

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«СИБИС»

*На правах рукописи*



**Чернов Артем Сергеевич**

Исследование и разработка оптоволоконного микро-опто-  
электромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Виктор Алексеевич Гридчин, доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

Васильев Владислав Юрьевич, доктор химических наук

Новосибирск – 2019

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	14
1.1 Микроэлектромеханические и микрооптоэлектромеханические системы .....	14
1.2 Волоконно-оптические датчики .....	18
1.2.1 Волоконно-оптические датчики с пассивным преобразованием .....	19
1.2.2 Волоконно-оптические датчики на решетках Брэгга .....	22
1.2.3 Фотоэлектрические датчики давления .....	26
1.2.4 Обсуждение .....	32
1.3 Концепция фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления .....	34
1.3.1 Анализ конструктивных решений фоточувствительных элементов .....	37
Выводы к главе 1 .....	41
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОМЕХАНИЧЕСКОГО УЗЛА КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ .....	47
2.1 Общая концепция кремниевого фотовольтаического датчика давления .....	47
2.2 Преобразовательная функция кремниевого фотовольтаического датчика давления .....	49
2.3 Моделирование кремниевого упругого элемента оптомеханического узла .....	50
2.3.1 Аналитическая модель оптомеханического узла с одноточечной схемой нагружения .....	50
2.3.2 Аналитическая модель оптомеханического узла с двухточечной схемой нагружения .....	53
2.3.3 Конечно-элементное моделирование характеристик оптомеханического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления .....	56
2.3.4 Конечно-элементная модель оптомеханического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления с одноточечной схемой нагружения .....	57
2.3.5 Результаты численного моделирования оптомеханического узла с одноточечной схемой нагружения .....	61
2.3.5.1 Влияние положения и размеров жесткого центра упругого элемента .....	61
2.3.5.2 Влияние размера сечения оптоволокна .....	65
2.3.5.3 Решение для поворотов сечений и плоскостей оптомеханического узла .....	67
2.3.5.4 Влияние положения жесткого центра на прогиб упругого элемента .....	69
2.3.5.5 Влияние размера мембраны упругого элемента на чувствительность оптомеханического узла .....	71
2.3.5.6 Обсуждение .....	72
2.3.6 Конечно-элементная модель оптомеханического узла кремниевого	

фотовольтаического датчика давления с двухточечной схемой нагружения.....	73
2.3.6.1 Влияние положения и размеров жесткого центра упругого элемента.....	74
2.3.6.2 Влияние толщины мембраны упругого элемента.....	77
2.3.7 Сравнение аналитических и конечно-элементных моделей.....	79
Выводы к главе 2 .....	82
<b>ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО УЗЛА</b>	
<b>КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ,</b>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ.....</b>	
3.1 Особенности преобразовательной характеристики фотовольтаического узла.....	83
3.2 Базовая конструкция фотовольтаического узла .....	86
3.3 Моделирование фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	87
3.3.1 Особенности модели фотовольтаического узла.....	88
3.3.2 Описание модели сегмента фотодиода.....	89
3.3.3 Влияние пассивирующих покрытий.....	89
3.3.4 Результаты численного моделирования фотодиода кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	91
3.3.4.1 Результаты моделирования фотоэлектрических характеристик фотодиода.....	91
3.3.4.2 Моделирование латерального перемещения узкого пучка света.....	94
3.4 Изменение формы и размера светового пятна .....	95
3.5 Функция преобразования фотодиода.....	96
Выводы к главе 3 .....	99
<b>ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВОГО</b>	
<b>ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....</b>	
4.1 Топология упругого элемента оптомеханического узла.....	100
4.1.1 Технические требования к рассовмещению фотошаблона с базовым срезом пластины кремния.....	103
4.1.2 Исследование закономерностей формирования трехмерных островковых структур упругого элемента.....	108
4.2. Топология фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	114
4.2.1 Формирование сквозных отверстий в кристаллах фотовольтаического узла.....	118
4.3. Изготовление лабораторных образцов кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	120
Выводы к главе 4 .....	122

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	123
5.1 Измерительная схема кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	123
5.2. Измерение характеристик элементов кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	126
5.2.1 Измерение характеристик источника излучения.....	126
5.2.2 Исследование величины поверхностного сопротивления слоев фотодиода.....	128
5.2.3 Исследование темновых характеристик фотодиода.....	129
5.2.4 Исследование световых характеристик фотодиода.....	131
5.2.5 Исследование влияния латерального перемещения излучающего оптоволокна относительно сдвоенных фотодиодов.....	133
5.2.6 Исследования характеристик фотодиодов кремниевого фотовольтаического датчика давления в расширенном температурном диапазоне.....	136
5.3 Исследование характеристик кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	139
5.3.1 Исследование начального разбаланса и влияния температуры.....	139
5.3.2 Исследование преобразовательной характеристики кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	142
5.3.3 Температурная зависимость чувствительности кремниевого фотовольтаического датчика давления.....	145
Выводы к главе 5 .....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	147
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	150
Приложение А Акт об использовании в учебном процессе результатов работы.....	159
Приложение Б Заключение об использовании результатов исследований.....	160



## ВВЕДЕНИЕ

Классическая структура измерительной схемы представляет собой триаду, состоящую из сенсора (датчика), сигнального процессора и актюатора, как показано на Рисунке В.1. В сенсоре измеряемая величина преобразуется в аналоговый электрический сигнал, в сигнальном процессоре происходит обработка и преобразование сигнала, в том числе и превращение его в цифровую форму, а в актюаторе происходит дальнейшее преобразование электрического сигнала в механический, термический, магнитный, химический сигнал [1].



Рисунок В.1 – Блок-схема измерительной системы

Если к сенсору подается от источника питания электрическая энергия, то он именуется модуляционным (пассивным), а если нет – самогенерирующим (активным), в котором энергия измеряемого сигнала превращается в электрический выходной сигнал [2]. В русскоязычной литературе для первого блока измерительной системы применяется несколько терминов: первичный преобразователь, датчик, сенсор. В данной работе для единообразия будет использоваться термин «датчик», как более соответствующий исторически сложившейся терминологии в области предмета исследования диссертации.

**Актуальность темы исследования.** Использование волоконно-оптических датчиков (ВОД) перспективно, когда необходимо обеспечить высокую чувствительность измерительной системы к измеряемым параметрам, 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) [3-4]. Основным элементом

сейсмических измерительных систем является датчик давления – для морской сейсмологии, и датчики перемещения, скорости и ускорения точки земной поверхности для сейморазведки. 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 [5] и высокую стоимость из-за необходимости применения специальных блоков генерации и обработки оптических сигналов [6-8]. 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 [9] и создания О. Тафтом и П. Чепменом первого интегрального датчика давления с упругим элементом в виде плоской круглой диафрагмы [10]. 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 [11] привели к появлению нового класса устройств – микро-опто-электромеханических систем (МОЭМС) [12].

В зависимости от типа преобразования ВОД давления могут быть рефлекторного типа, с использованием решеток Брэгга [13], и основанные на фотовольтаическом эффекте [14]. 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 слабый 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 в основном ведется 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. К настоящему времени в России и за рубежом вопросы выбора конструкции и моделирование характеристик ВОД на фотовольтаическом эффекте с применением МЭМС технологии рассмотрены недостаточно.

**Целью диссертационной работы** является 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 оптоволокном.

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** впервые полученных 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 защемления оптоволокна целесообразно использовать при минимальной нелинейности узла. Показано, что использование двухточечной схемы нагружения позволяет увеличить чувствительность ОМУ при одинаковой толщине УЭ и использовании стандартного промышленного оптоволокна.

2) В рамках приближения геометрической оптики показано, что применение двух интегральных ФД при нормальном падении света от оптоволокна 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 КЗ предпочтительней с точки зрения температурной зависимости чувствительности, чем режим ХХ. Режим КЗ обеспечивает положительный знак температурного коэффициента чувствительности, причем величина этого коэффициента может быть малой без применения специальных мер термокомпенсации в интервале температур  $-40 \div +85$  °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 микроэлектроника (см. Приложение 1).

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) (см. Приложение 2).

**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 схемам 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.

**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.

**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:

1) 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.

2) 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.

3) 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.

4) The 13<sup>th</sup> international conference «Actual problems of electronic instrument engineering» АРЕИЕ–2016. Тринадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2016; Новосибирск, Россия, 3-6 октября 2016.

5) 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.

6) The 14<sup>th</sup> international conference «Actual problems of electronic instrument engineering» АРЕИЕ–2018. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2018; Новосибирск, Россия, 3-6 октября 2018.

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.

#### Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, обозначена цель диссертационного исследования и сформулированы задачи. 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, изготовленных с использованием МЭМС технологии и технологии современных оптических приборов. Обосновывается выбор конструктивных решений для создания исследуемых конструкций КФДД. В главе сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе формулируется аналитическая модель преобразовательной характеристики узлов рассматриваемого датчика и проводится математическое моделирование методом конечных элементов в программном пакете ANSYS [15] важнейшей составляющей части этой характеристики – функции преобразования оптической модуляции. В исследуемой конструкции преобразование давления в электрический сигнал состоит из нескольких этапов: 1 – преобразование измеряемого давления в перемещение жесткого центра мембраны; 2 – преобразование перемещения жесткого центра мембраны в отклонение свободного конца оптоволоконного; 3 – преобразование отклонения свободного конца оптоволоконного и светового пятна по активной области фоточувствительного элемента в разностный электрический сигнал.

Исследовано влияние этапов преобразования, технологических и конструктивных параметров датчика на чувствительность и нелинейность преобразования. Предложены критерии, согласно которым выбираются конструктивные решения для обеспечения оптимальной чувствительности и определяется режим работы датчика.

В третьей главе рассмотрены особенности преобразовательной характеристики фоточувствительного узла датчика, проведен обзор существующих методик формирования фоточувствительных элементов на базе КМОП технологии. Проводится моделирование методом конечных элементов фоточувствительного элемента в модуле Athena программного продукта Silvaco TCAD [16], с учетом латерального перемещения светового пучка и влияния пассивирующих покрытий. Рассмотрены особенности преобразовательной характеристики фотодиода с учетом изменения формы и размера светового пятна.

В четвертой главе рассматриваются технологические аспекты формирования кремниевого упругого элемента, конструкция датчика в целом и его компонентов. В данной главе описаны разработанные топологии кристаллов ОМУ и ФВУ датчика. Описаны особенности формирования островковой структуры с V-канавкой, влияние рассогласования фотошаблона и кристаллографической ориентации пластины на форму жесткого центра с V-канавкой, а также процесс двустороннего формирования сквозных отверстий для юстировки элементов датчика. Описывается алгоритм сборки всех узлов в конечное устройство датчика.

В пятой главе описывается разработка контрольно-измерительных средств и блока управления работой датчика, включая разработку программного обеспечения для калибровки серийных изделий. Проводятся измерения характеристики используемого лазерного диода, исследование характеристик фотодиодной структуры и латерального перемещения светового пятна, относительно сдвоенной фотодиодной структуры. Приводятся результаты измерений метрологических характеристик датчика и влияния температуры на преобразовательную характеристику и чувствительность датчика.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.



**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.

## ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В середине 70-ых годов прошлого столетия возникла и стала реализовываться новая концепция построения датчиков, основанная на использовании оптического излучения и уникальных свойствах оптических сред, в качестве которых использовалось оптоволокно [17]. В общем виде структура оптоволоконных датчиков с использованием оптического излучения представлена на Рисунке 1.1 в виде блок схемы:



Рисунок 1.1 – Блок схема структуры оптоволоконных датчиков [11]

На Рисунке 1.1: 1 – источник оптического излучения; 2 – оптическая среда, на которую воздействует измеряемая физическая величина; 3 – преобразователь информационной части сигнала; 4 – приемник излучения, преобразующий световой сигнал в электрический; 5- устройство усиления и обработки электрического сигнала. Части 2 и 3 могут быть объединены как полностью, так и частично, как это имеет место в оптоволокне и ВОД.

Особенностью ВОД является [17]:

1. Нахождение оптической среды в измерительной зоне, куда поступает только световая энергия, но не энергия от электрического источника.
2. Локализация электронной части в ограниченном объеме, отделенном от измерительной зоны.

Реализация концепции построения ВОД позволяет создать целый ряд датчиков для работы в специальных условиях. Физическим основам работы ВОД, особенности их проектирования и классификации посвящен ряд монографий, например, [18]. Дальнейшее развитие и миниатюризация ВОД возможны при интеграции с другими технологиями создания датчиков, например МЭМС.

### 1.1 Микроэлектромеханические и микрооптоэлектромеханические системы

Открытие гигантского тензорезистивного эффекта в кремнии и германии [9] привело к возникновению нового направления техники, получившего в европейской литературе название «микросистемной техники» - МСТ, а в американской – микроэлектромеханические системы –

МЭМС. МЭМС в наиболее общем виде включают механические микроструктуры, микродатчики, микроэлектронику и актюаторы [11], как показано на Рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Компоненты МЭМС [11]

Исторически платформой для развития МСТ и соответствующих технологий явились датчики давления [10]. Технология МСТ включает базовые операции микроэлектроники, объединенные со специализированными операциями, созданными для нового направления техники:

- трехмерное профилирование кремния;
- безклеевое соединение кремний-кремний, кремний-стекло;
- технология удаления жертвенных слоев;
- специальные методы формирования контактов;
- специфические методы сборки и испытаний.

Указанное объединение позволяет развивать технологии МСТ и создавать разнообразные датчики, реализованные на подложках монокристаллического кремния с высокой чувствительностью, малым размером и низкой стоимостью. Особо необходимо отметить возможность сопряжения датчиков, изготовленных по технологии МСТ с цифровыми каналами передачи информации, облегчающей создание сенсорных сетей и оперативный сбор большого объема данных.

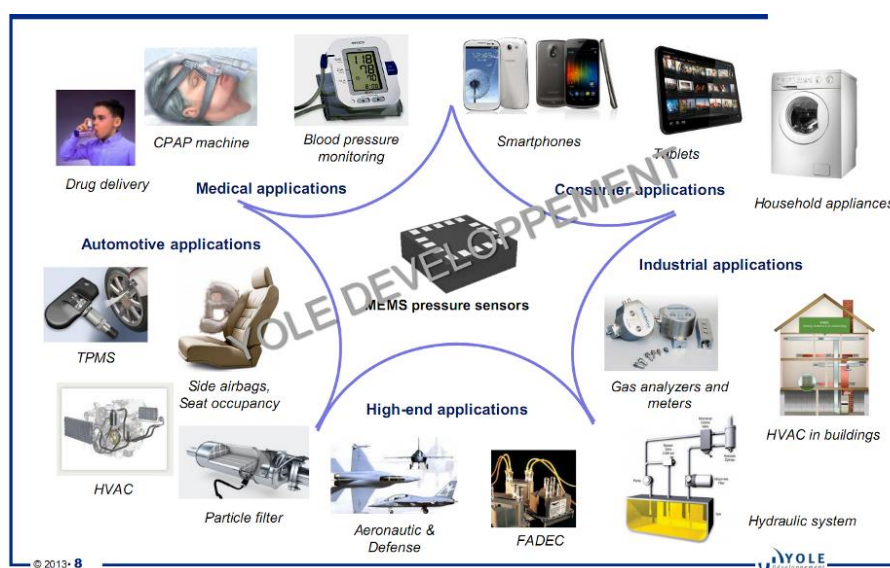
Микросистемная технология позволила создавать не только датчики давления, но и акселерометры, гироскопы, расходомеры, которые используют следующие основные принципы преобразования механических величин в электрический сигнал:

1. Тензорезистивный – здесь регистрируется изменение сопротивления металлического или полупроводникового резистора под действием механической нагрузки. Отметим, что имеется хороший отечественный обзор на данную тематику [19], в котором рассматривается техническая сторона итогов разработок датчиков давления за последние 25 лет;

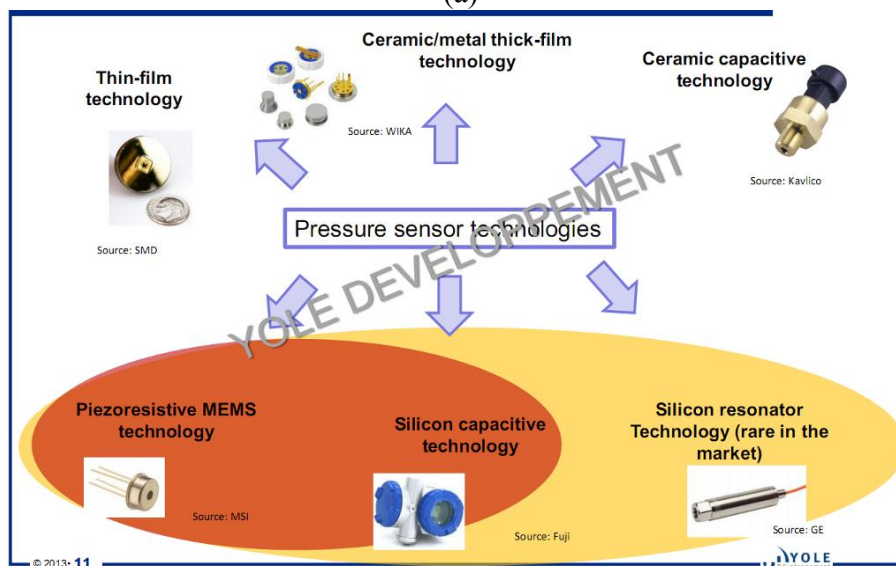
2. Емкостной – регистрируется изменение емкости конденсатора при изменении расстояния между элементами полупроводниковой или металлической структуры под действием механической нагрузки.

3. Пьезоэлектрический принцип преобразования, когда регистрируется заряд или разность потенциалов на обкладках пьезоэлектрического конденсатора под действием давления измеряемой среды.

Датчики давления и сейчас остаются одним из наиболее востребованных изделий в технике. На Рисунке 1.3 указаны основные области их применения, взятые из отчета Yole Developpement за 2017 год [20].



(a)



(б)

Рисунок 1.3 – Обобщенные данные Yole Developpement за 2017 год: а) области применения датчиков давления; б) основные МЭМС технологии изготовления датчиков давления [20]

Рынки датчиков давления, особенно с применением технологии МСТ продолжают неуклонно расширяться как количественно, так и качественно, а также по областям применения.

Расширение области применения автоматизированных систем делает необходимым создание новых типов датчиков, способных работать в специальных условиях. К их числу относятся, например, взрыво-пожароопасные среды, повышенные или пониженные температуры, повышенный уровень радиации, сильные электромагнитные поля. При этом возрастают требования к срокам непрерывной работы, удобству эксплуатации, обеспечению заданной погрешности измерений и невысокой стоимости. Перечисленные требования противоречивы и труднореализуемы, и это заставляет разработчиков искать новые конструктивные решения и принципы действия для датчиков.

Как упоминалось ранее, объединение технологии МСТ, оптоволокон или интегральных световодов, микрооптики и фотоэлектроники привело к расширению понятия МЭМС. Пояснения к классификации МОЭМС приведены на Рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Пояснения к классификации микросистемной технологии [12]

Технологически направление развития МЭМС базируется на достижениях микроэлектронных технологий и производства интегральных микросхем (ИМС) [21, 22]: групповой прецизионной технологии производства на подложках (главным образом – подложках монокристаллического кремния), высокой надежности и воспроизводимости характеристик изготавливаемых приборов, низкой стоимости при крупных масштабах практического использования приборов. Именно преемственность технологий ИМС дает возможность интеграции технологических циклов изготовления МЭМС и ИМС для создания уникальных интегрированных систем, объединяющих преобразователи и электронные схемы управления и обработки данных. При этом существенно, что требования к технологическим процессам изготовления и оборудованию для МЭМС в большинстве своем ниже или на уровне с

оборудованием для ИМС, что дает, возможность эффективно использовать для производства МЭМС оборудование, отработавшее в производстве ИМС предыдущих поколений.

Применение технологии МОЭМС изменило идеологию конструирования ВОД и привело к появлению новых типов датчиков, перечень которых продолжает расширяться. Далее будут рассмотрены конструктивно-технологические решения кремниевых оптических, оптоволоконных и фотовольтаических датчиков давления, с акцентом – конструкций, выполненных по МЭМС технологии, что представляется наиболее перспективным направлением решения современных задач обеспечения высокого качества фотовольтаических датчиков давления.

## 1.2 Волоконно-оптические датчики

Датчики механических величин относятся к числу самых распространенных компонентов микросистемной техники и широко применяются в аэрокосмической, нефтегазовой и автомобильной промышленности. Современные датчики давления должны обладать повышенной помехозащищенностью, долговременной стабильностью, минимальным энергопотреблением и габаритными размерами, а также взрыво- и пожаробезопасностью. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют волоконно-оптические датчики давления. Волоконно-оптические датчики к настоящему моменту времени используются во многих прецизионных практических приложениях.

Развитие оптоволоконных датчиков началось после: а) появления технологии микросистемной техники; б) появления оптического волокна высокого качества; в) после появления эффективных твердотельных фото и светодиодов. К этому моменту тензорезистивные, пьезоэлектрические и емкостные датчики давления были уже освоены и широко распространены, а область применения датчиков продолжила расширяться и началось интенсивное развитие ВОД. Применение МЭМС технологий и стандартных групповых технологических операций при создании кремниевых фотовольтаических датчиков давления позволит, в перспективе, осуществить интегрирование датчика со схемой обработки сигналов, давая возможность миниатюризировать размеры, повысить их чувствительность и помехозащищенность.

Оптоволоконные или волоконно-оптические датчики давления разделяются по типам преобразования и видам чувствительных элементов [17]. Различают волоконно-оптические датчики пассивного и активного преобразования. Пассивное преобразование могут использовать датчики рефлекторного типа, с использованием решеток Брэгга и фотодиодов. В настоящее время активное преобразование применяется только в фотовольтаических датчиках, и

обуславливается применением в составе чувствительного элемента, например, фотодиодов в обратном смещении. Для того, чтобы определить сильные и слабые стороны каждого типа, рассмотрим подробнее их конструктивные особенности.

### 1.2.1 Волоконно-оптические датчики с пассивным преобразованием

В настоящее время существует ряд конструкций рефлекторного типа. В основе работы пассивных оптоволоконных датчиков давления лежит модуляция интенсивности светового излучения вследствие прогиба мембраны, как показано на Рисунке 1.5.

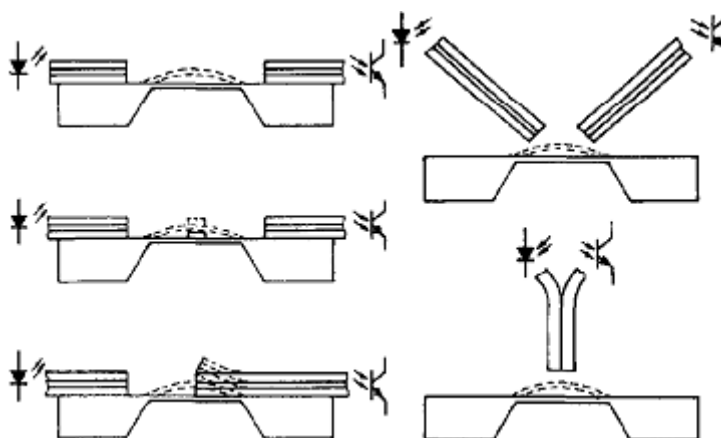


Рисунок 1.5 – Варианты модуляции оптического сигнала в пассивных оптоволоконных датчиках давления [23]

Элементами такого датчика являются оптическое волокно, в которое подается световой поток, кремниевая мембрана, преобразующая давление в перемещение отражающей поверхности, закрепленная в корпусе, источник излучения – светодиод или лазерный диод. В таком датчике излучение, выходящее из оптоволоконна, падает по нормали на поверхность мембраны, отражаясь обратно в излучающее волокно, или в соседнее, размещенное рядом с излучающим, волокно. Под действием давления мембрана изгибается, и количество отраженного света изменяется. На другом конце по уровню отраженного сигнала определяется измеряемое давление.

Известен преобразователь давления [24], содержащий корпус с воспринимающей давление мембраной, основанием, источником излучения и двумя фотоприемниками, подключенными соответственно к излучающему и двум фотоприемным световодам, которые передают световой поток к двум дискретным фотодиодам. Схема датчика показана на Рисунке 1.6. Каких-либо характеристик данного устройства не приведено. Преобразователь давления состоит из разного рода дискретных элементов, что в свою очередь усложняет его сборку,

отладку, а также накладывает ограничения на использование материалов из-за разных коэффициентов температурного расширения.

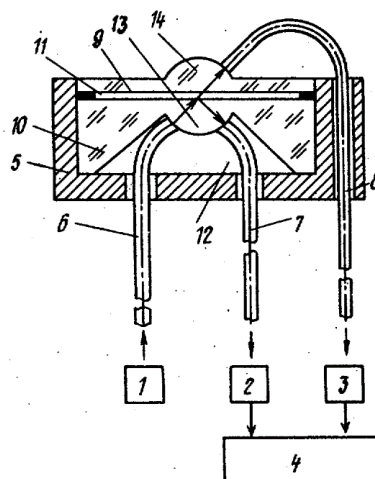


Рисунок 1.6 – Преобразователь давления [24], где 1 – светодиод, 2 и 3 – фотодиоды, 4 – схема обработки, 6 – 8 – оптоволоконно, 9 – мембрана, 13, 14 – линза

Существует конструкция амплитудного волоконно-оптического датчика, который содержит чувствительный элемент в виде мембраны, штуцера для подачи внешнего воздействия на чувствительный элемент, приемные и передающие оптические волокна [25]. Чувствительный элемент выполнен из монокристаллического кремния, а на рабочей поверхности чувствительного элемента изготовлены регулярные ячейки в виде углублений размерами, на порядок больше длины волны падающего на рабочую поверхность чувствительного элемента излучения и, на порядок меньше толщины жесткого центра мембраны. Схема датчика показана на Рисунке 1.7.

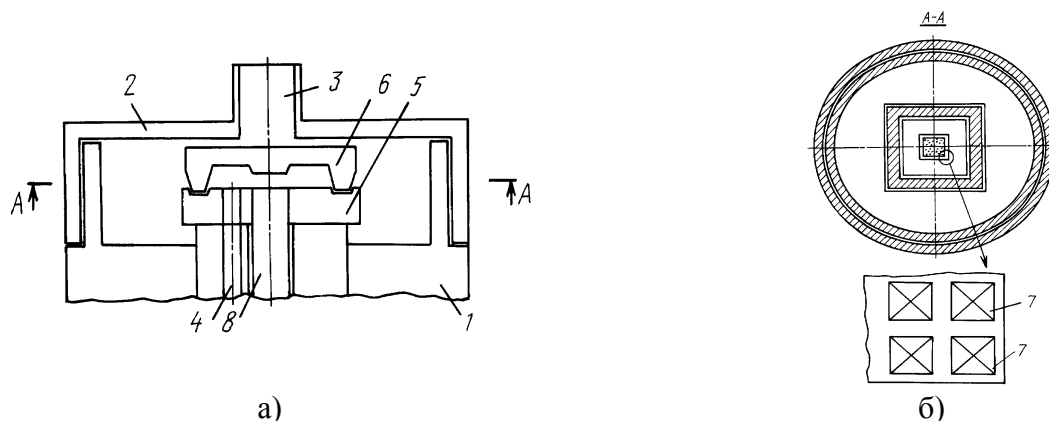


Рисунок 1.7 – Сечение амплитудного волоконно-оптического датчика [25] а), и вид сверху на сечение А-А - б), где 1, 2 – корпус; 3 – верхний штуцер; 4 – нижний штуцер; 5 – кремниевое основание; 6 – кремниевый чувствительный элемент; 7 – ячейки в виде углублений; 8 – приемные и передающие оптические волокна

Преобразователь работает следующим образом: излучение из оптоволоконна падает на поверхность чувствительного элемента и отражается обратно в принимающие оптоволоконна, под действием измеряемого давления изменяется интенсивность отраженной части излучения. Ячейки служат для усиления отражения, за счет вклада граней ячеек. Каких-либо характеристик



преобразователя не приведено. Основной проблемой такой конструкции является вторичная засветка рассеянным в корпусе датчика излучением.

В статье [26] описан МОЭМС датчик вибраций. Конструктивно датчик состоит из кремниевого кристалла с двумя соосными V-канавками, в которые клеевым способом закрепляются два оптоволоконна, одно излучающее, другое принимающее излучение, см. Рисунке 1.8а. Концы оптоволоконна находятся на расстоянии нескольких сотен микрон друг от друга, между ними располагается кантилевер, рассчитанный на определенную резонансную частоту. В качестве источника излучения использовался лазерный диод мощностью 3 мВт с длиной волны 1.3 мкм. В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод. Использовалось оптическое волокно с диаметрами сердцевины и внешней части 50 и 125 мкм, соответственно. Сечение датчика показано на Рисунке 1.8б.

Основные параметры датчика следующие:  $f_0$  - резонансная частота кантилевера от 130 до 2152 Гц,  $\delta x$  - расстояние между концами оптоволоконна от 0,4 до 0,59 мм,  $x_0$  расстояние между оптоволоконном и кантилевером от 50 до 180 мкм,  $S$  – чувствительность от 0,002 до 2,5 мВт·г<sup>-1</sup>. Данный датчик позволяет измерять вибрации в диапазоне 125 – 2152 Гц, что является слишком высокой частотой при измерении геотектонических толчков. При изменении конструкции, а именно добавлении постоянного концентратора давления на кантилевер через мембрану, можно получить МОЭМС датчик для измерения квазистатических давлений. Диапазон измеряемых давлений может быть рассчитан из прогиба мембраны с концентратором в виде жесткого центра и отклонением кантилевера. Форма выходного сигнала такого датчика без дополнительных, усложняющих конструкцию оптических щелей и линз будет нелинейной.

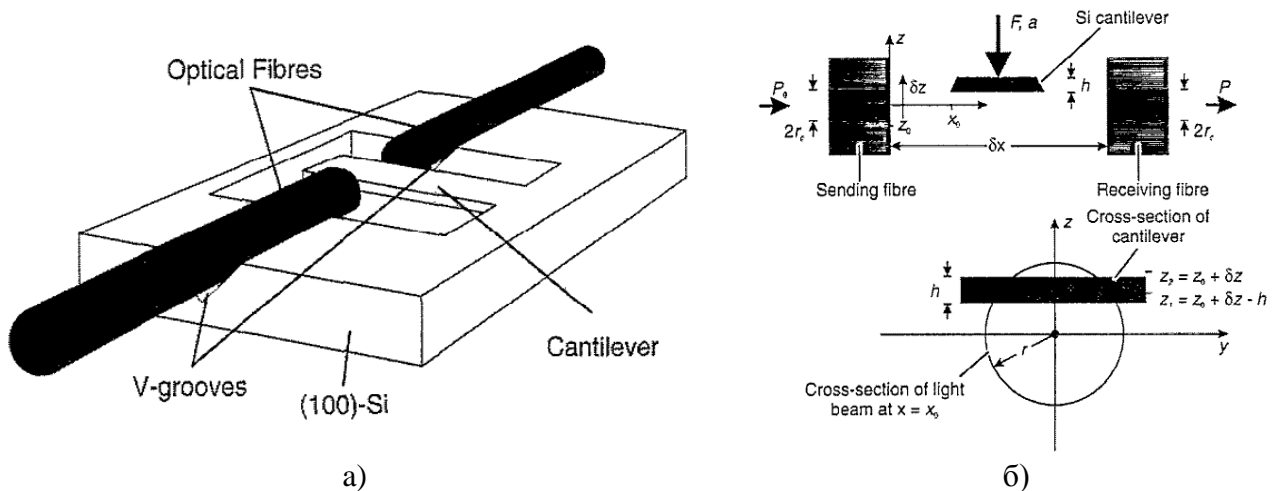


Рисунок 1.8 – Общий вид МОЭМС датчика вибраций – а); сечения по оси оптоволокон и светового пятна – б) [26]

### 1.2.2 Волоконно-оптические датчики на решетках Брэгга

Развитие технологии производства оптоволоконных кабелей дало толчок к развитию еще одной конструкции, а именно датчиков со встроенной в оптоволоконно решеткой Брэгга, настроенной на определенную длину волны, Рисунке 1.9а [27]. Чувствительный элемент таких датчиков - волоконная брэгговская решетка, которая представляет собой периодическую структуру, сформированную в оптическом волокне, способную отражать узкий спектр длин волн. Такие датчики работают следующим образом: давление через упругий элемент передается на место оптоволоконна, где сформирована решетка. Лазер, расположенный в анализаторе сигналов, посылает несколько длин волн  $N$  раз в секунду. Волоконная брэгговская решетка отражает излучение без изменения, а при внешнем воздействии смещается длина волны и на фотоприемники возвращается измененный сигнал. По изменению длины волны датчика определяются характеристики внешнего воздействия на датчик, как показано на Рисунке 1.9б.

Волоконно - оптические датчики давления серии OSP – 551 [28], использующие оптоволоконно с решеткой Брэгга предназначены для измерения давления в гидротехнических сооружениях. Длина волны 1510-1590 нм, диапазон измеряемого давления 0 – 10 МПа с разрешением по давлению 0,05 % и точностью измерения давления 0,5 % на весь диапазон.

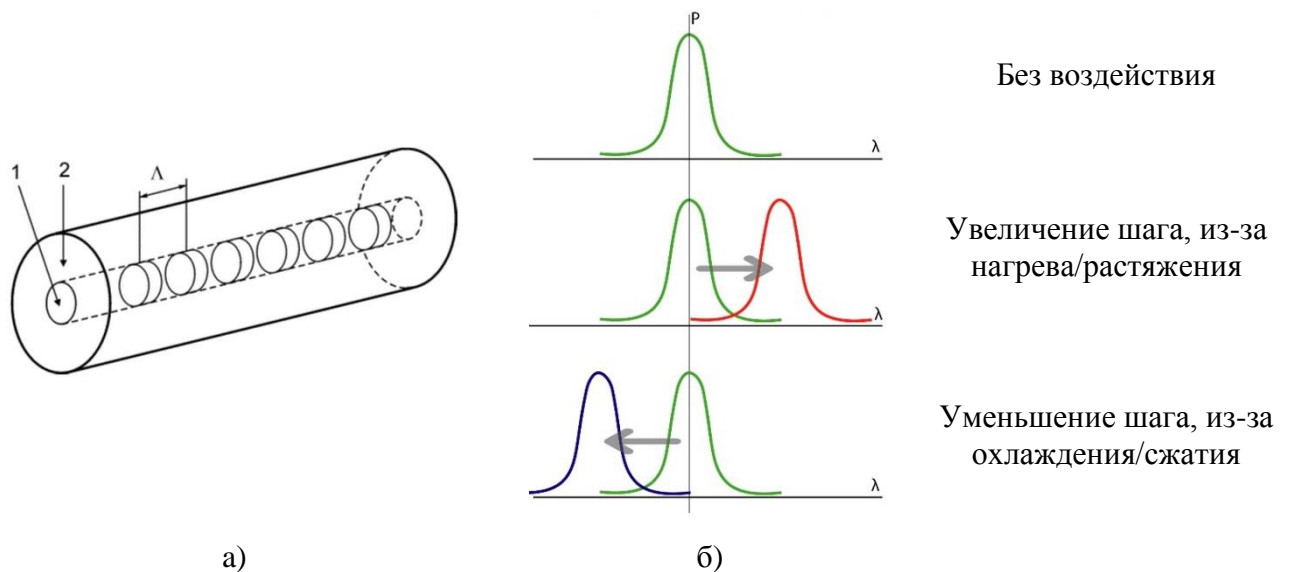


Рисунок 1.9 – Волоконная брэгговская решетка – а), где 1 – сердцевина, 2 – кожух,  $\Delta$  – шаг решетки; изменение отраженной волны – б)

Датчик может работать при температурах от минус 20 до плюс 80 °С. Размеры датчика  $\varnothing 26 \times 135$  мм, длина оптоволоконного кабеля 1 м. Внешний вид датчика приведен на Рисунке 1.10. Оптические сигналы от датчиков давления обрабатываются волоконно-оптическими регистрирующими модулями, которые существенно увеличивают стоимость эксплуатации таких датчиков.



Рисунок 1.10 – Волоконно - оптический датчик давления серии OSP – 551 [28]

На предприятии ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарёва проводилась научно-исследовательская работа по разработке волоконно-оптических измерительных систем и первичных высокотемпературных преобразователей на основе ВОД для систем, осуществляющих мониторинг авиационных конструкций из композитных материалов, строительных и техногенных объектов, мониторинг газопроводов и нефтепроводов, мониторинг силовых подстанций [29]. На отечественном рынке представлена пара датчиков давления производства фирмы ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь [30]. Датчики используют оптоволокно с решеткой Брэгга и предназначены для измерения нагрузки и веса на различные основания и конструкции ASTRO A565 (Рисунок 1.11а), а также давления жидкостей и газов - ASTRO A561 (Рисунок 1.11б). ASTRO A565 позволяет наблюдать за деформационными процессами, возникающими в инженерных сооружениях. Диапазон измеряемого давления 0 – 1,8 МПа с приведенной погрешностью 0,35 % в диапазоне температур от минус 30 до плюс 80 °С. Длина волны 1500 - 1600 нм. Для ASTRO A561 диапазон измеряемого давления 0 – 10 МПа с приведенной погрешностью 0,2 % в диапазоне температур от минус 30 до плюс 80 °С.

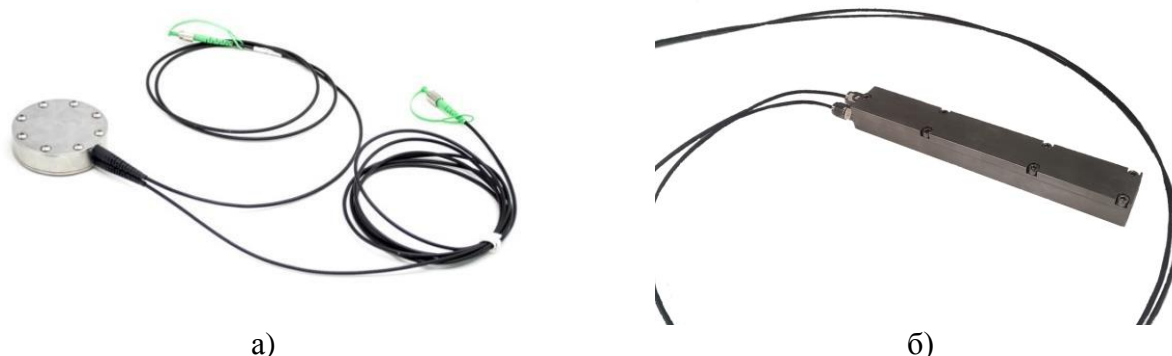


Рисунок 1.11 – Волоконно - оптический нагрузки и веса ASTRO A565 – а; датчик давления или уровня ASTRO A561[30]

К достоинствам данных датчиков можно отнести высокую помехозащищенность, нечувствительность к электромагнитным помехам, таким как СВЧ-поле, искровой разряд, магнитные поля, электромагнитные импульсы различной природы и любой интенсивности,

электробезопасность, связанную с отсутствием электрических цепей между датчиком и регистрирующим модулем, взрыво- и пожаробезопасность. Но при этом датчики требуют использования дорогостоящего регистрирующего и обрабатывающего оборудования.

Среди отечественных разработок также следует отметить работу «ОКБ Автоматика» в направлении разработки высокочувствительных волоконно-оптических датчиков, которые на данный момент находятся на стадии натурных испытаний [31]. На данный момент НПО «Автоматика» заявляет о разработанных волоконно-оптических датчиках рефлекторного типа ВОМФ-1, гидрофоне ВОГФ-1, гидрофоне ВОГК-2 и датчике вибраций ВОДВ-1. На информационном ресурсе компании отсутствуют данные о технических характеристиках разработанных устройств. В ЭОКБ «Сигнал» ведется работа над разработкой широкой номенклатуры различных датчиков (давления, уровня, частоты вращения, температуры, перемещения, напряжения и др.) на базе волоконно-оптических преобразователей [32, 33]. Однако каких-либо характеристик разрабатываемых датчиков не приведено. Отсутствие метрологических характеристик может быть обусловлено специализированным назначением датчиков и находиться в закрытом реестре.

Известна конструкция амплитудного волоконно-оптического датчика давления [34] показанная на Рисунке 1.12.

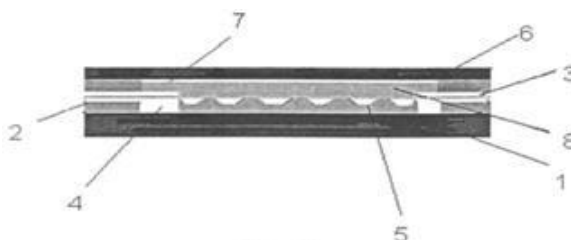


Рисунок 1.12 – Конструкция датчика: 1 – корпус, 2 - пропускной канал, 3 – оптоволоконно 50/125 мкм, 4 – паз с рифлёной поверхностью -5, 6 – крышка, 7 – выемка, 8 – прижимная пластина [34]

Волоконно-оптический датчик давления, выполнен на основе оптического волокна, содержит участки ввода и вывода излучения, а также участок, размещенный в пропускном канале резинового корпуса прямоугольного сечения. Участки ввода и вывода излучения оптического волокна пропущены через металлический корпус. Пропускной канал включает участок с рифленой поверхностью в основании для размещения оптического кабеля параллельно основанию корпуса. Оптическое волокно в пазу прижато к вершинам выступов рифленой поверхности пластиной из термостойкой резины. На концах участков ввода и вывода излучения оптического волокна установлены оптические разъемы. Давление прикладывается к резиновой пластине, которая прижимает оптоволоконно к выступам основания, оптоволоконно изгибается, и амплитуда оптического сигнала затухает. Информация взята из базы патентов и каких-либо характеристик или габаритов датчика не

приведено, однако указано, что данный датчик может подойти для измерения веса подвижных объектов, машин, вагонов поезда и др., а также для автоматического контроля технического состояния рельсового подвижного состава в процессе его эксплуатации путем измерения динамических нагрузок, оказываемых подвижным составом на датчик. Принцип модуляции оптического сигнала аналогичен конструкциям с использованием решеток Брэгга, однако габаритные параметры чувствительного элемента датчика выходят далеко за рамки габаритов МЭМС устройств.

Известен микромеханический волоконно-оптический датчик давления [35], который выполнен на основе оптического волокна, содержащего участки ввода и вывода излучения, а также участок с решетками Брэгга, размещенный в пропускном канале корпуса, см. Рисунок 1.13а.

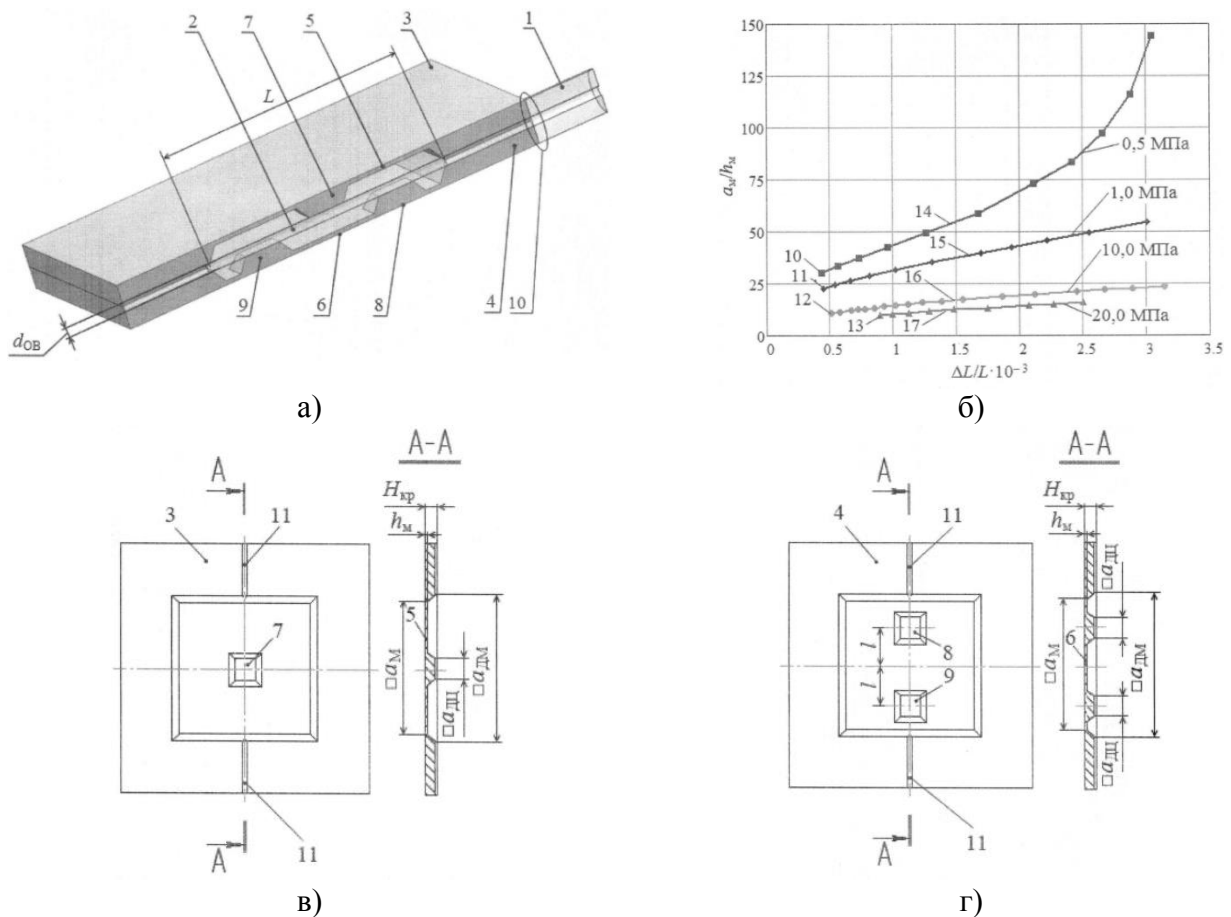


Рисунок 1.13 – Микромеханический волоконно-оптический датчик давления, сечение – а), где 1 – ОВ, 2 – решетка Брэгга, 3 – кристалл с одним ЖЦ, 4 – кристалл с двумя ЖЦ, 5,6 - ЖЦ; зависимость изменения отношений размеров мембран кремниевых кристаллов к толщине мембран от воздействующего давления и зависимость изменения отношений размеров мембран кремниевых кристаллов к толщине мембран от относительного удлинения оптического волокна – б); кремниевый кристалл с одним ЖЦ – в) кремниевый кристалл с двумя ЖЦ – г) [35]

Этот вариант конструкции является прямым МЭМС аналогом предыдущей конструкции датчика. Пропускной канал выполнен в виде паза с рифленой поверхностью в основаниях

кремниевых кристаллов, на которых сформированы мембраны одинаковой толщины  $h_m$ , при этом первая мембрана имеет один квадратный жесткий центр (Рисунок 1.13в), размещенный в центре, вторая мембрана - два одинаковых квадратных жестких центра (Рисунок 1.13г), расположенных вдоль участка оптического волокна на расстоянии  $l$  по обе стороны от центра мембраны. Волокно в пазу прижато к вершинам жестких центров. Под действием измеряемого давления оптоволокно растягивается жесткими центрами, и меняется отраженная длина волны решетки Брэгга, как показано на Рисунке 1.13б.

По изменению отраженной длины волны определяется величина измеряемого давления. Такая конструкция микромеханического волоконно-оптического датчика давления позволяет измерять давление до 20 МПа. Данных о нелинейности преобразовательной характеристики не приведено. Датчик имеет малые массогабаритные параметры, а также возможность расчета конструктивных параметров под определённый диапазон давлений. Однако для работы датчика необходимо использовать высококачественное одномодовое оптоволокно и достаточно сложную систему обработки сигнала.

Еще один недостаток датчика такого типа - температурная зависимость, которая оказывается сильнее, чем для тензорезистивных, что в свою очередь требует сложной системы компенсации. Интересным решением данной конструкции является использование жестких центров для передачи давления на оптоволокно.

### 1.2.3 Фотоэлектрические датчики давления

В последнее время, наряду с традиционными сенсорами давления, работающими на тензорезистивном, емкостном, и пьезоэлектрическом эффектах, стали исследоваться датчики на фотоэлектрическом и фотовольтаическом эффекте. В таких сенсорах действие измеряемого давления приводит к перемещению конца оптоволокна относительно фотоприемника, в результате чего изменяется площадь его засветки и выходной сигнал [23]. На данный момент систематических исследований конструктивных и технологических основ создания датчика давления на фотовольтаическом эффекте с фотодиодами, расположенными внутри датчика до сих пор не проводились. Подробные исследования вариантов конструкции, влияния размеров и положения УЭ, размеров и параметров оптоволокон на характеристики датчика позволят создать начальную базу для последующих разработок датчиков. В открытых информационных источниках ведущих фирм разработчиков нет данных о выпуске прецизионных кремниевых фотоэлектрических датчиков давления (КФДД), изготовленных на основе кремниевой МЭМС технологии. Имеются примеры выполнения датчиков давления с использованием дискретных фотодиодов, рассеянного и сфокусированного света.

