

*На правах рукописи*



Чернов Артём Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОВОЛОКОННОГО МИКРО-  
ОПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КРЕМНИЕВОГО  
ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «СибИС».

Научный руководитель:

**Гридчин Виктор Алексеевич**

доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

**Васильев Владислав Юрьевич,**

доктор химических наук

Официальные оппоненты:

**Корляков Андрей Владимирович,**

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург, Научно-образовательный центр «Нанотехнологии», директор;

**Нестеренко Тамара Георгиевна,**

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, отделение электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности, доцент.

Ведущая организация:

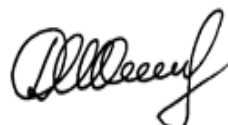
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Защита состоится 25 июня 2019 г. в 10:00 ч. в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д.212.173.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного университета на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » апреля 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Д. И. Остертак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Использование волоконно-оптических датчиков (ВОД) перспективно, когда необходимо обеспечить высокую чувствительность и достаточный частотный диапазон измерительной системы, а также, взрыво-пожаробезопасность, невосприимчивость к агрессивным средам и электромагнитным полям. Одной из областей, где предъявляются такие требования являются научные исследования и практические приложения в геофизике: прогноз стихийных бедствий, поиск полезных ископаемых и т.д. В научном плане геофизические исследования в области идентификации структурных особенностей планетарных размеров формируют спрос на ВОД для проведения профильных и площадных наблюдений. Еще больший спрос и актуальность использования ВОД можно наблюдать в практической геофизике: сейсмологии, сейсморазведке, сейсмическом мониторинге промышленных объектов (гидроэлектростанции, угольные и рудные разрезы и шахты). Основным элементом сейсмических измерительных систем является датчик давления – для морской сейсмологии, и датчики перемещения, скорости и ускорения точки земной поверхности для сейсморазведки. Существует широкий ассортимент датчиков для сейсмических систем. Однако датчики ВОД выгодно отличаются по своим эксплуатационным характеристикам, что и определяет их перспективность широкого использования в научной и практической геофизике. Следует отметить, что современная тенденция формирования цифровой экономики, и в частности, цифровых месторождений будет увеличивать спрос на первичные элементы управления цифровым месторождением – это надежные и эффективные датчики, в том числе датчики давления.

Помимо прочего, необходимо обеспечить возможность измерения датчиком квазистатических давлений. Обычно для измерения таких давлений применяются емкостные датчики, которые к настоящему времени не обеспечивают работу в данном режиме. В настоящее время ВОД имеют относительно большие массогабаритные параметры и высокую стоимость из-за необходимости применения специальных блоков генерации и обработки оптических сигналов. Перспектива развития ВОД связана с уменьшением габаритных параметров, удешевлением всей измерительной системы. Для снижения конечной стоимости необходимо применять групповое производство, как это делается в технологии кремниевых интегральных микросхем (ИМС). Уменьшить габариты и вес измерительного датчика помогут основные принципы конструирования микро-электромеханических систем (МЭМС), обладающие малыми массогабаритными параметрами, высокой надежностью, низкой себестоимостью и энергопотреблением, а также универсальностью.

Исторически направление техники, которое получило название МЭМС возникло после открытия Ч. Смитом гигантского эффекта пьезосопротивления в кремнии и германии и создания О. Тафтом и П. Чепменом первого интегрального датчика давления с упругим элементом в виде плоской круглой диафрагмы. На сегодняшний момент интегральные кремниевые датчики давления остаются старейшими и наиболее распространенными компонентами измерительных систем, область применения которых непрерывно расширяется. При этом одновременно расширяется и спектр физических эффектов, реализуемых в датчиках. Кремний является по-прежнему базовым материалом для МЭМС датчиков, но развитие оптоэлектроники и достижения в области техники оптоволоконных линий сделали актуальными исследования в области новых конструктивных решений оптоволоконных датчиков, где преобразование оптического излучения в электрический сигнал происходит непосредственно в области измерения. Объединение оптоэлектроники, оптомеханики и МЭМС привели к появлению нового класса устройств – микро-опто-электромеханических систем (МОЭМС).

В зависимости от типа преобразования ВОД давления могут быть рефлекторного типа, с использованием решеток Брэгга, и основанные на фотовольтаическом эффекте. Датчики рефлекторного типа и с использованием решеток Брэгга имеют высокую электромагнитную помехозащищенность и взрыво- и пожаробезопасность, однако являются сравнительно дорогими, поскольку требуют дорогостоящего оборудования для обработки выходного сигнала и применения специального оптоволокна, в котором формируется решетка Брэгга.

Кремниевые фотовольтаические датчики давления, в которых преобразование оптического сигнала в электрический непосредственно в области измерения, могут работать без внешнего электрического питания и поскольку оптическое излучение преобразуется в слаботочный электрический выходной сигнал, за счет фотовольтаического эффекта, могут применяться во взрыво- и пожароопасных средах. Чувствительный элемент (ЧЭ) таких датчиков может содержать упругий элемент (УЭ) и преобразующие оптический сигнал фотодиоды (ФД), расположенные как на одном кристалле, так и на нескольких. Выходной сигнал таких датчиков допускает обработку стандартными и не дорогими электронными схемами, а оптическое излучение может подводиться по стандартному промышленному оптоволокну от источника к кристаллу с ФД с расстояния в несколько километров. Поскольку все компоненты, входящие в такие датчики могут производиться по групповым кремниевым технологиям ИМС, с применением технологии МЭМС, то КФДД

могут стать доступным и дешевым конкурентом ВОД давления рефлекторного типа и на решетках Брэгга.

**Степень разработанности темы исследования.** За рубежом и в России ведется активное исследование конструктивных решений ВОД на решетках Брэгга и датчиков рефлекторного типа. За последние 8 лет в России по тематике ВОД рефлекторного типа защищена 1 докторская диссертация и 1 кандидатская диссертация. Однако к настоящему времени как за рубежом, так и в России, вопросы выбора конструкции и моделирование характеристик фотовольтаических ВОД на фотовольтаическом эффекте с применением МЭМС технологии рассмотрены недостаточно и отсутствуют какие-либо примеры промышленной реализации.

**Цель работы:** исследование и разработка конструктивно-технологических основ создания оптоволоконного МОЭМС кремниевого фотовольтаического датчика давления (КФДД).

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) Провести исследование и анализ современных конструкций и способов изготовления КФДД, в том числе с использованием технологий микросистемной техники и современных оптических приборов.

2) Разработать аналитическую модель составного КФДД, устанавливающую связь конструктивно-технологических параметров как отдельных элементов, так и преобразовательной характеристики датчика в целом для первичного подбора параметров датчика.

3) Разработать конечно-элементные модели упругого элемента (УЭ) оптомеханического узла (ОМУ) датчика. На основе разработанных моделей провести численные исследования, в том числе исследование влияния положения жесткого центра мембраны на отклонение свободного конца оптоволокна и преобразовательную характеристику УЭ ОМУ с оптоволоконном.