В публикации [36] показана возможность создания волоконно-оптического датчика давления, содержащего профилированную путем анизотропного травления кремниевую мембрану с жестким центром, многомодовое оптоволокно, закрепленное V-канавке на рамке мембраны и лежащее на жестком центре, и флуоресцентные диски из неодимового стекла, расположенные на рамке напротив свободного конца ОВ, как показано на Рисунке 1.14(а-б). Датчик работает следующим образом: через ОВ от внешнего источника поступает некогерентное излучение, попадающее на флуоресцентные диски, излучение вызывает свечение в дисках, мембрана изгибается под действием прилагаемого давления, свободный конец ОВ отклоняется и вызывает изменение интенсивности свечения дисков, по разности времени флюоресценции измеряется выходной сигнал. Используя фазочувствительную схему обработки сигнала регистрируется обратное излучение в оптоволокне. В эксперименте использовалось оптоволокно 110/140 мкм, кремниевая пластина с ориентацией (100), неодимовые диски с временем флюоресценции 50 мкс и 1 мс, мембрана со стороной от 2 до 4 мм, и толщиной от 40 до 80 мкм. Чувствительность определялась из прогиба мембраны  $S=0,0074 a^4/h^3$  (мкм/бар), где  $a$  - сторона мембраны,  $h$  - её толщина. При излучении равном 1 мВт,  $a = 2$  мм, изменение интенсивности составило 35 нВт/бар.

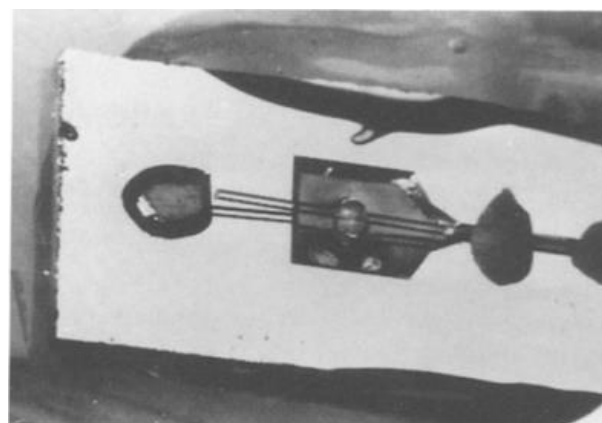
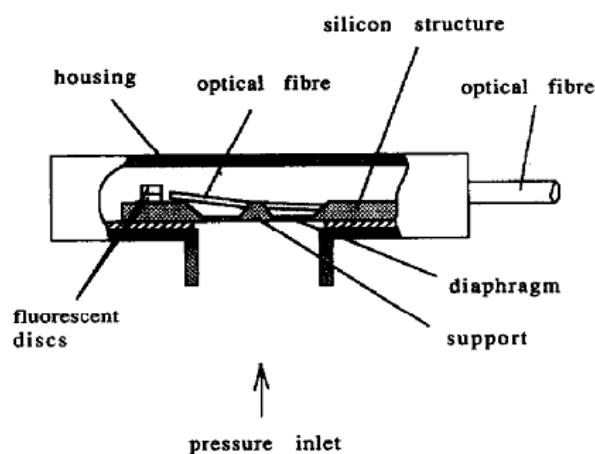


Рисунок 1.14 – Схема датчика давления – а); фотография образца – б) [36]

К плюсам данной конструкции можно отнести полное отсутствие питания и выделения тепла в области измерения давления, однако в публикации отсутствуют какие-либо данные по форме выходного сигнала, температурных зависимостях, как неодимовых дисков, так и преобразовательной характеристики датчика в целом. Также в статье не рассматривались вопросы нелинейности преобразовательной характеристики.

Описанный в статье [23] датчик давления также использует прогиб мембраны, но также дополнительно преобразует оптический сигнал в электрический при помощи фотодиода размещенного на краю рамки мембраны, как показано на Рисунке 1.15(а-б). При этом не

требуется электрического питания датчика и он работает по принципу выключателя, настроенного на определенное давление.

Данный датчик состоит из следующих частей:

- Кремниевого профилированного кристалла с жестким центром на тонкой мембране, с V-канавкой и светочувствительным p-n переходом;
- Стандартного оптоволоконна диаметром 150 мкм, расположенного в V-канавке и зафиксированного с помощью клея к ЖЦ и рамке, свободный конец которого направлен на p-n переход;
- Кремниевого кристалла, выступающего в качестве буферного слоя между корпусом и рабочим профилированным кристаллом;
- Корпуса.

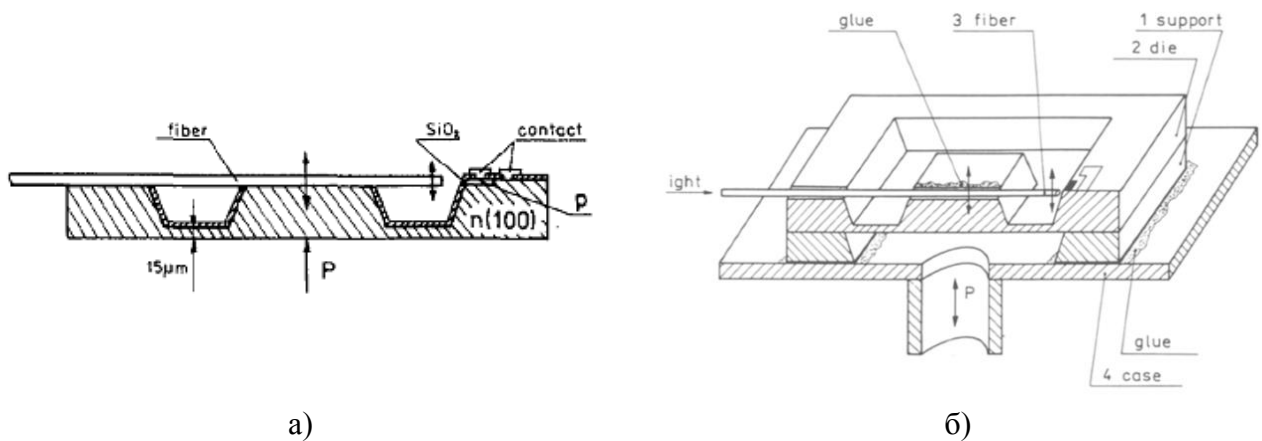


Рисунок 1.15 – Схема оптоволоконного датчика с электрическим выходным сигналом, сечение - а); сборка датчика– б) [23]

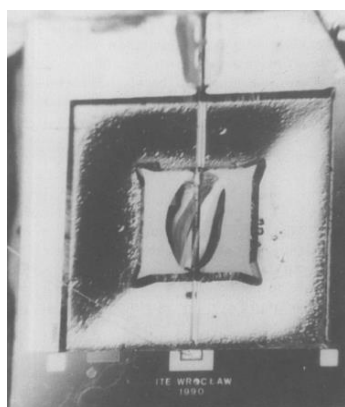
Датчик работает следующим образом: свободный конец направлен на p-n переход и освещает его пропорционально отклонению мембраны за свет подаваемого с обратной стороны давления жидкости или газа. Свет в оптоволокну поступает извне: может быть использована галогенная лампа, солнечный свет или лазер. P-n переход фоточувствительного элемента генерирует фотовольтаический сигнал пропорциональный засветке, который меняется при любом отклонении волокна.

Для изготовления датчика использовались кремниевые пластины диаметром 7.62 см с кристаллографической ориентацией (100). Травление проходило в водном растворе КОН при температуре 80 °С. Внешний вид собранного датчика показан на Рисунке 1.16а и график зависимости выходного сигнала приведены на Рисунке 1.16б.

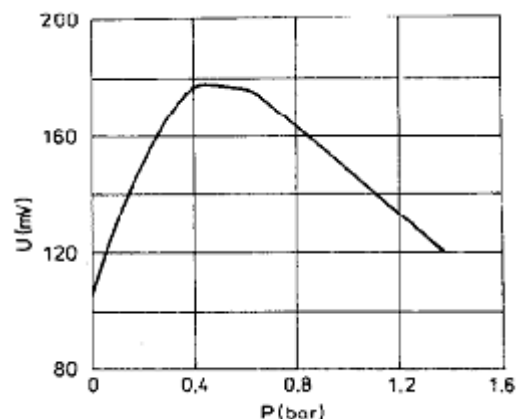
Как видно из графика зависимости, характеристика имеет 3 участка: 1) рост выходного сигнала в диапазоне давлений 0-0.38 бар; 2) псевдопологий максимум при 0.38-0.6 бар; и 3) уменьшении выходного сигнала 0.6-1.6 бар. Чувствительности участков 1 и 3 +240 и -80 мВ/бар,



соответственно. Максимальный прогиб мембраны 500 мкм. Параметры датчика давления приведены в таблице 1.1 [23].



а)



б)

Рисунок 1.16 – Фото датчика в сборе вид сверху - а); график зависимости выходного сигнала от давления - б) [23]

Данный датчик имеет высокую чувствительность, не требует электрического питания, при этом сам вырабатывает электрический выходной сигнал, который является взрыво- и пожаробезопасным. Однако имеется ряд недостатков, к которым можно отнести большие размеры кристалла, сильную температурную зависимость выходного сигнала, малый диапазон измеряемых давлений, высокий начальный сигнал, который напрямую зависит от положения оптоволоконна и выходной сигнал нелинейной формы, как показано на Рисунке 1.16б. Следствием нелинейности выходного сигнала является усложнение системы обработки выходного сигнала, что может сказаться на конечной стоимости датчика и его применения в измерительных системах.

Таблица 1.1 – Параметры датчика давления [23]

Параметр	Значение
Размеры кристалла, мм	10×8,5×0,5
Размеры мембраны a×b×h, мм	6×6×0,02
Размеры ЖЦ ε, мм	≈3×3
Диаметр оптоволоконна, мкм	150
Расстояние от конца ОВ до р-п перехода, мкм	100
Чувствительность, мВ/бар	+240, -80
Источник питания	свет, ≈100 Вт, без спец. соединения
Overpressure, Бар	3

Известен фотоэлектрический датчик давления жидкости на диапазон давлений от 0,02 до 8 кПа на дискретных элементах [37]. Авторы использовали дифференциальную схему, в которой применена пара планарных диффузионных фотодиодов, где один является диодом сравнения, а

другой - детектирующим диодом, расположенным напротив регулирующий поток шторки, закрепленной на подвижной мембране, как показано на Рисунке 1.17.

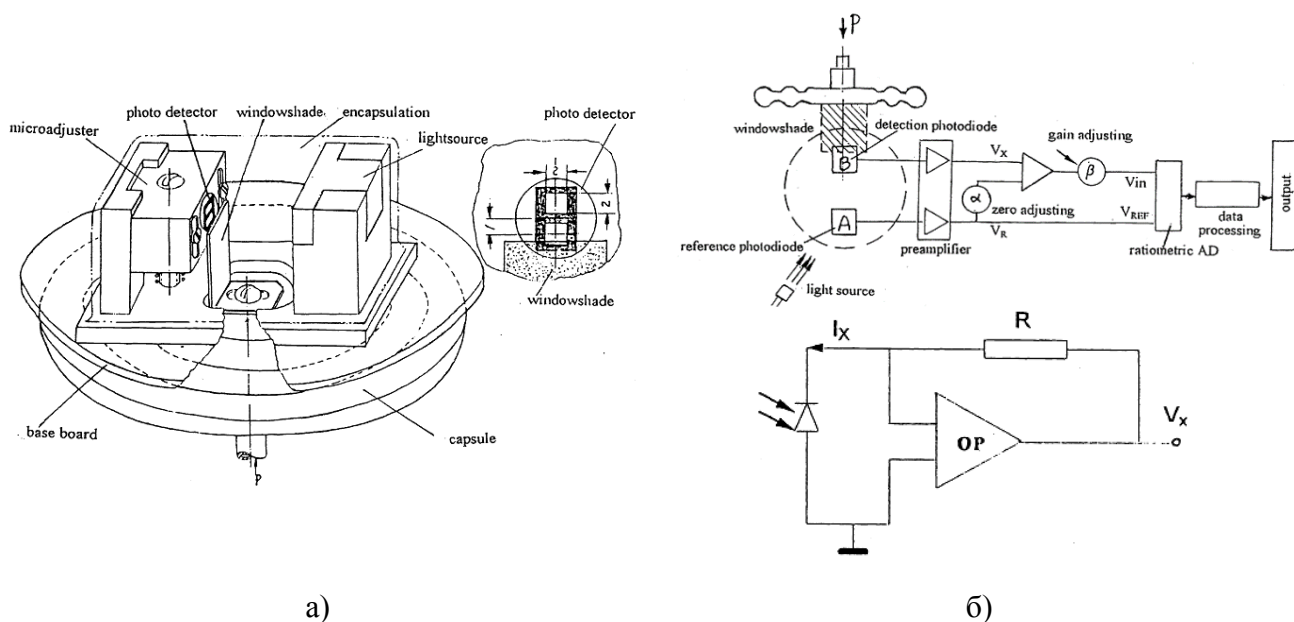


Рисунок 1.17 – Общий вид фотовольтаического датчика давления, с парой дискретных фотодиодах, шторкой закрепленной на подвижной мембране и кристалл со светодиоидом –а); схема преобразования давления в выходной сигнал – б) [37]

Электрический выходной сигнал с нелинейностью  $\approx 0,3\%$  получен с использованием схемы обработки сигнала приведенной на Рисунке. Активная площадь используемых фотодиодов была  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ . Минусом данной конструкции являются большие габаритные размеры датчика из-за применения дискретных элементов в конструкции. Схема преобразования приведенная в статье позволяет нивелировать влияние старения фотодиодов и изменения в источнике излучения, хотя на практике по прежнему требуется стабилизированный источник питания с оптической обратной связью через фотодиод.

Известен интегральный преобразователь давления (ИПД), использующий фотовольтаический эффект [38], вид сверху которого показан на Рисунке 1.18а, а, на Рисунке 1.18б - его продольный разрез. Преобразователь состоит из консольной балки на кремниевом основании. На консоль нанесена капля люминофора, освещенного светодиодом. Напротив балки размещен МДП-фотодиод. ИПД работает следующим образом. Излучение от светодиода инициирует собственное излучение люминофора. Светонепроницаемое покрытие препятствует проникновению излучения от светодиода в фоточувствительную область фотодиода. В отсутствие внешнего воздействия мембранная консоль не искривлена, поэтому излучение от люминофора также не попадает в фоточувствительную область фотодиода. Под действием внешнего давления свободный конец консоли опускается, и излучение от люминофора попадает в торец полупроводника опорного основания вблизи ОПЗ. Поскольку расстояние от ОПЗ до края

опорного основания меньше диффузионной длины носителей заряда, фотогенерированные носители попадают в область ОПЗ, вызывая фототок во внешней цепи фотоприемника.

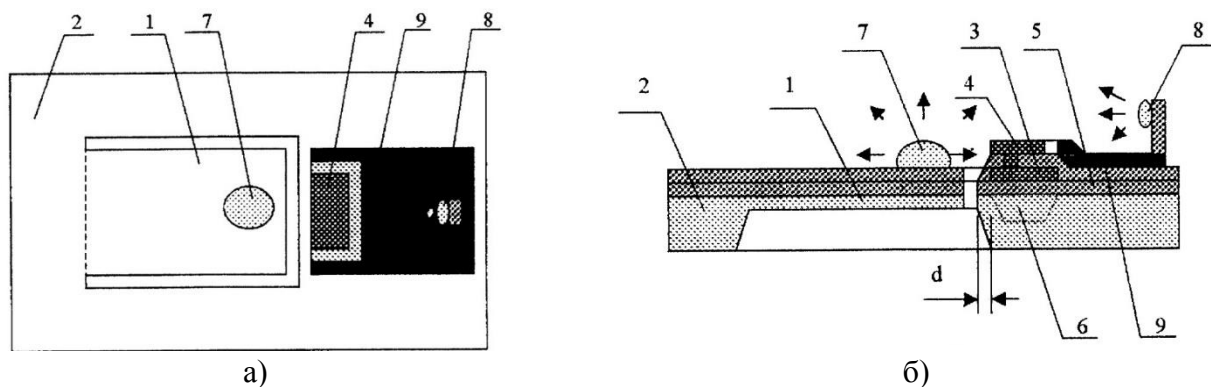


Рисунок 1.18 – ИПД: рабочая поверхность – а); поперечный разрез – б), где 1 – консольная балка; 2 – рамка; 3,4 и 5 элементы МДП фотодиода, 6 – ОПЗ фотодиода, 7 - капля люминофора, 8 – опорное основание со светодиодом; 9 светонепроницаемое покрытие [38]

Чем сильнее прогиб консоли, тем больше величина фототока в пределах механической прочности конструкции. Таким образом, реализуется преобразование внешнего давления в электрический сигнал. Способ передачи давления на балку не описан, но учитывая открытый доступ измеряемой среды к электродам датчика, сильно ограничивается сферы его применения.

Известен волоконно-оптический датчик на дискретных элементах [39], сечение которого показано на Рисунке 1.19(а-б).

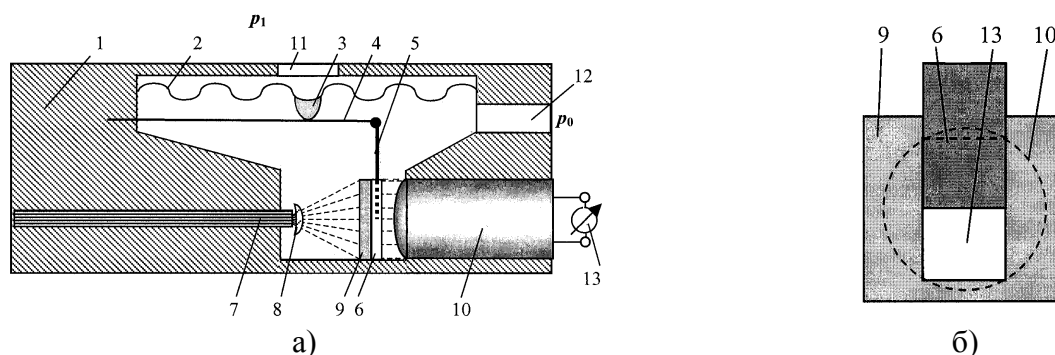


Рисунок 1.19 – Схема волоконно-оптического датчика давления - а); вид на рамку со стороны световода - б), где 1 - корпус, 2 - упругая мембрана с упором 3, 4 консоль, и 5 - светонепроницаемая перегородка, 6 – направляющие, 7 - световод, 8 - рассеивающая линза, 9 - рамка со световой щелью, 10 – фотоприемник, 11 и 12 отверстия для давления [39]

Датчик содержит корпус, в котором закреплен световод и фотоприемник, между которыми размещена подвижная консоль с частично перекрывающей оптическое излучение шторкой. Консоль приводится в движение через упор, размещенный на мембране, на которую воздействует внешнее давление. Измеряемое давление подается на упругую мембрану, которая оказывает давление на консоль, шторка начинает перекрывать фотоприемник, сигнал которого пропорционален интенсивности засветки. Фототок регистрируется внешним измерительным прибором. Очевидными недостатками являются большие габаритные параметры, использование

дискретных элементов, а также нелинейная форма выходного сигнала. Конструктивные особенности и форма выходного сигнала сокращает возможные сферы применения датчика.

Конструкция [40] является аналогом волоконно-оптического датчика давления [39]. Оптическое излучение подается на неподвижное волокно, центр которого расположен напротив подвижного оптоволоконна, как показано на Рисунке 1.20а.

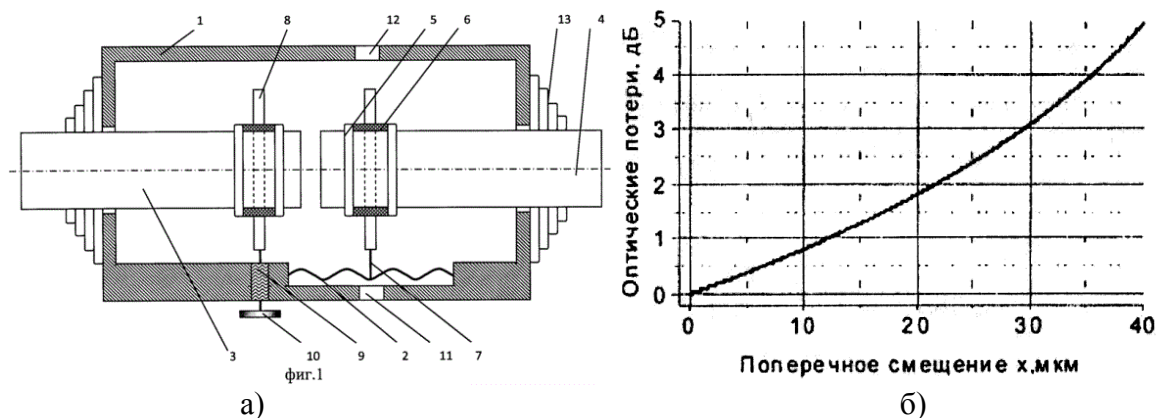


Рисунок 1.20 – Схема волоконно-оптического датчика давления - а), где 1 - корпус, 2 - упругая мембрана, 3 – фиксированный и 4 – подвижный световоды, 5 – световод, 6 - хомут фиксации, 7 - штанга, 8 - рассеивающая линза, 9 и 10 – подстроечные винты, 11 и 12 отверстия для давления, 13 - сальник; зависимость оптических потерь от поперечного перемещения –б) [40]

Под действием измеряемого давления мембрана прогибается, штанга приподнимает подвижное волокно, тем самым увеличивая оптические потери в системе датчика. Добавление в конструкцию уплотнительных колец обеспечивает возможность использования датчика во взрывоопасных средах. Основное отличие заключается, в том, что фотоприемник вынесен за пределы чувствительного элемента. К плюсам конструкции можно отнести простоту конструкции и миниатюрные размеры чувствительного элемента (ЧЭ), однако выходной сигнал такого датчика имеет нелинейную зависимость и требует дополнительной обработки и калибровки, как показано на Рисунке 1.20б.

#### 1.2.4 Обсуждение

Волоконно-оптические датчики давления рефлекторного типа вызывают большой интерес исследователей, как за рубежом, так и в России. В частности, за последние 8 лет в России по тематике волоконно-оптических датчиков защищена докторская диссертация по теме «Физико-технологические основы формирования базовых элементов микросистемной техники» [41] и 1 кандидатская диссертация по теме «Разработка и исследование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления» [42]. В датчиках рефлекторного типа используется пассивное преобразование оптического сигнала, поэтому к преимуществам можно отнести высокую

электромагнитную помехозащищенность, из-за отсутствия питания в области ЧЭ, взрыво- и пожаробезопасность, использование современного оптического волокна, позволяет измерять давление на расстоянии в несколько километров. Однако основным недостатком является сложность обработки выходного сигнала, вследствие возможных неточностей сборки ЧЭ датчика, световых потерь отраженного пучка света, и необходимости применения дорогостоящего оборудования для обработки выходного сигнала. Также, стоит отметить, что форма преобразовательной характеристики такого типа датчиков имеет нелинейный характер и требует дополнительной обработки. При использовании резонансной частоты, как в датчике [26], можно получить высокочувствительный датчик вибраций, рассчитанный на определенную частоту.

Волоконно-оптические датчики с использованием оптоволокна с решеткой Брэгга, нашли широкое применение в различных областях промышленности. Зачастую это обусловлено тем, что для модуляции оптического сигнала требуется небольшое воздействие на участок с решеткой Брэгга, будь то механическое воздействие, или температурное. Однако, высокая чувствительность к этим воздействиям и создает основные препятствия для использования ЧЭ на основе решеток Брэгга в прецизионных измерениях. Если применять такой тип ЧЭ для измерения давления, то необходимо создавать специализированный корпус, который будет передавать измеряемое давление на участок оптоволокна с решеткой, при этом защищать его от воздействия температуры. Либо необходимо использовать дополнительный датчик температуры, с последующей корректировкой измеренного давления. Помимо прочего для работы требуется дорогостоящее оборудование, позволяющее обеспечить высокую точность и скорость обработки сигналов, первичного и отраженного светового сигнала. Датчики на решетках Брэгга обладают высокой степенью помехозащищенности, взрыво- и пожаробезопасностью, малыми массогабаритными параметрами. Анализ литературы показывает, что в России, ведется активное исследование конструктивных решений волоконно-оптических датчиков на решетках Брэгга, которые могут найти свое применение в промышленности, кораблестроении, авиационной и космической отраслях в качестве нового перспективного вида измерительных приборов, для измерения давления, уровня, частоты вращения, температуры, перемещения, напряжения.

Датчики давления со встроенными фотодиодами могут найти широкое применение в различных областях промышленности, авиастроении, кораблестроении, космических аппаратах. В отличие от волоконно-оптических датчиков рефлекторного типа и с использованием решеток Брэгга, датчики на фотовольтаическом эффекте обладают меньшей чувствительностью к температурным изменениям и не требуют сложной схемы обработки выходного сигнала и дорогостоящего оборудования. Выходной сигнал таких датчиков меняется при изменении засветки фотодиодов, вызванной перемещением от давления шторки или оптоволокна.

Основные достоинства датчиков давления на фотовольтаическом эффекте:

- помехозащищенность – электромагнитные помехи не оказывают воздействие на передачу оптического сигнала от источника излучения до фоточувствительного элемента;
- минимальное, равное энергии поглощенных фотонов светового поля, потребление энергии в самом преобразователе;
- возможность передачи оптического излучения на большие расстояния, до 10 км, по оптоволокну при минимальных потерях;
- взрыво- и пожаробезопасность такого рода датчиков, т.к. не требуется электрическое питание;
- возможность получения высокой чувствительности за счет оптического рычага;
- хорошее технологическое согласование со стандартными процессами кремниевой интегральной электроники;
- меньшее число выводов: в простейшем варианте имеет 2 электрических вывода, вместо 5 для мостовых датчиков, или более при использовании резонансного принципа.

### 1.3 Концепция фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления

В простейшем случае фотодиод представляет собой р-п переход, который обычно формируется путем создания п- области на р-подложке, с помощью диффузии или имплантации. В более сложных конструкциях применяются эпитаксиальные слои, различные технологии. Принцип работы фотодиода основан на разделении неосновных носителей полем образованным обедненной областью р-п перехода, рис 1.21(а). Под воздействием электрического поля электроны дрейфуют в п-область, а дырки – в р-область [43]. Носители, которые достигают квазинейтральных областей создают фототок, и это вызывает смещение вольтамперной характеристики фотодиода как показано на Рисунке 1.21(б). Выражение ВАХ фотодиода имеет вид [43]:

$$I = I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

где  $I_s$  – обратный темновой ток насыщения,  $k$  константа Больцмана,  $T$  – температура,  $I_{ph}=I_L$  – фототок.

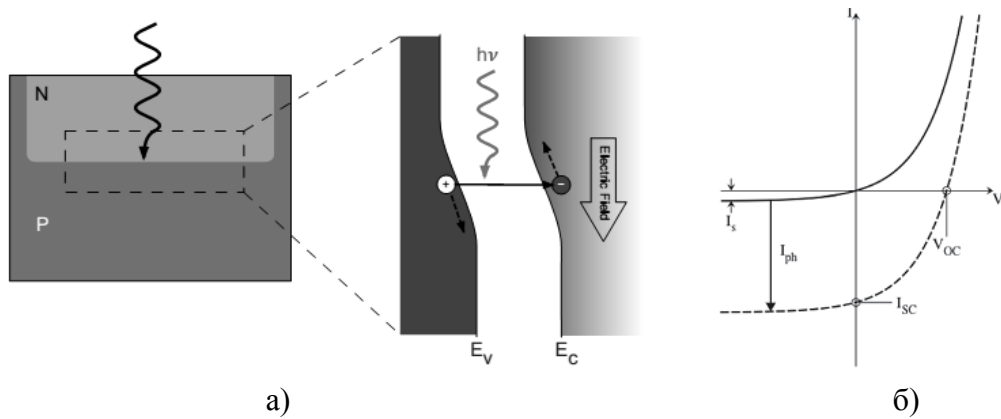


Рисунок 1.21 – Упрощенный процесс генерации фототока в р-п переходе– а) и смещение ВАХ фотодиода – б) [43]

Фотодиод может работать в трех основных режимах: режим холостого хода (ХХ), режим короткого замыкания (КЗ) и режим фотопроводимости (или обратно смещенный режим). Схематически режимы показаны на Рисунке 1.22

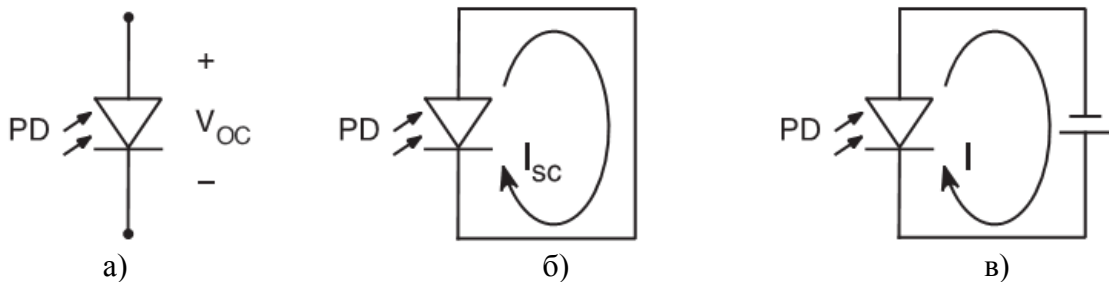


Рисунок 1.22 – Режимы работы фотодиода: режим холостого хода –а), режим короткого замыкания –б) и режим фотопроводимости (или обратно смещенный режим) – в).

Особенностью режима ХХ является отсутствие протекающего через фотодиод тока, внешняя цепь «разомкнута», но за счет фотогенерации на выводах образуется разность потенциалов, которая называется напряжением холостого хода  $V_{oc} \equiv U_{xx}$ , см. Рисунок 1.21(б). В режиме КЗ цепь «замкнута» и через фотодиод протекает фототок  $I_{ph}$ , величина которого соответствует току короткого замыкания  $I_{sc} \equiv I_{кз}$ , см. Рисунок 1.21(б). В обратно смещенном режиме прикладывается разность потенциалов на фотодиод, тем самым позволяя работать в третьем квадранте ВАХ. Обратное смещение изменяет потенциалы перехода на  $V_0 - V$ , а также меняется баланс между дрейфовой и диффузионной составляющими токов в р-п переходе, при этом увеличится ширина обедненной зоны  $W$  и усилится электрическое поле  $E$ . Зависимость изменения ширины обедненного слоя от обратного напряжения можно выразить как:

$$W = K (V_0 - V)^{m_j}$$

где  $K$  константа, а  $m_j$  коэффициент, зависящий от формы р-п перехода ( $m_j = 1/2$  для ступенчатого, и  $1/3$  для линейного перехода). Увеличенная обедненная зона под воздействием обратного смещения создает большую зону фотогенерации, в то время как усиленное поле увеличивает

дрейфовую скорость сгенерированных носителей. Суммарно это снижает общее время пробега, и потери вследствие рекомбинационных процессов в обедненной области.

Основными особенностями работы фотодиода исследуемого датчика давления являются: а) функционирование при изменяющейся площади засветки детектирующего устройства; б) отсутствие внешних источников питания, а значит режим фотопроводимости использовать не получится; остаются только режимы ХХ и КЗ; в) малая нелинейность преобразовательной характеристики и возможно более высокая чувствительность. Режим работы фотодиода без внешнего источника питания называют фотовольтаическим, чаще всего его используют в солнечных элементах. Авторы в статье [23] уже использовали в аналогичной конструкции датчика один фотодиод на р-п переходе, работающий в фотовольтаическом режиме, и выходной сигнал имел «куполообразную» форму, из-за выхода светового пятна с поверхности фотодиода. Современные технологии открывают широкие возможности для новых конструктивных и схемотехнических решений фотодиодов в составе датчика, однако к настоящему времени какой-либо количественный и систематический анализ в этом направлении отсутствует.

Для построения датчика такого типа авторы [37] уже использовали пару дискретных фотодиодов, но такой тип построения обуславливается необходимостью подбора фотодиодов с идентичными характеристиками, что приводит к увеличению цены конечного продукта. Для решения этой проблемы можно интегрировать фотодиоды на одном кристалле с помощью технологии ИМС. Традиционные конструкции фотодиодов используют в качестве базы весь объем кристалла, что позволяет применять одномерную модель, подробно описанную в литературе [44].

Поскольку для реализации ФВУ с несколькими фотодиодами или фоточувствительными элементами (ФЭ) должна применяться интегральная технология, то при конструировании ФВУ должны выполняться следующие условия, которые не обязательны для дискретных ФЭ и сборок на их основе:

1. ФЭ и контакты к ним должны быть расположены на одной стороне пластины и быть изолированы друг от друга;
2. Размеры ФЭ и расстояние между ними должны быть согласованы с размером светового пятна от оптоволокна.

Эти конструктивные требования далее отражены при моделировании ФВУ. К конструктивным требованиям необходимо добавить и экономическую составляющую, поэтому желательно ФВУ изготавливать по наиболее распространенной КМОП технологии. Для определения конструктивных параметров следует рассмотреть варианты исполнения фотодиодов и других ФЭ, выполненных по КМОП технологии.



### 1.3.1 Анализ конструктивных решений фоточувствительных элементов

Современные технологии предлагают широкий спектр возможностей для создания фоточувствительных элементов на базе КМОП технологии. Далее будут рассмотрены конструктивные решения исполнения фотодиодов по КМОП технологии и некоторые их характеристики, для определения наиболее оптимального выбора конструкции ФЭ для исследуемого датчика. Так, в статье [45] рассмотрены варианты фотодиодов n+/psub и nwell/psub (psub – подложка p-типа, nwell – карман n-типа) выполненных по КМОП технологии с проектными нормами 40 нм фабрики Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC, Тайвань, [46]). Лучший спектральный отклик n+/psub, см. Рисунок 1.23(а), диода составил 0,09 А/Вт, полоса пропускания 3 ГГц при напряжении смещения 8 В и длине волны 520 нм. Для nwell/psub диода, см. Рисунок 1.23(б), эти же параметры составили 0,18 А/Вт, 3,0 ГГц при 14,8 В для длины волны 520 нм. При лучшем отклике nwell/psub диода параметры составили 0,24 А/Вт, 1,2 ГГц при 14,8 В для длины волны 660 нм. Глубина перехода составила 0,1 мкм для n+/psub и 1 мкм для nwell/psub. Для повышения устойчивости к пробое использовалась технология STI (shallow trench isolation [47]) между контактными областями p+ и активной зоной n+ или nwell.

В статье [45] описан опыт моделирования и измерения характеристик КМОП совместимых фотодиодов выполненных по технологическим нормам 0,18 мкм. Базовой предложенной конструкцией представлен фотодиод p+/pwell|STI|n+/nwell/psub (pwell – карман p-типа) состоящий из семи пар p+/pwell и n+/nwell полосок разделенных между собой STI изоляцией, как показано на Рисунке 1.24(а-б).

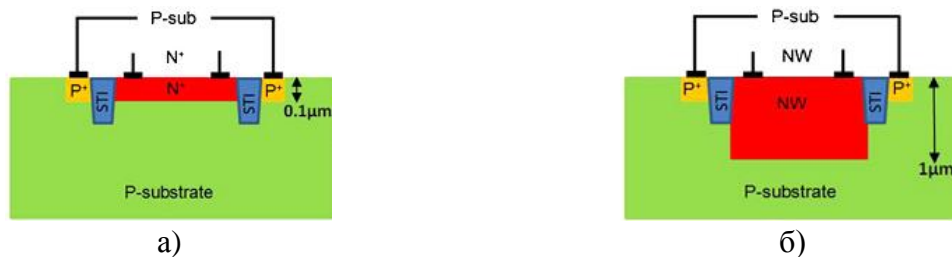


Рисунок 1.23 – Схематическое изображение КМОП фотодиодов с проектными нормами 40 нм фабрики TSMC [45]

Изготавливались образцы на фабриках TSMC и United Microelectronics Corporation (UMC, Тайвань, [48]). Размеры pwell, nwell, STI окисла, металлизации составили 1,5, 0,92, 0,48 и 0,45 мкм, соответственно, длина одного элемента 50 мкм. Для измерения отклика использовался поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором/вертикальным излучением (VCSEL) с длиной волны 850 нм, мощность падающего излучения 738 мкВт ( $\Phi_0 \approx 1E20 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ). В режиме нулевого смещения ФД<sub>TSMC</sub> показал отклик 0.06 и 0.2 А/Вт с обратным смещением 14.57 В, а ФД<sub>UMC</sub> 0.04 и 1.36 А/Вт при 15 В. Частоты среза составили 1.4 и

2.2 ГГц для тех же значений обратного смещения. Для улучшения частотных характеристик авторы использовали дополнительный контакт к подложке, выполненный из p+/pwell. При нулевом обратном смещении, мощности падающего излучения 380 мкВт, длине волны 823 нм отклик составил 0.061 А/Вт, частота среза 1.4 ГГц. А при обратном смещении 10 В частота увеличилась до 2.8 ГГц, а отклик до 0.38 при 13.9 В.

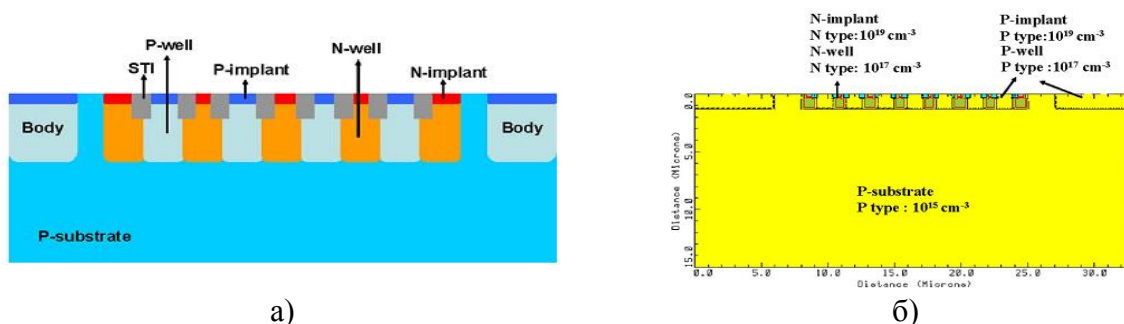


Рисунок 1.24 – Схематичное изображение сечения структуры фотодиода – а); разработанная структура в программном пакете Atlas Silvaco – б) [16]

Далее авторы предложили поместить конструкцию фотодиода внутри заземленного глубокого n-well и выполнить фотодиод в виде замкнутого восьмиугольника, как показано на Рисунке 1.25(а-б). Частота среза увеличилась до 8.7 ГГц при 11.4 В обратного смещения. Отклик составил 0.018 без смещения и 0.8 А/Вт перед пробоем. Также в статье предложено интегрировать кремниевый фотодиод с паразитным n-p-n транзистором в конструкцию ФД/пБТ, что позволяет при минимальном смещении всего 0.5 В увеличить отклик структуры ФД/пБТ с 0.06 до 1.4 А/Вт. В сравнении с предыдущими вариантами фотодиода где обратное смещение 14 В увеличивало отклик в 6 раз, применение такой схемы увеличивает отклик в 3,6 раз лучше при смещении в 28 раз меньше. Однако минусом такой конструкции является ухудшение частотных характеристик из-за БТ.

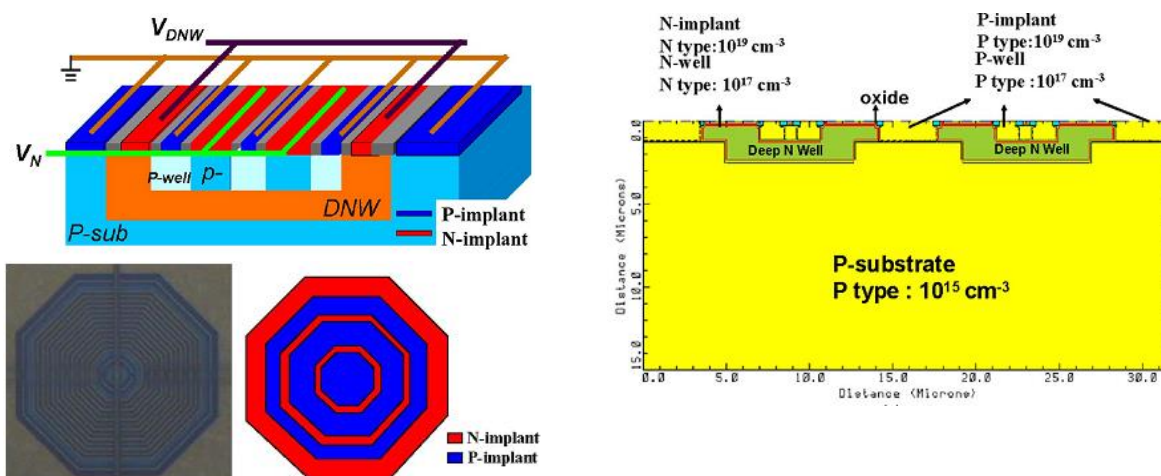


Рисунок 1.25 – Сечение модели ФД с изолирующим глубоким n-well и дополнительными контактами к подложке [16]

Авторы статьи [49] показывают возможность применения различных конструкций КМОП совместимых фотодиодов для создания фотоприемной матрицы с цветовой выборкой по

максимальному отклику структуры. Предлагается четыре базовых структуры фотодиодов:  $n^+/p$ - $/psub$ ,  $n-/psub$ ,  $p+/n-/psub$  and  $p+/n-$ , как показано на Рисунке 1.26(а-б), разработанных с использованием различных конструкций р-п переходов и технологических операций.

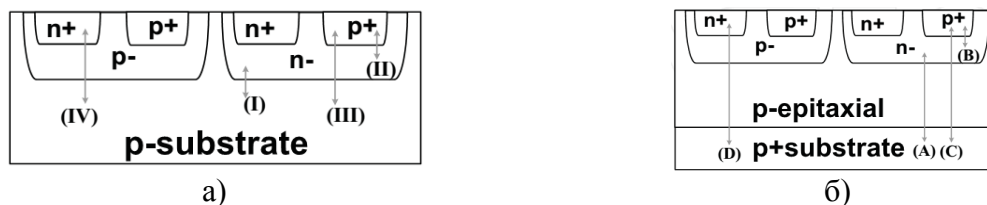


Рисунок 1.26 – Упрощенные структуры стандартных процессов КМОП технологии с четырьмя типами фотодиодов на р подложке а); и на эпитаксиальной подложке – б) [49]

Структуры  $n-/p$ -sub или  $p+/n-$  зачастую используются в КМОП датчиках изображения. Из-за того что покрытия кремния перекрывают видимый и инфракрасный диапазоны  $n-/psub$  и  $p+/n-/psub$  фотодиоды могут применяться в коммерческих КМОП датчика изображений. Благодаря более глубокому залеганию перехода  $n-/psub$ , такой переход более чувствительный к инфракрасному диапазону, т.е. к длинам волн  $>800$  нм, и может быть использован в качестве детектора инфракрасного излучения. Структура  $p+/n-/psub$  при условии, что  $p+$  слой полностью обеднен, может функционировать как pin фотодиод, обеспечивая улучшение чувствительности в диапазоне коротких длин волн. Переходы  $p+/n-$  и  $n-/psub$  фотодиода  $p+/n-/psub$  можно использовать в качестве фототранзистора с высоким усилением. Слой эпитаксии снижает взаимное влияние между ячейками, в частности, в фотодиоде с переходом  $p-epi/p+sub$  ( $p-epi$  – эпитаксиальный слой  $p$ -типа) может снижаться КЭ в инфракрасном диапазоне. Графики спектральных откликов структуры КМОП фотодиодов показанных на Рисунке 1.26а, работающих в фотовольтаическом режиме, без обратного смещения, приведены на Рисунке 1.27а

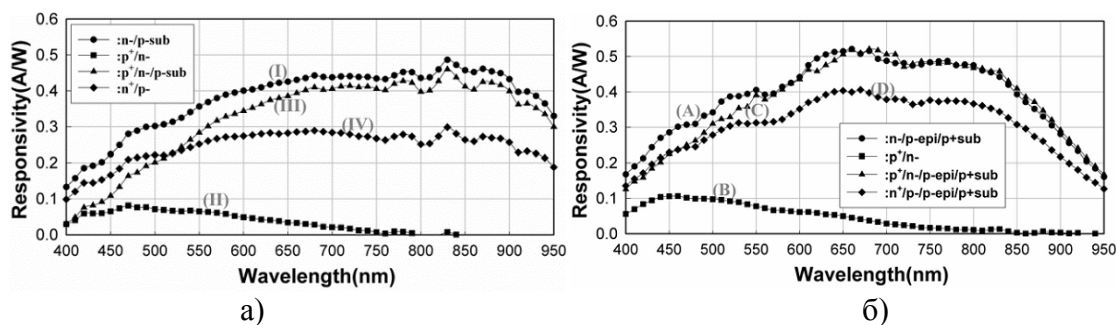


Рисунок 1.27 – Измеренные спектральные характеристики четырех КМОП фотодиодов с нулевым смещением для обычной подложки – а) и подложки с эпитаксией – б) [49]

Наилучший спектральный отклик на длине волны 650 нм имеют структуры  $n-/p$ -sub и  $n-/p-epi/psub$ . КМОП фотодиоды типа  $n^+/p$ - обладают чувствительностью в 0,29 А/Вт, а суммарная чувствительность структуры  $n^+/p-/p-epi/p+sub$  достигает 0,4 А/Вт при длине волны 650 нм. На структуре  $p+/n-epi/p-epi/psub$  выполненной по технологии 600 нм OPTO ASIC CMOS и длине волны источника 675 нм получен отклик до 76 А/Вт при обратном смещении 8 В. На структуре

$p^+/nwell/p\text{-}epi/p\text{-}sub$  и длине волны источника 850 нм получен отклик до 36 А/Вт при обратном смещении 8 В [50]. Также есть публикация в которой описывается МДМ (металл-диэлектрик-метал) фотодетектор разработанный по КМОП технологии [51], активная структура которого  $p^+/nsub$ . При обратном смещении в 10 В и длине волны 830 нм, со структуры получилось снять 0,17 А/Вт. В другом источнике рассматривается структура BDJ (структура заглубленного двойного перехода) фотодиода [52], который представляет собой глубокий карман в котором дополнительно сформирован еще один p-n переход, сечение такой структуры показано на Рисунке 1.28а, а на Рисунке 1.28б показана примерная топология такой структуры.

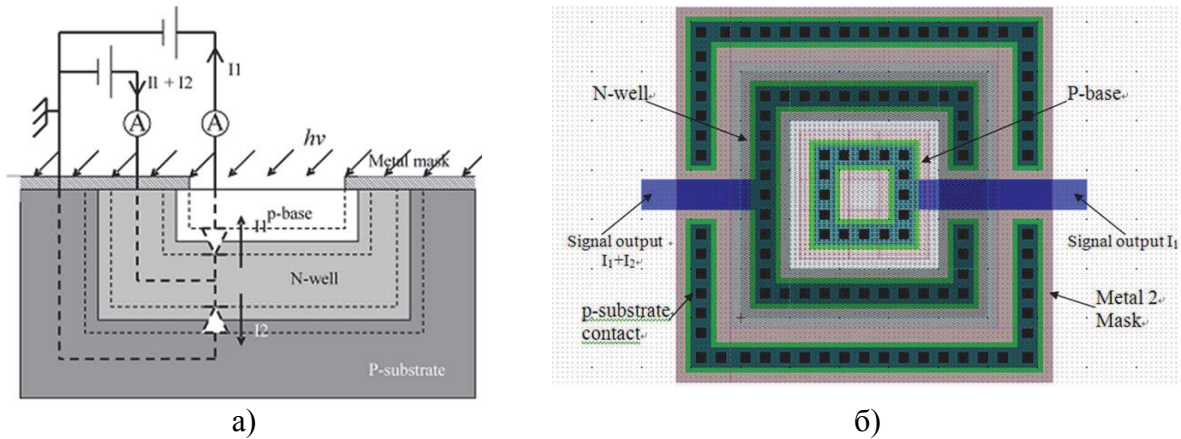


Рисунок 1.28 – Сечение структуры КМОП BDJ фотодиода – а), и ее примерная топология [52]

Очевидным плюсом такой конструкции является возможность формирования нескольких таких фотодиодов на одном кристалле и отсутствием их взаимного влияния во время работы. И как отмечается в [53], при использовании структуры с BDJ  $p^+/nwell/p\text{-}sub$  влияние соседней структуры на измеряемый фотодиод составило 0,35% КЭ при освещении только активной области соседнего элемента, и 3,5% при освещении промежутка между двумя удаленными фотодиодами.