4) Разработать конечно-элементную модель фоточувствительного элемента (ФЭ) фотовольтаического узла (ФВУ) датчика. На основе разработанной модели провести исследование зависимостей характеристик выходного сигнала ФЭ от положения светового пучка.

5) Разработать технологические маршруты и комплекты фотошаблонов для изготовления кристаллов ОМУ и ФВУ с помощью методов жидкостного анизотропного и плазмохимического травления.

6) Изготовить тестовые кристаллы ОМУ и ФВУ, на основе которых разработать технологический маршрут сборки составного датчика давления и изготовить лабораторные образцы датчиков давления в корпусах для проведения исследований.

7) Исследовать характеристики ФЭ и преобразовательную характеристику КФДД.

8) Исследовать влияние температуры на характеристики ФЭ и датчика давления в целом.

**Объект исследования** – оптоволоконный МОЭМС кремниевый фотовольтаический датчик давления составного типа на основе кремниевых кристаллов оптомеханического и фотовольтаического узлов, общие принципы проектирования таких датчиков и его характеристики.

**Предметом исследования** являются математические и аналитические модели элементов КФДД составного типа, схемотехнические, топологические и технологические приемы и решения, позволяющие реализовать и охарактеризовать как составляющие датчика давления ОМУ и ФВУ, так и датчик в целом.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1) Предложена конечно-элементная модель ОМУ с одно- и двухточечной схемами нагружения. Показано, что для увеличения чувствительности при одноточечной схеме нагружения смещение жесткого центра в сторону жесткого заземления оптоволоконна целесообразно использовать при минимальной нелинейности узла. Показано, что использование двухточечной схемы нагружения позволяет увеличить чувствительность ОМУ при одинаковой толщине УЭ и использовании стандартного промышленного оптоволоконна.

2) В рамках приближения геометрической оптики показано, что применение двух интегральных ФД при нормальном падении света от оптоволоконна и равных перемещениях светового пятна нелинейность преобразовательной характеристики может быть уменьшена по сравнению со случаем одиночного фотодиода.

3) Показано, что формирование V-каналов на поверхности жесткого центра сопровождается появлением зубчатых структур. Определены условия, когда эти структуры не оказывают влияния на работу КФДД.

4) Показано, что для КФДД дифференциальное включение двух ФД в режиме короткого замыкания (КЗ) предпочтительней с точки зрения температурной зависимости чувствительности, чем режим холостого хода (ХХ). Режим КЗ обеспечивает положительный знак температурного коэффициента чувствительности, причем величина этого коэффициента может быть малой без применения специальных мер термокомпенсации в интервале температур от  $-40$  до  $+85$  °С.

### **Практическая значимость работы:**

1) Разработана и проверена базовая технология сборки 3D МОЭМС КФДД основанная на формировании на рамке УЭ направляющих V-каналов для размещения центрирующих оптоволокон и сквозных отверстий в кристалле ФВУ.

2) Показано преимущество использования двухточечной схемы нагружения оптоволокна по сравнению с одноточечной и разработана практическая конструкция ОМУ с двухточечной схемой нагружения.

3) Разработана и проверена конструкция ФВУ с несколькими фотодиодами совместимая со стандартной КМОП технологией и учитывающая специфику работы КФДД и особенности 3D сборки.

4) Разработанные аналитические и конечно-элементные модели могут служить методической базой при проектировании взрыво- и пожаробезопасных оптоволоконных 3D МОЭМС КФДД.

5) Разработанные УЭ и ФВУ датчика использованы в учебном процессе при обучении студентов по профилю магистратуры 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

6) Результаты, полученные в диссертации, использованы в ходе выполнения проекта «Исследование перспективных конструкций и технологических принципов формирования оптоэлектронных приборов нового поколения (кремниевый фотоэлектрический датчик давления)» в рамках ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы. Шифр заявки «2013-132-14-426-0006-001». ГК от 30.09.2013. №14.430.12.0005.

7) Получено заключение о внедрении результатов диссертации на предприятии АО «НЗПП с ОКБ» (г. Новосибирск).

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теоретической механики, теории упругости и сопротивления материалов, прецизионного жидкостного и плазмохимического травления, методы конечно-элементного анализа и экспериментального анализа, современные методы оптической и электронной микроскопии, совокупность методов измерения и исследования характеристик датчиков давления, в том числе при повышенных температурах.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Варианты конструкций оптоволоконного КФДД на основе МОЭМС 3D технологии содержащих оптомеханический узел с одно- и двухточечной схемами нагружения и фотовольтаический узел с несколькими фотодиодами.

2) Конечно-элементные модели и аналитические выражения ОМУ в приближении сопромата для одноточечной и двухточечной схем нагружения для проектирования КФДД.

3) Конструкция ФВУ КФДД и маршрут его изготовления, включая формирование фотодиодов и центрирующих сквозных отверстий в кристалле путем сочетания жидкостного анизотропного и плазмохимического травления.

4) Результаты экспериментальных исследований особенностей формирования жесткого центра УЭ с V-канавкой для светопроводящего оптоволокна.

5) Использование фотовольтаического режима работы ФД в дифференциальном включении позволяет создавать КФДД с малым температурным коэффициентом чувствительности без специальной термокомпенсации.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и современного программного обеспечения на его основе, применением для изготовления кристаллов высоко воспроизводимых производственных технологических процессов, прецизионных фотошаблонов и многократным повторением экспериментов, применением современных аналитических методов характеристики структур, согласованием теоретических и экспериментальных результатов исследования.

**Личный вклад автора.** Поиск, анализ и обобщение литературных данных были проведены автором самостоятельно. Разработка вариантов конструкций проводилась совместно с соавторами. Автором проведены моделирование и расчеты ОМУ и ФВУ, разработаны фотошаблоны и технологические маршруты изготовления, проведены исследования кристаллов ОМУ и ФВУ. Автором изготовлены экспериментальные образцы датчиков давления и проведены их исследования и измерения. Постановка цели и задач проводилась совместно с научным руководителем. Обработка экспериментальных данных экспериментальных результатов, анализ и их интерпретация были проведены автором совместно с научным руководителем, научным консультантом и соавторами. Подготовка материалов к публикации проводилась совместно с соавторами.

#### **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и отечественных научно-технических конференциях: The 15<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014), Altai, Erlagol, Russia, 30 June – 4 July 2014; The 16<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2015), Altai, Erlagol, Russia, 30 June – 4 July 2015; The 1<sup>st</sup> annual Russian national conference on nanotechnologies, nanomaterials and microsystems technologies, NMST–2016. Первая ежегодная



Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, НМСТ–2016, Novosibirsk, Russia, Sedova Zaimka, 26–29 June 2016; The 13<sup>th</sup> international conference «Actual problems of electronic instrument engineering» АРЕІЕ–2016. Тринадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2016; Новосибирск, Россия, 3-6 октября 2016; The 18<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2017), Altai, Erlagol, Russia, 30 June – 4 July 2017; The 14<sup>th</sup> international conference «Actual problems of electronic instrument engineering» АРЕІЕ–2018. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2018; Новосибирск, Россия, 3-6 октября 2018.

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в том числе: 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ; 6 – в материалах научно-технических конференций; 2 патента на изобретение; 1 патент на полезную модель.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и условных сокращений, списка используемой литературы из 128 наименований и двух приложений. Основной текст диссертации изложен на 160 страницах и включает 139 рисунков и 8 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Краткое содержание работы.**

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

**В первой главе** проводится обзор и анализ существующих современных конструкций волоконно-оптических датчиков давления рефлекторного типа на решетках Брэгга и фотовольтаическом эффекте, в том числе реализованных с использованием технологий МЭМС и современных оптических приборов. Проведен обзор существующих методик формирования ФЭ на базе КМОП технологии

Показано, что датчики давления на фотовольтаическом эффекте могут найти широкое применение в различных областях промышленности, авиастроении, кораблестроении, космических аппаратах. В отличие от волоконно-оптических датчиков на решетках Брэгга и датчиков рефлекторного

типа датчики на фотовольтаическом эффекте обладают меньшей чувствительностью к температурным изменениям и не требуют сложной схемы обработки выходного сигнала и дорогостоящего оборудования. При этом обладают высокой степенью помехозащищенности, взыво- и пожаробезопасностью, малыми массогабаритными параметрами, а также хорошо согласуются с технологиями ИМС и МЭМС.

Проведен обзор литературы по тематике разработки и конструктивных особенностей ФЭ с применением процессов КМОП технологий. На основе анализа существующих конструкций ФЭ определено, для изготовления ФЭ ФВУ возможно использование стандартных процессов отечественной КМОП технологии с проектными нормами 3 мкм.

В результате анализа современных конструкций ВОД давления, нами было рассмотрено несколько вариантов конструкций датчика давления на фотовольтаическом эффекте, как показано на рисунке 1. Эти конструкции обладали рядом недостатков: нелинейная форма зависимости выходного сигнала (рисунок 1а) и малая чувствительность (рисунок 1б).

Для преодоления этих недостатков нами была предложена новая конструкция датчика на фотовольтаическом эффекте (далее кремниевый фотовольтаический датчик давления, КФДД). В конструкции реализуется двухточечная схема нагружения оптоволокну за счёт добавления дополнительного профилированного кристалла крышки, который накрывает профилированный кристалл упругого элемента с закрепленным на нем оптоволоконном, как показано на рисунке 2а.

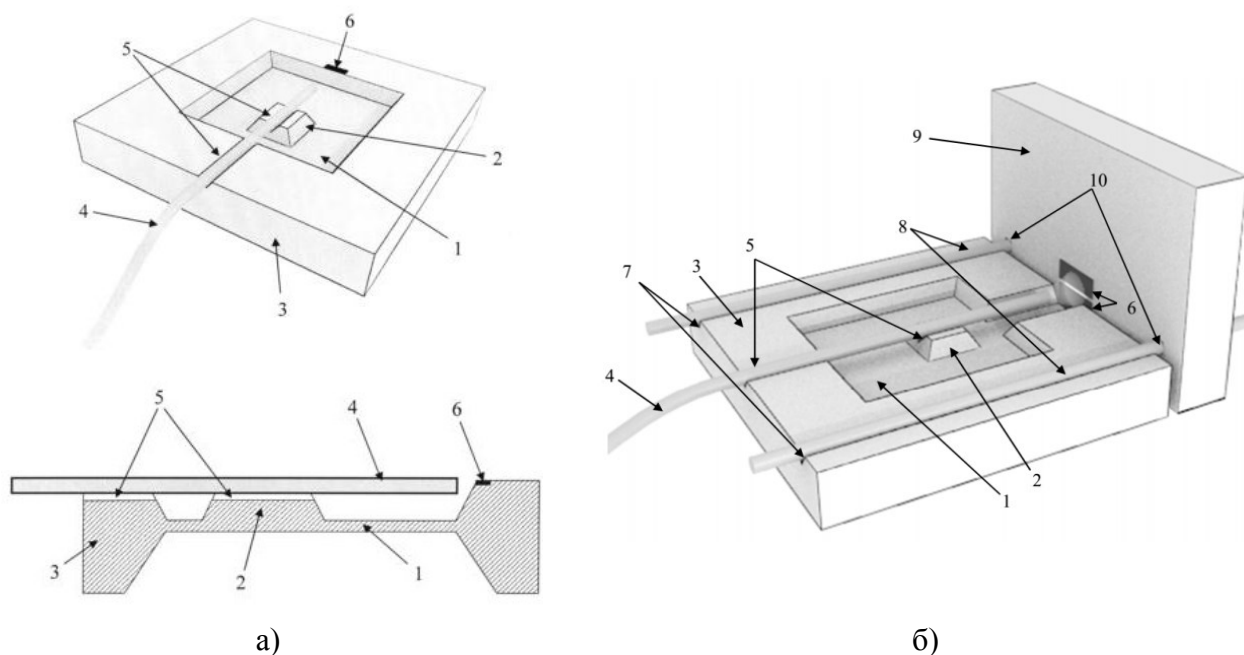


Рисунок 1 - Фотовольтаический датчик давления: однокристалльная конструкция – а), где 1 - квадратная измерительная мембрана, 2 - жесткий центр, 3 - опорная рамка, 4 – оптоволоконно, 5 – V-канавки, 6 – фотодиод; двухкристалльная конструкция – б), где 7 – направляющие V-канавки, 8 – направляющие, 9 - кристалл ФВУ и 10 - соединительные отверстия

Предлагаемая конструкция содержит кристалл упругого элемента – 1 с измерительной диафрагмой – 2, опорную рамку – 3, жесткие центры (ЖЦ) – 4, один из которых смещен в сторону U-канавки – 5, V-канавки на опорной рамке – 6 для направляющих – 7 и оптоволоконна – 8 на опорной рамке и второй кристалл – 9 с ЖЦ, смещенным от U-канавки, 10 – кристалл ФВУ с фотодиодами – 11 и соединительными отверстиями 12 для направляющих, как показано на рисунке 2а.