Еще одной разновидностью фотодетекторов являются фототранзисторы, которые могут генерировать намного больший токовый сигнал при тех же размерах что и фотодиод, но при этом они ограничены полосой пропускания в несколько сотен кГц. В добавок зависимость тока от освещенности имеет нелинейный характер, что делает их менее привлекательным вариантом для многих целей. На Рисунке 1.29 приведены сечение и пример топологии вертикального p-n-p фототранзистора. В литературе приводится достаточное количество примеров реализации как вертикальных, так и латеральных фототранзисторов (52-56).

Помимо этого существует достаточное количество примеров реализации фотодиодов по КМОП технологии [59-65, 49] от 40 нм [66] до 1.6 мкм [67], а также фотодиодов и фототранзисторов по технологии SiGe BiCMOS [68].



Среди фотодиодов выделяются лавинные фотодиоды, которые получили наибольшее применение при детектировании однофотонных явлений. Однако и в этих фотодиодах используется сильное обратное смещение. В режиме работы, под воздействием обратного смещения близкого к пробое, одного фотона хватает чтобы вызвать лавинный эффект, который активирует генерацию и высокий токовый сигнал [69-74]. Из-за особенностей работы таких фотодиодов, при их проектировании применяются защитные кольца, предотвращающие поверхностный пробой. Такая защита применяется во многих элементах технологий CMOS и BiCMOS [75 -80].

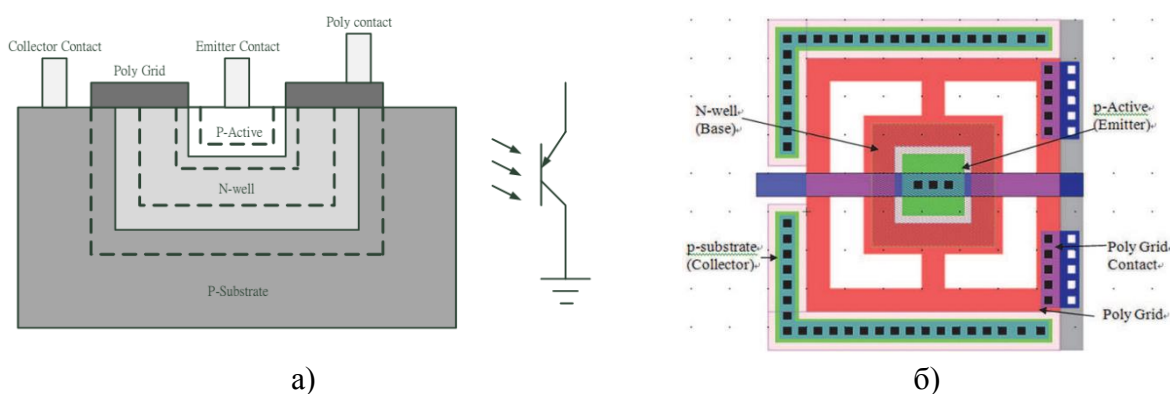


Рисунок 1.29 – Сечение вертикального p-n-p фототранзистора – а); топология – б)

Из-за работы с квазистатическими давлениями для исследуемого датчика на фотовольтаическом эффекте высокое быстродействие ФЭ не требуется. Размер фотодиодов должен быть сопоставим с размером светового пятна. Фотодиоды должны работать без внешнего электрического питания. Ко всему прочему стоимость конечного продукта имеет большое значение. Таким образом для изготовления ФЭ ФВУ возможно использование стандартных процессов отечественной КМОП технологии с проектными нормами 3 мкм.

### Выводы к главе 1

Анализ литературы показывает, что в России и за рубежом комплексного исследования по созданию волоконно-оптического датчика на фотовольтаическом эффекте не проводилось. Однако к началу постановки настоящей работы группой исследователей-разработчиков, возглавляемой научным руководителем проф. В.А. Гридчиным (кафедра ППиМЭ НГТУ), были показаны потенциальные возможности создания фотовольтаических датчиков нового поколения, обладающих лучшими, в сравнении с аналогами характеристиками, например, высокой чувствительностью и низкой нелинейностью выходного сигнала, более простой схемой обработки выходного сигнала.

В частности, вариант исполнения конструкции фотовольтаического датчика давления предложен группой авторов в патенте [81]. Конструкция имеет прототипом датчик давления [23]

с кремниевой рамкой, профилированной мембранной, на которой расположен жесткий центр с закрепленным оптоволоконном. Авторы патента предложили сместить жесткий центр мембраны в сторону закрепления оптоволоконна на жесткой рамке с целью увеличения чувствительности конструкции, как показано на Рисунке 1.30(а-б). Отклонение оптоволоконна жестким центром является аналогом задачи аналогична изгиба жестко защемленной балки, рассматриваемой в курсе теории сопротивления материалов [82]. А прогиб мембраны с ЖЦ рассматривался в докторской диссертации Драгунова В.П. [83]. Напротив свободного конца оптоволоконна сформирован фотодиод. От прототипа датчик отличается большей чувствительностью. Данная конструкция сенсора обеспечивает выходной сигнал с высоким уровнем нелинейности.

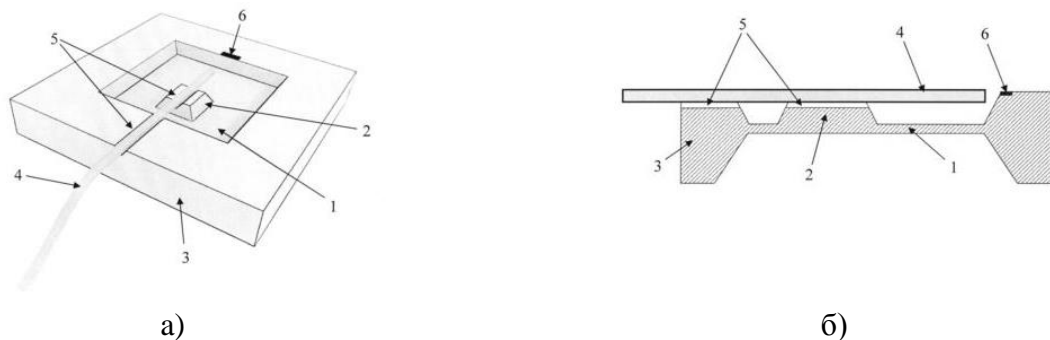


Рисунок 1.30 – Фотовольтаический датчик давления: общий вид – а); сечение – б), где 1 - квадратная измерительная диафрагма, 2 - жесткий центр, 3 - опорная рамка, 4 – оптоволоконно, 5 – V-канавки, 6 – фотодиод [81]

Устройство работает следующим образом: при подаче давления на измерительную диафрагму, жесткий центр отклоняется, смещая светоизлучающий конец оптоволоконна. Отклонение свободного конца оптоволоконна приводит к изменению степени засветки фотодиода и генерируемого им фототока. Оптоволоконно зафиксировано в V-канавках опорной рамки и жесткого центра. Из задачи [82], следует, что смещение жесткого центра позволяет повысить чувствительность оптомеханического узла благодаря увеличению суммы нормальной  $S_n$  и поворотной  $S_f$  составляющих общей чувствительности  $S$  отклонения светоизлучающего конца оптоволоконна к измеряемому давлению. Однако необходимо исследовать влияние размеров мембраны, ЖЦ и установить оптимальное положение, с учетом габаритов ЖЦ и требуемой чувствительности. В предложенной конструкции характеристики подобны прототипу [23] – куполообразный выходной сигнал, из-за размещения фотодиода на рамке.

В ходе дальнейшего развития данной концепции построения датчиков для линейаризации выходной характеристики датчика давления авторы [84] предложили использовать составной (двухкристальный) датчик (см. Рисунок 1.31) с кристаллом с кремниевой рамкой и смещенным островком с жестким креплением оптоволоконна, на втором (дополнительном) кристалле которого сформирована пара планарных фотодиодов,

разделенных узким промежутком. Предложенная конструкция позволяет точно позиционировать оптоволокно напротив двух фотодиодов в дифференциальном включении, с помощью направляющих оптоволокон и сквозных отверстий, для минимизации начального разбаланса датчика при отсутствии измеряемого давления. Таким образом, при отсутствии внешнего давления световое пятно, из свободного конца оптоволокон, равномерно освещает два фотодиода. Дифференциальная схема позволяет вычитать генерируемые сигналы друг из друга и на выходе датчика получается нулевой выходной сигнал, при условии что в отсутствии измеряемого давления световое пятно симметрично освещает оба фотодиода. При измерении давления мембрана изгибается, приподнимая жесткий центр и оптоволокно, световое пятно смещается по поверхности фотодиодов, меняется площадь засветки и генерируемый электрический сигнал. Моделирование и детальные исследования фотодиодов были выполнены в наших работах [85, 86]. Зависимость разности коэффициентов засветки двух фотодиодов в предполагаемом диапазоне перемещения светового пятна (0÷40 мкм) обладает существенно меньшей нелинейностью равной 3.5%, чем для конструкции на Рисунке 1.30.

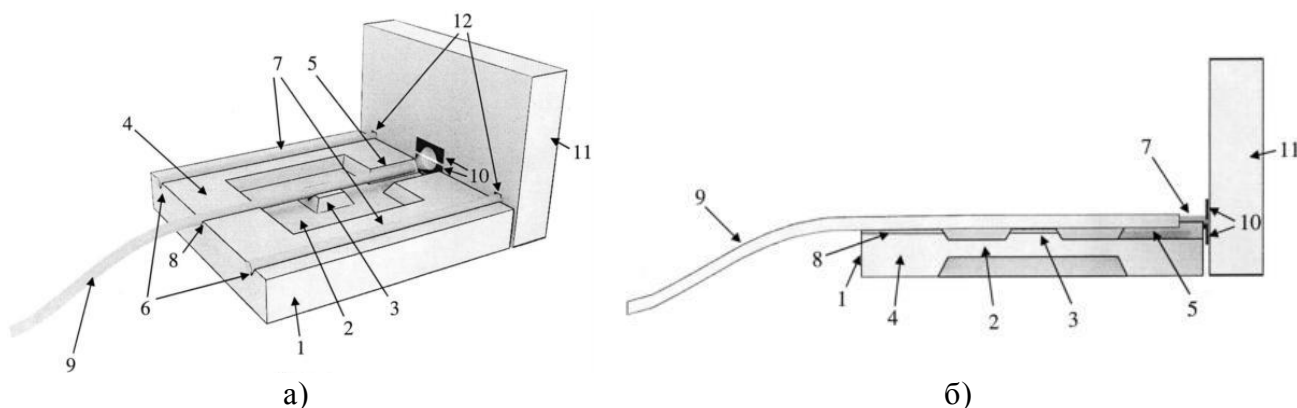


Рисунок 1.31 – Фотовольтаический датчик давления: общий вид – а); сечение – б), где 1 – кристалл упругого элемента, 2 – упругая мембрана, 3 – жесткий центр, 4 – рамка, 5 – U-канавка, 6 – направляющие V-канавки, 7 – направляющие, 8 - V-канавка, 9 – оптоволокно, 10 – фотодиоды, 11 – кристалл фоточувствительного элемента, 12 – соединительные отверстия [84]

Из-за необходимости фиксации оптоволокон на жестком центре увеличивается жесткость конструкции упругого элемента, тем самым снижая отклонение свободного конца оптоволокон и чувствительность датчика. Для решения этих недостатков нами была предложена новая конструкция ОМУ, в которой реализуется двухточечная схема нагружения оптоволокон за счёт добавления в конструкцию дополнительного профилированного кристалла крышки, который накрывает профилированный кристалл упругого элемента с закрепленным на нем оптоволоконном. При этом жесткость конструкции увеличивается в меньшей степени, а задача аналогична задаче изгиба жестко защемленной балки с двумя точечными встречными нагрузками, рассматриваемой в курсе теории сопротивления материалов [80]. 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 [87].

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 ФЭУ с фотодиодами – 11 и соединительными отверстиями 12 для направляющих, как показано на Рисунке 1.32.

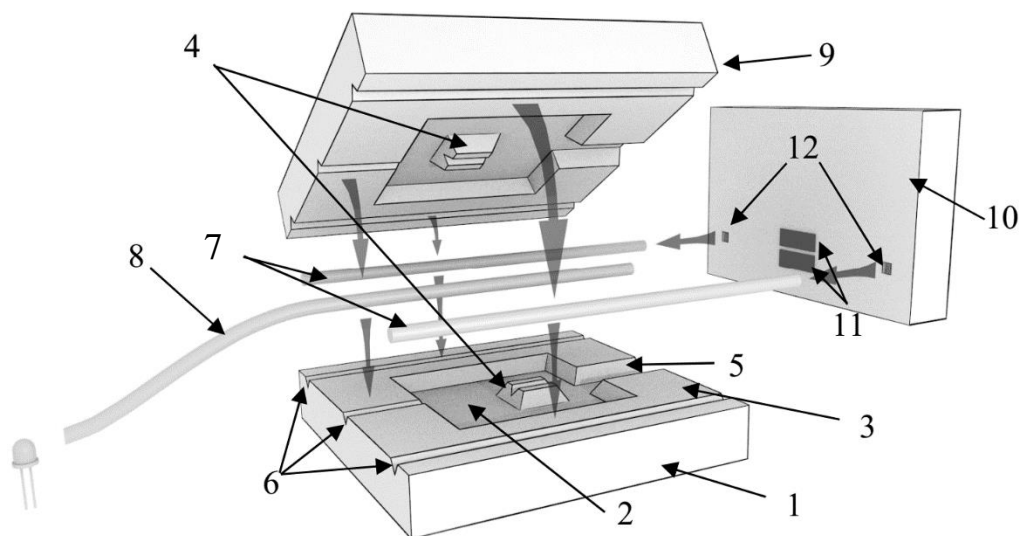


Рисунок 1.32 – Фотовольтаический датчик давления с двухточечной схемой нагружения, см. расшифровку в тексте [87]

Принимая во внимание предварительно установленную перспективность характеристик составной конструкции датчика давления, были сформулированы следующие направления настоящего исследования. При сборке такой конструкции датчика на начальных этапах разработки целесообразно использовать источник излучения с длиной волны видимого диапазона.

**Объектом исследования** является оптоволоконный МОЭМС кремниевый фотовольтаический датчик давления составного типа на основе кремниевых кристаллов оптомеханического и фотовольтаического узлов, общие принципы проектирования таких датчиков и его характеристики. При этом исследования предполагают развитие конструкции датчика на основе предыдущих конструкций и базовой составной концепции датчика.

В частности, представляет интерес концепция оптоволоконного датчика с двухточечной схемой нагружения, объединяющая в себе технологичность сборки датчика, простоту обработки выходного сигнала, высокую чувствительность и помехозащищенность, пониженную температурную зависимость и нелинейность выходного сигнала в выбранном диапазоне



перемещений светового пятна. Работу датчика можно описать следующим образом: световой поток, подаваемый через оптоволокно, модулируется измеряемым давлением в кремниевом упругом элементе, изготовленном по технологии микросистемной техники, далее световой поток падает на фоточувствительные элементы, в которых благодаря фотовольтаическому эффекту возникает электрический сигнал равный разности фототоков отдельных фоточувствительных элементов, пропорциональный количеству распределённых квантов света, сгенерированный фототок регистрируется системой обработки сигнала. В таком датчике кремниевому чипу не сообщается электрическая энергия от внешних источников, он имеет широкие функциональные возможности и может работать с постоянным и переменным уровнем засветки, а также применяться во взрыво- и пожароопасных средах.

Важно отметить, что при разработке такого датчика необходимо разработать аналитические модели для этапа предварительной разработки, численные – для уточнения параметров узлов, современные средства моделирования. Целесообразно технологическую реализацию конструкции согласовать со стандартными технологическими возможностями (оборудованием и технологическими операциями) отечественных производителей твердотельных интегральных микросхем на подложках кремния, то есть обеспечить возможность изготовления кристаллов на отечественном микроэлектронном производстве.

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

**Целью диссертационной работы** является исследование и разработка конструктивно-технологических основ создания оптоволоконного МОЭМС КФДД.

Для достижения поставленной **цели** были сформулированы и решены следующие **задачи**:

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

10) 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.

11) 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 оптоволокном.

12) 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.

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

14) 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.

15) Исследовать характеристики ФЭ и преобразовательную характеристику КФДД.

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

## ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОМЕХАНИЧЕСКОГО УЗЛА КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ

### 2.1 Общая концепция кремниевого фотовольтаического датчика давления

Предложенный нами кремниевый фотовольтаический датчик давления имеет оригинальную базовую конструкцию, которая в общем виде включает в себя профилированный кристалл кремния с УЭ мембранного типа с ЖЦ, оптоволокну для подведения оптического излучения и кристалл кремния ФВУ с интегральными ФЭ, расположенный перпендикулярно оси оптоволокну.

Кремниевый фотовольтаический датчик давления (КФДД) представляет собой сложную конструкцию, которая состоит из ОМУ и ФВУ (Рисунок 2.1). Назначение ОМУ – преобразование измеряемого давления в изменение положения светового пятна, попадающего на ФВУ. Таким образом, ОМУ должен включать в себя механический элемент, способный деформироваться под действием измеряемого давления и, тем самым, менять пространственное положение конца оптоволокну, рассматриваемого как источник излучения для ФВУ. При этом излучение в оптоволокну вводится от внешнего по отношению к датчику источника, например светодиода. Самый распространенный механический элемент, используемый в микросистемной технике и способный деформироваться под действием измеряемого давления, является кремниевый УЭ мембранного типа. Упругий элемент формируется на жесткой рамке, обрамляющей мембрану со всех сторон, что обеспечивает ее жесткое защемление, как показано на Рисунке 2.1. При этом оптоволокну должно быть зафиксировано на поверхности мембраны таким образом, чтобы перемещаться в соответствии с изгибом мембраны. Для этого оптоволокну необходимо зафиксировать на жесткой рамке УЭ, а для более точной передачи изгиба мембраны сформировать на ее поверхности жесткий центр (ЖЦ). Отклонение излучающего конца оптоволокну регистрируется матрицей фотодиодов, сформированной в плоскости ФВУ, и выражается в изменении генерируемого ими фототока или напряжения. ФВУ расположен перпендикулярно оси оптоволокну и это является принципиальной особенностью датчика. Зависимость генерируемого фототока или напряжения от измеряемого давления является преобразовательной характеристикой датчика.

Для повышения точности позиционирования и фиксации оптоволокну вдоль осевой линии мембраны на поверхности УЭ создан специальный паз, в который можно поместить и закрепить оптоволокну. Этот паз может представлять собой V-образную канавку [88]. При этом островок и V-образная канавка формируются в едином технологическом цикле анизотропного травления

кремния в водном растворе гидроксида калия КОН. Излучающий конец оптоволокон должен находиться в подвешенном состоянии в U-образной полости, которая должна быть сформирована в жесткой рамке одновременно с мембраной и V-канавками кристалла ОМУ.

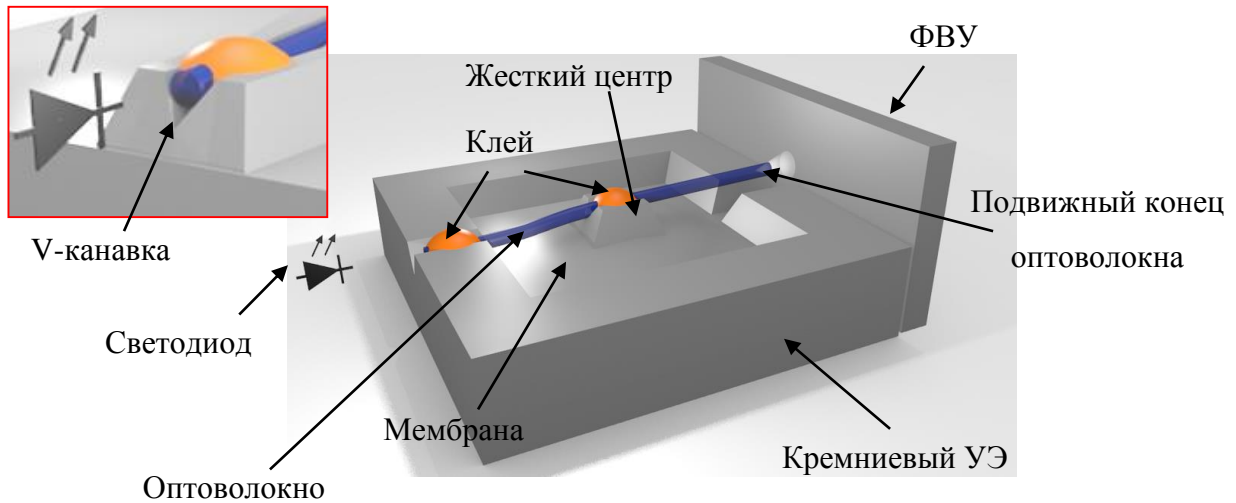


Рисунок 2.1 – Базовая конструкция ОМУ

Особенностью датчика с конструкцией, представленной на Рисунке 2.1, является требование, чтобы жесткость мембраны была много выше жесткости оптоволокон. В противном случае, это может выразиться в слишком малых деформациях мембраны под действием измеряемого давления и, как следствие, низкой чувствительности датчика. Вариант конструкции ОМУ (Рисунок 2.1) является базовым для исследования.

Кинематическая схема предложенного нами датчика такой конструкции представлена на Рисунке 2.2. В ее состав входят ОМУ и ФВУ.

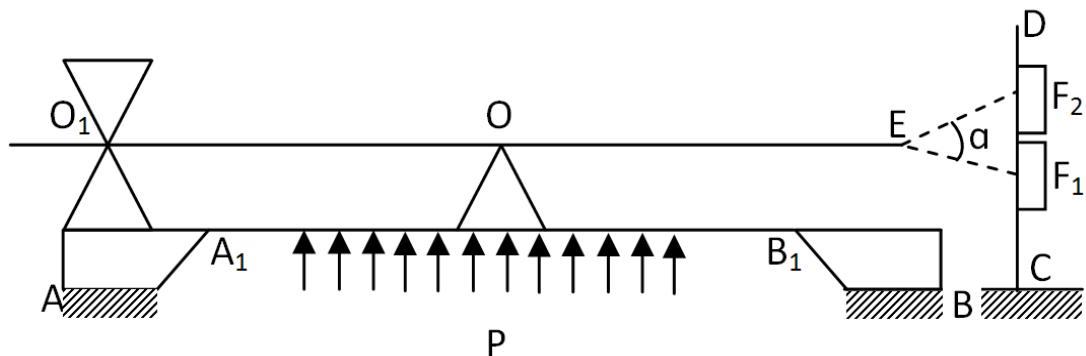


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема датчика КФДД

Оптомеханический узел АОВ включает квадратную кремниевую профилированную мембрану с тонкой частью  $A_1B_1$  и наружными размерами  $AB$ . На лицевой (планарной) стороне мембраны имеется ЖЦ  $O$ , в котором располагается центрирующая V-канавка, в которую укладывается рабочее оптоволокон  $O_1OE$ . Левый край оптоволокон жестко зашпелен в точке  $O_1$ , а правый край  $E$  – свободен. Под действием измеряемого давления ( $P$ ) ЖЦ  $O$  перемещается вверх

и изгибает оптоволокно на участке  $O_1O$ . Участок оптоволокну  $OE$  является свободным плечом оптического рычага, который увеличивает амплитуду перемещения конца оптоволокну  $E$  и светового конуса  $EF_1F_2$  с углом  $\alpha$  при вершине.

Фотовольтаический узел DC представляет собой кристалл кремния, на котором размещены два или более фотодиода, расположенных таким образом, чтобы края светового пятна приходились на центры фотодиодов  $F_1$  и  $F_2$ . При перемещении вверх, площадь засветки фотодиодов изменяется (в исходном состоянии, при  $P=0$ , площади засветки идентичны), таким образом, что засветка фотодиода  $F_2$  увеличивается, а фотодиода  $F_1$  – уменьшается. Диоды включаются по дифференциальной схеме, так что при возрастании давления выходной сигнал монотонно увеличивается.

## 2.2 Преобразовательная функция кремниевого фотовольтаического датчика давления

В рассматриваемом датчике давления преобразование измеряемой механической величины – давления в электрический выходной сигнал происходит по схеме, показанной на Рисунке 2.3.

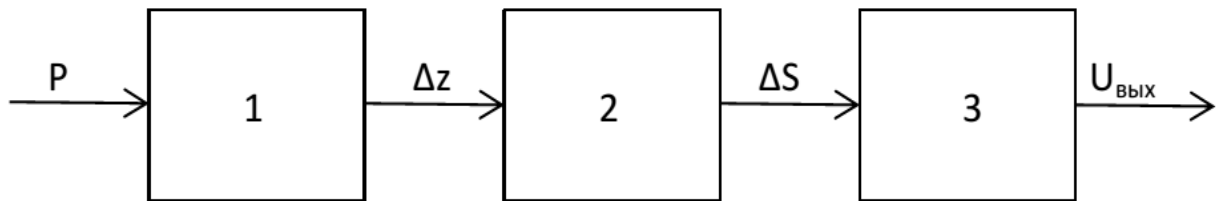


Рисунок 2.3 – Схема преобразования измеряемого давления  $P$  в электрический выходной сигнал

В ОМУ (1) происходит преобразование измеряемого давления в перемещение  $\Delta z = f_1(P)$  конца оптоволокну. Особенностью рассматриваемого типа датчиков является наличие этапа оптического преобразования (2) в ходе которого перемещение оптоволокну  $\Delta z$  трансформируется в изменение площади засветки фотодиодов  $\Delta S$ . По существу, это своеобразный оптический модулятор и в зависимости от конструктивных решений функциональная связь между  $\Delta z$  и  $\Delta S$ ,  $\Delta S = f_2(\Delta z)$  может быть различной. На третьем этапе преобразования, в кремниевом фотодиоде, формируется электрический выходной сигнал, пропорциональный площади засветки и плотности светового потока:  $U_{\text{в}} = f_3(\Delta S)$ . В итоге общая преобразовательная характеристика датчика имеет структуру:

$$U_{\text{в}} = f_3 \left( f_2 \left( f_1(P) \right) \right) = F(P) \quad (2.1)$$

где  $U_e$  – сигнал холостого хода фотодиода,  $f_3, f_2, f_1$  – частные преобразовательные функции. Общая чувствительность датчика определяется стандартным образом:

$$S_P = \frac{\delta U_B}{\delta P} = \frac{\delta F(P)}{\delta P} \quad (2.2)$$

В свою очередь,  $S_P$  определяется через частные функции отдельных этапов преобразования, в соответствии с рисунком 2.3. В линейном приближении имеем:

$$S_P = \frac{\delta f_3}{\delta(\Delta S)} \times \frac{\delta f_2}{\delta(\Delta z)} \times \frac{\delta f_1}{\delta P} \equiv S_3 S_2 S_1 \quad (2.3)$$

где  $S_3, S_2, S_1$  – чувствительности соответствующих этапов преобразования.

## 2.3 Моделирование кремниевого упругого элемента оптомеханического узла

ОМУ определяет такие основные характеристики КФДД, как чувствительность, нелинейность и прочность. Варьируя конструктивные параметры ОМУ КФДД, возможно достигнуть определенного баланса этих характеристик, удовлетворяющего технологическим возможностям его изготовления. Одним из эффективных способов исследования влияния конструктивных параметров ОМУ на характеристики КФДД является численное моделирование. Численное моделирование деформированного состояния ОМУ позволяет исключить затраты на производство экспериментальных образцов и сократить время проектирования датчика. При проектировании датчиков давления необходимо оценивать влияние конструктивных параметров на характеристики датчика. Одним из способов оценки являются аналитические выражения. Далее рассмотрим выражения для ОМУ с одноточечной и двухточечной схем нагружения.

### 2.3.1 Аналитическая модель оптомеханического узла с одноточечной схемой нагружения

Кремниевые фотовольтаические датчики давления являются, слабо исследованными датчиками давления, возникшими на стыке оптоволоконной и традиционной кремниевой микросистемной техники. До сих пор отсутствует какая-либо связанная математическая модель, позволяющая рационально конструировать фотовольтаические датчики давления на основе технологии микросистемной техники. Метод конечно-элементного моделирования позволяет достаточно точно определить технические характеристики разрабатываемой конструкции, однако требуют большого количества входных данных и времени на проведение расчетов. Аналитическая модель зачастую не обладает такой точностью, но при этом позволяет определить общую тенденцию в изменении, например преобразовательной характеристики, изгиба волокна или отклонения свободного конца оптоволоконной структуры. В данном разделе представлены новые результаты исследований по созданию математической модели

ОМУ КФДД для одноточечной схемы нагружения. Модель рассматривается в одномерном приближении относительно направления оптического излучения, как показано на Рисунке 2.4. Рассматриваемая задача ЖЦ будем считать точечным. Для оценочного расчета будем использовать следующие исходные данные: радиус используемого оптоволоконна  $R=62,5$  мкм; модуль Юнга кварцевого оптоволоконна  $E=69$  ГПа; точка приложения силы относительно жестко заземленного конца  $l=1$  мм; длина оптоволоконна от точки приложения силы до свободного конца  $L_1=3$  мм; перемещение ЖЦ направлено по нормали к оси оптоволоконна  $f=1$  мкм.

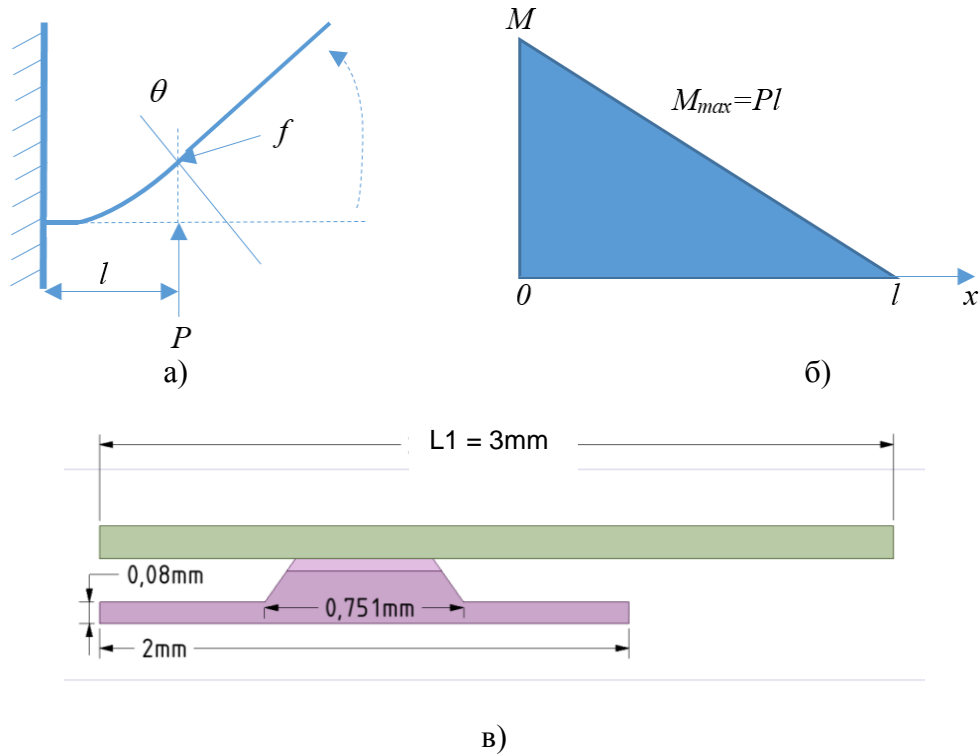


Рисунок 2.4 – Двумерное приближение модели изгиба оптоволоконна от приложенного воздействия – а), распределение изгибающего момента вдоль оптоволоконна – б), сечение исследуемой структуры – в)

Согласно аналогичной задаче по изгибу жестко заземленной балки [82] получаем следующий пример расчета деформации:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{max}(0)}{E}$$

$$\sigma_{max x=0} = \pm \frac{3ERf}{2l^2}$$

$$\varepsilon_{max x=0} = \pm \frac{3Rf}{2l^2}$$

$$\varepsilon_{max x=0} = \pm \frac{3Rf}{2l^2} = \pm \frac{3 \cdot 62,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \pm 0,9375 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_{\max x=0} = \pm \frac{3ERf}{2l^2} = -\frac{3 \cdot 69 \cdot 10^9 \cdot 62,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \pm 6,47 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

где  $\varepsilon$  – деформация,  $\sigma$  – напряжения,  $E$  – модуль Юнга.

Расчет максимального угла поворота сечения оптоволокна  $\theta_{\max}$  при  $x=L$ :

$$\theta_{\max} = \frac{3f}{2l} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

$$\theta_{\max} (\text{град}) = \frac{180}{\pi} \frac{3f}{2l} = \frac{180 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 86 \cdot 10^{-3} = 0,86^\circ$$

Согласно расчетам  $\sigma_{\max}$  и сравнивая с пределом прочности стекла  $\sim 20$  ГПа, можно сделать вывод, что имеется запас прочности. Перемещение свободного конца оптоволокна в точке  $L_1$  определяется соотношением:

$$y(L_1) = y(l) + (L_1 - l) \operatorname{tg} \theta_{\max}, \quad (2.4)$$

где  $\theta_{\max}$  – угол поворота сечения при  $X = l$ .

Перемещение свободного конца оптоволокна может быть представлено в аналитической форме (2.8) при двух предположениях [86]:

1. Размеры ЖЦ пренебрежимо малы по сравнению с размером мембраны, так что воздействие ЖЦ на оптоволокно можно считать точечным, а диафрагму приближенно - плоской;
2. Жесткость оптоволокна много меньше жесткости кремниевой мембраны. В этом случае можно пренебречь воздействием оптоволокна на прогиб мембраны.

Для рассматриваемого случая одноточечного нагружения прогиб и поворот поперечного сечения оптоволокна под действием силы  $F$ , приложенной в точке  $X = l$ , определяются соотношениями [80]:

$$y(l) = \frac{FL^3}{3EJ}, \quad \theta_m = \frac{FL^2}{2EJ}, \quad (2.5)$$

где  $F$  – величина приложенной силы,  $J$  – момент инерции кругового сечения оптоволокна:

$$J = \frac{\pi R^4}{4}$$

Приняв, что при  $X=l$  перемещение оптоволокна равно прогибу мембраны  $w_0$ , из соотношений (2.5) можно определить силу  $F$  и угол поворота  $\theta$ :

$$F = \frac{3w_0 EJ}{l^3}, \quad \theta(L) = \frac{3w_0}{2l} \quad (2.6)$$

Для квадратной кремниевой мембраны прогиб ее центра под действием давления  $q$  определяется соотношением [83]:

$$w_0 = C \frac{qa^4}{h^3}, \quad (2.7)$$



где  $a$  – половина стороны мембраны,  $h$  – ее толщина,  $C$  – константа, зависящая от кристаллографической ориентации сторон мембраны,  $q$  – приложенное давление. Если стороны мембраны ориентированы вдоль направлений  $[110]$  (наиболее важный практический случай), то  $C = 1,55 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ .

Учитывая (2.4-2.7) и уравнение прогиба квадратной мембраны с квадратным ЖЦ [83] отклонение конца оптоволоконна в точке  $L_1$  в рамках рассматриваемого приближения получаем:

$$y(L_1, l) = \frac{3}{2} \left( \frac{L_1}{l} - 1 \right) C \frac{q a^4}{h^3} (1 - \delta)^2, \quad (2.8)$$

где  $\delta = \varepsilon/\alpha$ ,  $\varepsilon$  – половина ширины основания ЖЦ,  $\alpha$  – половина стороны мембраны.

Для одноточечной схемы нагружения, при толщине мембраны  $h=80 \text{ мкм}$ ,  $L_1 = 3 \text{ мм}$ ,  $a = 1 \text{ мм}$  и приложенном давлении  $q = 550 \text{ кПа}$  зависимость отклонения свободного конца оптоволоконна от точки приложения силы имеет следующий вид [89], Рисунок 2.5. Как видно из рисунка 2.5, чем ближе точка приложения силы к заземленному краю оптоволоконна, тем сильнее отклонение свободного конца  $y(L_1, l)$  или  $U_y$ . Обратным воздействием оптоволоконна можно пренебречь вследствие малости его жесткости в сравнении с мембраной. При смещении точки приложения силы на  $25 \text{ мкм}$  от жестко заземленного конца оптоволоконна, отклонение свободного конца может достигать  $114 \text{ мкм}$ . На практике оказывается невозможным создание точки приложения силы так близко к заземленному концу оптоволоконна из-за размерных особенностей ЖЦ. При центральном положении точки приложения силы  $x = 1000 \text{ мкм}$ , отклонение свободного конца может достигать  $\sim 1.9 \text{ мкм}$ , что для практических применений достаточно мало.

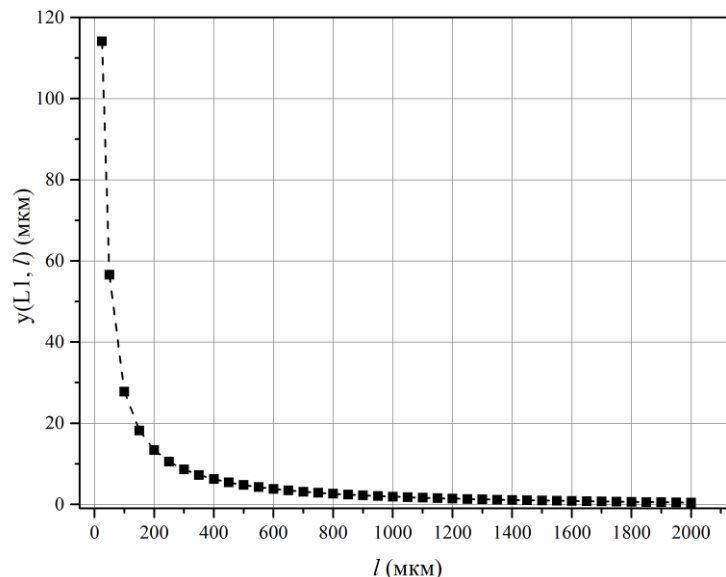


Рисунок 2.5 – Отклонение свободного конца оптоволоконна от точки  $L$  приложения силы

### 2.3.2 Аналитическая модель оптомеханического узла с двухточечной схемой нагружения

В данном разделе представлены новые результаты исследований по созданию математической модели ОМУ КФДД для двухточечной схемы нагружения. Модель также

рассматривается в одномерном приближении относительно направления оптического излучения, как показано на Рисунке 2.6.

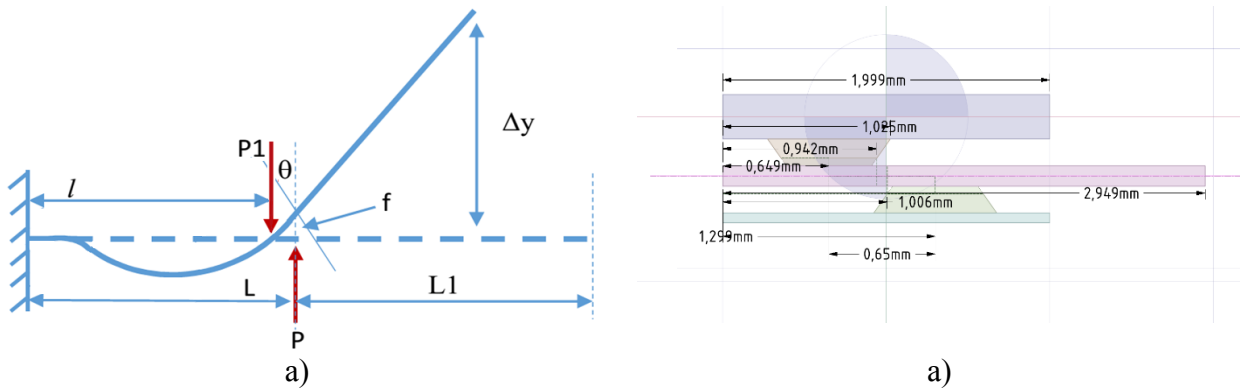


Рисунок 2.6 – Двумерное приближение модели изгиба оптоволокна от приложенного воздействия при использовании двух ЖЦ– а), сечение исследуемой структуры – б)

Относительно одноточечной схемы нагружения, в данной модели происходит смещение точки приложения силы P в точке L и используется противодействующая сила P1 в точке l, а также участок оптоволокна дополнительно разбивается на участки 0 – l, l – L, L – L1. Общее решение для прогибов оптоволокна для двухточечной схемы нагружения приведено на Рисунке 2.7 и может быть рассчитано по следующим формулам:

1)  $x < l$

$$y(x) = \frac{P}{EJ} \left[ -\frac{3}{4} \left( \frac{L}{l} - \frac{1}{3} \right) \times x^2 \left( l - \frac{x}{3} \right) + \frac{x^2}{2} \left( L - \frac{x}{3} \right) \right] = \frac{P}{EJ} \times F_1(L, l, x)$$

2)  $L > x > l$

$$y(x) = -\frac{P}{EJ} \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{L}{l} - \frac{1}{3} \right) \times l^2 \left( x - \frac{l}{3} \right) - \frac{x^2}{2} \left( L - \frac{x}{3} \right) \right] = -\frac{P}{EJ} \times F_2(L, l, x)$$

(2.9)

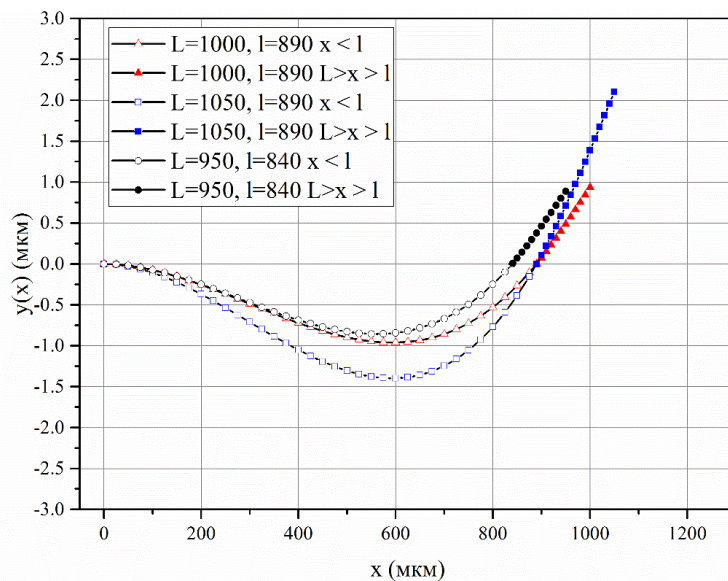


Рисунок 2.7 – Общее решение для прогибов оптоволокна для двухточечной схемы нагружения

Общее решение для угла поворота сечения оптоволокна приведено на Рисунке 2.8 и может быть рассчитано по следующим формулам:

1)  $x < l$

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{F}{EJ} x \left[ -\frac{3}{2} \left( \frac{L}{l} - \frac{1}{3} \right) \left( l - \frac{x}{2} \right) + \left( L - \frac{x}{2} \right) \right] = \frac{F}{EJ} \times \varphi_1(L, l, x)$$

2)  $L > x > l$

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{F}{EJ} \left[ -\frac{3}{4} \left( \frac{L}{l} - \frac{1}{3} \right) l^2 + x \left( L - \frac{x}{2} \right) \right] = \frac{F}{EJ} \times \varphi_2(L, l, x) \quad (2.15)$$

Поворот сечения можно вычислить по формуле:

$$\theta_{x=L} = \frac{F}{EJ} \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{L}{l} - \frac{1}{3} \right) l^2 - \frac{L^2}{2} \right] \quad (2.10)$$

Отклонение свободного конца оптоволокна рассчитывается по формуле:

$$\Delta y = y(L) + (L_1 - L) \operatorname{tg} \theta(L) \quad (2.11)$$

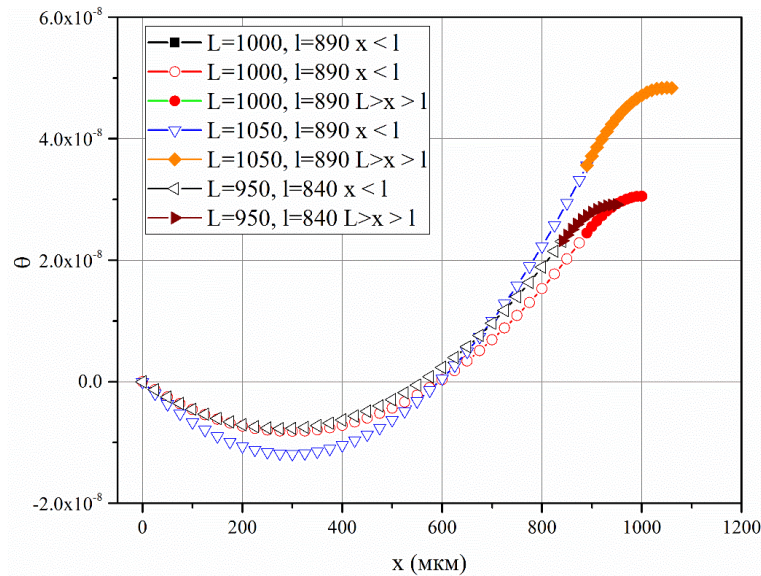


Рисунок 2.8 – Общее решение для угла поворота сечения оптоволокна

*Решение полного уравнения прогиба и отклонения свободного конца оптоволокна*

Полное решение уравнений прогиба  $w_0$  и отклонения свободного конца  $y(L_1)$  оптоволокна для двухточечной схемы приводит к следующим формулам:

$$\begin{aligned} y(L_1) &= y(L) + \operatorname{tg} \theta (L_1 - L) = y(L) + \frac{3}{2} \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \frac{y(L)}{L} (L_1 - L) = y(L) \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \frac{(L_1 - L)}{L} \right) = \\ &= w_0 \left[ 1 + 3 \frac{2 - 3k + k^2}{4 - 9k + 6k^2 - k^3} \frac{(L_1 - L)}{L} \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$0 \leq k = \frac{l}{L} \leq 1 \quad (2.13)$$

$$\Psi(k) = \frac{2-3k+k^2}{4-9k+6k^2-k^3} \quad (2.14)$$

$$y(L1) = w_0 \left[ 1 + 3\Psi(k) \frac{(L1-L)}{L} \right] \quad (2.15)$$

$$w_0 = C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^2 \quad (2.16)$$

Если стороны мембраны ориентированы вдоль направлений [110] (наиболее важный практический случай), то  $C = 1,55 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ . Для значений  $a=1000 \text{ мкм}$ ,  $h = 80 \text{ мкм}$ :  $w_0(q=550 \text{ кПа}) = 1,665 \text{ мкм}$ ,  $w_0(q=2000 \text{ кПа}) = 6,055 \text{ мкм}$ . На Рисунке 2.9 приведена зависимость  $y(k)$ , при  $P = 550 \text{ кПа}$ :

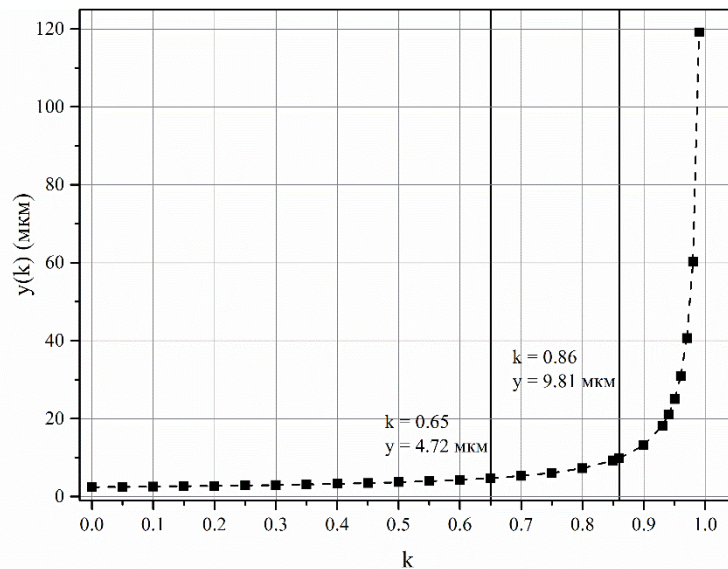


Рисунок 2.9 – Зависимость отклонения свободного конца оптоволоконного датчика от отношения  $k=l/L$  для двухточечной схемы нагружения [87]

Как видно из рисунка при отношении  $k=0,65$  отклонение свободного конца оптоволоконного датчика – 4,72 мкм, а при соотношении  $k=0,86$  уже 9,82 мкм.