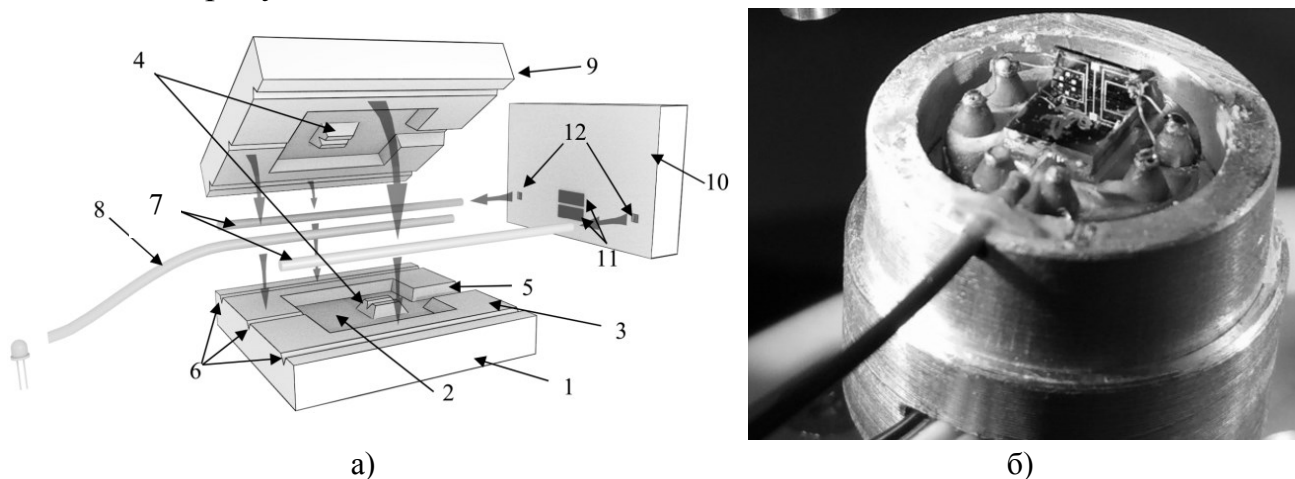


Рисунок 2 - Фотовольтаический датчик давления с двухточечной схемой нагружения (смотри расшифровку в тексте) – а) и МОЭМС КФДД в корпусе без крышки – б)

В такой конструкции перемещение свободного конца оптоволоконна определяется поворотом, вызванным парой перерезывающих сил, действующих в сечении оптоволоконна, заключенного между жесткими центрами нижнего и верхнего кристаллов.

На основе проведенного анализа были сформулированы основные задачи диссертационной работы.

При проектировании датчиков возникает необходимость заранее оценить характеристики конструкции и основные параметры. Для этого **во второй главе** формулируется аналитическая модель преобразовательной характеристики узлов рассматриваемого датчика и проводится математическое моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакете ANSYS важнейшей составляющей части этой характеристики – функции преобразования оптической модуляции. Функция преобразования оптической модуляции состоит из нескольких этапов преобразования: 1 – преобразование измеряемого давления в перемещение жесткого центра мембраны; 2 – преобразование перемещения жесткого центра мембраны в отклонение свободного конца оптоволоконна  $U_y$ ; 3 – преобразование отклонения свободного конца оптоволоконна в перемещение светового пятна по активной области фоточувствительного элемента в разностный электрический сигнал.

Рассмотрены общая концепция и принципы построения МОЭМС КФДД, определены основные направления исследования и моделирования.

Предложена схема и функция преобразования измеряемого давления в электрический выходной сигнал. Особенностью рассматриваемого типа датчиков является наличие этапа оптического преобразования, в ходе которого перемещение оптоволокну  $\Delta z$  трансформируется в изменение площади засветки фотодиодов  $\Delta S_\phi$ . Общая чувствительность датчика  $S_p$  определяется как:

$$S_p = \frac{\delta U_e}{\delta P} = \frac{\delta F(P)}{\delta P} = \frac{\delta f_3}{\delta(\Delta S)} \times \frac{\delta f_2}{\delta(\Delta z)} \times \frac{\delta f_1}{\delta P} \equiv S_3 S_2 S_1,$$

где  $U_e$  - выходной сигнал датчика,  $P$  - давление,  $F(P)$  - функция преобразования КФДД,  $f_3$  - функция изменения разности фототоков,  $\Delta S$  - изменение площадей засветки,  $f_2$  - функция отклонения свободного конца оптоволокну  $U_y$ ,  $\Delta z$  - изменение положения ЖЦ,  $f_1$  - функция перемещения ЖЦ,  $S_3, S_2, S_1$  - чувствительности функций  $f_3, f_2, f_1$ .

Проведено математическое моделирование УЭ ОМУ с использованием методов конечных элементов, проанализировано влияние базовых конструктивных параметров УЭ и оптоволокну на характеристики ОМУ. Оценено влияние положения и размеров ЖЦ УЭ на чувствительность и нелинейность преобразования ОМУ с учетом изменения толщины мембраны и для различных диаметров оптоволокну.

По результатам моделирования УЭ для конструкции с одноточечной схемой нагружения (используется только кристалл УЭ) определен оптимальный вариант, в котором сбалансированы основные характеристики УЭ ОМУ КФДД, у которого толщина мембраны  $h = 80$  мкм, а жесткий центр основанием размером  $0,75 \times 0,75$  мм сдвинут от центра мембраны в сторону ее края на  $-370$  мкм. Показано, что для мембран с толщинами  $60$  и  $80$  мкм максимальное отклонение свободного конца оптоволокну достигает при давлении  $2$  МПа, соответственно,  $25,5$  и  $11,6$  мкм, а нелинейность преобразовательной характеристики не превышает  $0,2\%$ . Недостатком данной конструкции является малое отклонение оптоволокну и, как следствие, недостаточная чувствительность ОМУ КФДД

Приводится решение поворотов сечений и плоскостей элементов ОМУ, которое показывает взаимосвязь углов поворота и отклонения свободного конца оптоволокну. Оценено влияние размера мембраны УЭ на чувствительность ОМУ. Показано, что для мембраны при размере ее сторон  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> заметный рост чувствительности наблюдается при толщинах меньше  $50$  мкм. При этом увеличение в  $2$  раза размера ЖЦ уменьшает чувствительность не более чем на  $17,5\%$ .

Представлена конечно-элементная модель ОМУ с двухточечной схемой нагружения оптоволокну. Показано, конструкция с двухточечной схемой

нагружения в сравнении с одноточечной схемой позволяет увеличить отклонение свободного конца оптоволокна и, соответственно, чувствительность ОМУ на 75% для  $h = 60$  мкм и на 88% для  $h = 80$  мкм. Определен оптимальный вариант конструкции, в котором жесткие центры смещены относительно заземленного края оптоволокна на 324 мкм для кристалла крышки и на 924 мкм для кристалла УЭ. Для мембран толщиной 60 и 80 мкм при давлении 2 МПа отклонение свободного конца оптоволокна достигает 44,7 и 21,8 мкм, а нелинейность не превышает 0,2%, как показано на рисунке 3.

Предложены аналитические выражения для определения изгиба волокна или отклонения свободного конца оптоволокна. Отклонение свободного конца оптоволокна для одноточечной схемы определяется по формуле:

$$y(L_1, l) = \frac{3}{2} \left( \frac{L_1}{l} - 1 \right) C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^2,$$

где  $L$  - точка приложения силы относительно жестко заземленного конца,  $L_1$  - длина оптоволокна от точки приложения силы до свободного конца,  $a$  - половина стороны мембраны,  $h$  - ее толщина,  $C$  - константа, зависящая от кристаллографической ориентации сторон мембраны,  $q$  - давление,  $\delta = \varepsilon/a$ ,  $\varepsilon$  - половина стороны квадратного жесткого центра.