### 2.3.3 Конечно-элементное моделирование характеристик оптомеханического узла кремниевого фотovoltaического датчика давления

Предложенные аналитические выражения позволяют быстро оценить влияние точек приложения силы, толщины мембраны на отклонения свободного конца оптоволоконного датчика от измеряемого давления. Они позволяют понять в каком направлении двигаться при проектировании ОМУ КФДД. С другой стороны, эти выражения могут быть неидеальны и иметь расхождение с реальными конструкциями. Для проверки предложенных аналитических выражений следует провести более подробный анализ характеристик ОМУ с помощью методов

конечно-элементного моделирования. Такое моделирование позволит оценить нелинейность, чувствительность и геометрические параметры ОМУ, для последующей разработки фотошаблонов кристаллов ОМУ.

### 2.3.4 Конечно-элементная модель оптомеханического узла кремниевого фотovoltaического датчика давления с одноточечной схемой нагружения

Исследование влияния конструктивных параметров ОМУ КФДД на его характеристики выполнялось в пакете программ ANSYS Workbench. Модель УЭ с фиксированным оптоволоконным кабелем представлена на Рисунке 2.10. Симметрия ОМУ позволила ограничиться моделированием  $\frac{1}{2}$  части структуры. Конечно-элементная модель была составлена из элементов SOLID186 с необходимым уплотнением сетки в областях повышенной концентрации механических напряжений. SOLID186 – конечный элемент второго порядка, составленный из 20 узловых точек, которые описывают форму гексаэдра, что обеспечивает повышенную точность решения. Каждый узел имеет по три степени свободы  $u_x, u_y, u_z$ . Конечный элемент предназначен для моделирования трехмерных объемных структур. Упругие свойства кремниевого УЭ были определены в виде полной матрицы упругих коэффициентов с учетом правила сокращения индексов для матричной формы записи анизотропных свойств кремния, принятых в пакете программ ANSYS. При проведении математического моделирования необходимо учитывать такие параметры как модуль Юнга и коэффициент Пуассона оптоволокна. В таблице 2.1 приведены данные по современным оптоволоконкам из литературных источников.

Таблица 2.1 – Параметры оптоволокон

№	Е, ГПа	Оптоволоконно Сердцевина/оболочка/оплетка, мкм	коэфф. Пуассона	коэфф темп расширения 1/С
[90]	60,2	40/125/-	-	-
[91]	71,8	-/125/-	-	-
[92]	55,1	10/120/-	0,29	
[93]	73,8	-/125/-	0.25/0.25	5.04e-7
[94]	69,2	-/125±1/-	-	-
[95]	72,8	5/125/-	-	-
[96]	46,2	x/125/-	0,245	8e-5
[97]	69,0	-/125/-	0,3	-
[98]	83	62,5/125/-	-	-
[99]	73,1	-/-/-	0.17	5.5e-5
[100]	58,7-71,1(120±10 мм) 70,9-81,7(220±15 мм)	62,5/125/-	-	-
[101]	Е <sub>0</sub> =72 Е(ε)= 72-94	-/-/-	-	-

Для первоначального анализа выберем значение модуля Юнга  $E = 69$  ГПа [97] и коэффициента Пуассона  $\nu = 0.17$  для описания упругих свойств оптоволоконной оболочки [99]. Обычно оптоволоконно состоит из стеклянной сердцевины и оболочки, которые защищены полимерным материалом оплетки.

Способ задания граничных условий и нагрузки для конечно-элементной модели мембраны приведены на Рисунке 2.11. Граничные условия были определены в виде полного ограничения в перемещениях узлов боковой плоскости УЭ и плоскости сечения неподвижного конца оптоволоконной оболочки, см. Рисунок 2.11(а):

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad w = 0.$$

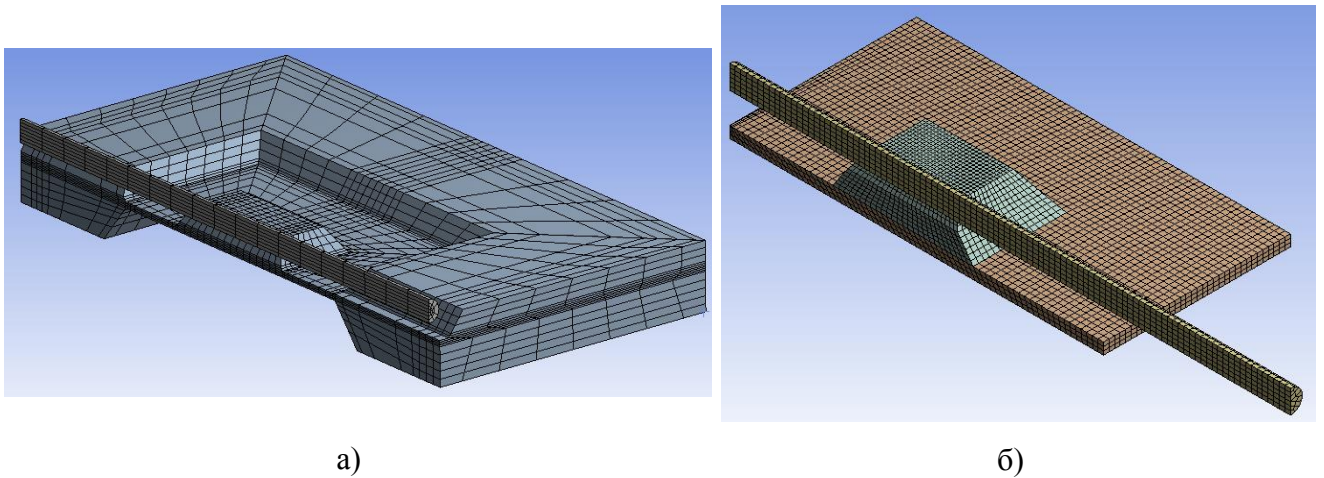
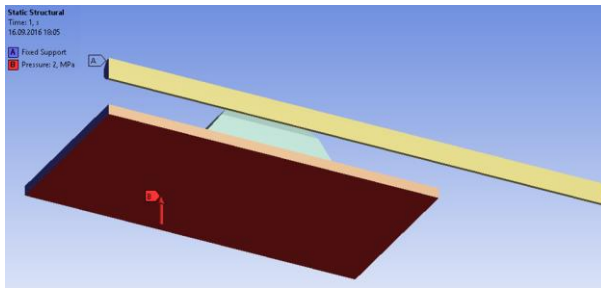


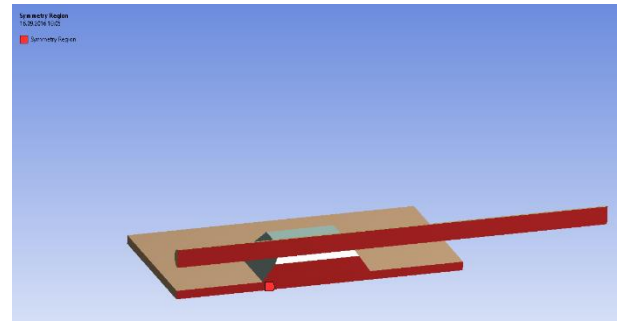
Рисунок 2.10 – Конечно-элементная модель ОМУ с одноточечной схемой нагружения КФДД с рамкой – а); без рамки – б)

Симметричные граничные условия были определены в виде ограничения перемещения узловых точек лежащих в плоскости симметрии ОМУ в нормальном по отношению к этой плоскости направлении, см. Рисунок 2.11(б). Распределенная нагрузка  $P = 20$  МПа была приложена ко всей поверхности подмембранной полости, Рисунок 2.11(а). Вычисление отклонений оптоволоконной оболочки производилось вдоль оси оптоволоконной оболочки с помощью геометрии типа *Path*, Рисунок 2.11(в), а вычисление максимальных прогибов производилось вдоль оси симметрии УЭ с помощью геометрии типа *Path*, Рисунок 2.11(г). Связь между сетками конечных элементов кремниевого УЭ и оптоволоконной оболочки описана с помощью контактных пар. Области крепления оптоволоконной оболочки к поверхности УЭ описаны с помощью контактных пар жесткой фиксации (*Bonded*) [15] и представлены на Рисунке 2.12. Эти же области могут быть определены как места скользящего соприкосновения без трения оптоволоконной оболочки с гранями V-канавки определены с помощью контактных пар *Frictionless*, Рисунок 2.12, которые допускают возможность образования зазора между соприкасающимися поверхностями моделей.

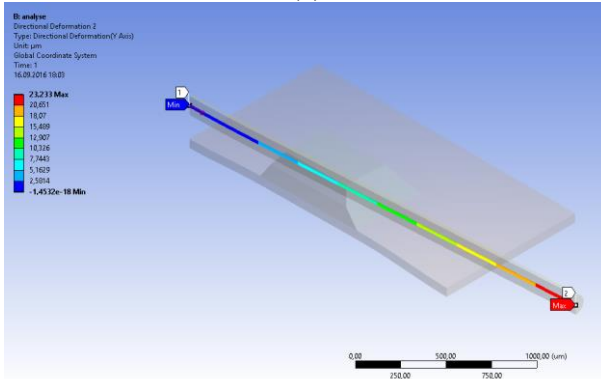




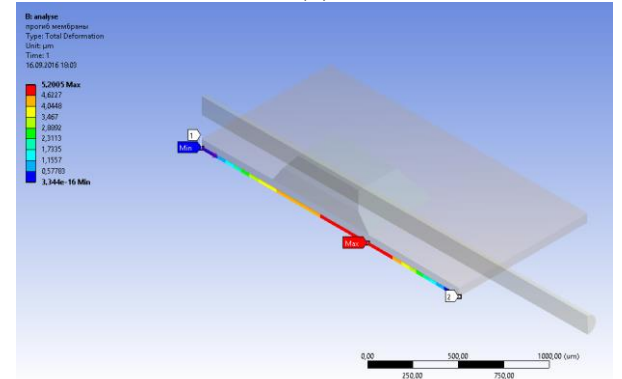
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.11 – Граничные условия модели ОМУ: (а) области полного ограничения в перемещениях; (б) симметричные граничные условия; (в) геометрия типа Path вдоль середины оптоволокна по оси симметрии; (г) геометрия типа Path вдоль мембраны по оси симметрии

Эффективное управление вычислительным экспериментом было организовано с помощью проекта, представленного на Рисунке 2.13. Проект имеет взаимосвязанную модульную структуру с управляющими блоками параметрического анализа.

Модуль *A - Geometry* содержит информацию о структуре и размерах кремниевого УЭ и оптоволокна. Все основные геометрические размеры параметризованы и допускают возможность их варьирования в широких пределах.

Модуль *B - Static Structural* предназначен для нелинейного расчета напряженно-деформированного состояния модели ОМУ. Упругие свойства материалов, составляющих ОМУ, были определены в разделе *Engineering Properties*. Параметризованная геометрическая модель была наследована из модуля *A - Geometry*. Раздел *Model* содержит информацию о сетке конечных элементов и методах разметки, с помощью которой она формируется. В разделе *Setup* назначены граничные условия, определена нагрузка, настроен решатель. Процесс расчета напряженно-деформированного состояния ОМУ КФДД разбит на четыре подшага последовательного увеличения приложенной нагрузки, с помощью которых реализуется нелинейная схема решения методом Ньютона-Рафсона. Раздел *Results* предназначен для анализа полученных результатов. Процесс обработки результатов сводится к расчету основных характеристик ОМУ: чувствительности, нелинейности и прочности.

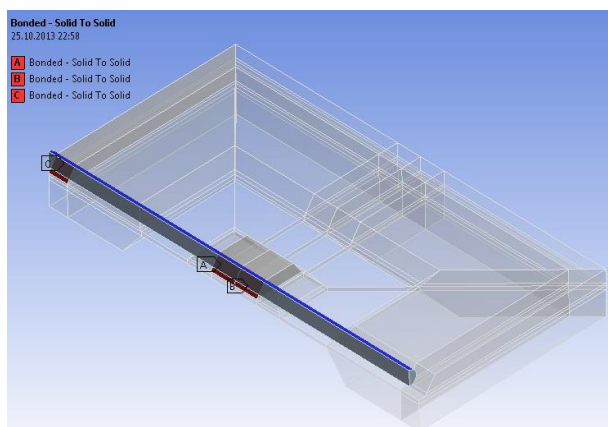


Рисунок 2.12 – Места формирования контактных пар, использованные в модели ОМУ КФДД: жесткой связи – Bonded; или скользящего соприкосновения без трения – Frictionless

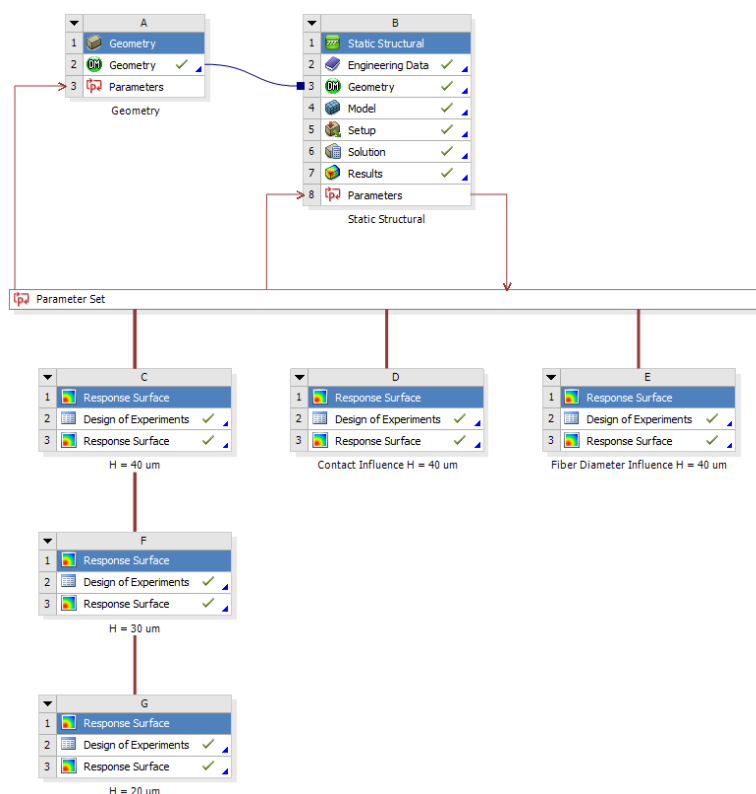


Рисунок 2.13 – Проект вычислительного эксперимента КФДД

*Parameter Set* – блок, в котором хранятся все параметры структуры, с информацией о значениях вычисляемых параметров рассчитанных моделей. К вычисляемым параметрам относятся максимальное отклонение излучающего конца оптоволокна, нелинейность характеристики, связывающей зависимость этого отклонения от приложенного измеряемого давления, а также коэффициент запаса прочности структуры при номинальном давлении.

В блоках параметрического анализа *C*, *F* и *G* – *Response Surface* реализованы вычислительные эксперименты в которых исследуется влияние положение ЖЦ, его размеров, а также толщины мембраны на основные характеристики ОМУ КФДД. Блок параметрического



анализа *D – Response Surface* предназначен для исследования влияния размеров областей жесткой фиксации оптоволокон к кремниевому УЭ на основные характеристики ОМУ КФДД. Влияние размера диаметра оптоволокон на характеристики КФДД исследовано в блоке *E – Response Surface*.

### 2.3.5 Результаты численного моделирования оптомеханического узла с односточечной схемой нагружения

#### 2.3.5.1 Влияние положения и размеров жесткого центра упругого элемента

Смещение края оптоволокон под действием измеряемого давления является сложной функцией набора конструктивных параметров как кремниевого УЭ (размеры мембраны, параметры ЖЦ, в том числе углы скоса) так и оптоволокон. Толщина применяемых оптоволокон вполне сопоставима с толщиной мембраны УЭ, что в сочетании с закреплением оптоволокон на ЖЦ приводит не только к смещению свободного конца оптоволокон  $U_y$ , по нормали к плоскости мембраны, но и к повороту торца на небольшой угол  $\beta$  ( $\operatorname{tg}\beta \approx \beta$ ) [102].

$$U_y = U_{y0} + \beta \cdot l_0, \quad (2.17)$$

где  $U_y$  – отклонение свободного конца оптоволокон,  $l_0$  – длина свободного конца оптоволокон.

Вклад каждого из слагаемых в общую чувствительность  $S = \frac{U_y}{P}$  ОМУ может быть различен и зависит от конструктивных размеров узла. Влияние положения и размеров ЖЦ мембраны на основные характеристики ОМУ КФДД были исследованы для толщин мембраны УЭ  $h = 80, 90$  и  $100$  мкм. Рассмотрены следующие варианты размеров основания ЖЦ  $L = 0.8, 0.9$  и  $1$  мм. Положение ЖЦ варьировалось вдоль средней линии мембраны в сторону закрепленного конца оптоволокон относительно ее средней точки. Эти расчеты выполнялись при номинальном давлении  $P = 2$  МПа и диаметре оптоволокон  $D = 150$  мкм. Общие размеры ОМУ КФДД представлены на Рисунке 2.14.

Зависимости отклонения излучающего конца оптоволокон от размеров и положения ЖЦ представлены на Рисунке 2.15. При увеличении толщины мембраны зависимость отклонения излучающего конца оптоволокон имеет более линейную форму, без выраженных перегибов. Для мембраны толщиной  $h = 90$  мкм, при смещении ЖЦ на  $-0,4$  мм значения отклонения принимают значения  $4.7$  мкм,  $4.35$  и  $4.05$  мкм. А при толщине мембраны  $100$  мкм –  $3.95, 3.62$  и  $3.35$  мкм соответственно для  $L = 0.8, 0.9$  и  $1$  мм.

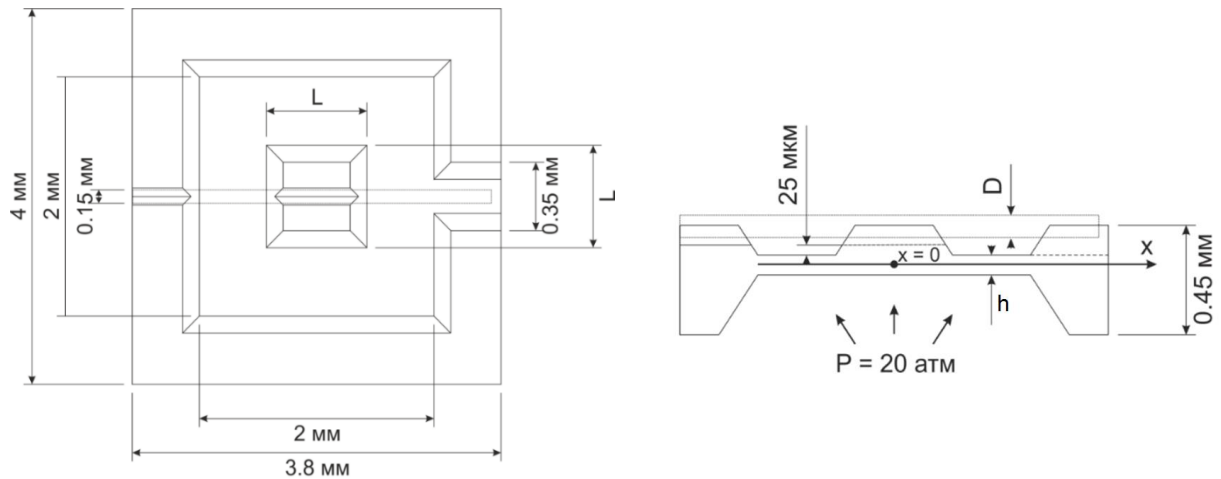


Рисунок 2.14 – Геометрические размеры УЭ КФДД и ось  $x$ , вдоль которой исследуется перемещение ЖЦ

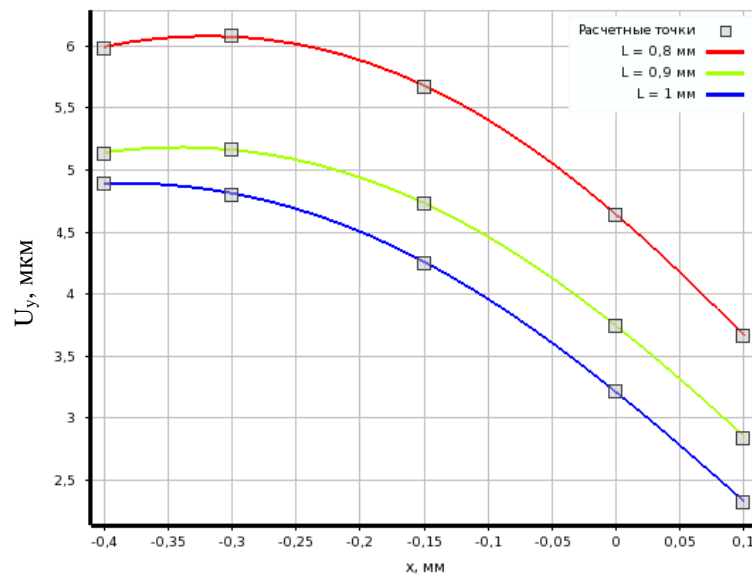


Рисунок 2.15 – Зависимости отклонения излучающего конца оптоволоконна от размеров и положения ЖЦ относительно средней точки мембраны ( $x = 0$  мкм) для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм.

Для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм (Рисунок 2.15), отклонение свободного конца оптоволоконна принимает максимальное значение, когда ЖЦ сдвинут в сторону фиксированного конца относительно средней точки мембраны на  $-0.32$ ,  $-0.34$  и  $-0.37$  мм, соответственно для размеров основания ЖЦ  $L = 0.8$ ,  $0.9$  и  $1$  мм. В остальных случаях отклонение свободного конца оптоволоконна максимально для предельного рассматриваемого значения смещения ЖЦ относительно средней точки мембраны  $x = -0.4$  мм. Чувствительность ( $S$ ), определяемая как коэффициент пропорциональности между смещением излучающего конца оптоволоконна  $U_y$  и приложенным измеряемым давлением  $P$ , максимальна для случая наиболее тонкой мембраны  $h = 80$  мкм и наименее широкого основания ЖЦ  $L = 0.8$  мкм ( $S = 3.05$  мкм/МПа).

$$S = \frac{U_y}{P} \quad (2.18)$$

Информация о прочности представлена с помощью наименьшего значения коэффициента запаса прочности  $K$  в пределах кремниевого УЭ, который для хрупких тел определяется как отношение максимального растягивающего напряжения  $S_{\max}$ , которое может выдержать материал исследуемой структуры ( $S_{\max} = 600$  МПа для кремния, профилированного методом анизотропного травления [88]) к главной компоненте механических напряжений  $S_1$  (2.6):

$$K = \frac{S_{\max}}{S_1} \quad (2.19)$$

Влияние размеров и положения ЖЦ УЭ на коэффициент запаса прочности  $K$  при различных толщинах мембраны УЭ и давлении  $P = 2$  МПа представлено на рисунках 2.16 –2.17.

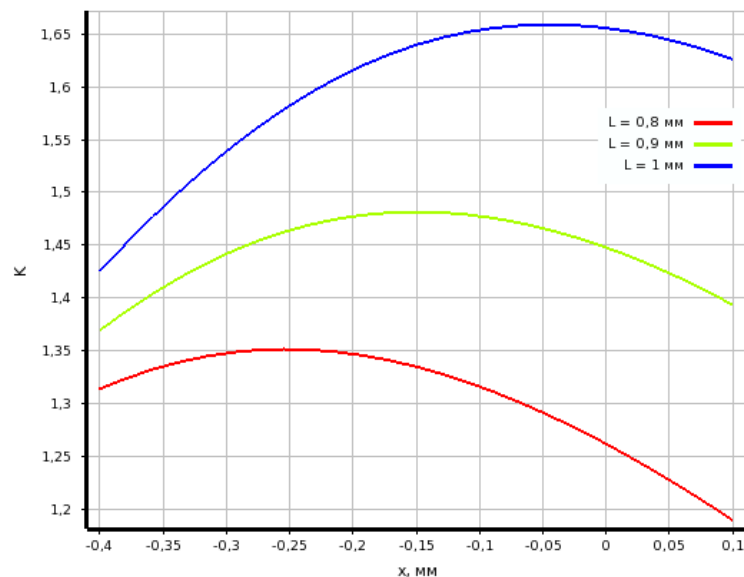


Рисунок 2.16 – Зависимость коэффициента запаса прочности кремниевого УЭ от размеров и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки ( $x = 0$ ) для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм

Когда толщина мембраны  $h = 90$  мкм, то максимальные значения запаса прочности составляют 2.09, 1.88 и 1.75 для  $L = 0.8, 0.9$  и 1 мм. Интересным моментом является постоянная зависимость коэффициента запаса прочности при  $L = 0.9$  мм при  $h = 100$  мкм и разворот кривой при  $L = 1$  мм.

Коэффициент запаса прочности  $K$  тем выше, чем толще мембрана и шире основание ЖЦ. Для толщины мембраны  $h = 80$  мкм коэффициент  $K = 1.5$  при положении ЖЦ с основанием  $1 \times 1$  мм в точке  $x = -0.37$  мм, которая соответствует максимальному отклонению излучающего конца оптоволокну. Такой коэффициент запаса прочности удовлетворяет требованию по перегрузке для большинства датчиков, используемых для измерения давления жидкости и газов.

Нелинейность преобразовательной характеристики ОМУ  $NL$  является неотъемлемой частью общей преобразовательной характеристики и определена как разность между реальной и линеаризованной характеристикой отклонения излучающего конца оптоволоконна  $\delta$ , приведенного к максимальной величине его отклонения  $U_y^{\max}$  (2.7):

$$NL = \frac{\delta}{U_y^{\max}} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

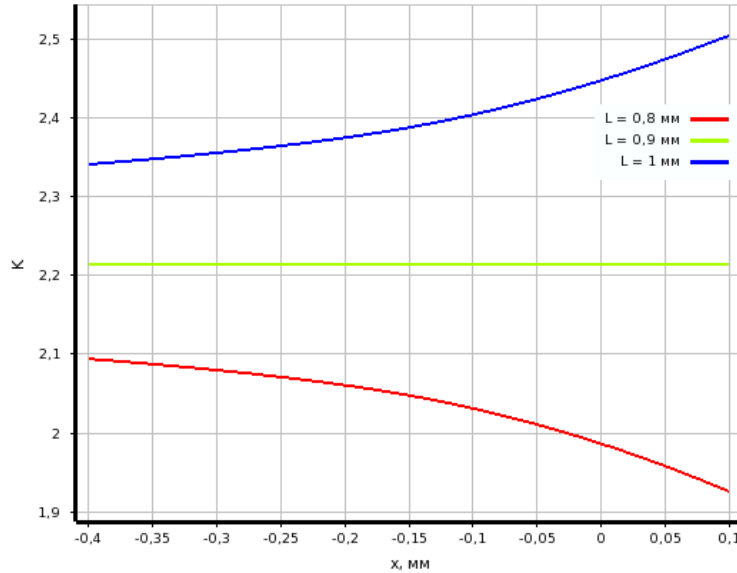


Рисунок 2.17 – Зависимость коэффициента запаса прочности кремниевое УЭ от размеров и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки ( $x = 0$ ) для случая, когда толщина мембраны  $h = 100$  мкм

Результаты влияния размеров и положения ЖЦ УЭ на нелинейность преобразовательной характеристики ОМУ при различных толщинах мембраны УЭ представлены на Рисунке 2.18.

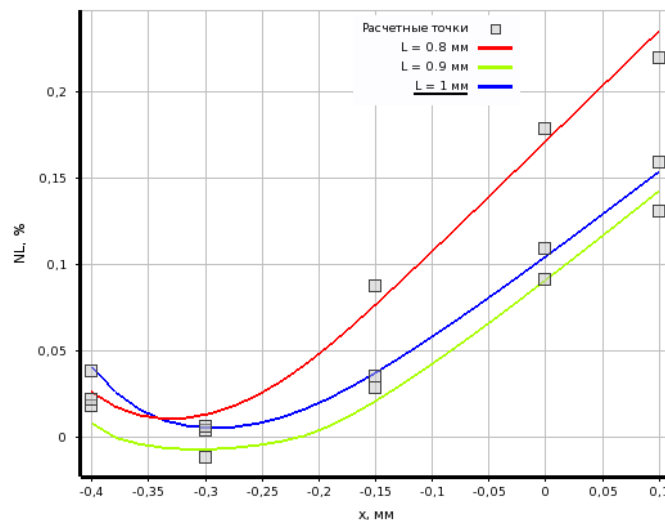


Рисунок 2.18 – Зависимость нелинейности  $NL$  преобразовательной характеристики ОМУ от размеров и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки ( $x = 0$ ) для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм

Зависимость нелинейности  $NL$  преобразовательной характеристики ОМУ от размеров и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки для случаев когда толщина мембраны равна 90 и 100 мкм имеет схожую форму, что для мембраны толщиной 80 мкм, при этом с увеличением толщины мембраны уменьшается нелинейность. Нелинейность преобразовательной характеристики тем меньше, чем ближе ЖЦ к краю мембраны, и принимает минимальное значение в интервале  $x = -0,35 \div -0,3$  мм для рассматриваемых размеров основания ЖЦ. Для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм и ЖЦ находится в положении, при котором обеспечивается наибольшее отклонение оптоволоконна ( $x = -0,37$  мм), нелинейность преобразовательной характеристики ОМУ не превышает 0,02%.

### 2.3.5.2 Влияние размера сечения оптоволоконна

Размер сечения оптоволоконна также представляет интерес для исследования. Стандартные размеры диаметра оптоволоконна лежат в широких пределах. Размеры V-канавок в структуре УЭ ОМУ необходимо подобрать таким образом, чтобы обеспечить надежную фиксацию оптоволоконна диаметром  $D$  не более 150 мкм. Для исследования влияния размера диаметра оптоволоконна на основные характеристики ОМУ, вычислительный эксперимент был изменен таким образом, чтобы расчет оптимального положения ЖЦ выполнялся для разных размеров сечения оптоволоконна ( $D = 100, 125$  и  $150$  мкм). На рисунках 2.19 – 2.21 приведены результаты вычислительного эксперимента.

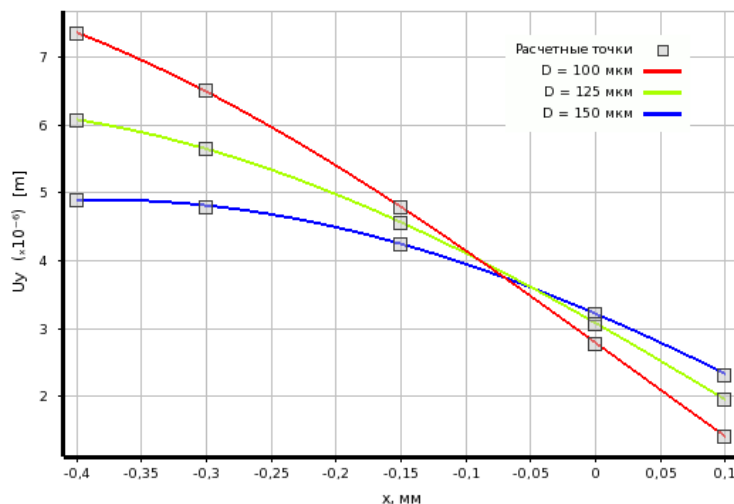


Рисунок 2.19 – Зависимость отклонения излучающего конца оптоволоконна от его диаметра  $D$  и положения ЖЦ относительно средней точки мембраны ( $x = 0$  мкм) для  $h = 80$  мкм

Увеличение толщины оптоволоконна приводит к увеличению жесткости конструкции ОМУ, что при всех остальных одинаковых условиях выражается в уменьшении чувствительности, увеличении прочности и незначительной вариации нелинейности. Для мембраны УЭ толщиной  $h = 80$  мкм с ЖЦ, расположенным в точке  $x = -0,37$ , использование оптоволоконна диаметром

сечения  $D = 100$  мкм вместо 150 мкм позволяет повысить чувствительность  $S$  преобразовательной характеристики на 28% при практически неизменной нелинейности и незначительного уменьшения коэффициента запаса прочности  $K$  на 5.3%.

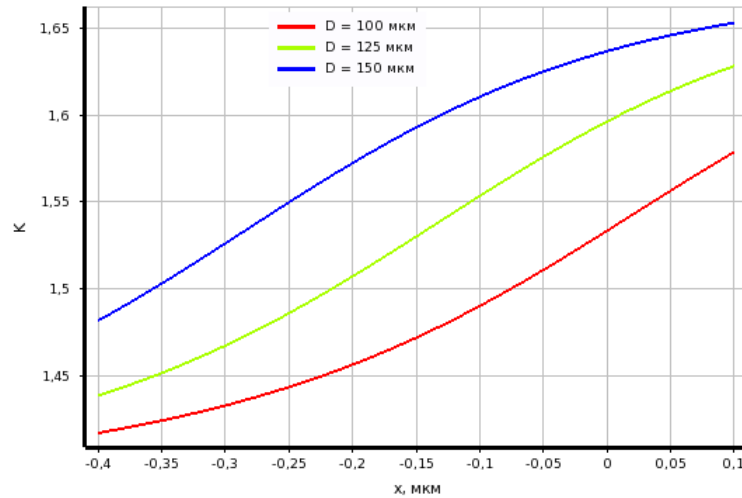


Рисунок 2.20 – Зависимость коэффициента запаса прочности  $K$  кремниевого УЭ от диаметра  $D$  оптоволоконного волокна и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки ( $x = 0$ ) для  $h = 80$  мкм

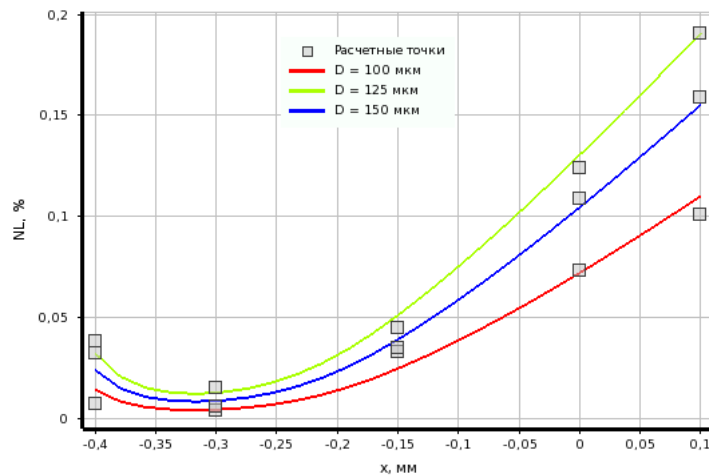


Рисунок 2.21 – Зависимость нелинейности  $NL$  преобразовательной характеристики ОМУ от диаметра  $D$  оптоволоконного волокна и положения ЖЦ на поверхности мембраны относительно ее средней точки ( $x = 0$ ) для  $h = 100$  мкм

Проведенные исследования показывают, что наиболее оптимальный вариант конструкции, в котором сбалансированы основные характеристики ОМУ КФДД, соответствует УЭ, у которого толщина мембраны  $h = 80$  мкм, а ЖЦ размером  $0,75 \times 0,75$  мм сдвинут в сторону края мембран на  $-0,37$  мм. При таких размерах УЭ и диаметре оптоволоконного волокна  $D = 150$  мкм ОМУ имеет следующие параметры: чувствительность  $S = 2,45$  мкм/МПа, коэффициент запаса прочности  $K = 1,5$ , нелинейность преобразовательной характеристики  $NL = 0,02$  %. Наиболее распространенным является оптоволоконное с сечением 125 мкм, которое может быть, как одномодовым, так и многомодовым. С точки зрения массового использования и простоты применения, следует выбирать оптоволоконное с  $D = 125$  мкм.

### 2.3.5.3 Решение для поворотов сечений и плоскостей оптомеханического узла

Место соприкосновения оптоволокон с гранями ЖЦ является точкой приложения силы к оптоволокну. В этой точке происходит поворот сечения оптоволокон которое также влияет на отклонение свободного светоизлучающего конца оптоволокон. В данном параграфе была решена задача поворота сечения оптоволокон в точке приложения силы для одноточечной схемы нагружения и были вычислены повороты поверхности ЖЦ и торца оптоволокон. При расчетах рассматривались мембраны с толщиной 40 и 80 мкм. Нужно отметить, что для решения задачи в программном пакете ANSYS отсутствуют прямые инструменты для определения вращения. Однако есть возможность косвенными методами получить значения поворотов.

Первый метод заключается в присвоении плоскости торца свободного конца оптоволокон *Remote Point* для измерения деформации с помощью инструмента *Deformation Probe* и последующим применением команд постобработки для значений деформаций узлов исследуемой поверхности. Второй способ заключается в применении инструмента расчета шарнирных элементов *Joint Probe*, для этого необходимо присвоить интересующей поверхности соединение шарнирного типа *Joint* и выбрать тип соединения *Body-Ground*, и разрешить вращения по всем осям в настройках. В решателе необходимо указать тип *Relative rotation*. На Рисунке 2.22 (а-б) приведены конечно-элементные модели с отображением шарнирного соединения *Joint Probe* на плоскости свободного конца оптоволокон и поверхности ЖЦ для мембраны толщиной 40 мкм. Для мембраны толщиной 80 мкм, условия задаются аналогично.

Объектом расчета является вращение вокруг оси Z, для выбранной системы координат, как показано на Рисунке 2.22(а-б). Для давления 1 МПа значения вращений плоскостей полученные с применением методов расчета шарнирных соединений и инструмента *Deformation Probe* приведены в таблице 2.2.

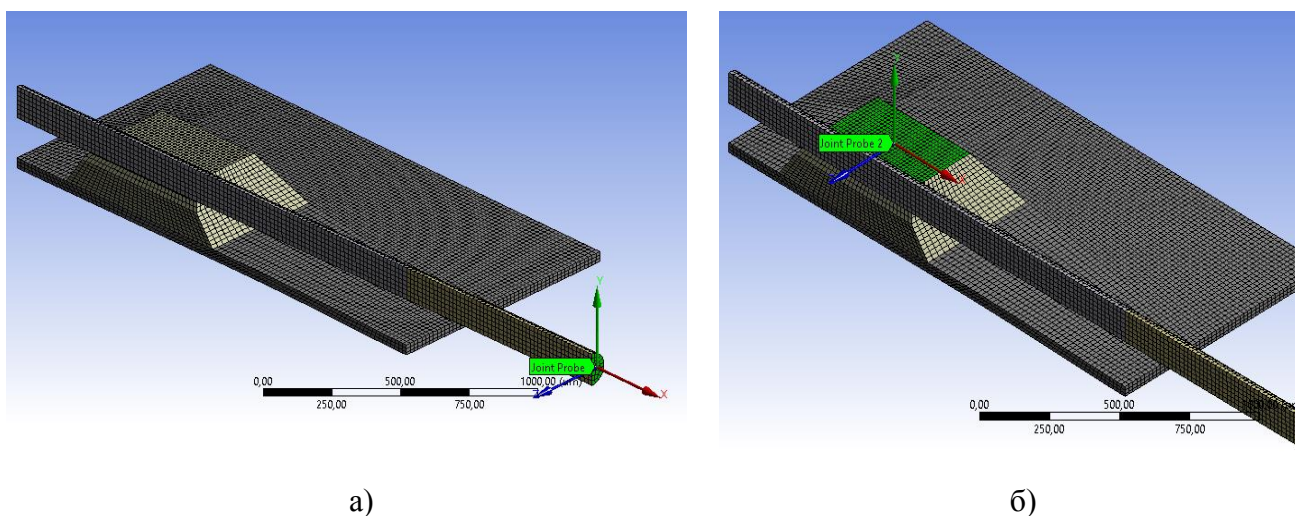


Рисунок 2.22 – Конечно-элементные модели с отображением применения расчета шарнирного соединения на плоскости свободного конца оптоволокон –а) и поверхности ЖЦ – б) для мембраны толщиной 40 мкм

Таблица 2.2 – Вращения плоскостей

Вращение вокруг оси		Верхняя плоскость ЖЦ		Плоскость свободного конца оптоволокна	
Толщина мембраны, мкм		40	80	40	80
Deformation probe	x, °	$-1,6746 \cdot 10^{-2}$	$-1,017 \cdot 10^{-2}$	$-6,2773 \cdot 10^{-8}$	$1,6833 \cdot 10^{-10}$
	y, °	$2,9646 \cdot 10^{-3}$	$1,4343 \cdot 10^{-3}$	$-1,5197 \cdot 10^{-9}$	$-2,7974 \cdot 10^{-10}$
	z, °	$5,8725 \cdot 10^{-1}$	$9,2157 \cdot 10^{-2}$	$6,7524 \cdot 10^{-1}$	$9,0835 \cdot 10^{-2}$
Joint Probe	x, °	$-3,8434 \cdot 10^{-3}$	$-1,0181 \cdot 10^{-2}$	$8,203 \cdot 10^{-8}$	$3,1204 \cdot 10^{-9}$
	y, °	$2,8497 \cdot 10^{-3}$	$1,4415 \cdot 10^{-3}$	$2,8519 \cdot 10^{-6}$	$-3,8702 \cdot 10^{-10}$
	z, °	$5,8715 \cdot 10^{-1}$	$9,208 \cdot 10^{-2}$	$6,784 \cdot 10^{-1}$	$1,1012 \cdot 10^{-1}$

Как видно из таблицы 2.2, вращения вокруг оси Z для плоскости ЖЦ дают одинаковый результат для двух методов расчета, с погрешностью менее 0,1%. Для плоскости свободного конца ОВ при увеличении толщины мембраны до 80 мкм, имеется расхождение результатов поворота в 0,02°. Проверка результатов моделирования с помощью расчета шарнирных соединений демонстрирует аналогичные значения. Поэтому далее используются результаты расчетов полученные от инструмента *Deformation Probe*. Поворот сечения оптоволокна на краю ЖЦ, расположенного со стороны свободного конца ОВ равен повороту плоскости свободного конца ОВ. Для простоты расчетов можно считать максимальное отклонение по оси y ЖЦ в точке приложения силы и отклонение оптоволокна в этой точке одинаковыми. Для расчетов можно использовать конструктивные геометрические элементы Path для расчета отклонения по оси y, как показано на Рисунке 2.23 (а-б). Длина Path составляет ~468 мкм.

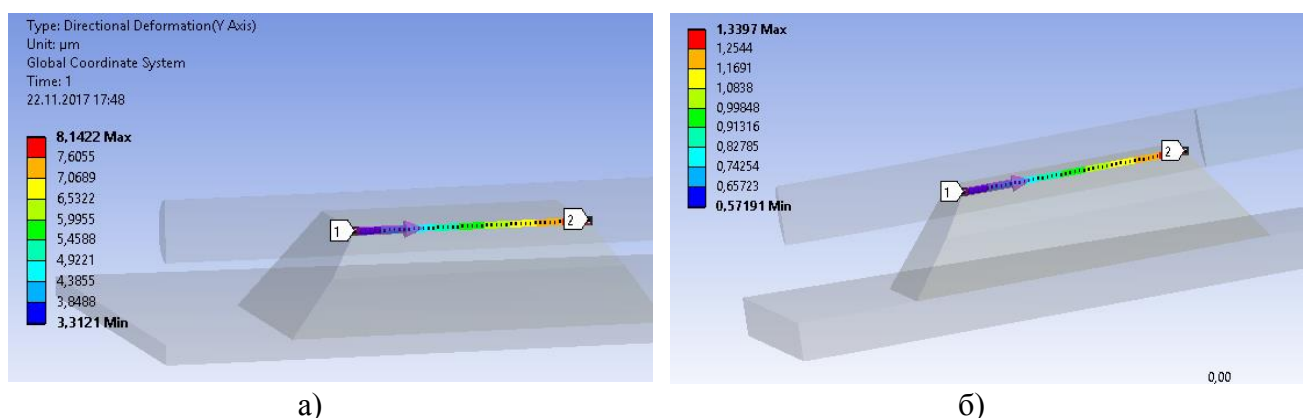


Рисунок 2.23 – Конструктивные геометрические элементы Path отображающие деформацию ЖЦ для толщины мембраны 40 мкм – а), и для 80 мкм – б)

Для мембраны 40 мкм, (Рисунок 2.23а) максимальное отклонение конструктивного геометрического элемента Path составляет 8,14 мкм, а минимальное 3,31 мкм. Для мембраны 80 мкм аналогичные точки имеют отклонение 1,34 и 0,57 мкм соответственно. Если учесть, что под действием давления ЖЦ не изменяет форму, то можно рассчитать тангенс угла поворота  $\theta$  геометрического элемента *Path*, и верхней плоскости ЖЦ, по формуле:



$$tg\theta = \frac{\text{Отклонение}_{\text{макс}} - \text{Отклонение}_{\text{мин}}}{\text{Длина Path}}$$

Так для мембраны 40 мкм  $tg\theta = \frac{4,83}{468} = 0,01$ , а  $\theta = 0,591^\circ$ . А для мембраны 80 мкм  $tg\theta = 0,002$ , а угол поворота  $\theta = 0,094^\circ$ . Сравним полученные результаты с данными приведенными в таблице 2.2 Вращение плоскостей: для мембраны 40 мкм имеем  $0,58725^\circ$  и  $0,591^\circ$ , а для 80 мкм  $0,092157^\circ$  и  $0,094^\circ$ . Полученные результаты свидетельствуют о достоверности применяемых методов.

### 2.3.5.4 Влияние положения жесткого центра на прогиб упругого элемента

Положение ЖЦ влияет на жесткость конструкции ОМУ и изменение максимального прогиба мембраны с ЖЦ, что при всех остальных одинаковых условиях выражается в различной чувствительности. Поэтому следует подбирать оптимальное положение, исходя из результатов численного моделирования. Для мембраны УЭ толщиной  $h = 80$  мкм с ЖЦ с основанием 750 мкм и 200 мкм высотой, при использовании оптоволоконна с  $D = 125$  мкм, показано семейство кривых прогибов на Рисунке 2.24.

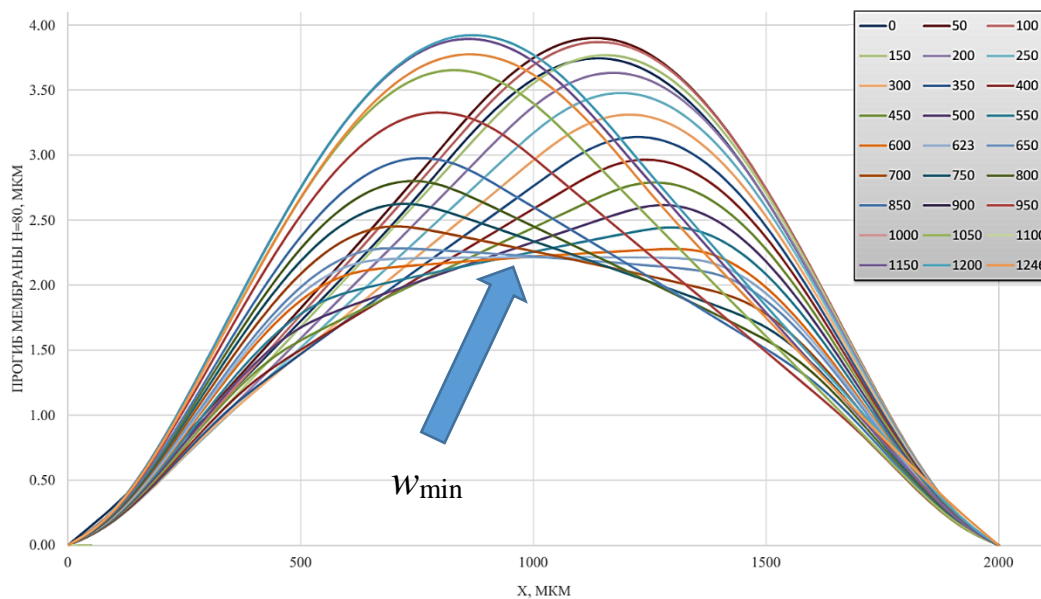


Рисунок 2.24 – Семейство кривых прогибов мембраны толщиной  $h=80$  мкм вдоль оси симметрии ОМУ, при ширине основания ЖЦ 750 мкм, и перемещении ЖЦ

Как видно из рисунка, семейство имеет симметрию и минимальный прогиб мембраны  $w_{\min}$  при центральном положении ЖЦ. При смещении ЖЦ к краям мембраны прогиб увеличивается, из-за увеличения площади с меньшей жёсткостью. Наибольший прогиб мембраны равный 3,92 мкм приходится на положения 50 и 1200 мкм смещения, которые соответствуют 425 и 1575 мкм центральной части ЖЦ размером 750 мкм.