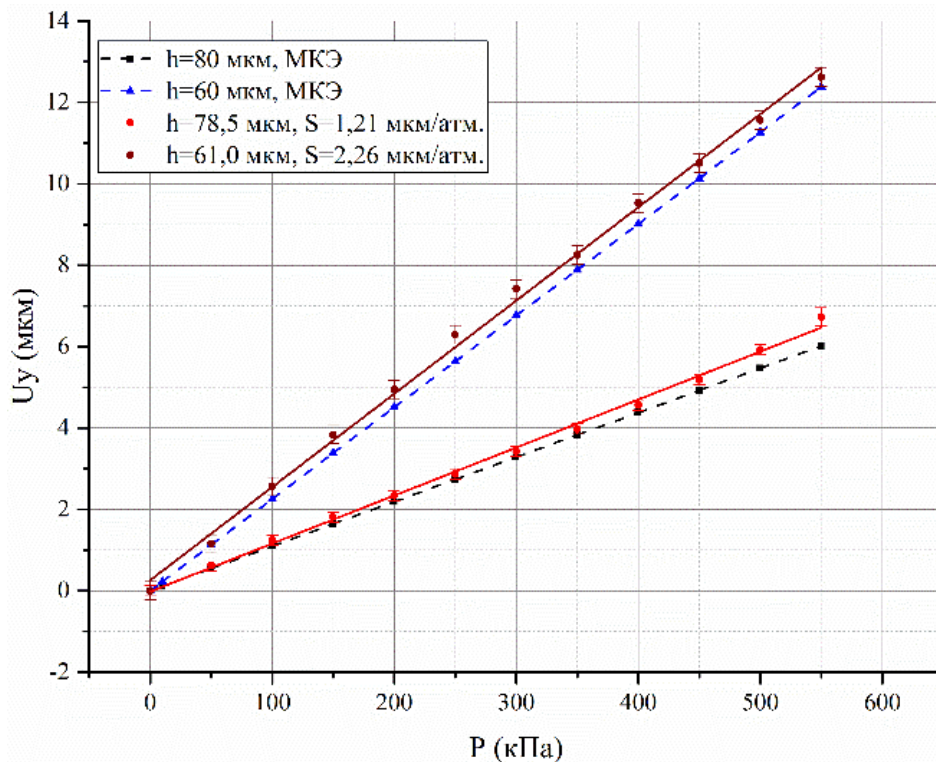


Рисунок 3 - Зависимости  $U_y$  для модели МКЭ и образцов КФДД

Отклонение свободного конца оптоволокна для двухточечной схемы определяется по формуле:

$$y(L1) = A(h)C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^2 \left[ 1 + 3\Psi(k) \frac{(L1-L)}{L} \right],$$

где  $\Psi(k) = \frac{2-3k+k^2}{4-9k+6k^2-k^3}$ ,  $0 \leq k \leq 1$ ,  $k = \frac{l}{L}$ ,  $l$  – вторая точка приложения силы,  $A(h)$  – поправочный коэффициент.

**В третьей главе** рассмотрены особенности преобразовательной характеристики ФВУ КФДД. Проведено моделирование ФЭ методом конечных элементов в модуле Athena программного продукта Silvaco TCAD с учетом латерального перемещения светового пучка и влияния пассивирующих покрытий. Рассмотрены особенности преобразовательной характеристики ФЭ с учетом изменения формы и размера светового пятна. Рассмотрены особенности преобразовательной характеристики ФВУ КФДД при использовании одного и двух фотодиодов в дифференциальном включении. Показано, что при идентичных характеристиках интегральных ФЭ возможноinearизовать преобразовательную характеристику датчика давления.

Предложена базовая конструкция ФВУ КФДД.

Проведено математическое моделирование методом конечных элементов ФЭ в модуле Athena программного продукта Silvaco TCAD, с учетом выбранной рабочей длины волны излучателя в диапазоне 630-660 нм. Показано, что разработанная структура может быть реализована на подложке n-типа при глубине залегания p-n переходов подложка - анод 5,8-6,0 мкм и анод-катод 0,8-1,2 мкм.

Показано, что латеральное перемещение светового пучка оказывает влияние на преобразовательную характеристику ФЭ, а изменение площади светового пятна является величиной второго порядка малости. Показана возможность применения в составе датчика давления такой структуры ФЭ

Определена функция преобразования ФЭ и параметры, которые влияют на метрологические характеристики ФВУ

**В четвертой главе** рассмотрены технологические аспекты формирования кремниевого УЭ, ФВУ и конструкции датчика в целом. В данной главе описана разработанная топология упругого и фоточувствительного элементов датчика. Охарактеризованы особенности формирования островковой структуры с V-канавкой, влияние рассогласования фотошаблона и кристаллографической ориентации пластины на форму жесткого центра УЭ с V-канавкой, а также процесс двустороннего формирования сквозных отверстий в ФВУ для юстировки элементов датчика. Описывается алгоритм сборки всех узлов в конечное устройство датчика.

Представлена топология кристаллов УЭ и крышки ОМУ КФДД, размеры которых составили  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> с квадратной мембраной со сторонами 2 мм и ЖЦ с основанием  $750 \times 1000$  мкм<sup>2</sup>, V-канавками для направляющих и рабочего оптоволокон, и U-канавкой для подвижного конца оптоволокон. Рассчитаны размеры компенсаторов травления внешних углов ЖЦ, V- и U- канавок,

обеспечивающие получение требуемой формы элементов ОМУ. Разработан и экспериментально опробован технологический маршрут для изготовления кристаллов ОМУ. Проанализировано влияние рассовмещения маски фотошаблонов с базовым срезом пластины. Показано, что для воспроизводимого травления элементов кристаллов ОМУ угловое рассовмещение фотошаблонов с кристаллографической ориентацией кремниевой пластины не должно превышать 0,5 градуса.

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей формирования островковых структур сложной формы, например, ЖЦ с V-канавкой ОМУ, как показано на рисунке 4.

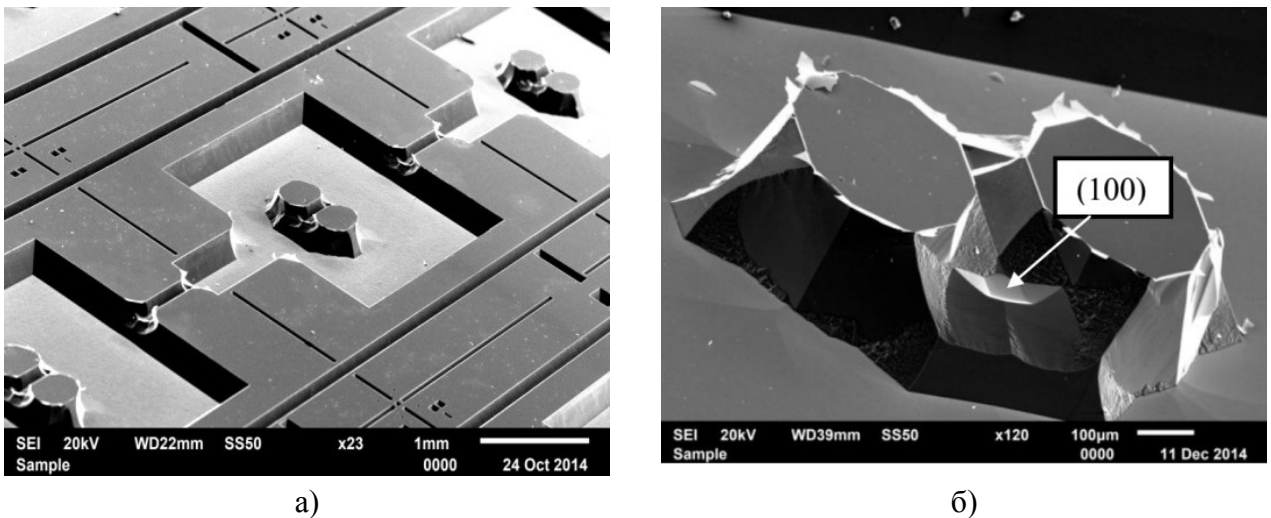


Рисунок 4 - Изображения с растрового электронного микроскопа кристаллов УЭ КФДД – а), и ЖЦ УЭ со вскрытой плоскостью (100) – б)