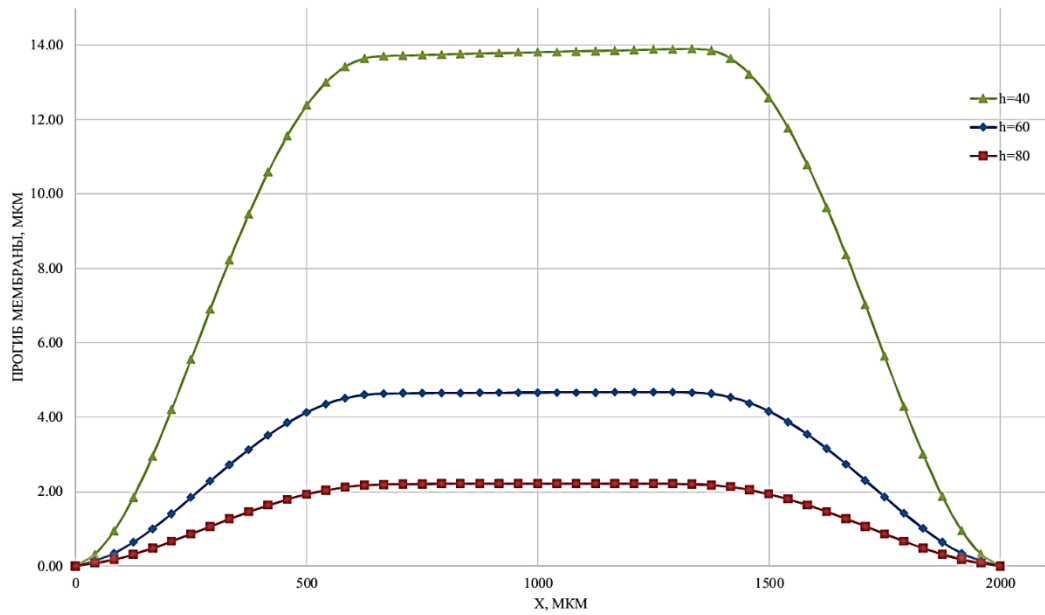


Рисунок 2.25 – Прогибы мембраны при центральном положении ЖЦ, при ширине основания ЖЦ 750 мкм

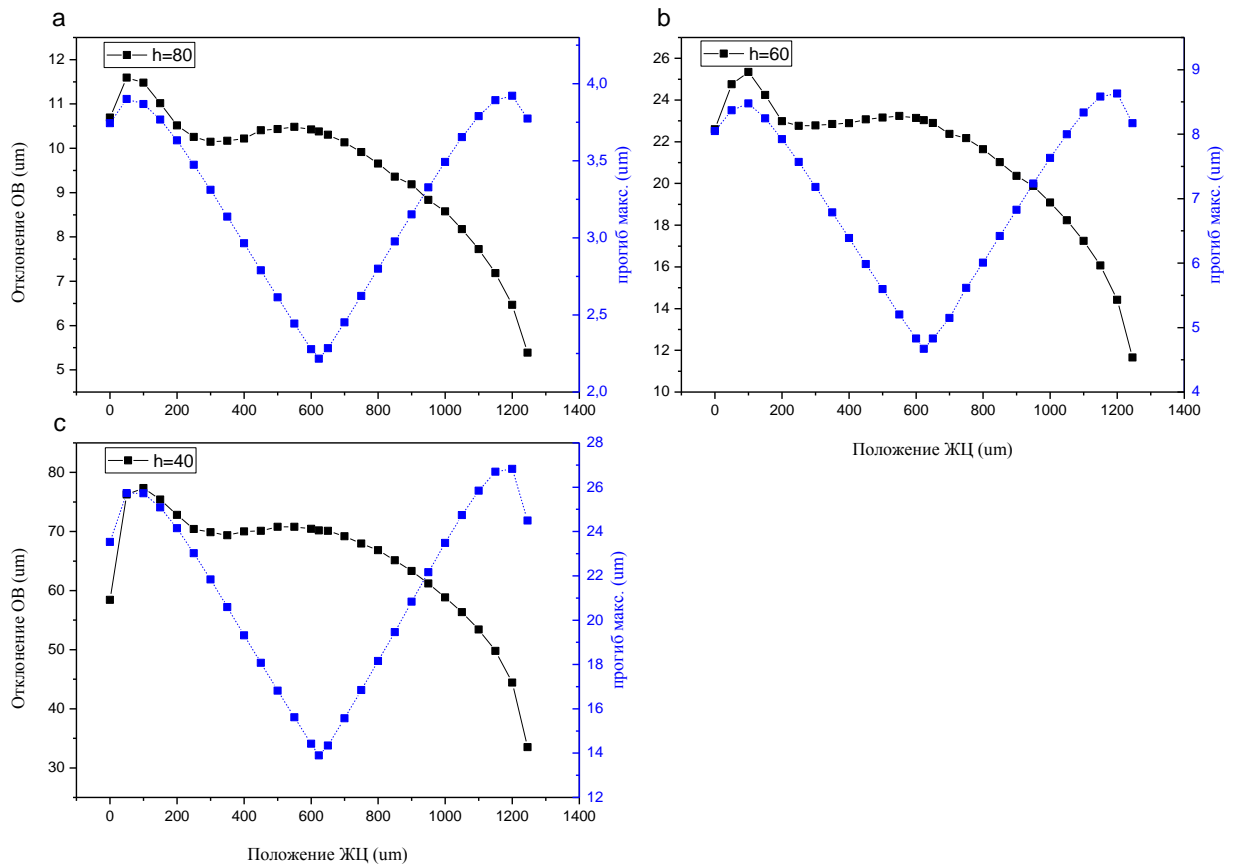


Рисунок 2.26 – Максимальное отклонение конца ОВ и максимальный прогиб мембраны в зависимости от положения ЖЦ

При уменьшении толщины мембраны УЭ в составе ОМУ датчика, с закрепленном на ЖЦ оптоволоконном с  $D = 125$  мкм наблюдается влияние оптоволоконна на изгиб мембраны, когда жесткость мембраны УЭ с ЖЦ становится сопоставима с жесткостью оптоволоконна. Эффект начинает проявляться при толщине мембраны менее 70 мкм. На Рисунке 2.25 показаны прогибы

мембран с толщиной  $h$  равной 40, 60 и 80 мкм с центральным расположением ЖЦ. Для мембраны с толщиной  $h = 40$  мкм, разница достигает 0,7 мкм при общем прогибе  $\sim 14$  мкм. Оптимальный выбор положения ЖЦ на мембране следует определять по отклонению свободного конца оптоволоконна.

### 2.3.5.5 Влияние размера мембраны упругого элемента на чувствительность оптомеханического узла

На Рисунке 2.27(а-б) приведены зависимости чувствительности  $S$  от смещения ЖЦ для двух размеров мембраны  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> и  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> при одинаковой толщине. Для мембраны  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> смещение позволяет увеличить чувствительность на 20%. В этом случае сочетание поворота оптоволоконна на угол  $\beta$  (соответствующая чувствительность  $S_\beta = \frac{l_0 \cdot \beta}{P}$ ) и его нормального смещения  $U_y$  (чувствительность  $S_U = \frac{U_y}{P}$ ) достигает максимума при смещении ЖЦ относительно центра мембраны на 200 мкм. Для мембраны  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> основную роль играет смещение  $U_y$ , а не поворот  $\beta$ . В этом случае центральное расположение ЖЦ является оптимальным, но уменьшится

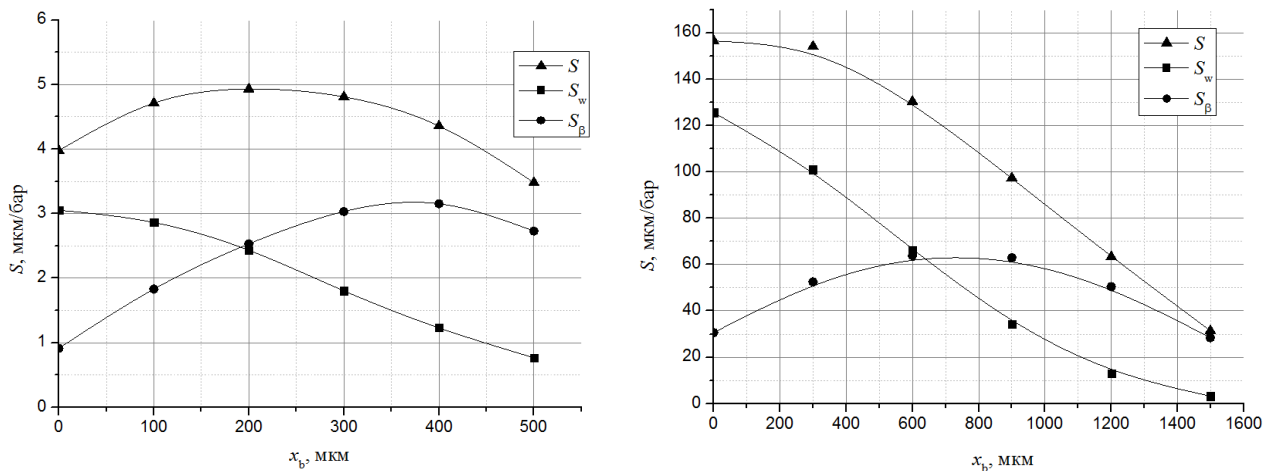


Рисунок 2.27 – Зависимость чувствительности ОМУ от положения ЖЦ  $x_b$  относительно средней точки мембраны размером а)  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> и б)  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Толщина мембраны  $h = 20$  мкм, высота ЖЦ  $h_b = 150$  мкм, сторона жесткого центра  $L = 1000$  мкм [100]

Чувствительность к давлению ОМУ в основном определяется отношением размера стороны мембраны к ее толщине, а размеры ЖЦ оказывают существенно меньшее влияние. На Рисунке 2.28 приведена зависимость чувствительности  $S$  от толщины мембраны при размере ее сторон  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>.

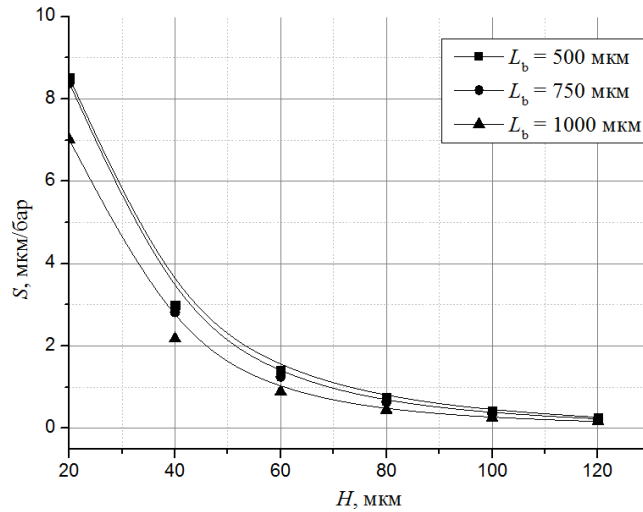


Рисунок 2.28 – Зависимость чувствительности ОМУ от толщины мембраны  $h$ , при оптимальном положении ЖЦ. Площадь мембраны  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ , высота ЖЦ  $h_b = 150 \text{ мкМ}$ , длина  $L_b = 500, 750, 1000 \text{ мкМ}$  [100]

Размер стороны квадратного основания ЖЦ является вариабельным параметром. Видно, что рост чувствительности больше чем на порядок наблюдается при толщинах мембраны меньше 50 мкМ, относительно  $h = 120 \text{ мкМ}$ . Для мембраны  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  чувствительность  $S$  выросла в 7 раз при уменьшении  $h$  со 120 мкМ до 60 мкМ. При этом увеличение в 2 раза размера ЖЦ уменьшает чувствительность не более чем на 17,5%.

### 2.3.5.6 Обсуждение

Экспериментально установлено, что конструкция ОМУ в состав которой входит кремниевый профилированный кристалл со смещенным ЖЦ, имеет ряд недостатков, например, для мембран с толщиной более 80 мкМ – малое отклонение свободного конца оптоволоконна, а также необходимость фиксации оптоволоконна в V-канавке ЖЦ с помощью клея, для реализации случая жесткого закрепления. Фиксация с помощью клея, ограничивает перемещение оптоволоконна внутри V-канавки, увеличивает жесткость конструкции, тем самым снижая отклонение свободного конца и чувствительность ОМУ.

Для устранения этих недостатков нами была предложена новая конструкция ОМУ фотовольтаического датчика давления, в которой реализуется двухточечная схема нагружения оптоволоконна, за счёт добавления в конструкцию дополнительного профилированного кремниевого кристалла-крышки, который накрывает профилированный кристалл УЭ ОМУ с закрепленным на нем оптоволоконном, при этом ЖЦ нижнего кристалла смещен в сторону свободного конца, а ЖЦ верхнего кристалла смещен в сторону закрепленного на рамке конца оптоволоконна. В такой конструкции перемещение свободного конца оптоволоконна определяется поворотом, вызванного парой перерезывающих сил действующих в сечении оптоволоконна

заключенного между ЖЦ нижнего и верхнего кристаллов. Предлагаемый ОМУ содержит первый двусторонне профилированный кремниевый кристалл – 1 с измерительной диафрагмой – 2, опорную рамку – 3, ЖЦ – 4, один из которых смещен в сторону U-канавки – 5, V-канавки на опорной рамке – 6 для закрепления оптоволоконна – 7 на опорной рамке и второй кристалл – 8 с ЖЦ смещенным к V-канавкам, как показано на Рисунке 2.28.

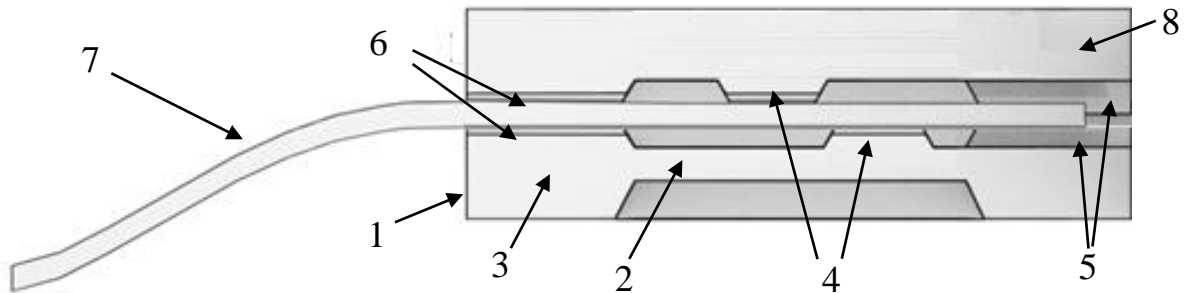


Рисунок 2.28 – Схема ОМУ с двухточечной нагрузкой

Геометрические размеры этой конструкции повторяют размеры схемы с одним ЖЦ. Для простоты вычислений ограничимся ЖЦ с  $L = 750$  мкм по основанию и оптоволоконном с диаметром  $D = 125$  мкм.

### 2.3.6 Конечно-элементная модель оптомеханического узла кремниевого фотovoltaического датчика давления с двухточечной схемой нагружения

Исследование влияния конструктивных параметров ОМУ с двухточечной схемой нагружения на его характеристики выполнялось по алгоритму, приведенному выше. Модель УЭ с двумя жесткими центрами и фиксированным между ними оптоволоконным кабелем представлена на Рисунке 2.29. Симметрия ОМУ позволила ограничиться моделированием  $\frac{1}{2}$  части структуры. Для анализа конечно-элементная модель была составлена с использованием гексагональных элементов с криволинейными гранями, что обеспечивает повышенную точность решения [103]. При проведении математического моделирования использовались те же параметры материалов, что и в одноточечной схеме нагружения. Для снижения времени расчета из конечно-элементной модели были удалены опорная рамка и основная часть верхнего кристалла, кроме ЖЦ. Эти элементы были заменены условием жесткого защемления *Fixed Support*, как показано на Рисунке 2.30а.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad w = 0.$$

Расчет половины конструкции был обеспечен условием *Symmetry Region* вдоль оси симметрии, проходящей через середину оптоволоконна, как показано на Рисунке 2.30б. На точки соприкосновения оптоволоконна и ЖЦ наложено условие касания *Adjust to Touch*.

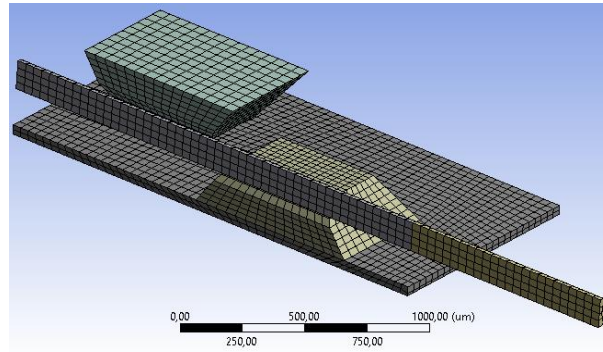
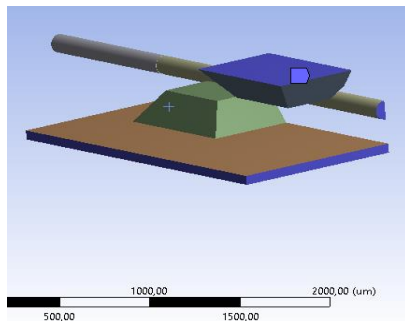
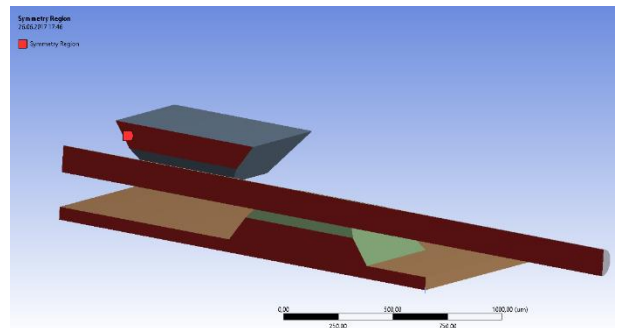


Рисунок 2.29 – Модель УЭ с двумя жесткими центрами и фиксированным между ними оптоволоконным кабелем



(а)



(б)

Рисунок 2.30 – Граничные условия модели ОМУ: (а) области полного ограничения в перемещениях; (б) симметричные граничные условия; (в) область приложения измеряемого давления [103]

### 2.3.6.1 Влияние положения и размеров жесткого центра упругого элемента

Влияние положения и размеров ЖЦ мембраны на основные характеристики ОМУ КФДД были исследованы для толщин мембраны УЭ  $h = 20, 40, 60$  и  $80$  мкм. Рассмотрен вариант ЖЦ с основанием  $L = 0,75$  мм. Положение ЖЦ варьировалось вдоль средней линии мембраны в обе стороны. Эти расчеты выполнялись при номинальном давлении  $P = 2$  МПа и диаметре оптоволоконна  $D = 125$  мкм. Базовые размеры ОМУ КФДД представлены на Рисунке 2.31.

На Рисунке 2.32 в виде поверхности представлено семейство зависимостей отклонения свободного конца оптоволоконна от взаимного расположения ЖЦ верхнего и нижнего кристаллов ОМУ при приложенном давлении 2 МПа для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм [104]. Как видно из рисунка, максимальное отклонение достигает 23.2 мкм при условии, что смещение ЖЦ нижнего кристалла больше смещения ЖЦ верхнего. При обратном соотношении, смещение конца оптоволоконна имеет отрицательное значение, т.е. смещается «вниз» до -18.8 мкм. Смещения жестких центров имеют диапазон положений, обеспечивающий максимальное отклонение

свободного конца оптоволокна, что позволяет проектировать кристаллы ОМУ с допусками на рассовмещение.

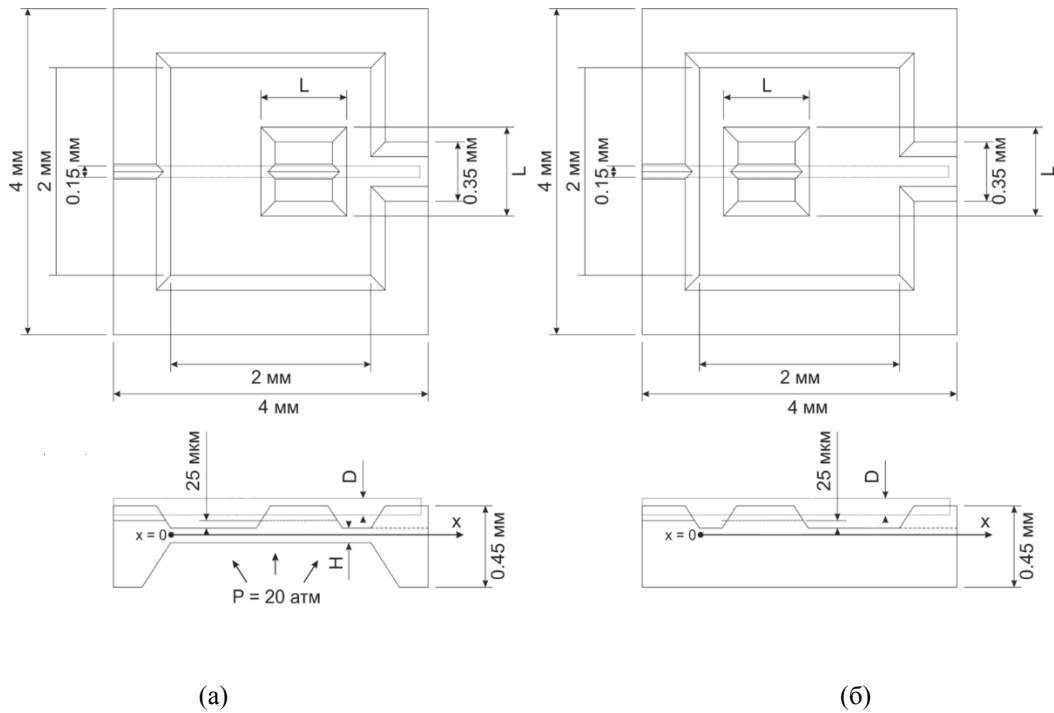


Рисунок 2.31 – Геометрические размеры УЭ КФДД и ось  $x$ , вдоль которой исследуется перемещение ЖЦ нижнего кристалла с мембраной – а) и верхнего кристалла крышки – б)

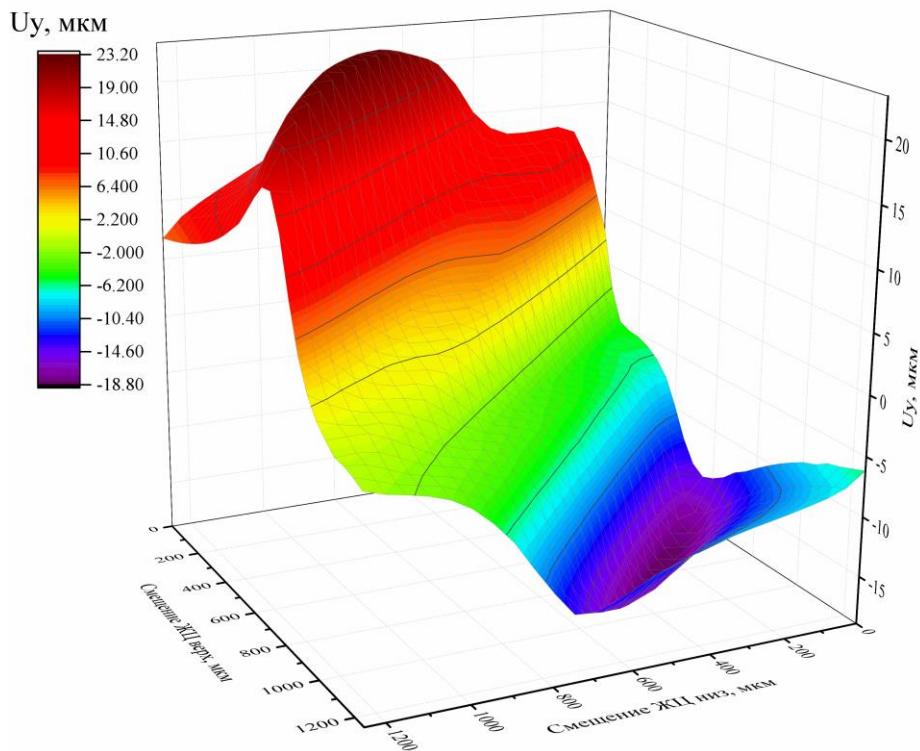


Рисунок 2.32 – Зависимость отклонения излучающего конца оптоволокна от положения ЖЦ относительно крайней точки мембраны ( $x = 0$  мкм) для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм [104]



На Рисунке 2.33 в виде поверхности представлено семейство зависимостей максимальных прогибов мембраны нижнего кристалла от взаимного расположения ЖЦ верхнего и нижнего кристаллов ОМУ при приложенном давлении 2 МПа для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм. Как видно из рисунка, максимальный прогиб может достигать 3.91 мкм.

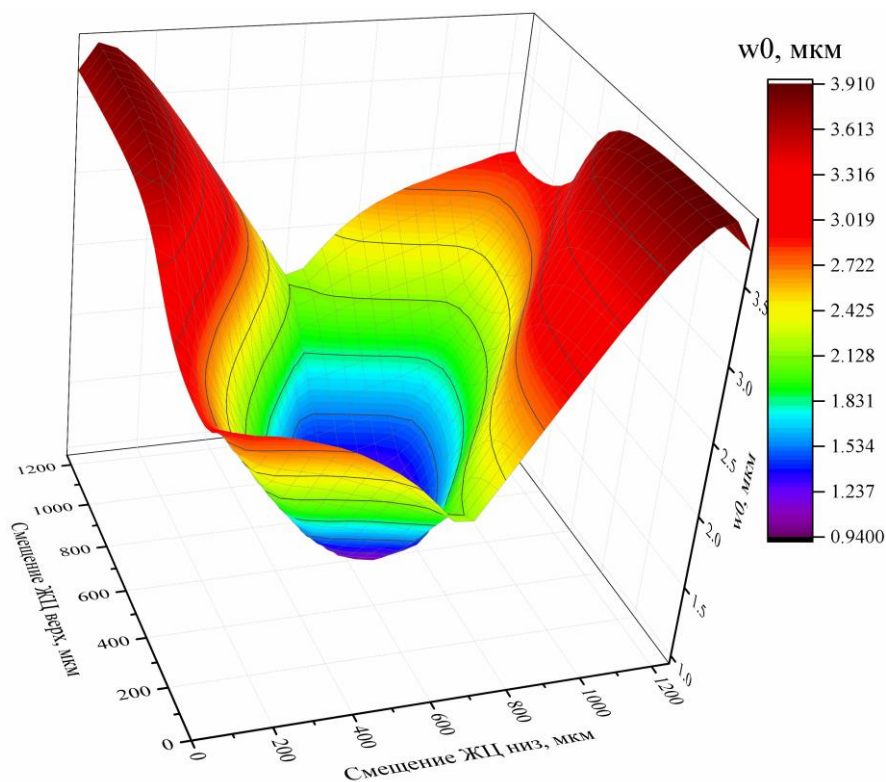


Рисунок 2.33 – Зависимость максимального прогиба мембраны от положения ЖЦ относительно крайней точки мембраны ( $x = 0$  мкм) для случая, когда толщина мембраны  $h = 80$  мкм [104]

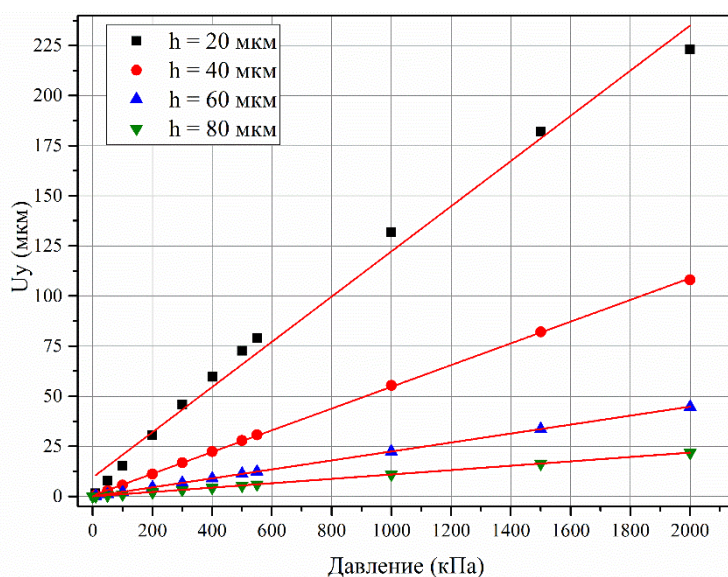


Рисунок 2.34 – Зависимость отклонения излучающего конца оптоволоконна  $U_y$  от толщины мембраны для случая, когда ЖЦверх смещен на 324 мкм, а ЖЦниз на 924 мкм



При центральных положениях ЖЦ прогиб на уровне 0.9 мкм. График имеет близкую к симметричной форму, небольшая асимметрия вызвана защемлением оптоволоконна на рамке или аналогичным условием фиксации. На Рисунке 2.34 представлена зависимость отклонения свободного конца оптоволоконна  $U_y$  от приложенного давления для мембран с толщинами 20, 40, 60 и 80 мкм с линейной аппроксимацией по методу наименьших квадратов.

Для мембран 40, 60 и 80 мкм зависимость имеет минимальную нелинейность, а для мембраны толщиной 20 мкм наблюдается существенное увеличение нелинейности. При приложенном давлении 2 МПа отклонения свободного конца оптоволоконна  $U_y$  составили 223, 108, 44.7 и 21.8 мкм для мембран с толщиной 20, 40, 60 и 80 мкм, соответственно, для случая, когда жесткие центры смещены на 324 мкм верхний и 924 мкм нижний от края мембраны, расположенного со стороны жесткого защемления оптоволоконна.

### 2.3.6.2 Влияние толщины мембраны упругого элемента

На Рисунке 2.35 представлена зависимость максимального прогиба мембраны нижнего кристалла  $w_0$  от приложенного давления для мембран с толщиной 20, 40, 60 и 80 мкм с линейной аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Как видно из рисунка, зависимость прогибов для мембраны 20 мкм также имеет существенную нелинейность.

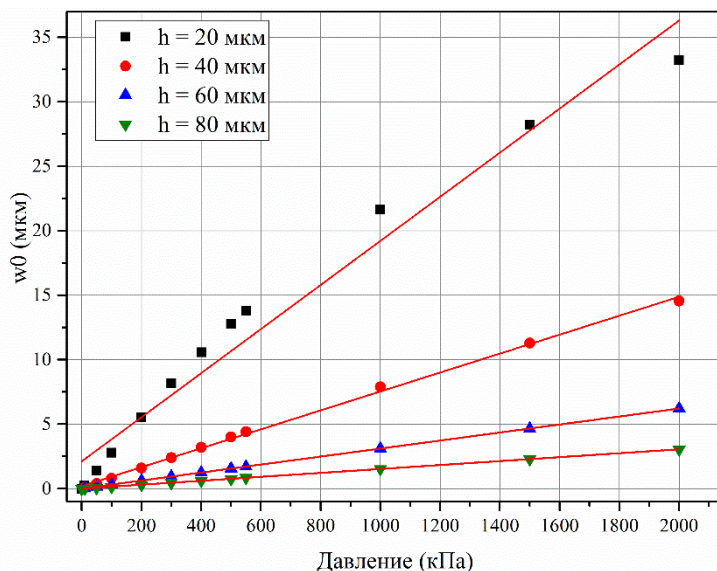


Рисунок 2.35 – Зависимость максимального прогиба мембраны  $w_0$  от толщины мембраны для случая, когда ЖЦверх смещен на 324 мкм, а ЖЦниз на 924 мкм

На Рисунке 2.36 представлены зависимости нелинейности  $NL$  от толщины мембраны для отклонения свободного конца оптоволоконна  $U_y$  и максимального прогиба мембраны  $w_0$ , для случая, когда жесткие центры смещены на 324 мкм верхний и 924 мкм нижний. Для  $w_0$  нелинейность достигает 9.2%, а для  $U_y$  - 5.5%. Для мембран 60 и 80 мкм нелинейность не превышает 0.2%.

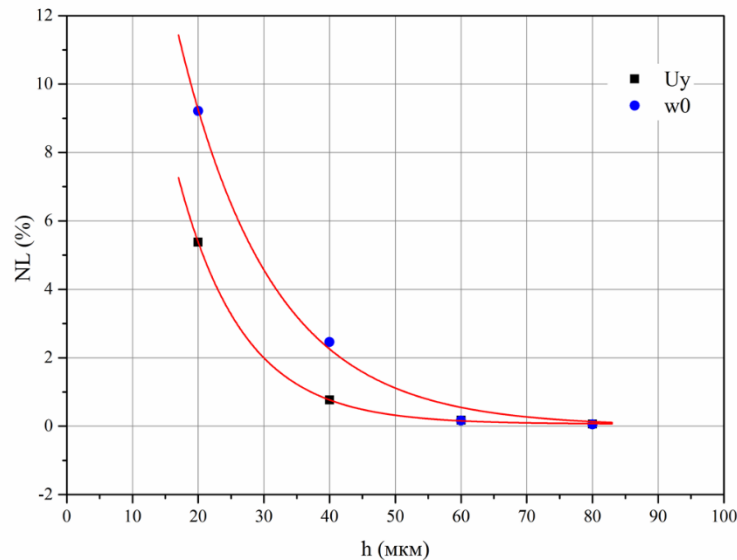


Рисунок 2.36 – Зависимость нелинейности максимального прогиба мембраны  $w_0$  и отклонения излучающего конца оптоволоконна  $U_y$  от толщины мембраны для случая, когда ЖЦверх смещен на 324 мкм, а ЖЦниз на 924 мкм

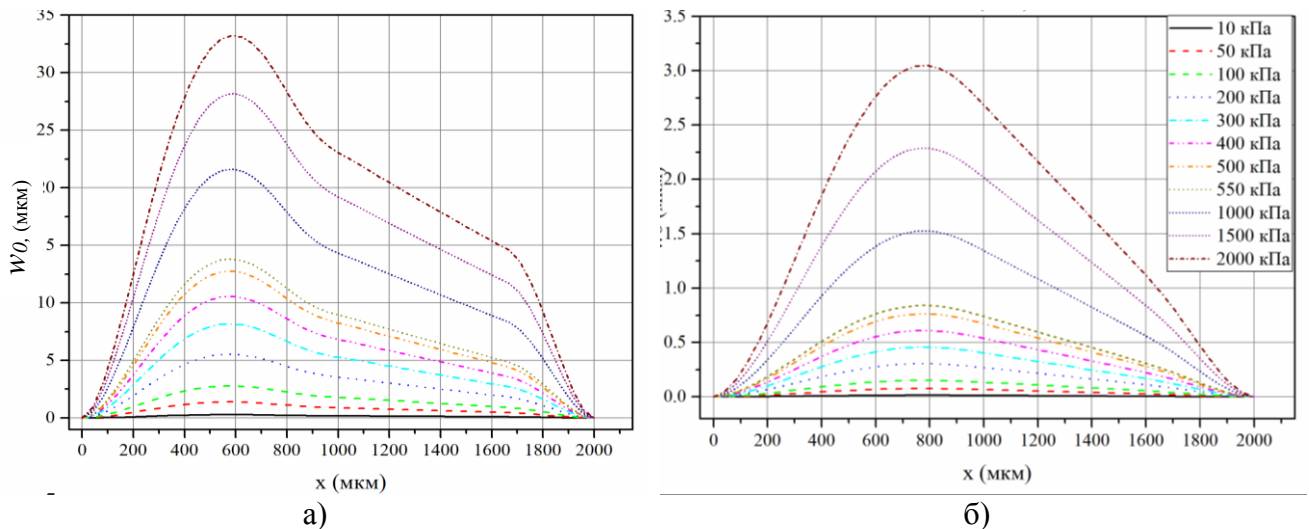


Рисунок 2.37 – Зависимости прогибов вдоль оси симметрии мембраны при различных значениях давления для мембран с  $h = 20$  мкм (а) и  $h = 80$  мкм (б) для случаев, когда ЖЦверх смещен на 324 мкм, а ЖЦниз на 924 мкм

На Рисунке 2.37 показаны семейства прогибов для мембран с толщиной  $h = 20$  и 80 мкм для случая, когда ЖЦ верхнего кристалла смещен на 324 мкм, а ЖЦ нижнего на 924 мкм. Прогиб мембраны с  $h = 20$  мкм в области 850 - 950 мкм левого края ЖЦ отрицательный. Для мембран с толщиной мембраны  $h = 40$  и 60 мкм, прогиб повторяет форму, но имеет большие значения чем на Рисунке 2.37(б). При давлении 2000 кПа максимальный прогиб мембраны составляет 11.4 и 6.2 мкм для мембран с  $h = 40$  и 60 мкм, соответственно.

На Рисунке 2.38 показаны семейства смещения центральной точки оптоволоконна для мембран с толщиной  $h = 80$  мкм при давлениях от 10 до 2000 кПа для случая, когда ЖЦ верхнего кристалла смещен на 324 мкм, а ЖЦ нижнего на 924 мкм. Зависимости имеют схожий вид и отличаются по амплитуде отклонения. В интервале от 0 до 875 мкм смещение средней точки

оптоволокну имеет отрицательные значения. После 875 мкм до свободного конца оптоволокну смещения положительные. Перегиб находится на 875 мкм. Уменьшение толщины мембраны не влияет на форму прогиба оптоволокну, изменяются только значения отклонений. При давлении 2000 кПа отклонения свободного конца оптоволокну составляют 224, 107 и 45 мкм для мембран с  $h = 20, 40$  и  $60$  мкм, соответственно.

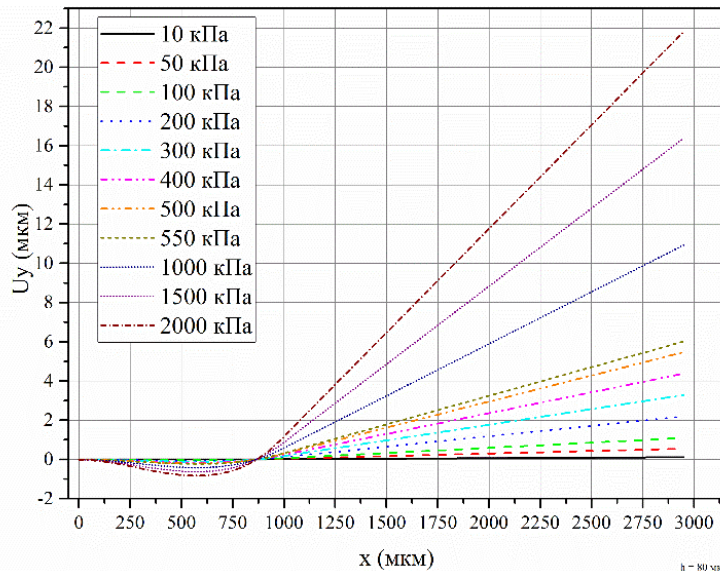
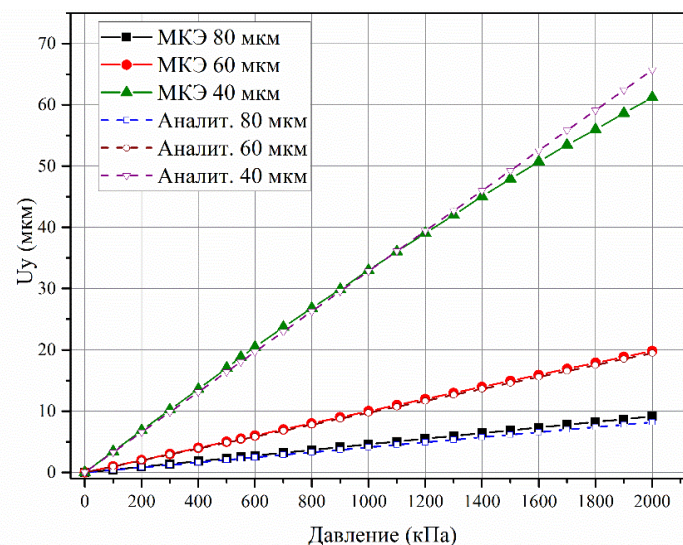


Рисунок 2.38 – Зависимости смещения центральной точки вдоль оси оптоволокну при различных значениях давления для мембраны с  $h = 80$  мкм для случая, когда ЖЦверх смещен на 324 мкм, а ЖЦниз на 924 мкм

### 2.3.7 Сравнение аналитических и конечно-элементных моделей

Сравним результаты отклонения свободного конца оптоволокну полученные методом конечных элементов (МКЭ) и аналитического выражения, зависимости которых приведены на Рисунке 2.39.



5

Рисунок 2.39 – Сравнение отклонения свободного конца оптоволокну рассчитанных по МКЭ с аналитическим выражением: для мембран толщиной 40, 60 и 80 мкм

Как видно, результаты полученные с помощью предложенного аналитического выражения хорошо согласуются с решением МКЭ модели, что свидетельствует о возможности последующего применения аналитического выражения для расчета конструкций ОМУ с одноточечной схемой нагружения.

Итоговое выражение для оценки преобразовательной характеристики ОМУ КФДД с одноточечной схемой нагружения:

$$y(L_1, l) = \frac{3}{2} \left( \frac{L_1}{l} - 1 \right) C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^2 \quad (2.21)$$

На Рисунке 2.40 (а-б) показаны зависимости отклонения  $U_y =$  от приложенного давления для мембран 20 - 80 мкм, полученные методом конечных элементов и с помощью аналитического выражения. Для мембран с толщиной 40, 60 и 80 результаты отклонения свободного конца оптоволокна превышают значения полученные из аналитического выражения, Рисунке 2.40(а). При давлении 2000 кПа отношение между значениями отклонения оптоволокна, полученных МКЭ и в аналитическом виде составляет 1.02 для мембраны 40 мкм, 1.42 – для 60 мкм и 1.65 для 80 мкм. Для мембраны с толщиной 20 мкм, решение полученное с помощью МКЭ меньше аналитического, отношение составляет 0,26. Такая разница в результатах может быть следствием того, что в аналитическом выражении приложение силы использовалось в виде точечной нагрузки, а в МКЭ имело место частичное распределение нагрузки по длине оптоволокна.

Представим отношение решений в виде поправочного коэффициента  $A$  для аналитического выражения. График зависимости поправочного коэффициента для аналитического выражения  $A$  и степени  $\gamma$  от толщины мембраны для  $L_1 = 3$  мм,  $L = 1,05$  мм,  $l = 0,89$  мм  $a=1000$  мкм,  $\varepsilon = 0,375$  мм приведен на Рисунке 2.41. Подставив коэффициент  $A(h)$  в уравнение 2.15, и учитывая 2.13, 2.14, уравнение отклонения свободного конца оптоволокна для двухточечной схемы нагружения принимает вид:

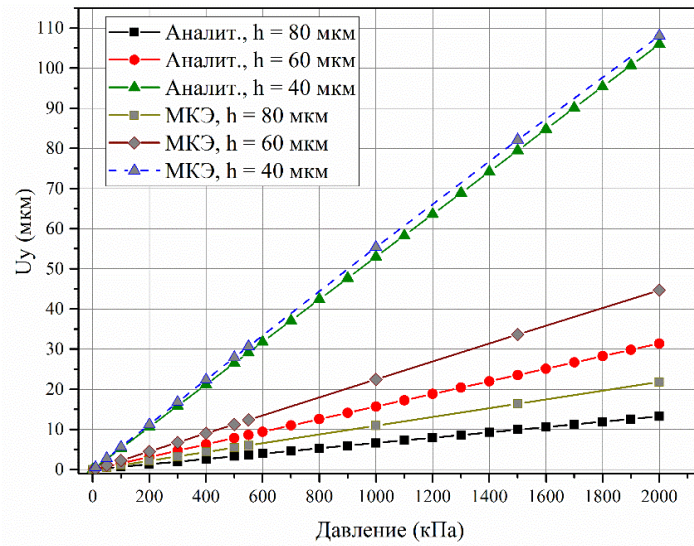
$$y(L_1) = A(h) C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^2 \left[ 1 + 3\Psi(k) \frac{(L_1 - L)}{L} \right] \quad (2.22)$$

Альтернативным способом можно подобрать степень  $\gamma$  для  $(1 - \delta)$  уравнения 2.22. Варианты подбора  $\gamma$  для уравнения прогиба мембраны с квадратным ЖЦ, приводящие к сходимости аналитического решения и результатов полученных методом конечных элементов приведены на Рисунке 2.41.

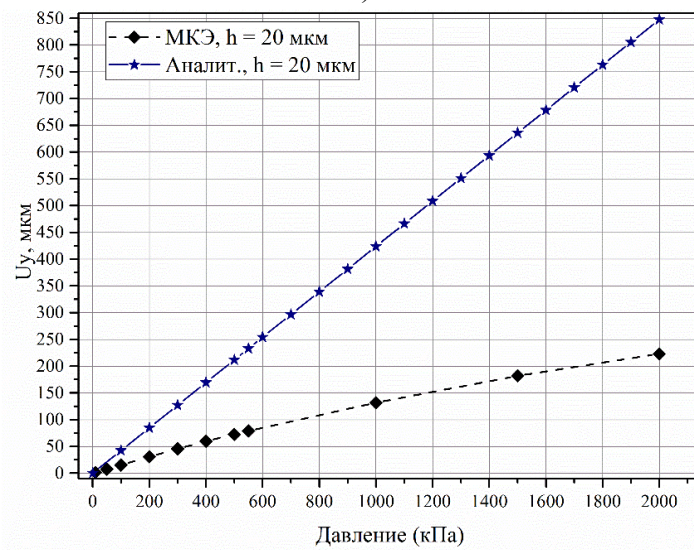
Учитывая коэффициент  $\gamma$  уравнение отклонения свободного конца оптоволокна для двухточечной схемы нагружения принимает вид:

$$y(L_1) = C \frac{qa^4}{h^3} (1 - \delta)^\gamma \left[ 1 + 3\Psi(k) \frac{(L_1 - L)}{L} \right] \quad (2.23)$$

Уравнения 2.23, 2.24 и график 2.41, можно использовать для дальнейших разработок ОМУ с двухточечной схемой нагружения.



а)



б)

Рисунок 2.40 – Сравнение отклонения свободного конца оптоволоконна рассчитанных по МКЭ с аналитическим выражением: для мембран толщиной 40, 60 и 80 мкм – а); для мембраны толщиной 20 мкм – б)

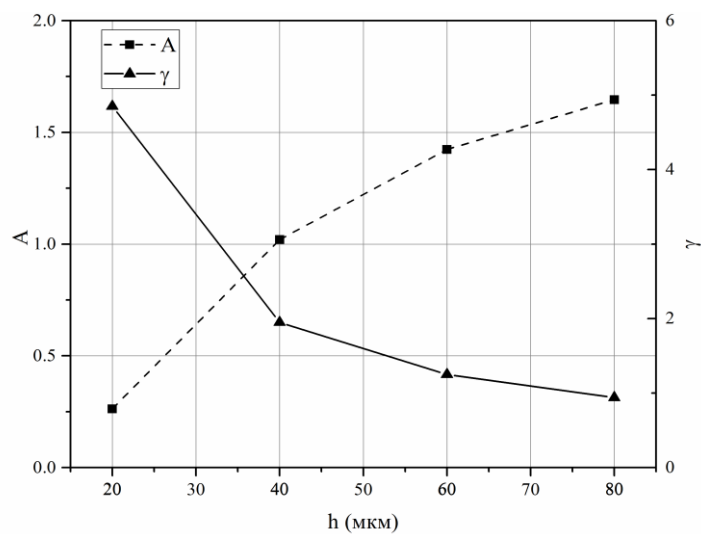


Рисунок 2.41 – Зависимость поправочного коэффициента для аналитического выражения  $A$  и степени  $\gamma$  от толщины мембраны (см. пояснения в тексте)



## Выводы к главе 2

1. Разработаны численные модели с использованием МКЭ 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.

2. 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 при одинаковой толщине УЭ и использовании стандартного промышленного оптоволокна.

3. Для упрощенных инженерных расчетов предложены аналитические модели ОМУ с одноточечной и двухточечной схемами нагружения. Сравнением численной и аналитической модели определены величины поправочных коэффициентов обеспечивающих приемлемую точность расчетов по аналитической модели.

### ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО УЗЛА КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Одной из составляющих частей исследуемого датчика давления является ФВУ, который представляет из себя отдельный кремниевый кристалл с ФЭ, расположенный перпендикулярно оси оптоволокну, через которое подводится оптическое излучение. Основная задача ФВУ преобразовать падающее излучение света в электрический выходной сигнал. При этом излучение в оптоволокну вводится от внешнего по отношению к датчику источника, например светодиода. В качестве устройств для преобразования падающего излучения источника света могут быть фоторезисторы, фотодиоды или фототранзисторы. Фототранзисторы и фоторезисторы требуют внешнего питания, а фотодиоды могут работать в фотовольтаическом режиме без внешнего источника. Далее рассматривается применение фотодиодной структуры для использования в конструкции датчика.