Представлена топология кристаллов ФВУ КФДД, размеры которых составили  $2,5 \times 4 \text{ мм}^2$  с планарными ФЭ размером  $500 \times 300 \text{ мкм}$ , разделенными промежутком в  $20 \text{ мкм}$ , и окнами для формирования сквозных отверстий. Разработанный маршрут изготовления кристаллов ФВУ включает в себя стандартные операции КМОП технологии и методы анизотропного жидкостного и изотропного плазмохимического травления.

Проведена сборка лабораторных образцов составных МОЭМС КФДД с использованием изготовленных кристаллов ОМУ И ФВУ, см. рисунок 2б.

**В пятой главе** описывается разработка контрольно-измерительных средств и блока управления работой датчика, включая разработку программного обеспечения для измерений. Представлена измерительная схема и программное обеспечение, которые позволяют исследовать преобразовательную характеристику, температурные зависимости чувствительности и начального разбаланса разработанного МОЭМС КФДД.

Проведены измерения характеристик используемого лазерного диода, исследование характеристик фотодиодной структуры и латерального

перемещения излучающего оптоволокна, относительно сдвоенной фотодиодной структуры. Приводятся результаты метрологических измерений характеристик датчика и влияние температуры на преобразовательную характеристику и чувствительность датчика. Проведены исследования темновых и световых характеристик, разработанных ФЭ. Обратный темновой ток насыщения составил 0,4 нА, максимальное значение фототока одного ФЭ - 408 мкА при мощности падающего излучения 3,72 мВт с длиной волны 630 нм. Темновые характеристики исследовались для отбраковки годных фотодиодов для последующих исследований. Показано, что возможно увеличение рабочей мощности источника излучения для увеличения генерируемого фототока и общей чувствительности ФЭ.

Проведенные исследования разработанных фотодиодных структур показали соответствие сопротивлений слоев структуры расчетным параметрам с точностью  $\pm 10\%$ . Полученные результаты позволяют использовать разработанный маршрут для дальнейшей оптимизации характеристик ФЭ

Проведены исследования влияния латерального перемещения излучающего конца оптоволокна относительно пары ФЭ в режимах холостого хода и короткого замыкания при выбранной мощности падающего излучения 9,8 мкВт. Показано, что в дифференциальном режиме включения ФЭ на характеристике можно выделить квазилинейный участок, в виде разности фототоков пропорциональных смещению светового пятна, который возможно использовать в работе КФДД. Анализ характеристик показал, что наиболее предпочтительным является начальное положение светового пятна в центральной или отрицательной части характеристики. Таким образом характеристика не будет выходить за пределы линейного участка, как показано на рисунке 5. Чувствительность на квазилинейном участке характеристики симуляции с устройством позиционирования лазерного пучка составила  $S_z=1,15$  нА/мкм.

Проведен анализ влияния температуры на основные характеристики ФЭ. Характер температурной зависимости напряжения холостого хода показывает непригодность применения такого режима для высокотемпературных измерений давлений. Показано, что температурный коэффициент тока короткого замыкания для разработанного ФЭ равен  $\alpha_{I_{кз}}=0,0014/^\circ\text{C}$ , что в 2,3 раза больше значения для идеального фотодиода. Температурная зависимость чувствительности примерно равна по величине, но противоположна по знаку температурной зависимости чувствительности тензорезистивных датчиков.



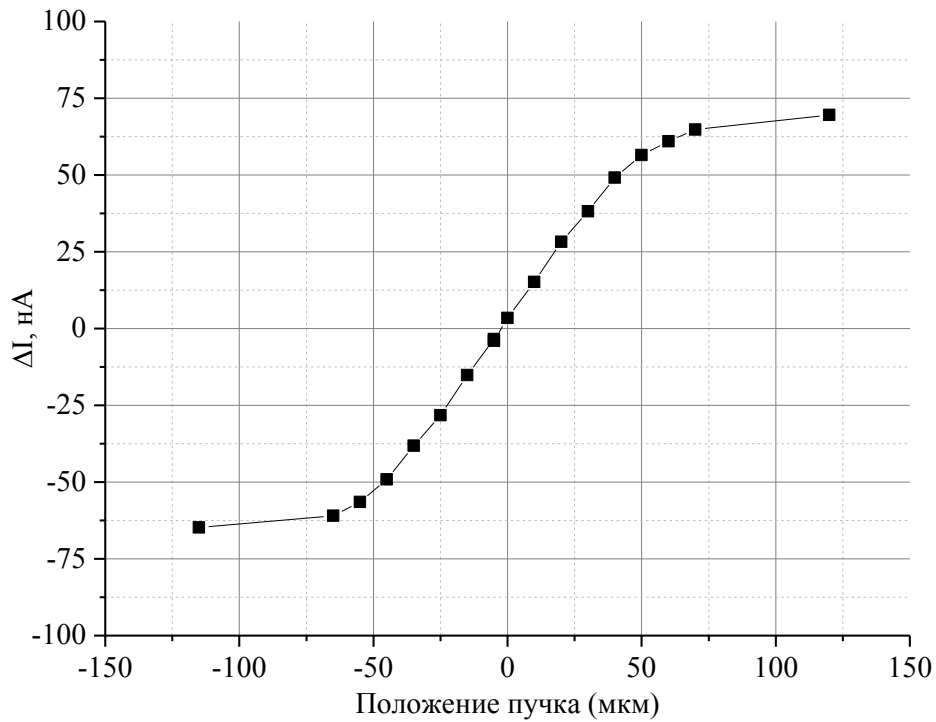


Рисунок 5 - Зависимость разности фототоков от латерального перемещения излучающего конца оптоволокна

Представлены результаты исследования влияния температуры на начальный разбаланс образцов КФДД. Показано, что при использовании термостойких клеев для сборки конструкции возможно увеличить рабочий диапазон датчиков до 150 °С при изменении значения начального разбаланса не более чем на 5%.