#### 3.1 Особенности преобразовательной характеристики фотовольтаического узла

Рассмотрим особенности преобразовательной характеристики при использовании фотодиодов в составе КФДД. Датчик давления является измерительным прибором и малая нелинейность имеет принципиальное значение. В данном параграфе будет показано, что для построения КФДД целесообразно применять не один, как это сделано в авторами в [23], а два или более фотодиода [102]. Для упрощения далее будет рассмотрен случай нормального падения светового потока на фотодиод со световым пятном в форме круга радиуса  $R$ .

На Рисунке 3.3 представлены два варианта расположения фотодиодов: а) одиночный и узкий, у которого  $h \ll R$  и  $w = 2R$ ; б) два фотодиода, разделенных промежутком  $\delta \ll R$ , у которых  $h > R$  и  $w = 2R$ , где  $R$  – радиус светового пятна от оптоволокну на фотодиоде. Случай «а» приближенно соответствует работе [23].

*Случай «а» - узкий фотодиод.*

Выходной электрический сигнал пропорционален площади засветки  $S$  фотодиода световым пятном оптоволокну:

$$U_B = K \frac{S}{S_\phi},$$

где  $S_\phi$  – общая площадь фотодиода,  $K$  – коэффициент учитывающий особенности светового пятна, электрические и конструктивные параметры фотодиода.

При идеальном расположении фотодиода и оптоволокна (круговое световое пятно, которое при давлении  $P = 0$  касается границы фотодиода), отношение площадей  $F = \frac{S}{S_\phi}$  при смещении  $z$  центра пятна относительно фотодиода имеет вид:

$$F(z) = \frac{R^2}{2wh} [f(x_1) - f(x_2)], \quad (3.1)$$

где  $f(x) = x - \sin(x)$  при  $0 \leq x \leq 2R$ ,  $x_1 = 2 \arccos\left(1 - \frac{z}{R}\right)$ ,  $x_2 = 2 \arccos\left(1 - \frac{z-h}{R}\right)$ .

Соотношение справедливо при смещениях  $z \geq h$ . Если  $z \leq h$ , то в (2) необходимо положить  $x_2 = 0$ .

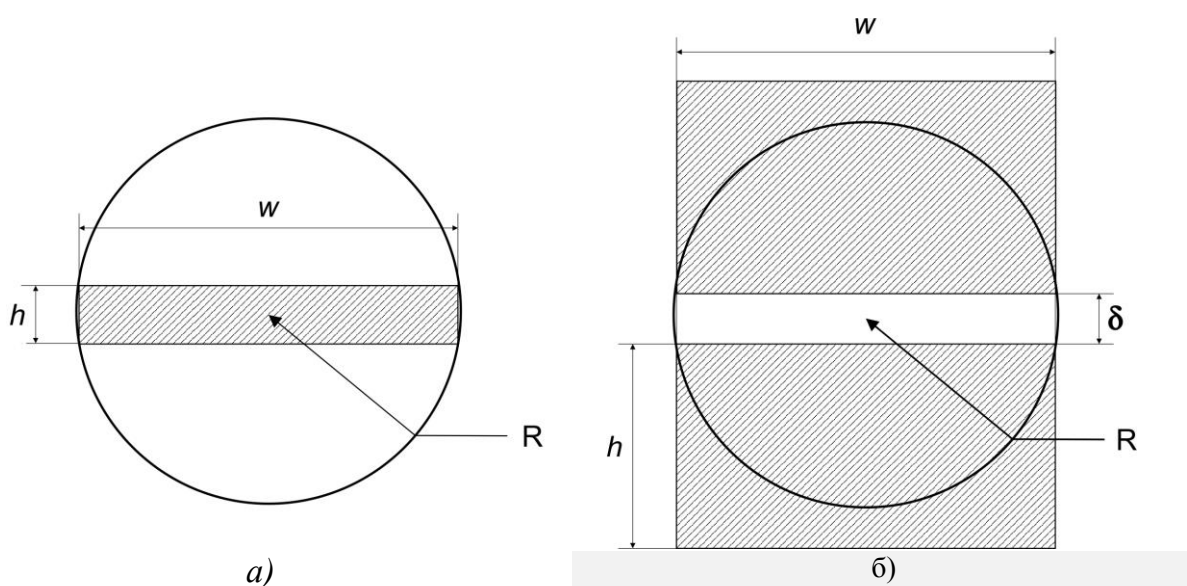


Рисунок 3.3 – Варианты расположения фотодиодов относительно светового пятна:  
а) одиночный узкий,  $h \ll R$ ,  $w = 2R$ ; б) два широких фотодиода:  $h > R$ ,  $w = 2R$ ,  $\delta$  – зазор между фотодиодами

На Рисунке 3.4 приведен общий вид  $F$ , когда смещение не превосходит диаметр светового пятна. Это означает, что частная преобразовательная функция  $S_3$  имеет заметную нелинейность. Зависимость имеет максимум при  $z = R + \frac{h}{2}$ . Если при  $z = 0$  уже существует засветка фотодиода, то имеется начальный выходной сигнал, а зависимость  $F(z)$  становится несимметричной.

*Случай «б» - два фотодиода в дифференциальном включении.*

Интегральная технология позволяет создавать два или более фотодиодов на кристалле. При одинаковых электрофизических и топологических параметрах фотодиодов, выходной сигнал фотовольтаического датчика давления пропорционален разности площадей засветки каждого фотодиода:



$$U = K \left( \frac{S_1 - S_2}{S_\phi} \right) = K [F_1(z) - F_2(z)] \quad (3.2)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – освещенные площади фотодиодов. При идеальном расположении оптоволоконна в режиме при  $P = 0$ , центр светового пятна находится посередине зазора шириной  $\delta$  между фотодиодами, засветка фотодиодов одинакова и выходной сигнал равен нулю. При смещении центра светового пятна на величину  $z$  выходной сигнал  $U \neq 0$  и функции  $F_1(z)$  и  $F_2(z)$  определяются соотношениями:

$$\text{если } 0 \leq z \leq \frac{\delta}{2}$$

$$F_1(z) = \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2 \arccos \left( \frac{\delta}{2R} - \frac{z}{R} \right);$$

$$F_2 = 0;$$

$$\text{если } \frac{\delta}{2} \leq z \leq R - \frac{\delta}{2} \quad (3.3)$$

$$F_1(z) = \frac{\pi R^2}{wh} - \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2 \arccos \left( \frac{z}{R} - \frac{\delta}{2R} \right);$$

$$F_2(z) = \frac{R^2}{2wh} f(x), \quad x = 2 \arccos \left( \frac{z}{R} + \frac{\delta}{2R} \right);$$

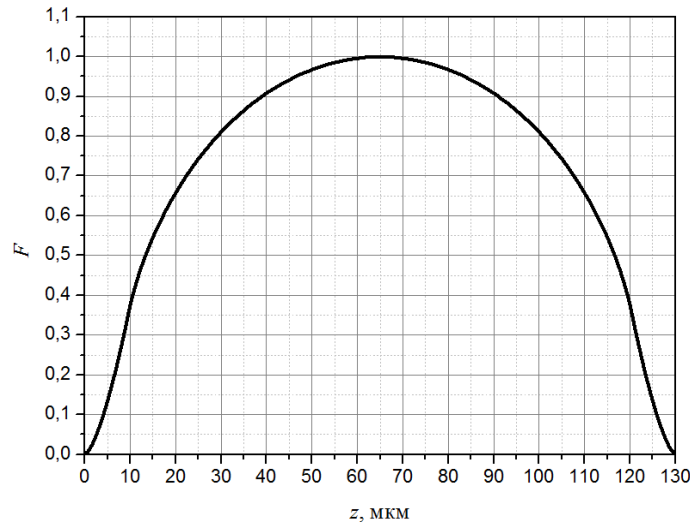


Рисунок 3.4 – Вид функции  $F(z)$  при  $R = 60$  мкм и  $h = 10$  мкм

Смещение  $z$  имеет верхнюю границу  $z_{\max} \leq R - \frac{\delta}{2}$ , тогда  $F_2 = 0$  и второй фотодиод уже не освещается и дифференциальное включение перестает работать. Соотношения (3.2) – (3.3) определяют частную преобразовательную функцию  $S_3$  для случая двух фотодиодов в

дифференциальном включении. На Рисунке 3.5 представлена зависимость разности функций  $S_3 = f_3(\Delta S) = F_1(z) - F_2(z)$  от смещения центра светового пятна. Эту разность можно представить, как чувствительность ФВУ  $S_3$ , рассмотренной в разделе 2.1. Зависимость существенно более линейна, чем для случая одного фотодиода, показанного на Рисунке 3.4. Источником начального выходного сигнала являются неодинаковые засветки фотодиодов при  $P = 0$  и возможные отличия электрофизических характеристик пары фотодиодов.

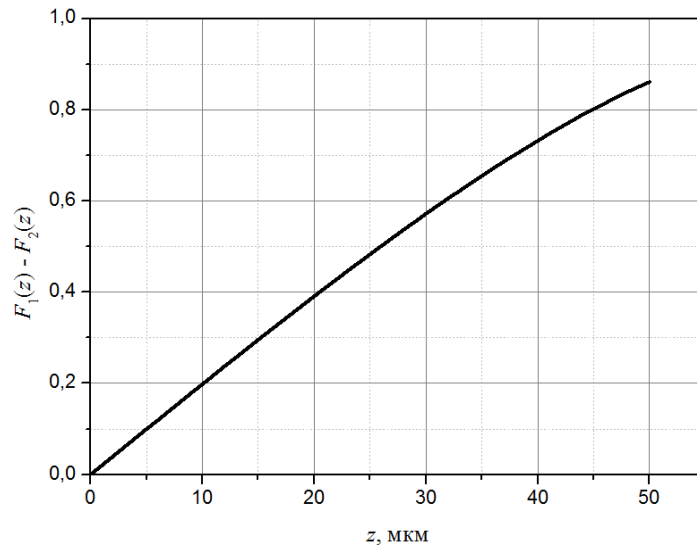


Рисунок 3.5 – Вид функции  $F(z)$  при  $R = 60$  мкм,  $h = 100$  мкм и  $\delta = 10$  мкм

Дифференциальное включение можно применять для фотодиодов и в режиме КЗ. В этом случае  $\Delta J = J_1 - J_2 = J_{\phi 1} - J_{\phi 2}$  и выходной сигнал определяется через разность фототоков фотодиодов. Из вышеприведенного следует, что применение двух фотодиодов в дифференциальном включении вместо одиночного фотодиода обеспечивает лучшую форму преобразовательной характеристики.

### 3.2 Базовая конструкция фотовольтаического узла

Исходя из литературных данных, рассмотренных в главе 1, для использования в качестве ФЭ в датчике давления самым простым будет пара фотодиодов, расположенных в глубоких карманах по принципу BDJ, разделенных между собой узким участком, см. Рисунок 3.6. Расстояние между глубокими карманами *rwell* определяется коэффициентом боковой диффузии конкретной технологии. Глубина *p-well* определяется максимальной глубиной поглощения квантов света, выбранной рабочей длины волны в диапазоне 630-660 нм, и равняется  $\sim 6$  мкм. Контакт к *n++* области желательно выполнить в виде периодической «фингерной» структуры, которая обычно применяется в солнечных элементах, при этом расстояние между полосками контактов не должно превышать 100 мкм, что соответствует диффузионной длине. Контакт к *p-*

well должен быть расположенным по всему периметру кармана. Выбранная подложка будет такой же как и для оптомеханического узла – n-тип проводимости, с кристаллографической ориентацией (100).

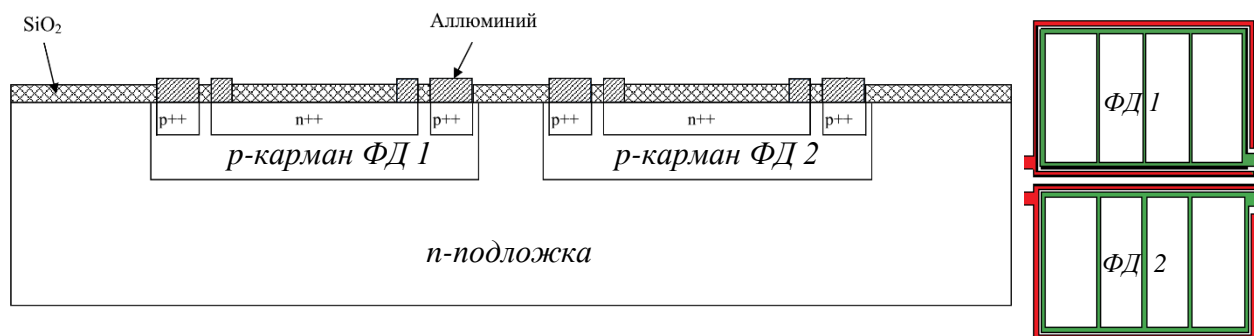


Рисунок 3.6 – Структура ФВУ датчика давления: сечение – слева, планарный вид - справа

По соображениям максимальной экономической эффективности ФВУ в работе рассматривается вариант использования подложек n-типа, как наиболее близко соответствующий современному технологическому процессу изготовления КМОП структур. В следующем разделе будет рассмотрена математическая модель ФЭ для ФВУ КФДД, приведенной на Рисунке 3.6.

### 3.3 Моделирование фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления

Как показано нами ранее в статье [102], в датчиках давления исследуемого типа можно ограничиться двумя ФЭ в дифференциальном включении. Однако при проведении математического моделирования, направленного на подтверждение работоспособности предложенной структуры, исходным для анализа является небольшой двумерный участок [85]. Исходные данные для моделирования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для моделирования

Параметры пластины	Si <100>, 4.5 $\Omega/\square$ , фосфор= $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Длина волны излучения	655 нм
Коэффициент поглощения [80]	$\alpha_{\text{Si}} = 2790 \text{ см}^{-1}$
Коэффициент преломления ( $\lambda=655 \text{ nm}$ ) [105]	$n_{\text{Si}}=3.844$ $k_{\text{Si}}=0,0144$ $n_{\text{Ox}}=1.457$ $k_{\text{Ox}}=0,0$ $n_{\text{Al}}=1.47$ $k_{\text{Ox}}=7.79$
Время жизни [105]	$\tau_n=1 \times 10^{-6} \text{ с}$ $\tau_p=4 \times 10^{-7} \text{ с}$
Концентрация примеси в эмиттере	$1.3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Концентрация примеси в базе	$4.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Толщина алюминия	$\sim 0,7 \text{ мкм}$
Глубина эмиттерной области	1.2 мкм

Принцип функционирования ФВУ в составе датчика давления определяет особенности моделирования:

- поступающее на фотодиод излучение, является монохроматическим,
- излучение поступает через многомодовое оптическое волокно, и в процессе перемещения конца оптоволокну под действием давления форма светового пятна может изменяться, а световое пятно перемещаться;
- фотодиод должен работать без дополнительного обратного смещения;
- в практических приложениях фотодиод работает в квазистатическом режиме.

### 3.3.1 Особенности модели фотовольтаического узла

При численном моделировании необходимо учитывать следующие специфические особенности работы оптоволокну и фотодиода в составе датчика давления:

1. Источником излучения является оптоволокну, световой поток падающий на ФЭ может иметь однородное распределение интенсивности по площади.

2. В зависимости от ориентации плоскости фотодиода, расходящийся световой поток образует на поверхности световое пятно круговой формы. Размеры пятна зависят как от расстояния между оптоволокну и поверхностью фотодиода, так и от сечения сердцевины оптоволокну и его угла рассеивания.

3. Площадь фотодиода должна быть больше площади светового пятна. В дифференциальном включении [106], при перемещении оптоволокну под действием измеряемого давления область засветки фотодиода меняется от половины (за вычетом площади зазора между фотодиодами) до полной площади пятна (Рисунок 3.7).

4. Одностороннее расположение эмиттерного и базового контактов фотодиода в сочетании с неоднородным распределением легирующей примеси по глубине требует двумерного моделирования и является существенно более сложной задачей, чем в случае одномерной модели [44].

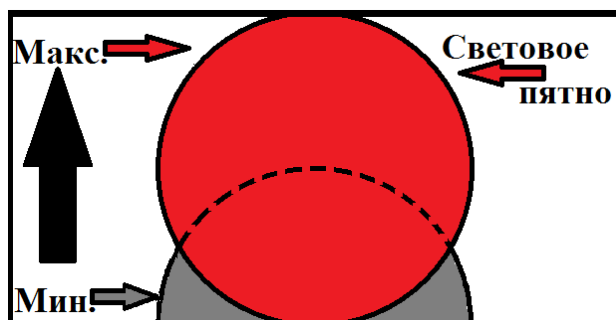


Рисунок 3.7 – Изменение площади засветки фотодиода при смещении оптоволокну

Для учета вышеприведенных особенностей 1-4, в рассматриваемой модели фотодиод разбивается на сегменты, в пределах которых электрофизические и оптические характеристики можно считать однородными (глубины р-п переходов, интенсивность излучения и т.д.) Вольтамперная характеристика одного сегмента отражает характеристику всей структуры. А фототоки сегментов фотодиода суммируются в соответствии с определенным алгоритмом. Размеры одного фотодиода составляют  $300 \times 500$  мкм<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Описание модели сегмента фотодиода

Модель распределения примеси сегмента фотодиода построена в программном пакете Silvaco TCAD [16], профиль легирования создан в модуле Athena. Размер локального 2D сегмента фотодиода  $35 \times 8.5$  мкм. Шаг сетки по  $x = 0,2$  мкм, по  $y$  изменяется от  $0,05$  мкм ( $y$  поверхности) до  $0,2$  мкм (в глубине). Таким образом создается 13032 точек сетки с учетом точек сетки оксида и алюминия (не отображены), которые покрывают 6 исследуемых областей и 2 электрода. Структура краевого сегмента неоднородна по глубине и переходит в одномерное распределение при  $x=10$  мкм в выбранной системе координат. Согласно рассмотренным вариантам изготовления ФЭ, максимальная концентрация примеси в эмиттере выбрана  $1.3 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, концентрация примеси в базе  $4.2 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, глубины залегания р-п переходов 1.2 и 5.8 мкм, для обеспечения максимального поглощения квантов света. Локальные фотодиоды с  $x \geq 20$  мкм могут рассматриваться в рамках одномерной модели. Профиль легирования представлен на Рисунке 3.8а [106]. Структура распределения примеси краевого сегмента фотодиода показана на Рисунке 3.8б.

### 3.3.3 Влияние пассивирующих покрытий

Ничем не прикрытый кремний обладает высокой, более 30%, отражательной способностью. Отражение может быть уменьшено путем применения текстурирования поверхности и нанесением просветляющих покрытий на рабочую поверхность чувствительного элемента [101]. Данные просветляющие покрытия аналогичны тем, что применяются в различных оптических устройствах, одним из ярких примеров являются линзы фото и видео камер. Покрытия состоят из тонкого слоя диэлектрического материала, со специально подобранной толщиной, чтобы эффекты интерференции в слое покрытия, смещали бы фазы волн, отраженных от просветляющего покрытия и от поверхности полупроводника, определенным образом. Отраженные в противофазе волны заглушают друг друга, так что в результате отраженная энергия равно нулю, т.е. отраженная волна отсутствует.

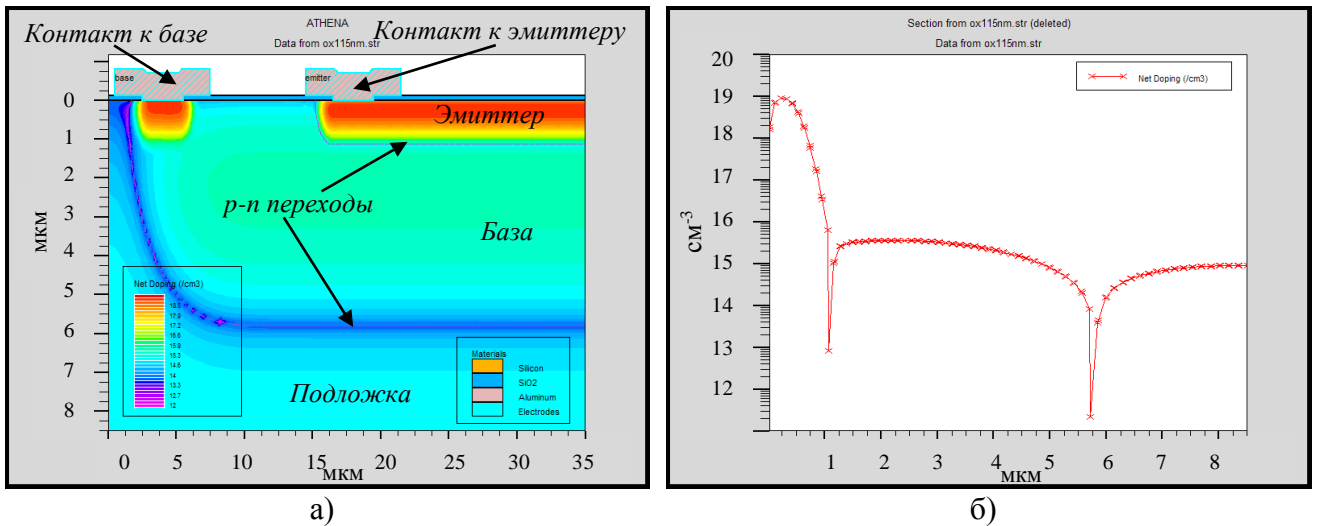


Рисунок 3.8 – 2D сегмент фотодиода –а) и профиль легирования в области  $x \geq 20$  мкм

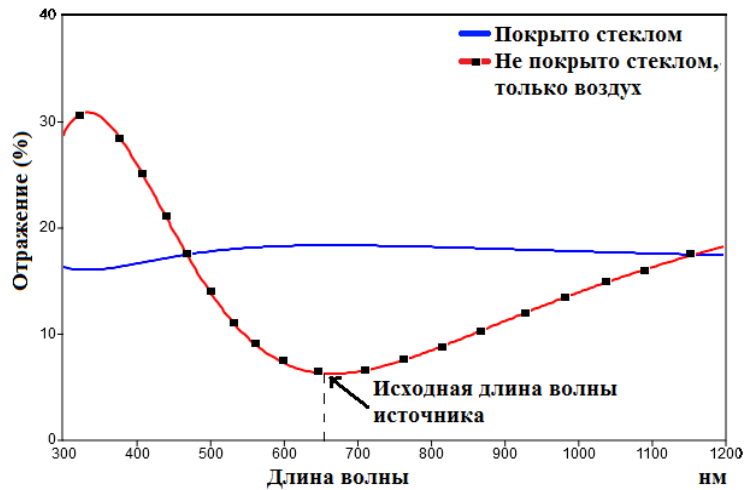
Толщина просветляющего покрытия выбирается, так чтобы длина волны в диэлектрическом материале была равна  $\frac{1}{4}$  длины падающей волны. Для прозрачного просветляющего покрытия на  $\frac{1}{4}$  длины падающей волны с показателем преломления  $n_1$  и падающего света с длиной волны  $\lambda_0$ , толщина слоя  $d_1$ , который обеспечивает минимальное отражение, рассчитывается по формуле [106]:

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1}$$

Отражение может быть уменьшено, если показатель преломления просветляющего покрытия  $n_1$  является средним геометрическим произведением показателей материалов: воздуха или стекла  $n_0$  и полупроводника  $n_2$  [108]:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$

Термический оксид кремния является наиболее простым и доступным материалом, если говорить о кремниевой технологии. Коэффициент преломления оксида кремния на исходной длине волны 655 нм  $n_1=1.457$ , согласно данным приведенным в [109]. На Рисунке 3.9 показано влияние слоя оксида кремния на отражение от поверхности кремния. Толщина просветляющего слоя составила 115 нм, отражение не превышает 6%. Если использовать вместо оксида кремния материал с коэффициентом преломления 1.89, толщиной 85 нм, то можно снизить отражение до 0%. Однако ни один материал из стандартного КМОП процесса, не обладает таким коэффициентом. Поэтому далее будем полагать термический оксид кремния рабочим просветляющим, пассивирующим материалом.



Рису. 3.9 – Влияние одиночного слоя просветляющего покрытия на коэффициент отражения

### 3.3.4 Результаты численного моделирования фотодиода кремниевого фотовольтаического датчика давления

#### 3.3.4.1 Результаты моделирования фотоэлектрических характеристик фотодиода

Вольтамперные характеристики определялись в специальном модуле Atlas Luminous пакета Silvaco TCAD, позволяющем проводить моделирование фотоэлектрических характеристик фото- и светодиодных структур. Для определения фотоэлектрических характеристик сегмента фотодиода в рабочем состоянии, задается равномерный пучок мощностью  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Графическое отображение равномерно падающего перпендикулярно поверхности светового пучка, состоящего из 501 луча, показано на Рисунке 3.10.

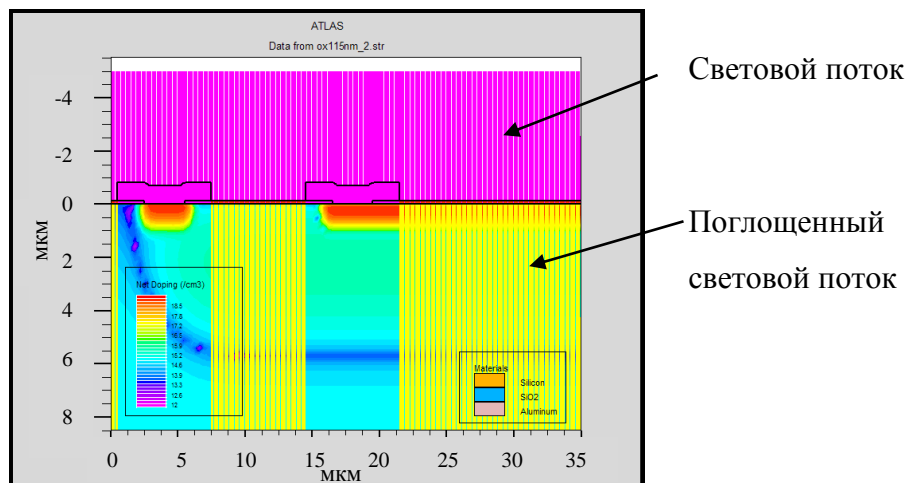


Рисунок 3.10 – Равномерное освещение сегмента фотодиода

На Рисунке 3.11(а-б) представлено изменение интенсивности излучения по глубине структуры. Как видно из графика, интенсивность на границе с оксидом кремния имеет значение

0,941 Вт/м<sup>2</sup>, следовательно после прохождения слоя оксида и отражения, теряется ~6 % интенсивности. На глубине 8 мкм интенсивность излучения падает почти до нуля. Слой алюминиевых контактов не пропускает излучение, поэтому интенсивность падающего пучка под ними равна нулю. Скорость фотогенерации в приповерхностных слоях структуры находится в пределах от  $1 \times 10^{21}$  см<sup>-3</sup> до  $7 \times 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, и убывает до нуля в глубине структуры. Максимальная скорость  $7 \times 10^{21}$  см<sup>-3</sup> на глубине 0.1 мкм, т.е. в пределах эмиттерного слоя.

Скорость рекомбинации, является одной из наиболее важных составляющих для фотодиодных структур в волоконно-оптических линиях связи. Эта характеристика определяет временной отклик структуры. Наибольшая скорость рекомбинации приходится на сильнолегированную область эмиттера, где максимальное значение концентрации составляет  $1.3 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> на глубине 0.2 мкм, затем происходит резкий спад характеристики, практически до нулевого значения. После в области пространственного заряда перехода база-подложка наблюдаются незначительные рекомбинационные процессы.

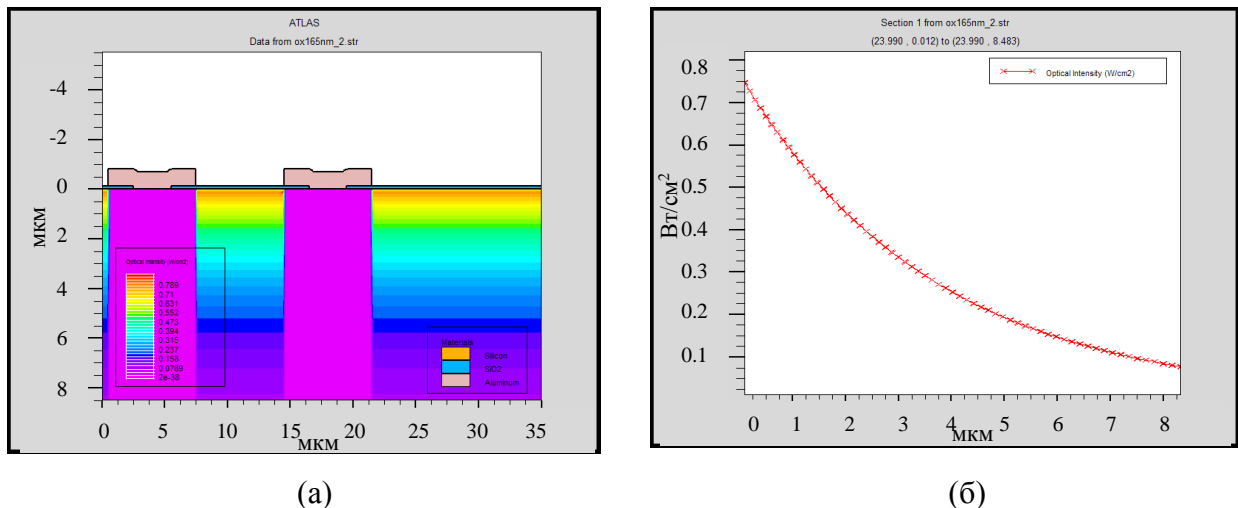


Рисунок 3.11 – Изменение интенсивности излучения по глубине структуры: (а) графическое отображение – слева, (б) график изменения

Для получения максимальной эффективности работы фотодиода необходимо получить спектральную характеристику исследуемой структуры. На Рисунке 3.12 показана характеристика спектрального отклика моделируемого сегмента фотодиода, максимальные значения тока находятся в интервале длин волн от 610 нм до 680 нм, что соответствует стандартным характеристикам кремниевых структур. Моделирование проводилось с учетом различных значений толщины пассивирующего просветляющего термического оксида кремния. Толщины исследуемых покрытий от 115 нм до 565 нм, с шагом 50 нм. Для удобства дальнейшего исследования, а именно, чтобы при сборке конструкции датчика давления было проще позиционировать световой пучок, было решено выбрать в качестве источника твердотельный лазер с длиной волны 655 нм.



Вольтамперная характеристика исследуемого сегмента фотодиода в трех режимах приведена на Рисунке 3.13. На Рисунке 3.13 красная (нижняя) кривая соответствует «темновой» характеристике исследуемого сегмента фотодиода, без источника освещения. Как видно из рисунка, значения обратной ветви ВАХ не превышают значений  $2 \times 10^{-13}$  А, точка перегиба кривой находится на отметке 0 В. Эти значения соответствуют стандартным параметрам КМОП диодов.

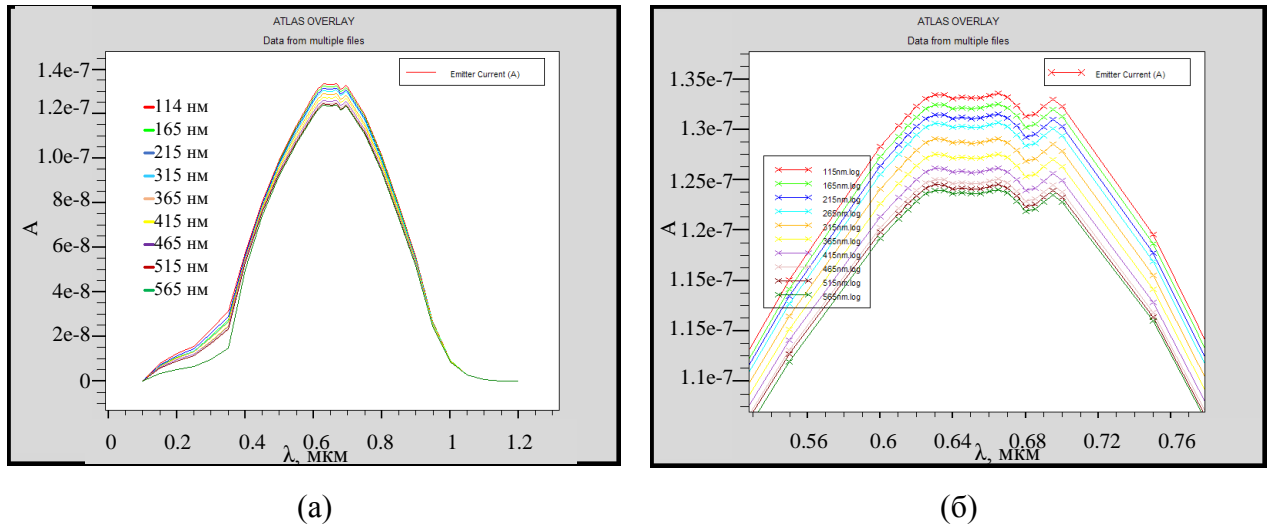


Рисунок 3.12 – Спектральный отклик структуры на длины волн от 0.1 до 1.2 мкм: а) общий вид характеристики спектрального отклика; б) увеличенный пик характеристики

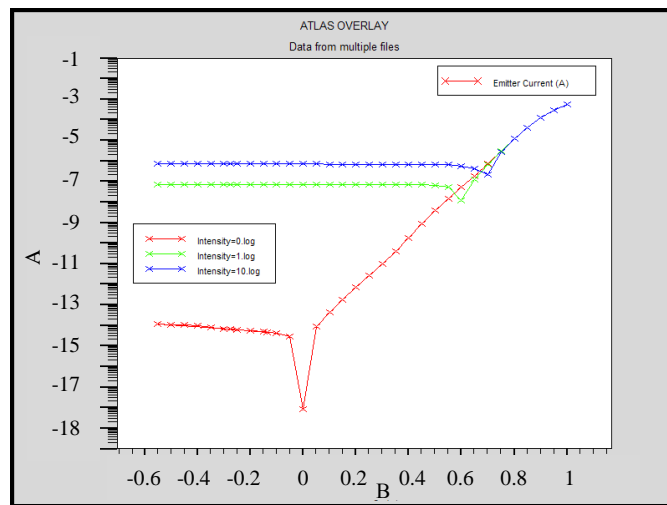


Рисунок 3.13 – Вольтамперная характеристика структуры в логарифмическом масштабе.

Красная кривая – «темновая» характеристика, без источника освещения; зеленая – смещение характеристики в условиях освещения  $1 \text{ Вт/м}^2$ ; синяя – смещение характеристики в условиях освещения  $10 \text{ Вт/м}^2$

Зеленая (средняя) кривая показывает смещение характеристики в условиях освещения источником мощностью  $1 \text{ Вт/м}^2$  на  $0.591 \text{ В}$  (напряжение  $U_{oc}$ ), а обратный ток сегмента возрос до  $2 \times 10^{-7}$  А. Синяя (верхняя) кривая показывает смещение характеристики при увеличении мощности излучения источника до  $10 \text{ Вт/м}^2$ . Как видно, обратный ток возрос до  $9 \times 10^{-7}$  А, а напряжение  $U_{oc}$  до  $0.635 \text{ В}$ . Эти характеристики соответствуют стандартным параметрам

кремниевых фотодиодов и свидетельствуют о возможности применения предложенной конструкции фотодиода для ФВУ.

### 3.3.4.2 Моделирование латерального перемещения узкого пучка света

В процессе работы световой пучок будет перемещаться по поверхности фотодиодов [106]. С целью исследования положения светового пучка на величину выходного сигнала локального фотодиода моделировалось перемещение светового пучка шириной 10 мкм с однородной интенсивностью по двумерному сегменту  $35 \times 10.5$  мкм, приведенного на Рисунке 3.8а. На Рисунке 3.14 показаны четыре положения пучка света, соответствующие перемещению от базового контакта по направлению к центру рассматриваемой строки сегментов.

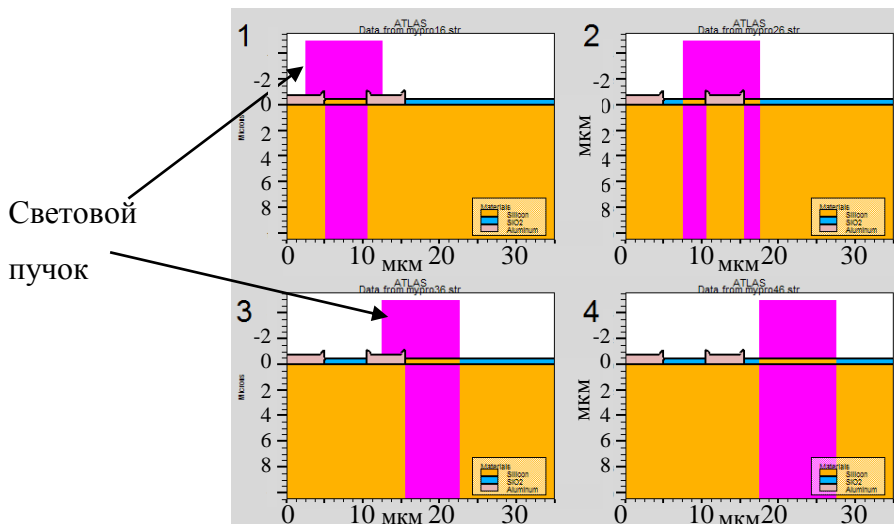


Рисунок 3.14 – Перемещение светового пучка вдоль поверхности сегмента

В положении 1 светового пучка максимальное влияние на напряжение холостого хода  $U_{oc}$  оказывают металлические контакты и искривление p-n перехода. В положении 4 светового пучка работа фотодиода может рассматриваться в рамках одномерной модели. На Рисунке 3.15 представлено изменение выходного сигнала краевого сегмента  $U_{oc}/(U_{oc})_{max}$  при перемещении светового пучка. При расчетах положение пучка задавалось с шагом 2 мкм, а при приближении к границам структуры - 1 мкм.

На полученной зависимости можно выделить 4 участка: 1 – световой пучок подходит к границе локального фотодиода; 2 – наблюдается снижение выходного сигнала связанное с затенением металлизацией эмиттера; 3 - постоянное максимальное значение  $U_{oc}$ , работу сегмента можно рассматривать в рамках одномерной модели; 4 - световой пучок выходит за границы сегмента, выходной сигнал уменьшается. Из результатов моделирования следует, что влияние неоднородного распределения примеси и затенения металлизацией перестает сказываться при полном переходе пучка в область одномерного распределения.

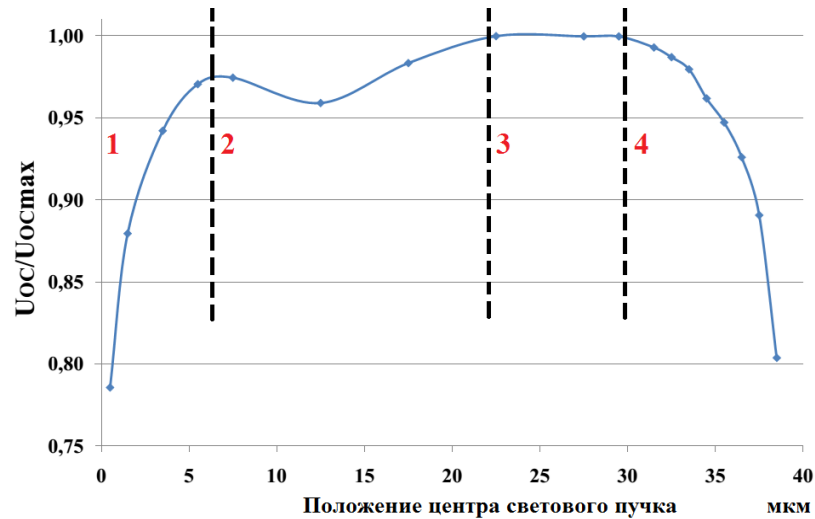


Рисунок 3.15 – Зависимость напряжения холостого хода  $U_{oc}$  от положения центра пучка. Ширина пучка 10 мкм, интенсивность излучения  $1 \text{ Вт} \times \text{см}^{-2}$

### 3.5 Изменение формы и размера светового пятна

Из-за того, что плоскость фотодиода находится на расстоянии  $l_3$ , а конец оптоволокна на расстоянии  $l_2$  от начала координат, при расчете размера светового пятна на фотодиоде необходимо учитывать расходимость светового луча. Возьмем  $L \equiv l_3 - l_2$ . Вопрос о диаграмме направленности этого луча обсуждался в ряде работ и описывался конусом с углом  $\alpha = 12^\circ$  [110-112]. Анализ опубликованных результатов и результаты наших собственных измерений [113] позволяет считать, что диаграмма направленности может быть представлена равномерным световым потоком в сечении, параллельном основанию. При этих предположениях диаметр кругового светового пятна при нормальном падении света на плоскость фотодиода можно описать выражением:

$$\frac{d_2}{2} = \frac{d_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} L \quad (3.3)$$

где  $d_2$ ,  $d_1$ ,  $\alpha$  – соответственно диаметр светового пятна на фотодиоде, диаметр зоны излучения на оптоволокне и угол расходимости светового луча. На Рисунке 3.16 приведены все указанные обозначения.

Для угла расходимости  $\alpha = 12^\circ$ , формула (3.3) принимает вид:

$$d_2 = d_1 + 2 * 0.1051L = d_1 + 0.2102L \quad (3.4)$$

Таким образом, общая площадь светового пятна на фотодиоде будет равна:

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (d_1 + 0.2102L)^2 \quad (3.5)$$

Под действием измеряемого давления световое пятно (3.5) перемещается на величину, определяемую формулой:

$$\Delta z = z(l_1) \left(1 + \frac{3(l_2 + L)}{2l_1}\right) \quad (3.6)$$

где  $z(l_1)$  - прогиб оптоволокну в точке  $l_1$  приложения силы.

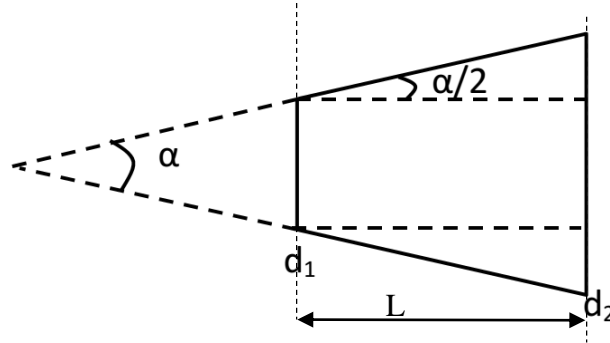


Рисунок 3.16 – Конус расходимости светового луча

Теоретически световое пятно при этом из круглого при  $P=0$  должно превратиться в эллипс при  $P \neq 0$  из-за поворота торца оптоволокну на угол  $\theta$ . Однако в нашем случае из-за малости прогибов мембраны с жестким центром (единицы микрометров) по сравнению с  $l_1$  ( $l_1 \sim 1000$  мкм), можно принять  $\theta \approx 0$  и считать световое пятно круглым (15) и при  $P \neq 0$ . Иными словами, изменение площади светового пятна является величиной второго порядка малости.

### 3.5 Функция преобразования фотодиода

В рассматриваемом датчике фотодиод может работать в режиме холостого хода, т.е. когда тока во внешней цепи нет. В этом случае выходной сигнал равен [42]:

$$U_B = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{j_f}{j_0} \frac{S}{S_\Phi}\right) \quad (3.6)$$

где  $j_f$  и  $j_0$  – плотности фототока и обратного темнового тока насыщения фотодиода;  $S$  – площадь освещенной части фотодиода,  $S_\Phi$  – общая площадь фотодиода.

Принципиальное отличие условий работы фотодиода в рассматриваемом датчике от солнечных элементов или фотодиодов в системах связи заключается в изменяющейся величине площади засветки фотодиода, когда отношение  $\frac{S}{S_\Phi}$  может лежать в интервале  $0 \leq \frac{S}{S_\Phi} \leq 1$ . При

этом в пределах площади засветки интенсивность светового пучка может быть неодинакова. Кроме того, наличие на одном фотодиоде освещенных и неосвещенных участков влияет на величину выходного сигнала  $U_B$ , если в цепи фотодиода протекает ток. Учитывая это, функция преобразования фотодиода будет далее рассматриваться при следующих приближениях:

1 - интенсивность светового пучка в пределах области засветки будем считать равномерной, что представляется естественным, учитывая малый угол ( $\sim 12^\circ$ ) светового конуса.

2 - будем предполагать идеальный случай работы фотодиода в режиме холостого хода, когда ток во внешней цепи отсутствует и шунтирующим действием неосвещенных участков фотодиода можно пренебречь. Реализация этого приближения возможна при высоком входном сопротивлении усилителя электронной схемы обработки сигнала и малом темновом токе фотодиода.

При реализации приближений (1) и (2) выходной сигнал фотодиода можно представить в виде:

$$U_B = K \frac{S}{S_\Phi} \quad (3.7)$$

где

$$K = \frac{\frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{j_f S}{j_0 S_\Phi}\right)}{\frac{S}{S_\Phi}} \quad (3.8)$$

Величина  $K$  в уравнении (3.8) имеет смысл чувствительности, а (3.7) является преобразовательной функцией фотодиода.

При малом уровне возбуждения, когда  $\frac{j_f S}{j_0 S_\Phi} \ll 1$ , чувствительность  $K$  не зависит от отношения  $\frac{S}{S_\Phi}$  и определяется физико-конструктивными свойствами фотодиода:

$$K = \frac{kT j_f}{e j_0} \quad (3.9)$$

При большем уровне возбуждения  $\frac{j_f S}{j_0 S_\Phi} \gg 1$ , имеем:

$$K = \frac{\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{j_f S}{j_0 S_\Phi}\right)}{\frac{S}{S_\Phi}} \quad (3.10)$$

В этом случае чувствительность зависит от отношения  $\frac{S}{S_\Phi}$ , а функция преобразования (3.7) является нелинейной.

Подставив выражения (3.7) и (3.9) в выражение ВАХ фотодиода и приняв

$$I_L = \frac{j_f S}{S_\Phi} \text{ и } I_S = \frac{j_0 S}{S_\Phi} \quad (3.11)$$

Получаем выражение

$$I = \frac{j_0 S}{S_\Phi} \cdot \left( \exp\left(\frac{e S}{kT S_\Phi} \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{j_f S}{j_0 S_\Phi}\right)\right) - 1 \right) - \frac{j_f S}{S_\Phi} \quad (3.12)$$

Упростив выражение (3.12), получаем функцию преобразования фотодиода при изменении площади освещения при большом уровне возбуждения:

$$I = \frac{j_0 S^2}{S_\phi^2} \cdot \exp\left(\ln\left(\frac{j_f S}{j_0 S_\phi}\right)\right) - I_s - I_L \quad (3.13)$$

Напряжение холостого хода  $U_B$  уменьшается с повышением температуры из-за температурной зависимости плотности тока насыщения  $j_0$ , который имеет вид:

$$j_0 = \frac{e D n_i^2}{L N_D} \quad (3.14)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $D$  – коэфф. диффузии,  $L$  диффузионная длина;  $N_D$  концентрация примеси,  $n_i$  – собственная концентрация, которую можно представить в виде:

$$n_i^2 = B T^3 \exp\left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right) \quad (3.15)$$

где  $E_{g0}$  – ширина запрещенной зоны при абсолютном нуле,  $B$  – температурно-независимая константа. Подставив выражения 3.15 в 3.14, получаем [114]:

$$j_0 = \frac{e D n_i}{L n N_D} B T^3 \exp\left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right) \approx B' T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right) \quad (3.16)$$

где  $B'$  – температурно-зависимая константа,  $\gamma$  – используется вместо 3 для учета возможных температурных эффектов других параметров материала. Для фотовольтаических структур  $j_0$  в среднем удваивается при увеличении температуры каждые 10 °С. Вклад  $j_0$  в изменение  $U_{xx}$  можно рассчитать подставив выражение 3.16 в выражение для  $U_{xx}$  [114]:

$$U_B = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{j_f}{j_0}\right) = \frac{kT}{e} (\ln j_f - \ln j_0) = \frac{kT}{e} \left( \ln j_f - \ln B' T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right) \right) = \frac{kT}{e} \left( \ln j_f - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{q U_{g0}}{kT} \right) \quad (3.17)$$

где  $E_{g0} = q U_{g0}$ . При условии, что  $dU_{g0}/dT$  не влияет на  $dj_f/dT$ , то  $dU_B/dT$  можно выразить как [114]:

$$\frac{dU_B}{dT} = \frac{U_B - U_{g0}}{T} - \gamma \frac{k}{e} \quad (3.18)$$

Из уравнения 3.18 следует что для больших напряжений наблюдается меньшая температурная зависимость. Для кремния  $E_{g0} = 1.2$ , а при  $\gamma = 3$  и  $U_B = 310$  мВ,  $dU_B/dT \approx -2.2$  мВ/°С.