Проведено исследование преобразовательной характеристики разработанных образцов КФДД с мембранами толщиной 50, 61 и 78,5 мкм в диапазоне измеряемых давлений 0 до 6,5 атм. Значения чувствительности образцов КФДД при  $T_0$  составили:  $S(T_0)$  (№6) = 0,1295 мВ/атм;  $S(T_0)$  (№5) = 0,1245 мВ/атм;  $S(T_0)$  (№3) = 0,2533 мВ/атм;  $S(T_0)$  (№4) = 0,1047 мВ/атм;  $S(T_0)$  (№7) = 0,1388 мВ/атм, как показано на рисунке 6. Оценка нелинейности преобразовательной характеристики выборки образцов датчиков показывает значения в интервале  $0,37 \div 0,69$  %.

Полученные экспериментальные результаты отклонения свободного конца показали высокую сходимость с результатами моделирования, как показано на рисунке 3. Нелинейность измеренной характеристики оказалась несколько выше, чем полученные ранее результаты математического моделирования ОМУ КФДД вследствие вклада нелинейности ФЭ.

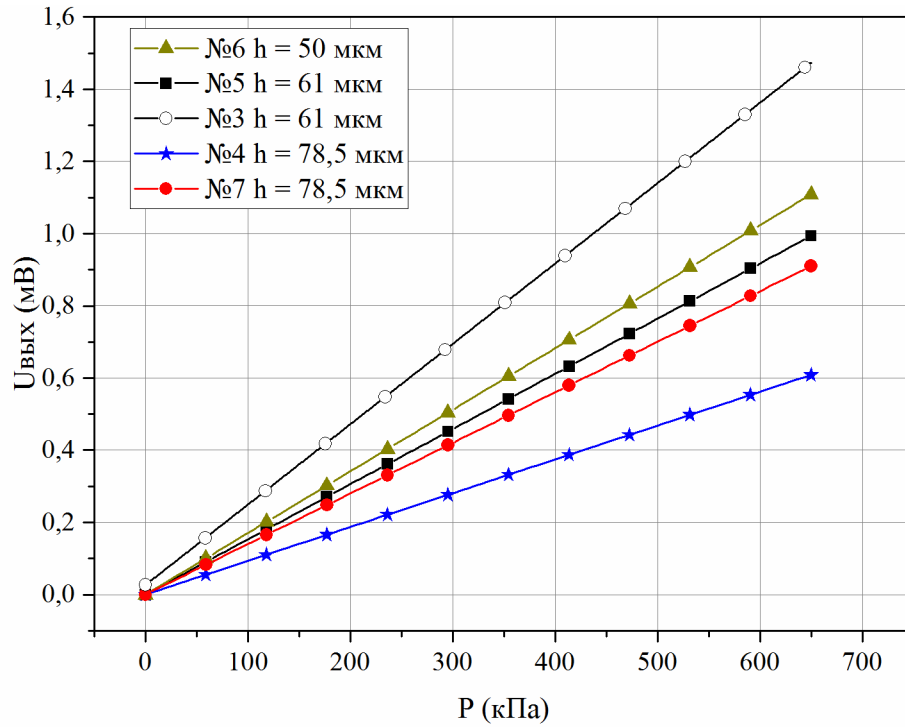


Рисунок 6 - Преобразовательные характеристики образцов КФДД

Хорошее совпадение результатов моделирования и экспериментов позволяют использовать разработанные модели при проектировании и оптимизации параметров КФДД.

Приводится анализ влияния температуры на чувствительность образцов КФДД с мембранами толщиной 50, 61 и 78,5 мкм. Показано, что КФДД обладают более низкой температурной зависимостью чувствительности в сравнении с тензорезистивными датчиками давления.

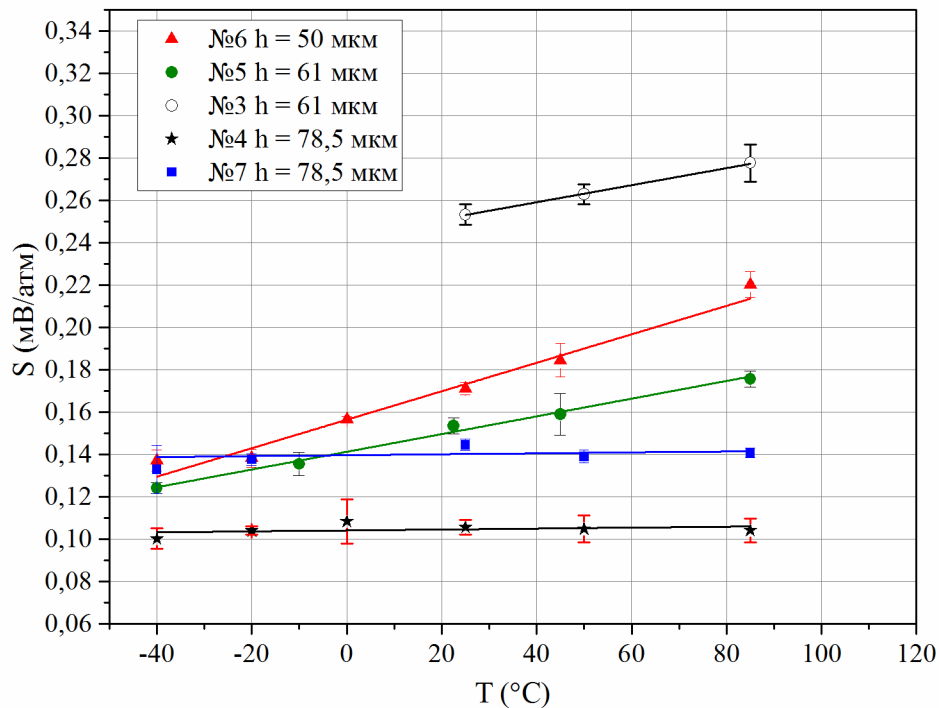


Рисунок 7 - Температурные зависимости чувствительности образцов КФДД

Минимальное значение коэффициента чувствительности ФЭ и КФДД  $\alpha$  в диапазоне температур от - 40 до 85 °С наблюдается для образца датчика №7 = 0,016 %/°С без специальных методов термокомпенсации, как показано на рисунке 7.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны численные модели с использованием метода конечных элементов для конструкций ОМУ КФДД с одноточечной и двухточечной схемами нагружения, позволяющие проанализировать влияние конструктивных параметров ОМУ на его важнейшие характеристики, в том числе на преобразовательную характеристику. Показано, что для увеличения чувствительности ОМУ с одноточечной схемой нагружения целесообразно применение УЭ со смещенным ЖЦ, а использование ОМУ с двухточечной схемой нагружения позволяет дополнительно увеличить чувствительность ОМУ.

2. Предложены аналитические модели ФВУ и ОМУ с одноточечной и двухточечной схемами нагружения. Сравнением численной и аналитической модели определены величины поправочных коэффициентов, обеспечивающих приемлемую точность расчетов по аналитической модели. Показано, что формирование нескольких интегральных ФЭ на кристалле обеспечивает возможность улучшения метрологических характеристик КФДД по сравнению с датчиками, содержащими один ФЭ. Сформулированы общие конструктивные требования к ФВУ КФДД.

3. Аналитически и экспериментально показано, что температурная зависимость функции преобразования ФВУ с дифференциальным включением может быть различной при работе в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), и предпочтительным является режим КЗ, как имеющий слабую зависимость от температуры. Предложена и реализована соответствующая измерительная схема.

4. Разработана двумерная численная модель ФЭ. На основе предложенной численной модели ФЭ показана возможность создания ФВУ с использованием стандартных операций изготовления КМОП интегральных микросхем с удовлетворительными характеристиками и функционирование при изменении площади освещения ФЭ. Разработаны и изготовлены оригинальные фотовольтаические элементы на базе двух фотодиодов, которые показали пригодность для построения КФДД.

5. Экспериментально исследованы особенности формирования островкового ЖЦ с V-канавкой на нем при жидкостном травлении в растворе КОН. Обнаружено возникновение островковых зубчатых структур при формировании V-каналов и определены требования к их размерам. Предложена

методика оптического контроля размеров сторон ЖЦ с использованием временных зависимостей длин граней типа [110] и [410]. Исследовано влияние угла рассовмещения фотошаблона с базовым срезом пластины на форму ЖЦ при травлении в растворе КОН.

6. Разработана базовая МЭМС технология, маршрут изготовления и фотошаблоны кремниевых компонентов КФДД, предложена и реализована технология сборки МОЭМС КФДД с 3D чувствительным элементом, состоящим из ОМУ и ФВУ, основанная на формировании V-каналов на кристаллах ОМУ, сквозных отверстий в кристалле ФВУ и оптоволокон.

7. Проведено исследование характеристик ФЭ ФВУ и КФДД в интервале температур от -40 до 85 °С. Установлено, что знак температурной зависимости чувствительности разработанных КФДД положителен в интервале температур от -40 до 85 °С и может быть близок к нулю ( $\alpha=0,016 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ) без применения специальных схем компенсации. Проведенные исследования показали хорошее соответствие результатов моделирования ОМУ и экспериментальных результатов образцов датчиков давления.

8. В результате проведенной работы на основании совокупности конструктивно-технологических решений, результатов моделирования и отечественных технологических процессов впервые созданы экспериментальные образцы малогабаритного самогенерирующего составного оптоволоконного МОЭМС КФДД с двухточечной схемой нагружения, включающего кремниевые кристаллы ОМУ и ФВУ, соединяемые перпендикулярно друг с другом с помощью направляющих во вспомогательных V-канавках и сквозных отверстий; на конструкцию которых получен патент на полезную модель. Полученные результаты могут служить методической базой для создания серийных малогабаритных самогенерирующих взрывобезопасных МОЭМС КФДД.

#### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

1. Chernov A.S. 2D Modeling of photoelectric part of silicon pressure sensor [Текст] / A. S. Chernov, M. A. Chebanov, A. D. Byalik, V. A. Gridchin, V. Y. Vasilyev // The 15<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014) : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014, IEEE, 2014. – P. 67-71. – DOI: 10.1109/EDM.2014.6882479.

2. Гридчин В.А. Численное моделирование элементов фотовольтаического волоконно-оптического сенсора давления [Текст] / В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев, М. А. Чебанов, А. Д. Бялик, А. С. Чернов // Нано- и микросистемная техника. - 2014. – № 6. – С. 3–7.

3. Бялик А.Д. Экспериментальное исследование осевой составляющей диаграммы направленности излучения многомодового оптоволокна [Текст] / А. Д. Бялик, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев, А. Н. Игнатов, А. С. Чернов // Вестник СибГУТИ. - 2015. – № 2. – С. 191–197.

4. Чернов А.С. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si(100) при травлении в водном растворе KOH [Текст] / А. С. Чернов, М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. - 2015. – № 9 (182). – С. 34–38.

5. Chernov A.S. A study of 3D boss structure formation in anisotropic etching of Si (100) in aqueous KOH [Текст] / A. S. Chernov, M. A. Chebanov, V. A. Gridchin, V. Y. Vasilyev, A. D. Byalik // 16<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM) : [proc.], Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – IEEE, 2015. – P. 83-86. - DOI: 10.1109/EDM.2015.7184494.

6. Чернов А.С. Фоточувствительный элемент для сенсора давления с оптической пространственной модуляцией [Текст] / А. С. Чернов, А. Л. Самородов, С. П. Хабаров, В. А. Гридчин // Нано- и микросистемная техника - 2016. – Т. 18, № 7. – С. 416–423.

7. Чернов А.С. Физическая верификация сенсора давления с оптической модуляцией сигнала [Текст] / А. С. Чернов, В. А. Гридчин // 1 Annual Russian national conference on nanotechnologies, nanomaterials and microsystems technologies, NMST–2016 = 1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, НМСТ–2016: conf. proc., Novosibirsk, Sedova Zaimka, 26–29 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 211–214. - ISBN 978-5-7782-2849-8.

8. Chernov A.S. Verification of Pressure Sensor With Optical Spatial Modulation [Текст] / A. S. Chernov, V. A. Gridchin // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016) : тр. 13 междунар. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1. - С. 34–37. - (Электронно-физическая). - ISBN 978-5-7782-2991-4 978-5-7782-2992-5 (т.

9. Chernov A.S. Analytical model of photoelectric pressure sensor [Текст] / A. S. Chernov, V.A. Gridchin // The 18 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 37-40. - ISBN 978-1-5090-6687-2.

10. Чернов А.С. Моделирование оптомеханического узла фотовольтаического сенсора давлений [Текст] / А. С. Чернов, В. А. Гридчин, А. Д. Бялик // Омский научный вестник. – 2017. – № 1. – С. 96–100.

11. Chernov A.S. A numerical simulation of the photoelectric pressure sensor optomechanical unit [Текст] / A. S. Chernov, V. A. Gridchin // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 1. – С. 58-61. - ISBN (NSTU) 978-5-7782-3614-1.

**Патенты на изобретения и полезную модель:**

12. Фотовольтаический сенсор давления [Текст]: пат. 167677 U1 Рос. Федерация МПК G01L 11/02 / Чебанов М. А., Чернов А. С., Гридчин В. А., Васильев В. Ю.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "СибИС" (ООО "СибИС") (RU). – № 2016134647; заявл. 24.08.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 5 с.: ил.

13. Амплитудный волоконно-оптический сенсор давления [Текст]: пат. 2589946 C1 Рос. Федерация МПК G01L 11/00 / Бялик А.Д., Чернов А. С., Чебанов М. А., Гридчин В. А., Васильев В. Ю.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "РАМИТ" (ООО "РАМИТ") (RU). – № 2015113564/28; заявл. 13.04.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. – 7 с.: ил.

14. Амплитудный волоконно-оптический сенсор давления [Текст]: пат. 2573708 C1 Рос. Федерация МПК G01L 11/02 / Бялик А.Д., Чернов А. С., Чебанов М. А., Гридчин В. А., Васильев В. Ю.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "РАМИТ" (ООО "РАМИТ") (RU). – № 2014130309/28; заявл. 22.07.2014; опубл. 27.01.2016, Бюл. № 3. – 5 с.: ил.