Для солнечного спектра ток короткого замыкания же наоборот плавно увеличивается с повышением температуры из-за уменьшения  $E_g$ , так как становится больше фотонов с энергией достаточной для формирования электрон-дырочных пар. Для тока короткого замыкания влияние температуры определяется следующим выражением  $\frac{1}{j_f} \frac{dj_f}{dT} \approx 0.0006$  на °С [112].

Таким образом работа ФВУ в режиме холостого хода имеет сильную зависимость от температуры, на уровне  $\frac{1}{U_B} \frac{dU_B}{dT} \approx -0.0048$  на °С, а для режим короткого замыкания характеризуется слабой зависимостью от температуры и является предпочтительным для использования в датчиках давления на фотовольтаическом эффекте. В сравнении с тензорезистивными датчиками, температурная зависимость которых выражается как  $1/T$ , КФДД обладают иной температурной зависимостью из-за различных принципов действия.

### Выводы к главе 3

1. Разработана аналитическая модель ФВУ КФДД. На ее основе показано, что интегральная технология позволяет изготовить несколько ФЭ на кристалле и обеспечивает возможность улучшения метрологических характеристик КФДД по сравнению с датчиками, содержащими один ФЭ. Сформулированы общие конструктивные требования к ФВУ КФДД.

2. Показано, что температурная зависимость функции преобразования ФВУ с дифференциальным включением может быть различной при работе в режимах ХХ и КЗ, и предпочтительным является режим КЗ, как имеющий слабую зависимость от температуры.

3. Разработана двумерная численная модель ФЭ. На основе предложенной численной модели ФЭ показана возможность создания ФВУ в рамках стандартного КМОП техпроцесса с удовлетворительными характеристиками и функционирование при изменении площади освещения ФЭ.

## ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

В рамках обзора возможных вариантов реализации КФДД был проведен анализ отечественных и зарубежных решений в области построения современных прецизионных датчиков давления. Базовым вариантом изготовления КФДД был выбран 3D вариант, который состоит из ОМУ и ФВУ КФДД с применением МЭМС технологии. Результаты математического моделирования узлов КФДД, приведенные в главах 2 и 3, делают приоритетной конструкцию ОМУ с двухточечной схемой нагружения и ФВУ с двумя фотодиодами на кристалле. Особенностью технологии создания КФДД является необходимость «встраивания» в маршрут выбранной в качестве базовой «чистой» стандартной микроэлектронной КМОП технологии с проектно-технологическими нормами 3.0 мкм процессов формирования трехмерных структур. Ниже отдельно рассмотрены результаты разработки топологии и исследования образцов кристаллов ОМУ и ФВУ КФДД.

### 4.1 Топология упругого элемента оптомеханического узла

В рамках моделирования нами было предложено несколько конструкций ОМУ КФДД. Первая представляет собой кремниевую профилированную с двух сторон мембрану с ЖЦ. На поверхности УЭ вдоль средней линии кристалла сформирована V-канавка, в которую вкладывается оптоволокно и в последствии фиксируется на рамке. Свободный конец оптоволокно направлен в сторону U-образной полости в жесткой рамке, глубина которой совпадает с глубиной профилирования мембраны. Вдоль жесткой рамки УЭ, параллельно V-канавке с рабочим оптоволокном, формируются вспомогательные V-канавки. В эти V-канавки вкладываются и фиксируются клеевым способом направляющие оптоволокна, необходимые для дальнейшей сборки датчика. Такая конструкция ОМУ реализует схему нагружения, в которой перемещение свободного конца оптоволокна повторяет перемещение ЖЦ.

Вторая конструкция ОМУ, реализует двухточечную схему нагружения. Особенностью этой конструкции является использование сборки, состоящей из УЭ и крышки. При этом структура УЭ повторяет упругий элемент первого варианта конструкции, с той лишь разницей, что ЖЦ сдвинут ближе к свободному концу оптоволокна. Структура крышки повторяет структуру УЭ, но при этом ЖЦ сдвинут в сторону закрепленного конца оптоволокна и отсутствует полость с обратной стороны кристалла. В такой конструкции перемещение свободного конца оптоволокна определяется поворотом, вызванного парой перерезывающих сил



действующих в сечении оптоволоконного заключенного между жесткими центрами УЭ и крышки, как показано на Рисунке 2.23.

Выбранный нами УЭ обеих конструкций - кремниевый кристалл площадью  $4 \times 4 \text{ мм}^2$  и толщиной 470 мкм в центральной части которого сформирована квадратная мембрана со сторонами длиной 2 мм и толщиной 60 - 80 мкм. Топологические размеры окон травления мембраны с планарной и обратной стороны пластины рассчитаны с учетом особенности травления плоскости (100) и составляют соответственно  $2282 \times 2282 \text{ мкм}^2$  и  $2600 \times 2600 \text{ мкм}^2$ . Размер окон V-канавок выбран таким образом, чтобы обеспечить надежную фиксацию рабочего и направляющих оптических волокон диаметром 125 мкм. Ширина линий реза с обеих сторон пластины составляет 40 мкм и выбрана таким образом, чтобы обеспечить вертикальность боковых граней кристаллов после операции резки пластины.

Размеры основания ЖЦ для УЭ конструкции ОМУ, состоящего из двух кристаллов -  $1000 \times 750 \text{ мкм}^2$ . При этом топологический размер ЖЦ рассчитан с учетом особенности травления плоскости (100). Внешние углы топологических элементов (ЖЦ, область сопряжения мембраны с U-образной полостью) были защищены от сглаживающего растрова в КОН квадратными компенсаторами [115-119], размеры которых были пересчитаны по формуле [115]:

$$a = \sqrt{2} \cdot d \cdot \frac{V_{411}}{V_{100}}, \quad (4.1)$$

где  $a$  – длина стороны компенсатора,  $d$  – глубина травления,  $V_{411}$  – скорость травления плоскостей {411}, а  $V_{100}$  – скорость травления плоскости (100). Отношение скоростей травления плоскостей 411 и 100 для случая 30% водного раствора КОН при температуре  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  примерно равно 1.319 [115]. Размеры длины стороны  $a$  компенсатора с учетом глубины травления  $d = 200 \text{ мкм}$ , равен 424 мкм. Ширина маски окна травления U-образной полости была рассчитана по формуле (4.1) и составляет 500 мкм. Внешние углы маски травления ЖЦ и области сопряжения мембраны с U-образной полостью были защищены от сглаживающего растрова в КОН квадратными компенсаторами, с размерами сторон  $a = 374 \text{ мкм}$ .

Ширина V-канавок 118 мкм выбрана таким образом, чтобы обеспечить надежную фиксацию оптоволокон. V-канавки для позиционирования рабочего оптоволоконного имеют на концах компенсаторы с размерами  $243 \times 324 \text{ мкм}$ , которые защищают концы V-канавки от сглаживающего растрова в КОН. Эти компенсаторы были рассчитаны по формуле (4.2):

$$L_c = \frac{1}{\tan(\alpha)} \cdot \left[ \frac{H}{\cos(\alpha)} \cdot \frac{V_{411}}{V_{100}} - \frac{W_c}{2} \right], \quad (4.2)$$

где  $L_c$  – длина компенсатора (243 мкм),  $W_c$  – выбранная ширина компенсатора (324 мм),  $H$  – глубина травления (200 мкм),  $\frac{V_{411}}{V_{100}} = 1.319$ ,  $\alpha$  – угол между плоскостями (411) и (100). V-канавки

для направляющего оптоволоконна проходят через всю длину кристалла и не нуждаются в компенсаторах.

Маска для травления ЖЦ размером  $468 \times 738$  мкм, была рассчитана с учетом финальной формы ЖЦ с размерами прямоугольного основания  $750 \times 1000$  мкм. Топология кристалла конструкции с двухточечной схемой нагружения представлена на Рисунке 4.1а, а на Рисунке 4.1б – топология крышки. При этом реализованы вариации взаимного положения ЖЦ кристаллов УЭ и крышки: расстояние между жесткими центрами 500 мкм, 550 мкм, 600 мкм.

Одним из самых распространенных способов объемного профилирования кремния для создания МЭМС-приборов является травление в водном растворе КОН. Анизотропия травления кремния в КОН обеспечивает простоту создания профиля травления желаемой формы и размеров. Обычно маска окна для анизотропного травления кремния состоит из комбинации пленок диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  и нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

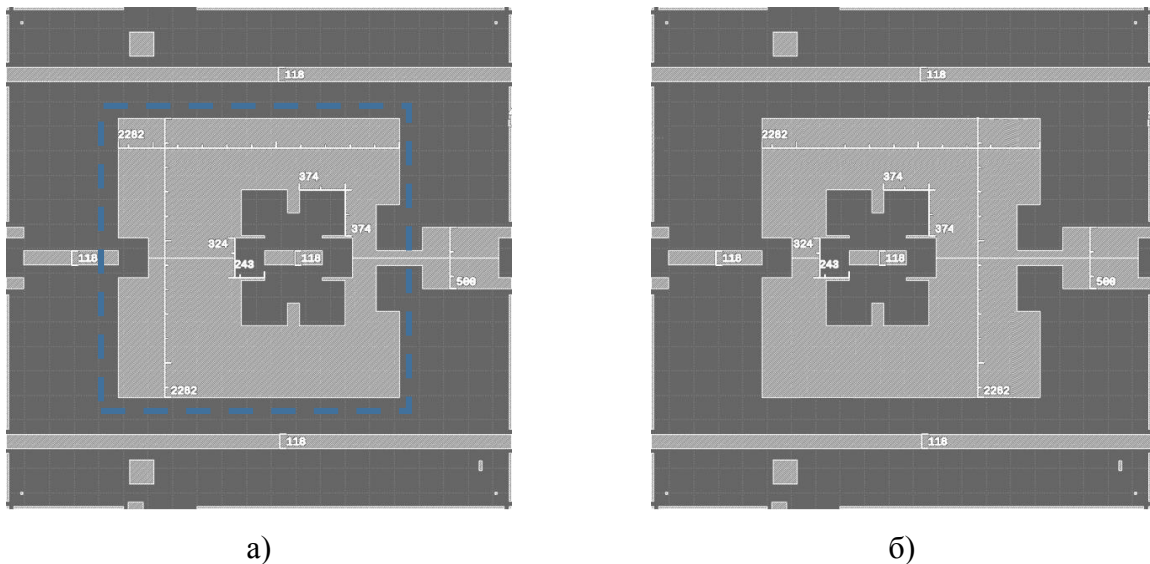


Рисунок 4.1 – Топология ОМУ с двухточечной схемой нагружения оптоволоконна, вариант с увеличенными компенсаторами на выходах V-каналов - а). Штриховой линией показано окно под травление мембраны с обратной стороны. Топология крышки – б)

Топология базовых шаблонов №1 и №2 приведена на Рисунке 4.2(а,б). Данная топология использована для проведения экспериментальных исследований и разработки маршрута на фабрике-изготовителе, в том числе для экспериментального обоснования и разработки технических требований к рассовмещению фотошаблона и пластины.

Фотошаблон №2 предназначен для создания маски для травления мембраны с обратной стороны кристалла. Размер маски окна травления для фотошаблона, приведенного на Рисунке 4.2б, рассчитан по формуле (4.1) и равен  $2.6 \times 2.6$  мм. При этом размер квадратного основания вытравленной полости глубиной 200 мкм равен  $2.318 \times 2.318$  мм, что на 318 мкм превышает размеры основания полости вытравленной с планарной стороны кристалла ( $2 \times 2$  мм).

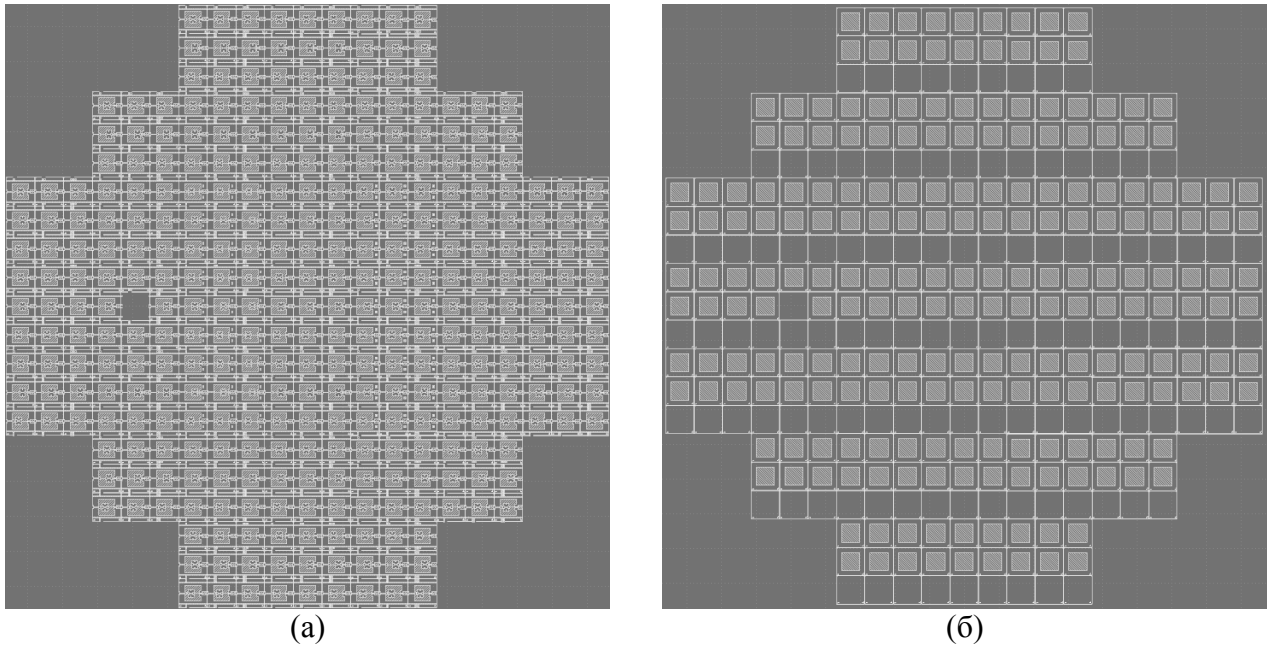


Рисунок 4.2 – Общий вид топологии для изготовления кристаллов ОМУ КФДД

Эта разница в размерах необходима для устранения возможных последствий рассовмещения фотошаблонов на этапе выполнения операции двусторонней фотолитографии. При этом мембрана УЭ определяется наименьшим из двух размеров и составляет  $2 \times 2$  мм.

#### 4.1.1 Исследование влияния рассовмещения фотошаблона с базовым срезом пластины кремния

Позиционирование маски относительно кристаллической структуры кремниевой подложки определяется на этапе фотолитографии, когда выполняется процесс совмещения фотошаблона с базовым срезом пластины. При этом угловое рассовмещение фотошаблона относительно базового среза определяет дальнейшие искажения формы травления, которая по разному выражается для элементов с внешним и внутренними углами маски окна травления. В данном разделе проведен анализ влияния рассовмещения фотошаблона №1 с базовым срезом пластины кремния на форму элементов УЭ после операции анизотропного травления в водном растворе КОН и обоснованию требований к рассовмещению.

За исходный материал УЭ КФДД выбрана кремниевая пластина, плоскость которой представляет собой поверхность (100), а её базовый срез ориентирован вдоль кристаллографического направления  $\langle 110 \rangle$ . При этом все элементы маски травления УЭ ориентированы вдоль направлений семейства  $\langle 110 \rangle$ . Угловая ошибка рассовмещения фотошаблона с базовым срезом приводит к искажению формы и размеров элементов УЭ. Эти изменения связаны с процессом самовыравнивания профиля травления. Процесс

самовыравнивания заключается в ограничении окна травления элементов УЭ наиболее устойчивыми к водному раствору КОН плоскостями (111).

Рассмотрим влияние угловой ошибки совмещения  $\beta$  фотошаблона по отношению к базовому срезу пластины на элементы УЭ, маска травления которых представляют собой прямоугольную или квадратную форму. В этом случае профиль самовыравнивания будет представлять описанную вокруг исходного окна травления размером  $w \times l$  фигуру с размерами  $W \times L$ , как показано на Рисунке 4.3.

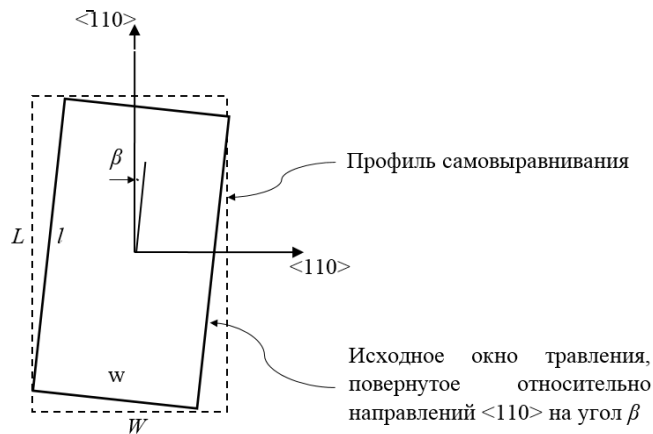


Рисунок 4.3 – Профиль самовыравнивания для элементов с прямоугольным окном травления

Размеры профиля самовыравнивания связаны с размерами исходного окна травления следующими соотношениями:

$$W(\beta) = w \cdot \cos(\beta) + l \cdot \sin(\beta), \quad (4.3)$$

$$L(\beta) = l \cdot \cos(\beta) + w \cdot \sin(\beta). \quad (4.4)$$

Как видно из рисунка 4.3, наличие угловой ошибки совмещения приведет к увеличению размеров элементов УЭ, маска травления которых имеет только внутренние углы. Изменение размеров мембраны, а также ширины V-каналов для направляющих и рабочего оптоволоконка приведены в зависимости от угла  $\beta$  на Рисунке 4.4. Изменение длины V-каналов не оказывает влияния на работу ОМУ КФДД.

Увеличение размеров мембраны приводит к уменьшению ее жесткости и как следствие увеличению отклонения рабочего оптоволоконка, что положительно повлияет на чувствительность датчика. Отрицательным эффектом будет являться незначительное уменьшение прочности чувствительного элемента. Уширение V-каналов для направляющего и рабочего оптоволоконка могут значительно повлиять на работоспособность датчика. Как видно из рисунка 4.4 угловое рассовмещение в различной степени влияет на ширину центральной и краевых V-каналов. Центральная V-канавка уширяется гораздо меньше, чем краевые. Это связано с разницей в длине окон травления этих V-каналов. Для конструкции ОМУ, в которой реализуется двухточечная схема нагружения, такое неравнозначное уширение V-каналов может привести к отклонению

рабочего оптоволоконна при отсутствии измеряемого давления, что отрицательно повлияет на начальный выходной сигнал датчика. Кроме того, в представленной конструкции ОМУ с двумя кристаллами, между крышкой и УЭ имеется технологический зазор, необходимый для отвода излишка клея от областей приклеивания (V-каналов для направляющих оптоволокон) датчика на этапе сборки. При этом направляющие оптоволоконна жестко фиксируются боковыми стенками V-каналов, что обеспечивает точное позиционирование ФВУ относительно ОМУ на этапе сборки датчика. Чрезмерное уширение направляющих V-каналов из-за ошибки рассовмещения может привести к случаю, когда направляющие оптоволоконна потеряют жесткую фиксацию в зазоре между V-канавками. В этом случае пропадет технологический зазор между крышкой и упругим элементом датчика, а также станет невозможным точное позиционирование ФВУ. Таким образом, угловая ошибка рассовмещения, при которой пропадает контакт направляющих оптоволоконна с боковыми стенками V-каналов, является критерием точности позиционирования фотошаблона относительно базового среза пластины.

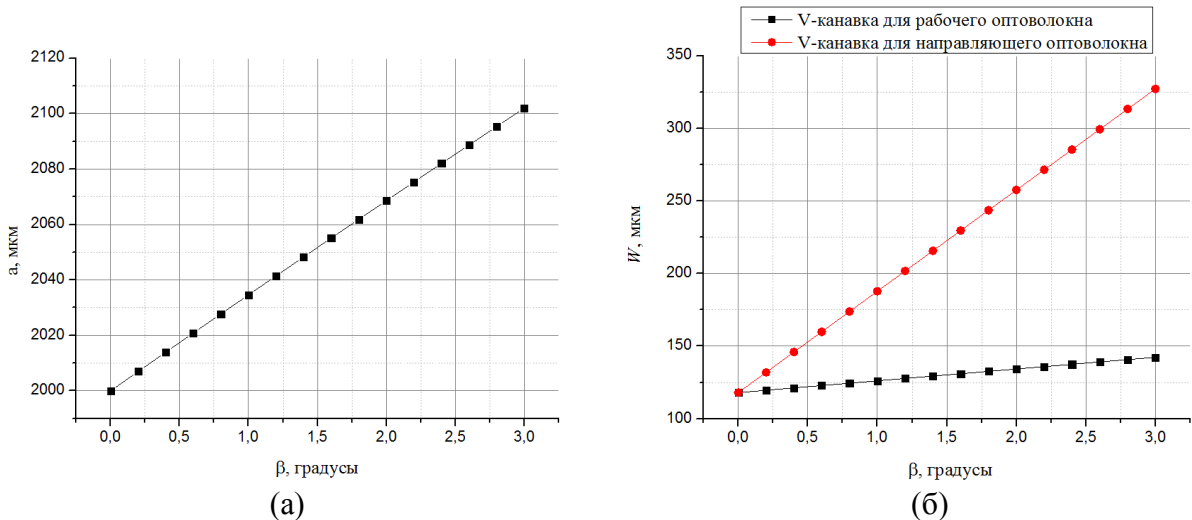


Рисунок 4.4 – Изменение размера мембраны (а) и ширины V-каналов (б) ОМУ ЧЭ КФДД в зависимости от угла рассовмещения  $\beta$

Для того чтобы определить максимально допустимый угол рассовмещения, найдем ширину направляющих V-каналов, при которой пропадает жесткая фиксация оптоволокон. Этот случай схематически изображен на Рисунке 4.5. Предельно допустимая ширина V-каналов  $w_{\max}$  и максимальный угол рассовмещения  $\beta_{\max}$  в этом случае определяются следующими соотношениями:

$$w_{\max} = \frac{D}{\sin(54.74)} = 153.08 \text{ мкм}, \quad (4.5)$$

$$\beta_{\max} = \arctg\left(\frac{w_{\max} - w_0}{l_0}\right) = 0.502, \quad (4.6)$$

где  $D$  – диаметр оптоволоконна (125 мкм),  $w_0 = 118$  мкм и  $l_0 = 4000$  мкм – соответственно топологические ширина и длина направляющих V-каналов.

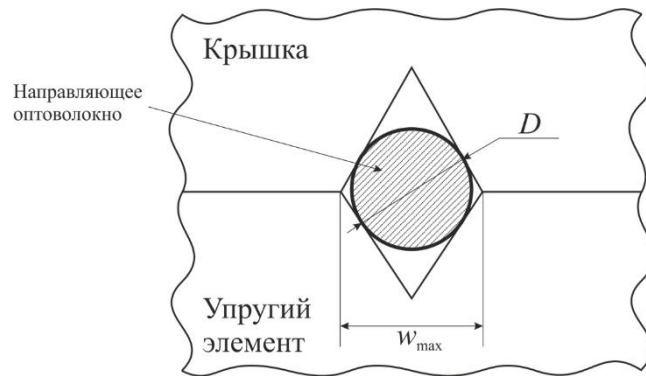


Рисунок 4.5 – Предельный случай уширения направляющих V-каналов

Топология ОМУ также включает в себя элементы, маска для травления которых содержит внешние углы. К таким элементам относятся ЖЦ и компенсаторы. В результате ошибки рассовмещения форма травления этих элементов в процессе самовыравнивания определяется контуром, вписанным в исходную маску травления, причем все его стороны ориентированы по направлениям  $\langle 110 \rangle$ , см. Рисунок 4.6. Размеры профиля самовыравнивания в этом случае определяются выражениями обратными (4.7) и (4.8):

$$w(\beta) = \frac{W - L \cdot \operatorname{tg}(\beta)}{(1 - \operatorname{tg}(\beta)^2) \cdot \cos(\beta)}, \quad (4.7)$$

$$l(\beta) = \frac{L - W \cdot \operatorname{tg}(\beta)}{(1 - \operatorname{tg}(\beta)^2) \cdot \cos(\beta)}. \quad (4.8)$$

На Рисунке 4.7(а) на примере топологии ЖЦ пунктиром показана маска травления, учитывающая процесс самовыравнивания. На Рисунке 4.7(б) приведена соответствующая форма ЖЦ на этапе травления, когда компенсаторы не полностью стравились. При этом маска травления ЖЦ была повернута относительно базового среза на угол  $\beta$ .

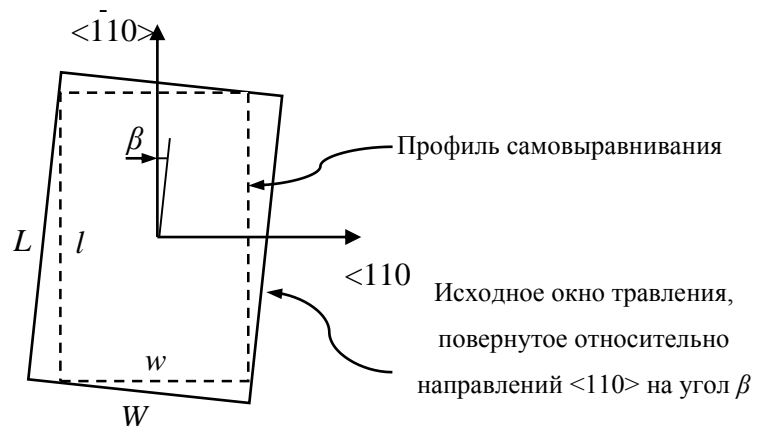


Рисунок 4.6 – Профиль самовыравнивания для элементов с внешними углами травления

Как видно из рисунка 4.7, влияние ошибки рассовмещения на компенсаторы и маску травления V-канавки для фиксации рабочего оптоволокна приводит к изменению их взаимного

расположения. Компенсаторы с обеих сторон V-канавки оказываются сдвинуты относительно ее средней линии. Это имеет следствием эффект не симметричного растравливания боковых стенок V-канавки с обеих ее концов, как показано на Рисунке 4.8.

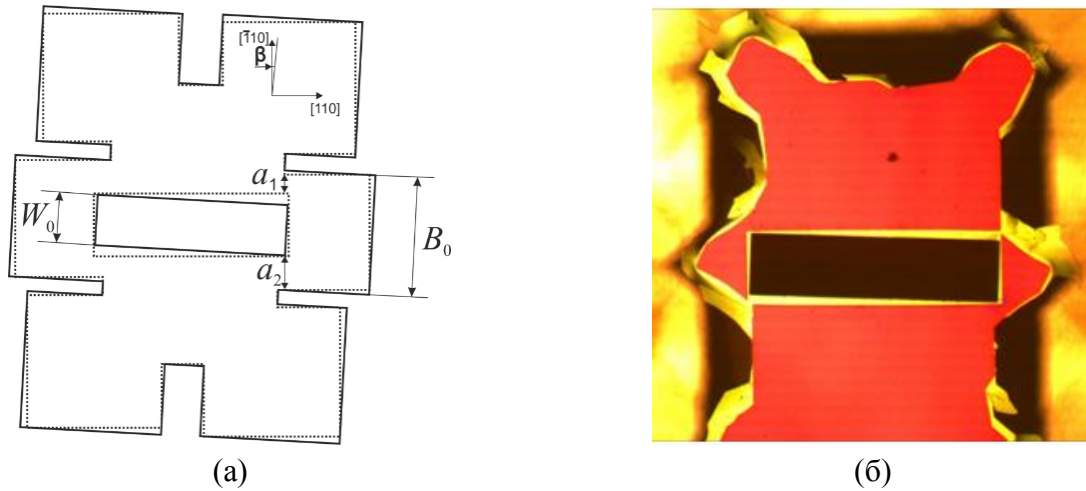


Рисунок 4.7 – Форма профиля самовыравнивания для топологии ЖЦ с учетом угловой ошибки рассовмещения (а) и ЖЦ на промежуточном этапе травления, для топологии которого была допущена угловая ошибка рассовмещения (б)

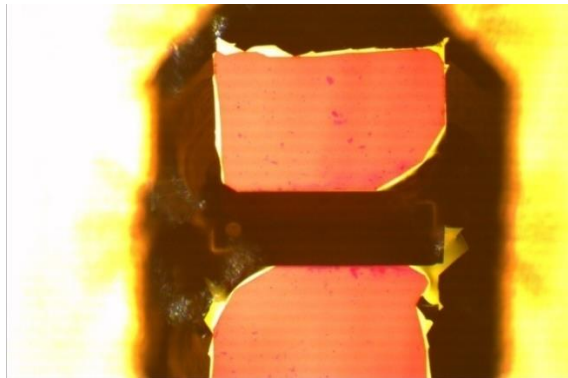


Рисунок 4.8 – Финальная форма травления ЖЦ с несимметричным растравом концов V-канавки для фиксации рабочего оптоволокну

В случае структуры с двухточечной схемой нагружения, эффект искажения формы представленный на Рисунке 4.8, может привести к изменению формы отклонения рабочего оптоволокну под нагрузкой. Так помимо нормального по отношению к мембране УЭ отклонения рабочего оптоволокну, появится латеральная составляющая отклонения оптоволокну. Это является следствием нарушения симметрии точек соприкосновения оптоволокну в местах его контакта с ЖЦ крышки и УЭ под нагрузкой. Появление латеральной составляющей отклонения оптоволокну отрицательно повлияет на чувствительность датчика.

На Рисунке 4.7 определены размеры  $a_1$  и  $a_2$ , которые характеризуют соответственно узкую и широкую части маски травления в области компенсаторов на обоих концах V-канавки в результате угловой ошибки рассовмещения. Это является причиной несимметричного растрав краёв V-канавки. Следовательно, степень влияния угловой ошибки рассовмещения на форму V-

канавки в центре мембраны можно охарактеризовать отношением характеристических размеров  $a_1$  и  $a_2$ . Эти размеры определяются следующими соотношениями:

$$a_1 = B(\beta) - W(\beta) - a_2, \quad (4.9)$$

$$a_2 = \frac{B - W_0}{2}, \quad (4.10)$$

где  $W_0$  и  $B_0$  - соответственно топологические размеры ширины V-канавки на жестком центре и компенсаторов на ее концах, а  $W(\beta)$  и  $B(\beta)$  - эти же размеры с учетом процесса самовыравнивания. Отношение характеристических размеров  $a_1$  и  $a_2$  приведено на Рисунке 4.9.

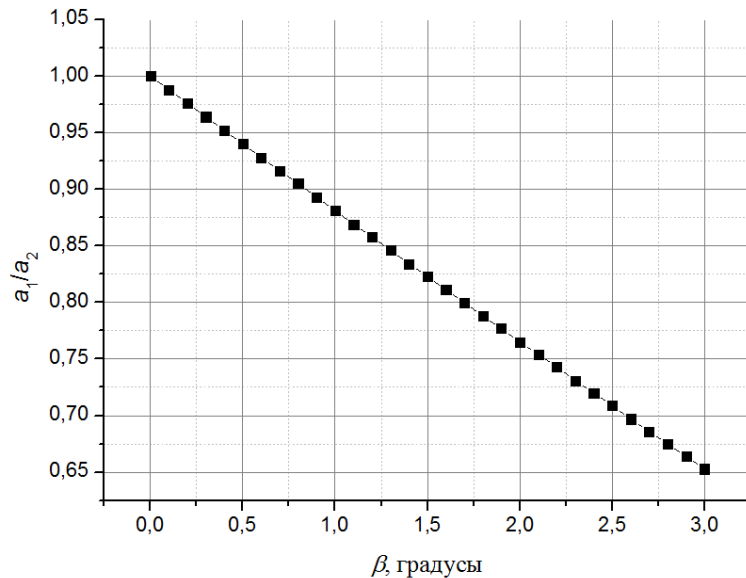


Рисунок 4.9 – Отношение характеристических размеров  $a_1$  и  $a_2$

При угловой ошибке рассовмещения не превышающей 0,5 градуса [120], отношение  $a_1/a_2$  не превышает 0,95, что свидетельствует о сохранении желаемой формы ЖЦ и незначительного отклонения в симметричности растравливания краёв V-канавки для фиксации светопроводящего оптоволокну. Таким образом, предельно допустимая величина рассовмещения фотошаблона и плоскости <100> кремниевой пластины не должно превышать 0,5 градуса.

#### 4.1.2 Исследование особенностей формирования трехмерных островковых структур упругого элемента

В данном разделе будут рассмотрены особенности формирования трехмерных островковых структур (ЖЦ) кремния (100) при травлении в водном растворе КОН. Наиболее массовым способом формирования ОМУ является анизотропное травление кремниевой подложки в водном растворе КОН. Его особенностью является хорошее воспроизведение внутренних углов при формировании углублений и сильное искажение формы внешних углов



вследствие эффекта бокового подтравливания. Различными авторами предложен ряд типов компенсаторов и методов их расчета для защиты внешних углов от растравливания в процессе формирования элементов структур датчика [115-117].

Случай одновременного формирования двух типов сопряженных структур, например, островковой структуры и V-канавки на ней, либо углубления и V-канавки, требует специального рассмотрения из-за усложненной топологии и сильного влияния бокового подтравливания. В работах [120-121] проанализирован теоретически и исследован экспериментально случай формирования в водном растворе КОН канала V-канавки и квадратной апертуры для системы микрофлюидики, когда число внешних углов требующих компенсации равно двум. Формирование островковой структуры и V-каналов для оптоволокна на ней, применительно к рассматриваемому варианту КФДД, до сих пор экспериментально не исследовано. В этом случае существует две характерные особенности:

1) Прямоугольная островковая структура с V-канавкой имеет восемь внешних углов, боковое подтравливание которых затрудняет получение структуры ОМУ с необходимой геометрией, и требует использования компенсаторов.

2) Отношение размера стороны островковой структуры к поперечному размеру V-канавки может быть существенно меньше, чем отношение стороны квадратного углубления к аналогичному размеру V-канавки, рассмотренному в работе [119], что приводит к специфической топологии компенсаторов для островковых структур.

Далее будет приведено экспериментальное исследование особенностей формирования кремниевой островковой структуры с V-канавкой для оптоволокна, входящей в состав ОМУ датчика давления, изготавливаемого на подложках кремния ориентации (100).

#### *Исходная структура и условия эксперимента*

Экспериментальное исследование проводилось на УЭ ОМУ кремниевое датчика давления. Упругий элемент состоял из:

- а) квадратной жесткой рамки толщиной 475 мкм, в которой сформирована V-канавка под жестко закрепленное оптоволокно и U-канавка для свободного торца шириной 500 мкм;
- б) мембраны размером  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> и толщиной 70 мкм;
- в) ЖЦ размером  $750 \times 1000$  мкм по основанию с V-канавкой в центре шириной 118 мкм и 84 мкм глубиной;
- г) стороны ориентированы вдоль направления  $\langle 110 \rangle$ , общие размеры  $4 \times 4$  мм.

Для создания УЭ использовались двусторонне полированные пластины КЭФ4.5 диаметром 100 мм и толщиной  $475 \pm 5$  мкм. В качестве маски для травления применялась комбинация слоев SiO<sub>2</sub> (0.4 мкм) и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (0.18 мкм). Травление проводилось на глубину до 225 мкм в 33% водном растворе КОН в термостате LOIP LT-124a при температуре  $80 \pm 0.5^\circ\text{C}$  со

скоростью травления  $V_{(100)} = 1.1 - 1.25$  мкм/мин, что обеспечивало приемлемую длительность процесса профилирования. С целью отслеживания промежуточных этапов травления проводилась фото фиксация и измерение латеральных размеров элементов структуры и глубины травления с периодом в 15 минут. Глубина V-канавки определялась условием смыкания плоскостей (111), а глубина U-канавки соответствовала общей глубине травления.

На Рисунке 4.1 представлена топология маски с компенсаторами травления внешних углов. При определении размеров компенсаторов использовалась методика расчета, описанная в работе [113], согласно которой ключевую роль при растравливании внешних углов играют плоскости семейства (411) и отношение скоростей травления плоскостей  $V_{(411)}/V_{(100)}$ . Как показано в работе [118] это отношение постоянно в диапазоне температур травления 60 - 100°C и при расчете компенсаторов оно было принято равным  $V_{(411)}/V_{(100)} = 1.319$ . С учетом этого и требуемых конечных размеров островковой структуры компенсаторы для центральной V-канавки определены прямоугольными по форме с размерами 243×324 мкм; для остальных внешних углов островковой структуры размер компенсаторов определен как 374×374 мкм. Компенсаторы U- и V-канавки, расположенные на рамке, имели такие же размеры.

Измерение длины граней пересечения плоскостей производилось после пошагового травления. Длины граней фиксировались с помощью цифровой камеры для микроскопа DCM510. Точность измерения составила  $\pm 2$  мкм. На Рисунке 4.10(а) приведены зависимости длины граней типа  $\langle 110 \rangle$   $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ , для островковой структуры с начальными топологическими размерами 374 мкм, 187 мкм, 243 мкм и 324 мкм, соответственно, от времени травления. Компенсаторы U- и V-каналов, расположенные на рамке, имеют аналогичные размеры, и обозначены как  $aU$ ,  $bU$ ,  $cV$ , и  $dV$ , соответственно, как показано на Рисунке 4.10(б).

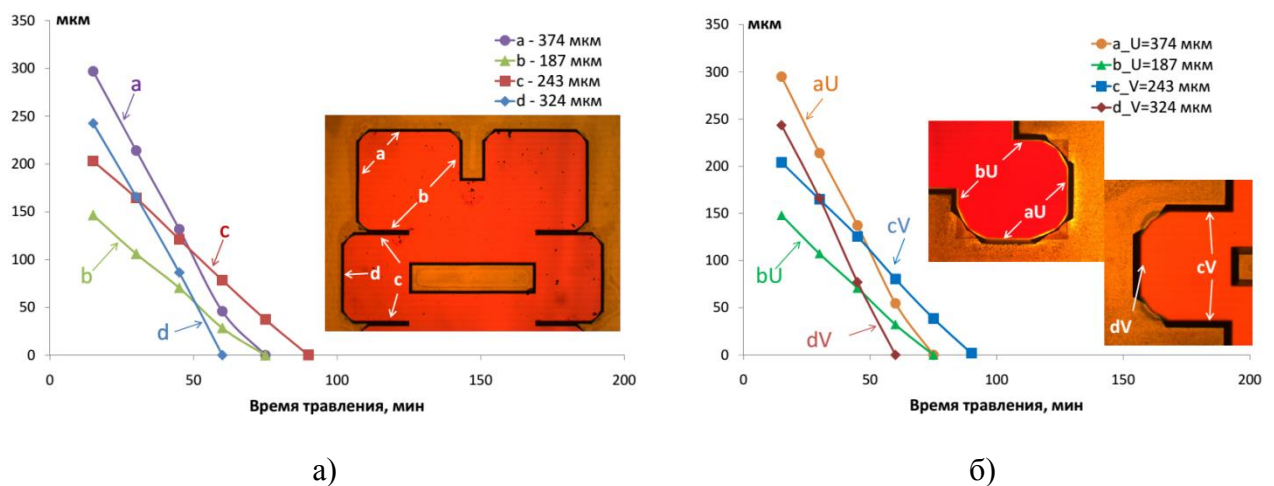


Рисунок 4.10 – Изменение длины граней типа  $\langle 110 \rangle$  компенсаторов от времени травления: а) для островковой структуры; б) для U- и V-канавки

Пересечение плоскостей (100) и (111) создает грани типа  $\langle 110 \rangle$ , а пересечение (100) и (411) – грани типа  $\langle 410 \rangle$ . На начальном этапе травления проявлялись грани  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 410 \rangle$ , а

компенсаторы имели форму близкую к топологическому рисунку маски. Увеличение времени травления по-разному влияло на длины граней и компенсаторов.

Длины граней типа  $\langle 110 \rangle$  уменьшались от начального топологического размера до нуля. Тангенс угла наклона прямых, аппроксимирующих экспериментальные точки, имеет смысл скорости изменения длины грани. Из рисунка 4.10 очевидно, что скорости изменения граней с двумя внешними углами на краях ( $a, d, aU, dV$ ) оказываются выше, чем таковые для граней ( $b, c, dU, cV$ ), имеющих с одной стороны внутренний угол. Это можно связать с тем, что внутренний угол, образованный плоскостями (111) с малой скоростью травления, дает возможность уменьшения длины прилегающей грани только с одной стороны. Из результатов измерений (Рисунок 4.10(a)) следует, что скорости изменения длин граней равны  $V_a = -5.51$  мкм/мин,  $V_b = -2.53$  мкм/мин,  $V_c = -2.73$  мкм/мин и  $V_d = -5.21$  мкм/мин. Видно, что выполняются равенства:  $V_a \approx V_d$  и  $V_b \approx V_c \approx 1/2 V_a$ .

Грани типа  $\langle 410 \rangle$  увеличивались от нуля до момента полного стравливания граней  $\langle 110 \rangle$ , и далее начинают уменьшаться, как показано на Рисунке 4.11. На вставке к рисунку приведены обозначения граней  $k, j, m$  островковой структуры. Грани компенсаторов на рамке, обозначены  $kU, jV, mV$  для U- и V-каналов, соответственно. Момент достижения максимальной длины зависит как от исходной длины граней  $\langle 110 \rangle$ , так и от наличия или отсутствия внешних углов. Компенсатор V-канавки имеет прямоугольную форму и грани типа  $m$  и  $mV$  достигают наибольшей длины.

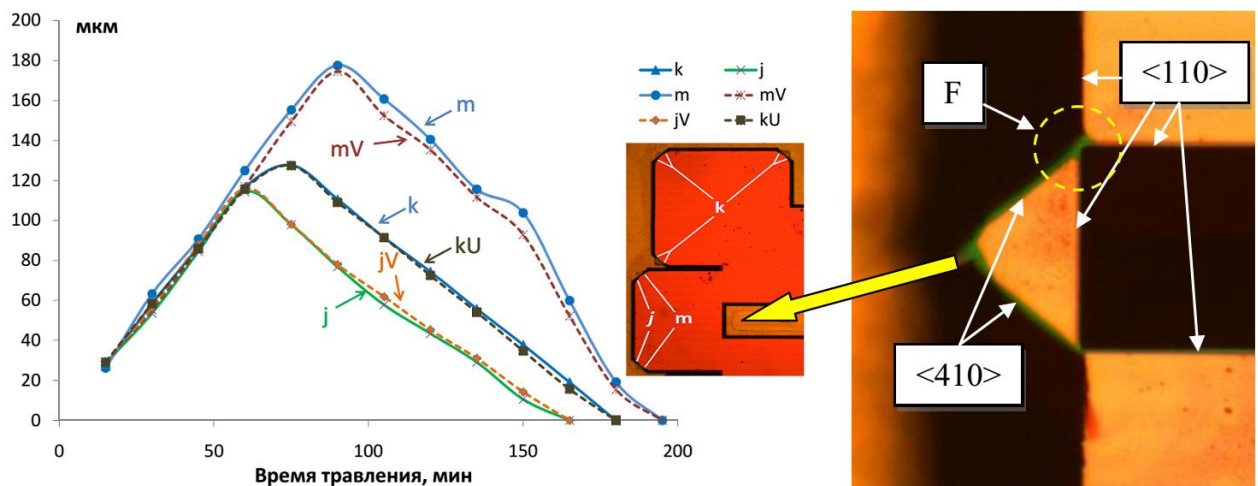


Рисунок 4.11 – Изменение длины граней типа  $\langle 410 \rangle$  компенсаторов от времени травления – слева; форма компенсатора V-канавки после 150 мин травления - справа

На восходящем участке зависимостей (Рисунок 4.11) скорость изменения длин всех граней составила в среднем  $V \approx 1.9$  мкм/мин, на нисходящем -  $V \approx 1.2$  мкм/мин. Однако для граней типа  $m$  и  $mV$  при времени травления  $t \geq 150$  мин скорость изменения длины граней  $\langle 410 \rangle$  увеличивается. Это связано с моментом «вскрытия» V-канавки, когда компенсатор принимает треугольную форму, как показано на вставке справа на рисунка 4.11. На краях грани  $\langle 110 \rangle$ ,

образующей треугольную структуру, в месте, обозначенном как F, формируются плоскости (411), что приводит к дополнительному увеличению скорости изменения граней  $m$  и  $mV$ .

При глубине травления, близкой к глубине смыкания плоскостей (111) V-канавок, на выходах последних формируются зубчатые структуры, в состав граней которых входят остаточные плоскости (411) и (771), формирование которых обсуждалось в работе [119]. Изображения внешнего вида зубчатых структур, полученные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM 6510A, представлены на Рисунке 4.12. На Рисунке отчетливо видно начало формирования плоскостей (771). Внешняя огранка островковой структуры определяется плоскостями (111) и (411).

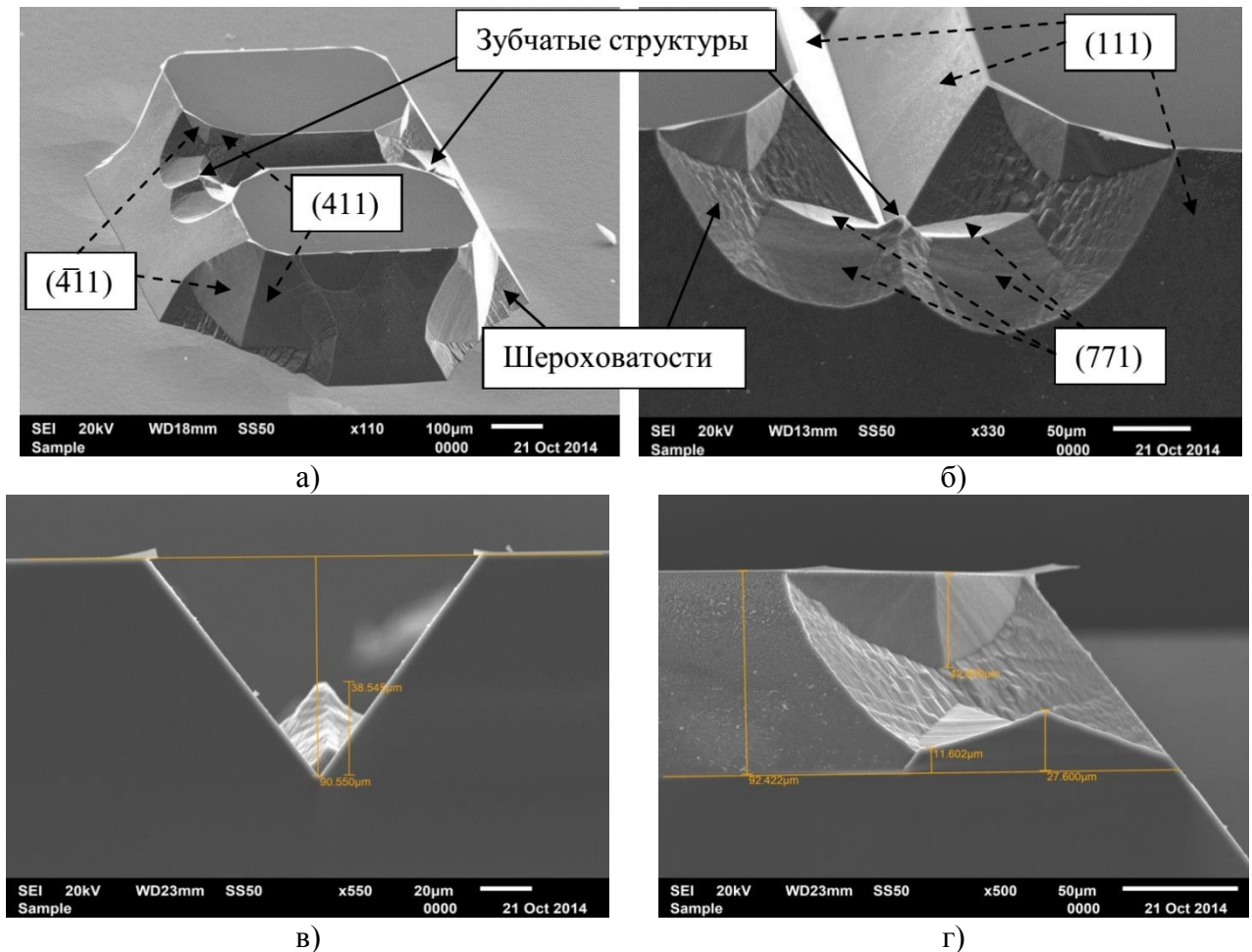


Рисунок 4.12 – Остаточные зубчатые структуры на концах V-канавок: а) на жестком центре; б) на жесткой рамке мембраны

Для исследования зубчатых структур на разных этапах травления кристаллы ОМУ датчика раскалывались вдоль V-канавки. Затем высота зубчатых структур измерялась на СЭМ, причем за «0» был принят уровень смыкания плоскостей (111) V-канавки. Результаты измерений показаны на Рисунке 4.13. При глубине травления 202-207 мкм высота зубчатой структуры составляет 5-9 мкм относительно предельной глубины V-канавки в режиме пошагового травления. При непрерывном режиме травления на ту же глубину высота зубчатой структуры составляет 3-6 мкм. На Рисунке 4.13 показана зависимость высоты зубчатой структуры от

глубины травления, которая носит линейный характер и может быть сведена к нулю. На Рисунке дополнительно показаны результаты травления, полученные при температуре  $52 \pm 0.5$  °С. Как видно из рисунка, высота зубчатой структуры не зависит от выбора температуры травления и согласуется с результатами, полученными при 80 °С.

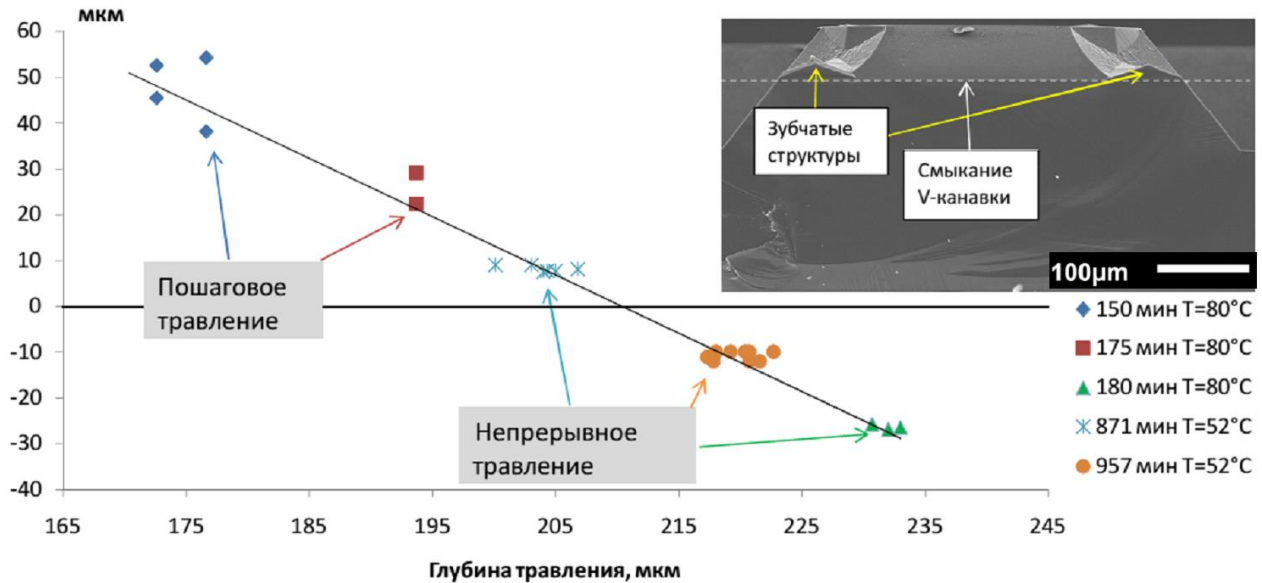


Рисунок 4.13 – Изменение высоты зубчатой структуры от глубины травления

В ходе травления, направленного на полное удаление зубчатой структуры, в точке схождения плоскостей (411) начинает выявляться плоскость (100). Данный процесс формирования плоскости (100) рассмотрен в работе [119]. При глубине травления 215-225 мкм площадка плоскости имеет размеры  $60 \times 52$  мкм, и находится на уровне 10-12 мкм ниже уровня смыкания V-канавки. Рельеф островковой структуры с выходом V-канавки, соответствующей данной глубине травления, представлен на Рисунке 4.14. При решении вопроса о степени удаления зубчатой структуры необходимо учитывать следующие моменты:

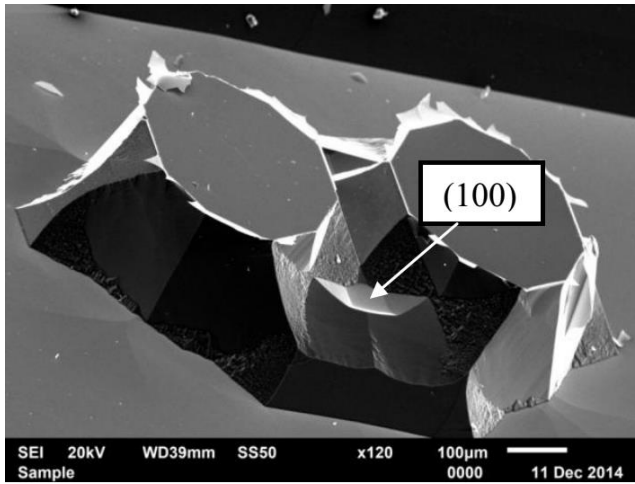
1. Глубину травления островковой структуры желательно минимизировать, а толщину мембраны УЭ задавать изменением глубины травления мембраны с обратной стороны, т.к. на ней отсутствуют внешние углы.

2. V-канавка на рамке и островковой структуре предназначены для фиксации оптоволокон диаметром  $d$ . Если максимальный поперечный размер V-канавки равен  $L$ , то между ее дном и оптоволоконном возникает зазор  $l$ , равный

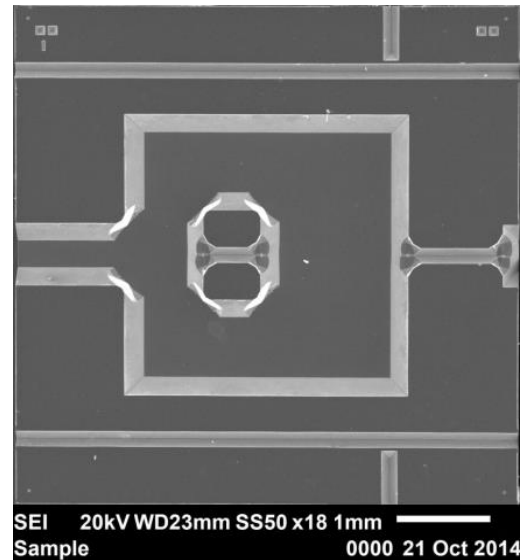
$$l = \frac{d}{2} [\sqrt{2x} - 1 + \sqrt{1 - x^2}], \quad (4.11)$$

где  $x=L/d$ , причем  $L < d$ .

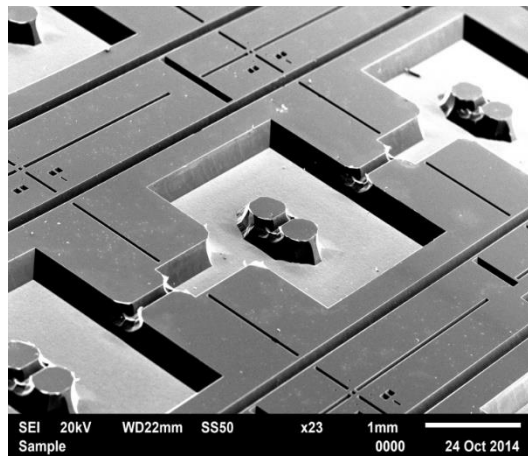
Для выбранных в эксперименте размерах оптоволокон  $d=125$  мкм и  $L=118$  мкм, зазор составляет  $\approx 40$  мкм. Это определяет предельную высоту зубчатой структуры и минимальное время травления. Максимальное время травления и глубина определяются моментом полного стравливания зубчатой структуры.



a)



б)



в)

Рисунок 4.14 – Снимки СЭМ островковой структуры ЧЭ КФДД с вскрытой плоскостью (100) – а), кристалла ЧЭ КФДД вид сверху – б), пластины с кристаллами ЧЭ КФДД – в)

3. Ввиду небольших поперечных размеров зубчатой структуры, ее влияние на прогиб УЭ под действием давления представляется незначительным.

Исходя из пунктов 1-3, можно оптимизировать время травления островковой структуры с V-канавками для получения заданной формы УЭ с ЖЦ.

#### 4.2 Топология фотовольтаического узла кремниевого фотовольтаического датчика давления

Фотовольтаический узел КФДД представляет собой кристалл с ФЭ, изготовленными с использованием стандартных операций КМОП технологии 3.0 мкм. На кристалле формируется пара фотодиодов для преобразования измеряемого давления в электрический сигнал. Фотодиоды размещаются напротив U-образной полости ОМУ, в которой находится свободный конец оптоволокон. Для соединения и позиционирования кристалла ФВУ на кристалле формируются сквозные отверстия с размером, близким к размеру направляющих оптоволокон. Отверстия



формируются путем комбинированного жидкостного анизотропного и плазмохимического травления. На кристалле формируются тестовые структуры типа «крест», предназначенные для измерения технологических и электрических параметров легированных слоев, а также область контроля глубины кармана. Типовая конструкция планарной и непланарной стороны ФВУ представлена на Рисунке 4.15.

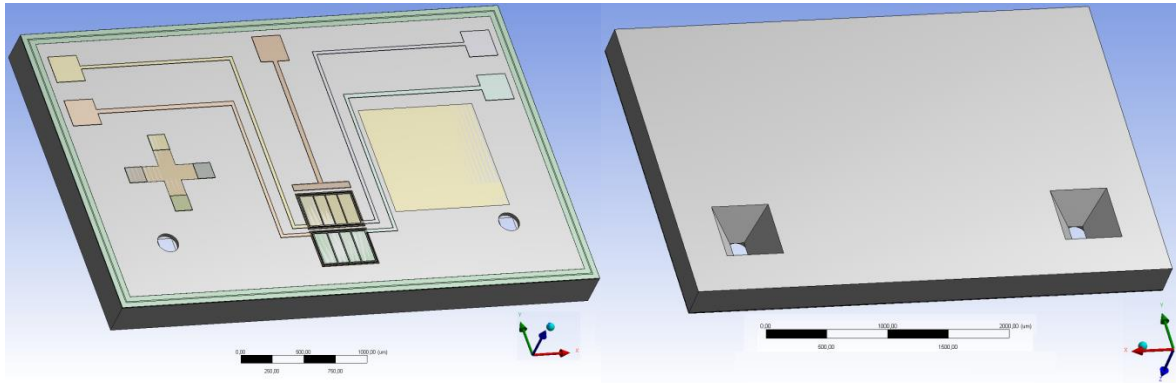


Рисунок 4.15 – Общий вид кристалла ФВУ КФДД: слева - вид с планарной; справа - вид с непланарной стороны кристалла

Разработанная топология имеет модульную структуру. Каждый модуль состоит из 4 кристаллов, которые отличаются размерами фотодиодов, но имеют подобную топологию, размеры приведены в таблице 4.1. Поэтому в дальнейшем для объяснения функционального назначения элементов фотшаблона используется один кристалл с топологией, представленной на Рисунке 4.16. Фотодиоды на первом кристалле модуля имеют размеры  $500 \times 300$  мкм, разделенные между собой промежутком в 20 мкм, как показано на Рисунке 4.16а, что позволяет компенсировать возможные отклонения светового пучка от заданного положения, вызванные механическими напряжениями оптоволокна в местах его закрепления к ЖЦ и рамке ОМУ КФДД.

Таблица 4.1 – Планарные размеры фотодиодов

W x L, мкм	По базе	По эмиттеру
Тип 1	500×315	480×295
Тип 2	1000×315	980×295
Тип 3	340×315	329×304
Тип 4	491×365	480×354

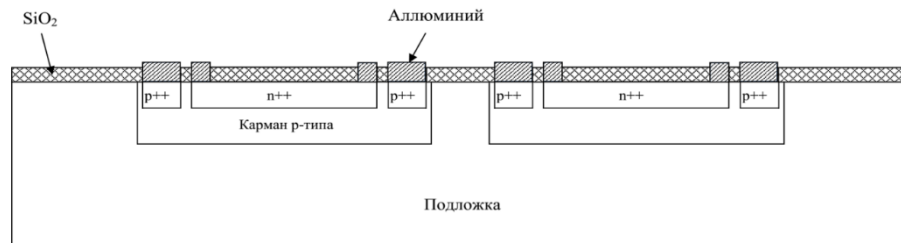
Кроме того, такой размер фотодиода позволяет работать со световым пучком диаметром до 240 мкм, при максимальном перемещении светового пятна до 60 мкм. Для изучения влияния площади фотодиода на выходную характеристику датчика во втором кристалле формируются фотодиоды размером  $750 \times 300$  мкм. На третьем и четвертом кристаллах модуля формируется по четыре фотодиода на каждом кристалле, размеры которых  $340 \times 315$  мкм и  $491 \times 365$  мкм,

соответственно. Такая конструкция позволяет оценить возможные моменты скручивания или изгиба рабочего оптоволокна. Принципиальной особенностью разработанного варианта топологии фотодиодов является планарное расположение всех электродов, что связано с особенностью их подключения.

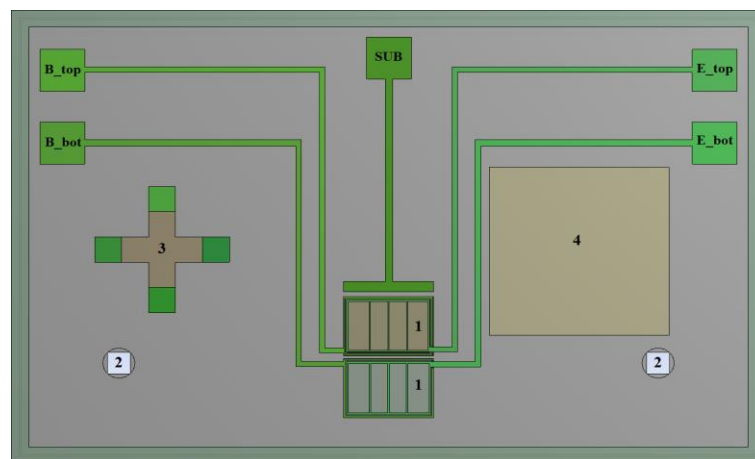
Реализация структуры кристалла ФВУ КФДД, приведенной на Рисунке 4.16, требует восьми фотошаблонов. Чертежи разработанных фотошаблонов ФВУ ЧЭ КФДД, предназначенных для работы с двусторонне-полированными пластинами монокристаллического кремния диаметром 100 мм толщиной 300 мкм, приведены на Рисунке 4.17. На Рисунке 4.17 приведена топология модуля кристаллов ФЭ КФДД, включающая все слои фотошаблонов.

Фотошаблон №1 предназначен для вскрытия окна под имплантацию бора в кристалл, с последующим образованием кармана р-типа глубиной порядка 6.5 мкм. Дополнительно на фотошаблоне формируется окно для юстировки шаблона с базовым срезом пластины.

Фотошаблон №2 предназначен для вскрытия окон формирования активной области фотодиода.



(а)



(б)

Рисунок 4.16 – Сечение структуры через фотодиоды (а) и вид планарной стороны кристалла ФВУ КФДД (б): Обозначения: 1 – фотодиоды; 2 – соединительные отверстия; 3 – тестовая структура типа крест; 4 – тестовая структура для контроля глубины кармана. Контакты: B\_top – к базе верхнего фотодиода; B\_bot – к базе нижнего фотодиода; E\_top – к эмиттеру верхнего фотодиода; E\_bot – к эмиттеру нижнего фотодиода; SUB – к подложке



Фотошаблон №3 предназначен для формирования круговой p++ области по краю кармана, для улучшения контакта к карману.

Фотошаблон №4 предназначен для формирования n++ области в середине кармана, и создания контакта к подложке кристалла, и управления потенциалом подложки.

Фотошаблон №5 предназначен для вскрытия контактных окон к активным областям фотодиодов. Формирование сквозных отверстий с непланарной стороны осуществляется анизотропным травлением кремния через маску из комбинации слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Эта маска формируется на шестой фотолитографии с помощью двустороннего совмещения фотошаблона №6, с типовой формой окон травления представленной на Рисунке 4.1. Размер маски окна травления рассчитан по формуле для расчета глубины травления окна мембраны, и равен  $500 \times 500$  мкм. При этом размер квадратного основания вытравленной полости глубиной 265 мкм равен  $125 \times 125$  мм.

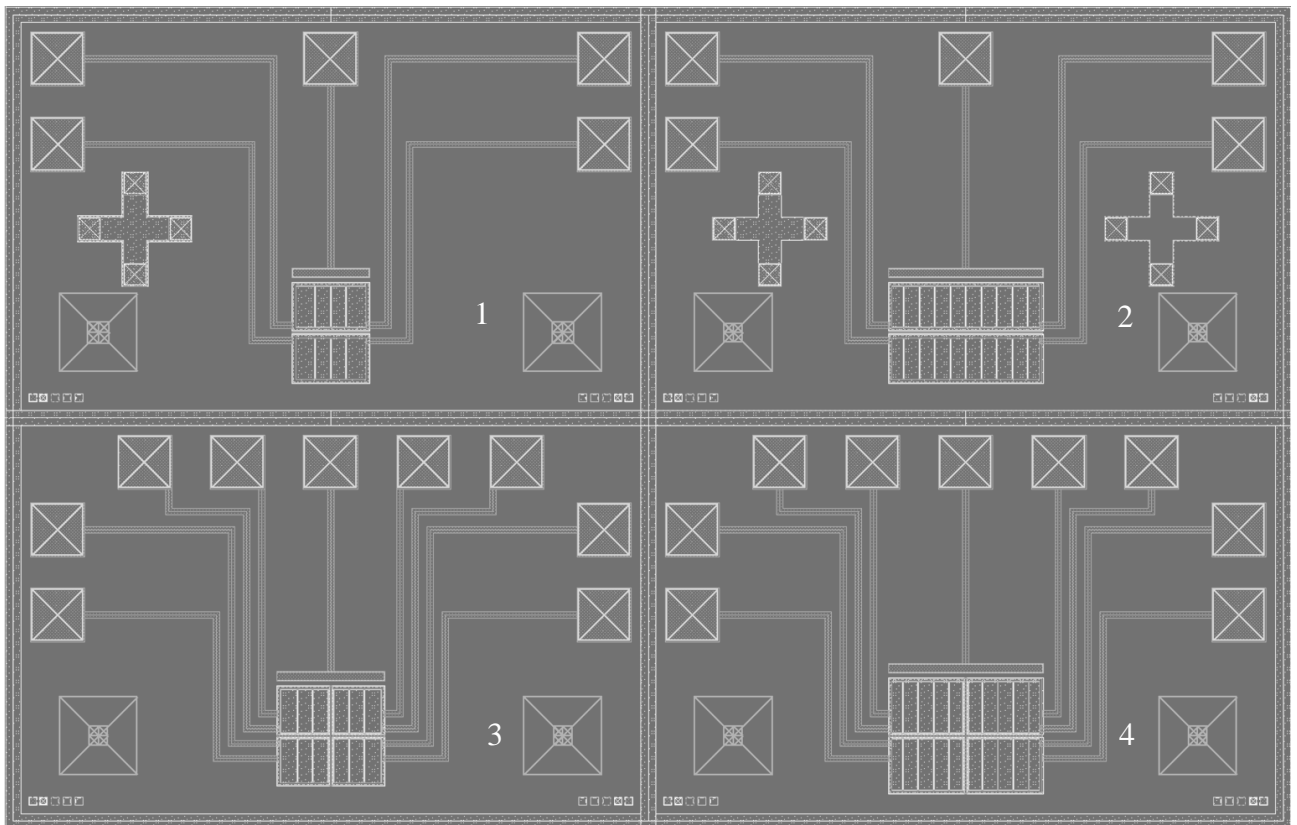


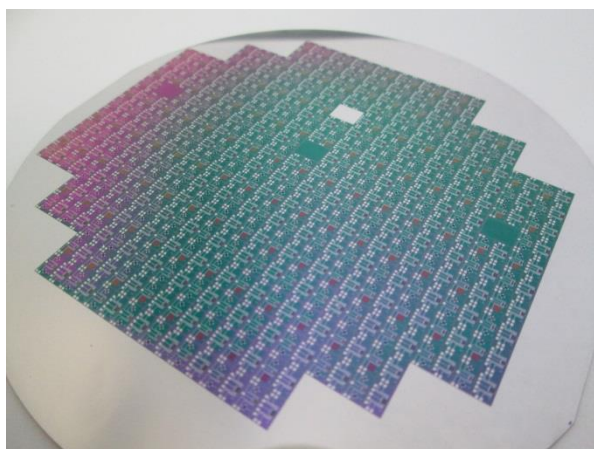
Рисунок 4.17 – Топология модуля ФЭ КФДД, включающая все слои фотошаблонов

Фотошаблон №7 предназначен для формирования алюминиевой металлизации кристалла ФВУ КФДД.

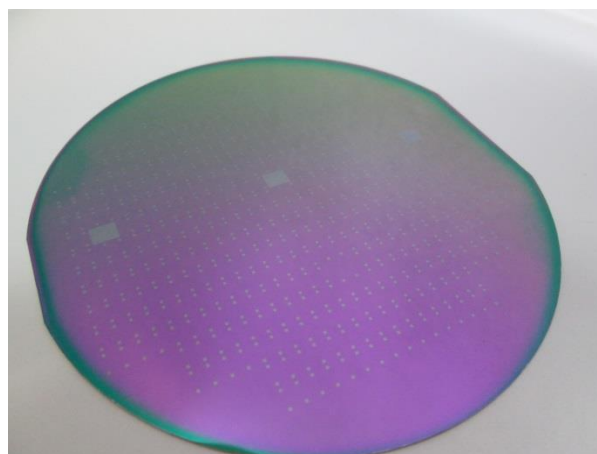
Для формирования отверстий с планарной стороны применялся метод плазмохимического травления через маску из комбинации слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Эта маска формируется на восьмой фотолитографии с помощью фотошаблона №8. Минимальный размер сквозного отверстия составляет 125 мкм. Боковое подтравливание во время плазмохимического травления составляет

~60% от глубины травления. Однако при контроле глубины травления уход расчетного размера сквозного отверстия не превышает 5%.

Фото изготовленных кремниевых пластин с кристаллами ФВУ КФДД приведены на Рисунке 4.18(а,б).



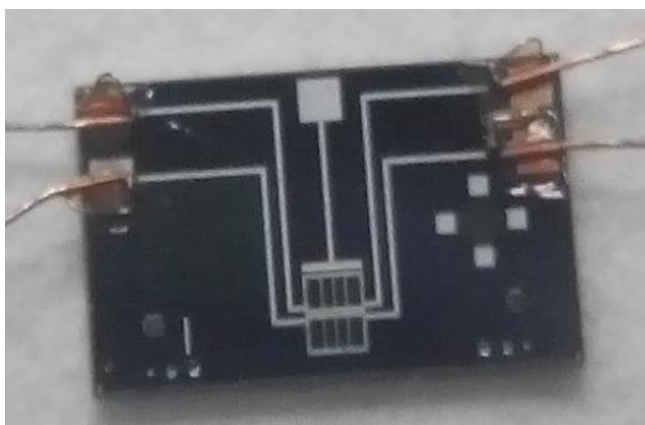
а)



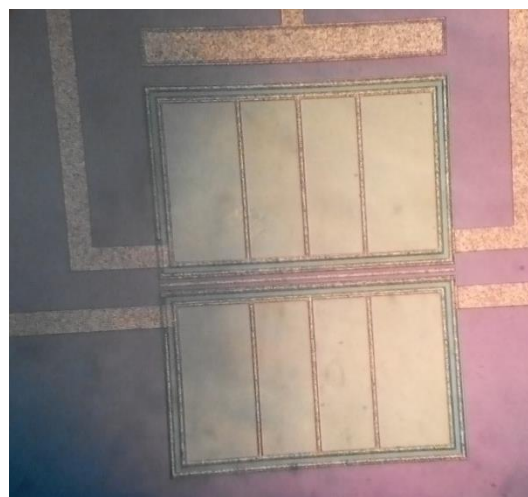
б)

Рисунок 4.18 – Фотографии внешнего вида кремниевых пластин с кристаллами ФВУ КФДД: планарная сторона - а); непланарная сторона - б)

На Рисунке 4.19а приведена фотография кристалла ФВУ типа 1 с двумя фотодиодами, к контактными площадкам которых приварены выводы. На Рисунке 4.19б приведена фотография изготовленных фотодиодов типа 1, сделанная с помощью оптического микроскопа.



а)



б)

Рисунок 4.19 – Фотография кристалла фоточувствительного элемента типа 1 с выводами – а); фотодиоды типа 1 – б)

#### 4.2.1 Формирование сквозных отверстий в кристаллах фотовольтаического узла

Разработка процесса формирования сквозного профилированного отверстия в кремнии представляет собой особую задачу. Основная проблема заключается в том, что для

формирования заданного профиля, обеспечивающего расчетное качественное крепление направляющих оптоволокон. В общей концепции изготовления предполагалось использовать комбинацию жидкостного анизотропного травления кремния в КОН с непланарной стороны на определенную глубину с последующим изотропным плазмохимическим травлением кремния с планарной стороны до полного вскрытия отверстий.

На рисунках 4.20(а,б) показаны фотографии с растрового электронного микроскопа на вытравленные отверстия с планарной и непланарной стороны пластины, а на Рисунке 4.21 показан профиль отверстия, создаваемого в кремнии комбинацией вышеуказанных методов травления.

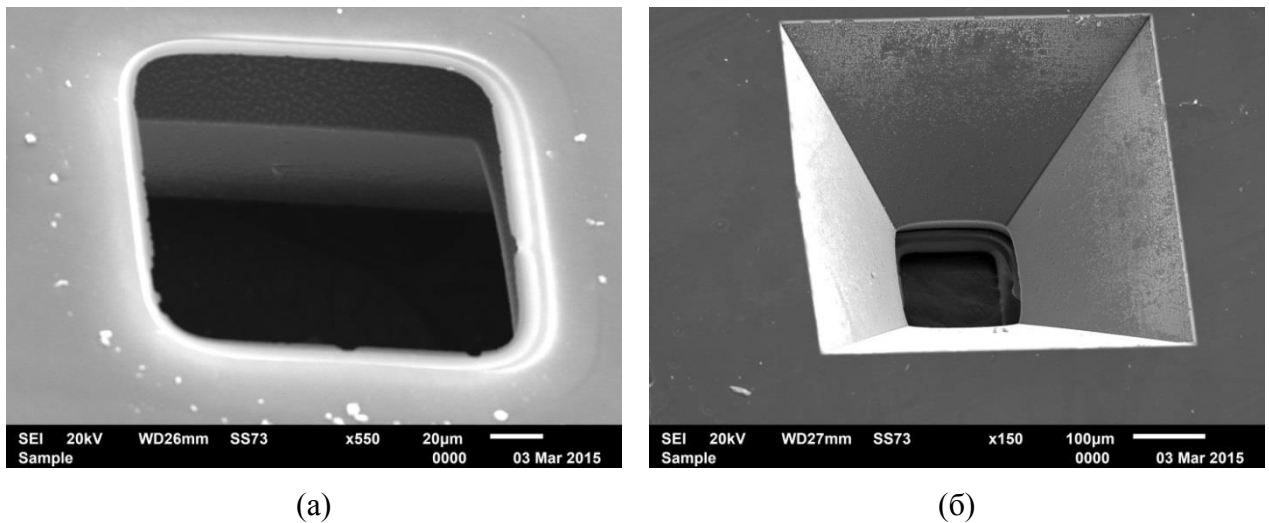


Рисунок 4.20 – Вид на сквозные отверстия в кристалле ФВУ КФДД, сформированные комбинированным травлением: (а) вид на отверстие после плазмохимического травления с планарной стороны; (б) вид на отверстие после жидкостного анизотропного травления кремния в КОН с непланарной стороны

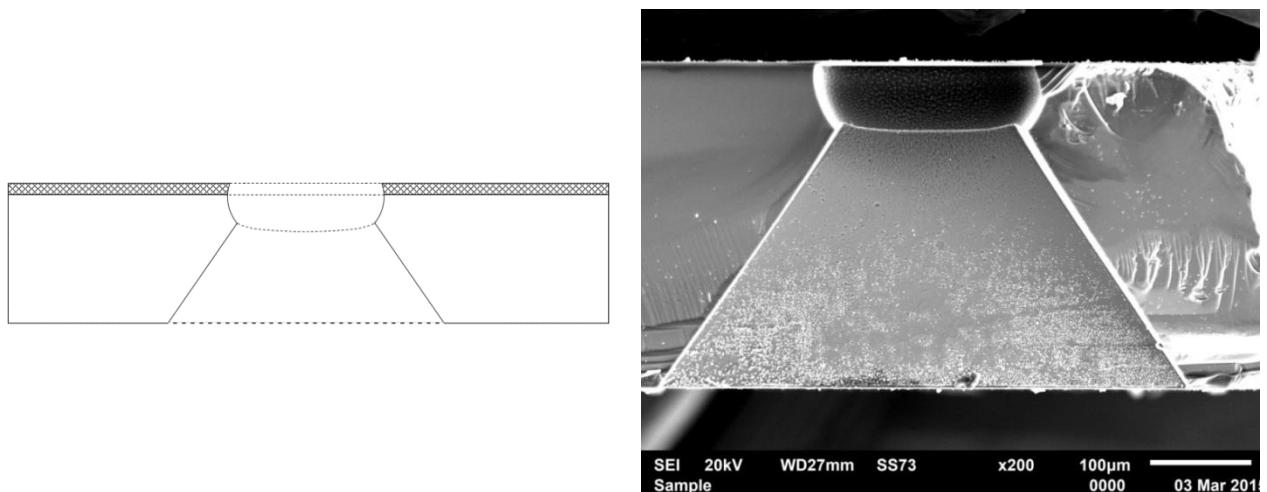


Рисунок 4.21 – Профиль расчетного (слева и экспериментального справа) поперечного сечения ФВУ КФДД, сформированного комбинированным травлением плазмохимическим травлением с планарной стороны и жидкостным анизотропным травлением кремния в КОН с непланарной стороны

Предполагается, что такой профиль позволит обеспечить совмещение кристаллов, простое введение оптоволокон в расширяющиеся наружу отверстия кристалла ФВУ КФДД, и его закрепление клеем с одной или двух сторон.

### 4.3 Изготовление лабораторных образцов кремниевого фотовольтаического датчика давления

Концепция исполнения КФДД в виде двух кристаллов ОМУ и одного кристалла ФВУ подразумевает проведение прецизионных сборочных технологических операций. Фотографии на Рисунке 4.22 показывают ключевые этапы сборочных операций в двух вариантах: на плоскости и на базе корпуса ТО-8. На Рисунке 4.22 приведена модель сборки КФДД с двухточечной схемой нагружения в корпусе ТО-8.

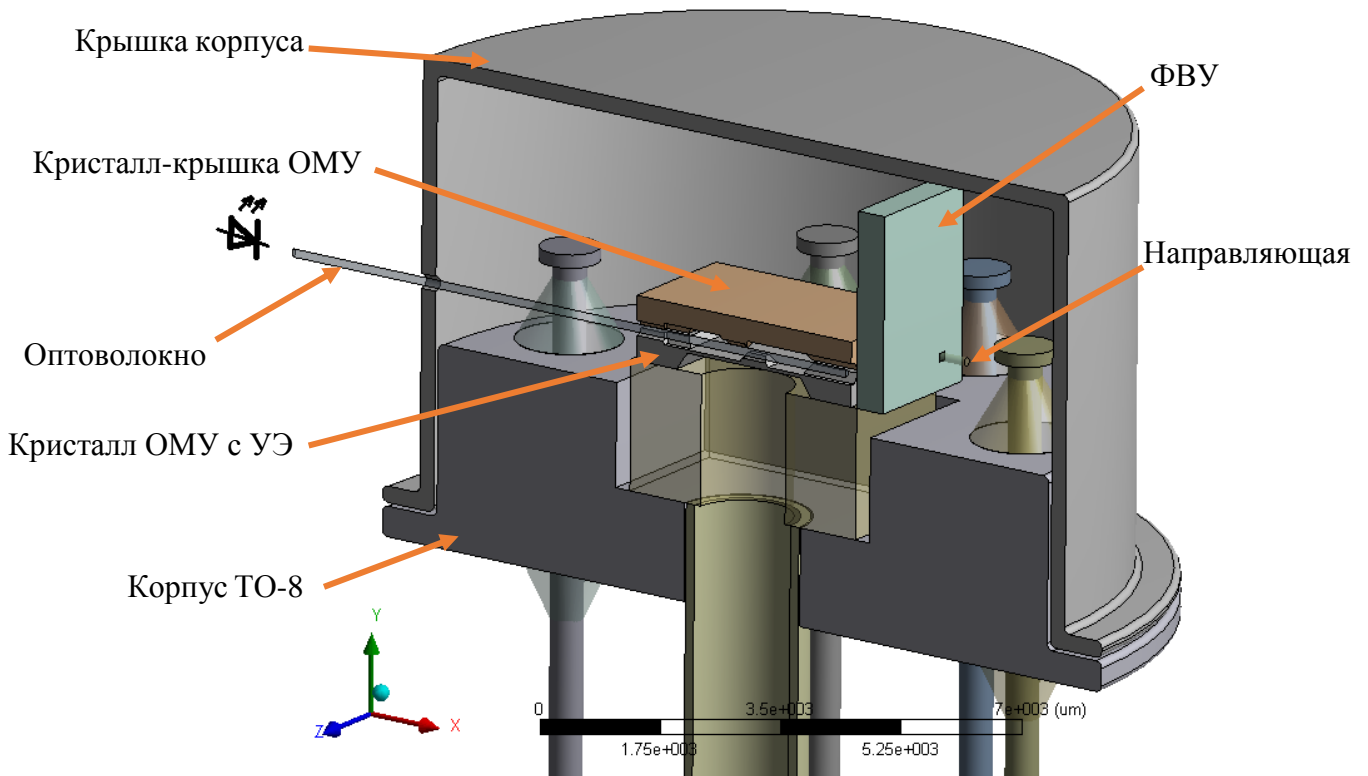
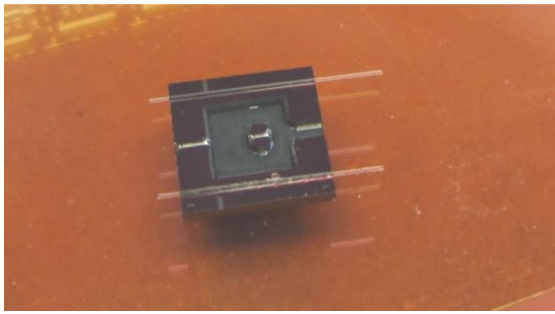


Рисунок 4.22 – Модель сборки КФДД с двухточечной схемой нагружения в корпусе ТО-8

Процесс сборки можно представить следующей последовательностью действий:

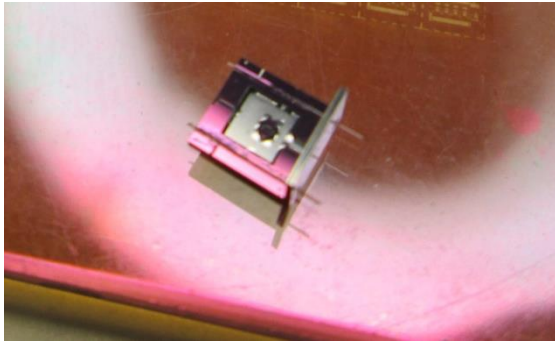
- зафиксировать кристалл УЭ (с мембранной) ОМУ на предметном столике или на основе в корпусе ТО-8 (предварительно закрепив стеклянную подложку);
- уложить в направляющие V-канавки соединительные оптоволоконна длиной 5 мм, так чтобы со стороны U-канавки конец оптоволоконна выходил на ~1 мм, предварительно нанеся на поверхность соединительных оптоволокон тонкий слой клея;



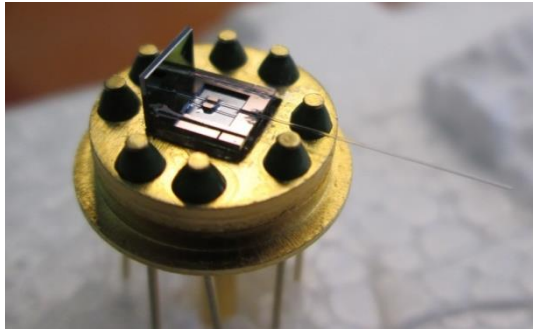
(а)



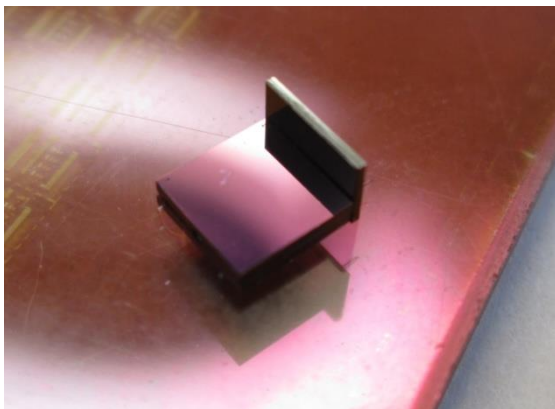
(д)



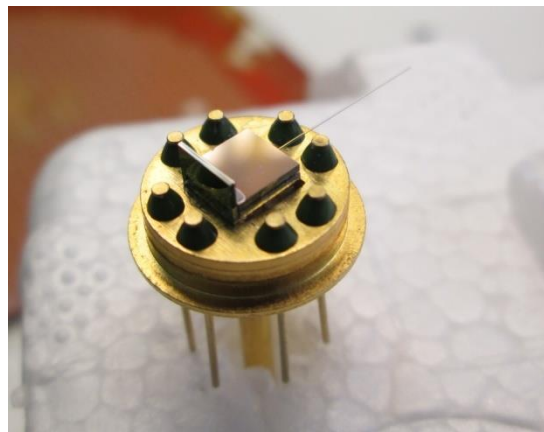
(б)



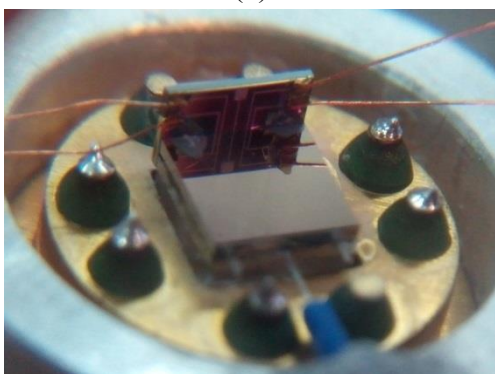
(е)



(в)



(ж)



(г)



(з)

Рисунок 4.23 – Иллюстрация процесса сборки лабораторных образцов ЧЭ КФДД: УЭ КФДД на плоскости - а), УЭ КФДД на базе корпуса ТО-8 –д); соединенные ОМУ и ФВУ- б), кристалл ОМУ ЧЭ с направляющими оптоволоконными и вводом излучения –е), сборка кристаллов ОМУ и ФВУ частей ЧЭ – в) и в корпусе –ж) сборка КФДД в целом – (г,з)



- уложить в центральную V-канавку рабочее оптоволокно, предварительно сняв защитную оплетку и сформировав очищенный конец оптоволокна длиной ~ 5 мм (размер зависит от размера ОМУ), зафиксировать оптоволокно на рамке (клеевое соединение);
- зафиксировать кристалл-крышку ОМУ на нижнем кристалле (сборке) так, чтобы совпадали пазы направляющих и рабочего оптоволокон (клеевое соединение);
- установить кристалл ФВУ\* на сборку ОМУ, пропустив направляющие через соединительные отверстия ФВУ, зафиксировать с обратной стороны (клеевое соединение).

\* Примечание. Предварительно разварить кристалл ФВУ в технологическом вспомогательном корпусе методом термокомпрессии, оставив с одной стороны свободной длину соединительной проволоки ~ 1 - 1.5 см; закрепить места термокомпрессии каплей эпоксидного клея. Иллюстрация моментов сборки образцов КФДД приведена на Рисунке 4.23.

Маршрут изготовления кристаллов ОМУ и ФВУ КФДД разбит на две части: для изготовления ОМУ (2 фотолитографии) и ФВУ (8 фотолитографий) КФДД. Маршрут включает в себя стандартные технологические техпроцессы фабрики-изготовителя, а также нестандартные операции и необходимые контрольные измерения параметров в пластинах. Данный маршрут реализуется для партий пластин при изготовлении экспериментальных образцов КФДД и будет использован для изготовления экспериментальных образцов.

#### **Выводы к главе 4**

1. Предложена и реализована концепция сборки 3D МОЭМС КФДД, основанная на формировании V-канавок на кристаллах ОМУ, сквозных отверстий в кристалле ФВУ и оптоволокон.
2. 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-канавок и определены требования к их размерам.
3. 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.
4. Разработана базовая МЭМС технология изготовления кремниевых компонентов КФДД, включая комплекты фотошаблонов и изготовлены лабораторные образцы датчика.

## ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КРЕМНИЕВОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Для оценки работоспособности КФДД необходимо провести экспериментальное исследование их характеристик. Фотовольтаический узел исследуемого датчика давления представляет из себя отдельный кремниевый кристалл со сформированными на его поверхности ФД, разделенными узким промежутком. Исследование электрофизических характеристик ФД является неотъемлемой частью работы, так как характеристики фотодиодов напрямую влияют на преобразовательную характеристику датчика. Темновые характеристики влияют на температурные зависимости ВАХ фотодиодов. Световые характеристики и латеральное перемещение светового пятна по поверхности фотодиодов ФВУ напрямую влияют на преобразовательную характеристику датчика и его чувствительность. Проведение этих исследований позволит сравнить характеристики изготовленных ФД с результатами моделирования и проверить пригодность для использования в КФДД. Особенностью решаемой задачи является преобразование оптического входного сигнала в выходной электрический, которая делает необходимым рассмотреть специфику измерений и измерительных средств. Разработанная измерительная схема позволяет исследовать преобразовательную характеристику, температурные зависимости чувствительности и начального выходного сигнала разработанного датчика давления.

### 5.1 Измерительная схема кремниевого фотовольтаического датчика давления

В настоящее время в литературе не описывалась измерительная схема МЭМС КФДД. Для измерения характеристик КФДД нами совместно с сотрудником кафедры ППиМЭ НГТУ С.П. Хабаровым был разработан и изготовлен электронный узел, структурная блок-схема электронного блока приведена на Рисунке 5.1. Общая схема преобразования описана ранее в главе 2.1.

Источник питания лазерного светодиода ИПЛСД, принципиальная схема которого приведена на Рисунке 5.2, обеспечивает питание светодиодного лазера стабильным постоянным током в диапазоне  $5 \div 55$  мА.

Сигналы с фотодиодов ФВУ КФДД, зависящие от величины деформации УЭ под воздействием давления и перемещения светового пятна, поступают на дифференциальный усилитель ДУ (Рисунок 5.2), реализованный на операционном усилителе AD8552. Затем полученный разностный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП, который формирует цифровой код пропорциональный входному сигналу. По последовательному

периферийному интерфейсу SPI цифровой код поступает на микроконтроллер МК ATmega16U4 фирмы Atmel Corporation и далее через USB в ЭВМ для отображения и хранения информации. Для промышленных образцов в МК можно дополнительно вводить значения температуры окружающей среды с датчика температуры ДТ, например LTC2996, и корректировать результаты измерения выходного сигнала датчиков давления в зависимости от температуры. Микроконтроллер по командам от ЭВМ управляет режимом работы, как источника тока лазерного светодиода, так и аналого-цифрового преобразователя.

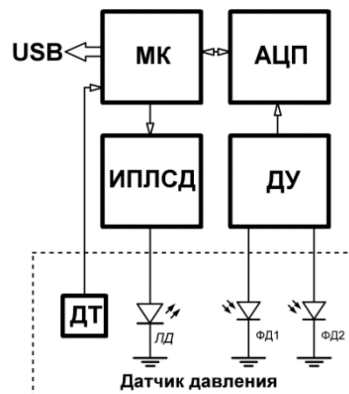


Рисунок 5.1 – Структура электронного блока КФДД. Обозначения блоков: ИПЛСД – источник питания лазерного светодиода; ДУ – дифференциальный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; ДТ – датчик температуры; ЛД – лазерный светодиод; ФД1, ФД2 – фотодиоды

На основе этой принципиальной схемы была разработана печатная плата электронного блока датчика давления, чертеж которой показан на Рисунке 5.3(а) с указанием габаритных размеров, а внешний вид в сборе - на Рисунке 5.3(б).

Программа для работы микроконтроллера написана в среде AVRStudio 6 фирмы Atmel Corporation с использованием библиотеки LUFA для реализации связи с ЭВМ через USB. Программа МК включает пять файлов: Descriptors\_optic.c; Descriptors\_optic.h; Optic.c; Optic.h; Lib.c.

Программа для работы ЭВМ разработана в среде Lab Windows/CVI фирмы National Instruments и состоит из двух частей. Первая программа предназначена для калибровки произведенного датчика с целью устранения погрешностей обусловленных нелинейностью и температурной зависимостью преобразовательной характеристики. Вторая программа с использованием табличного метода и линейной интерполяции представляет результаты измерения с погрешностью соответствующей заданному значению. Лицевая панель программы калибровки приведена на Рисунке 5.4.



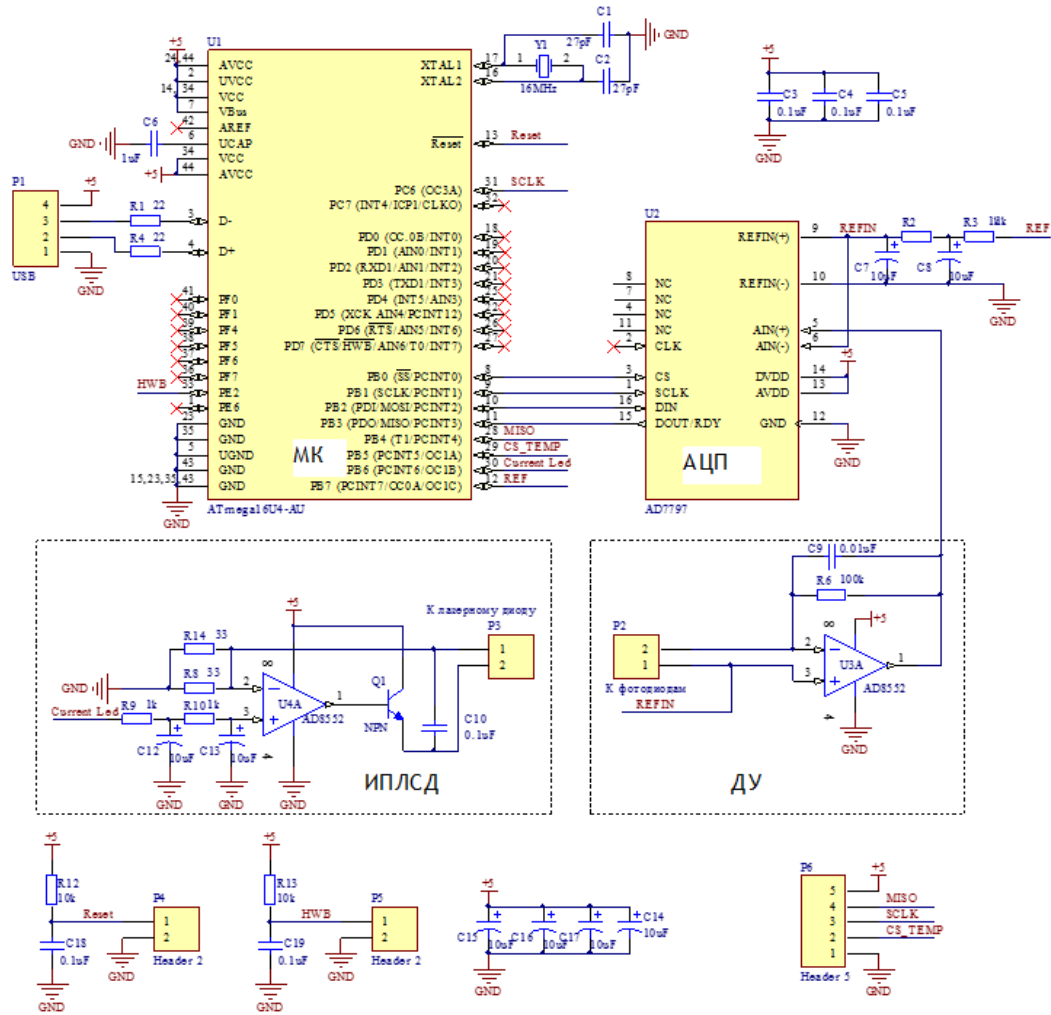


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема электронного узла КФДД

В блоке «Управление» с помощью элементов управления – кнопок «Измерить», «Калибровать», «Сохранить», «Удалить», осуществляется измерение выходного сигнала при заданном давлении, собственная калибровка системы измерения выходного сигнала, сохранение или удаление результатов измерения соответственно.

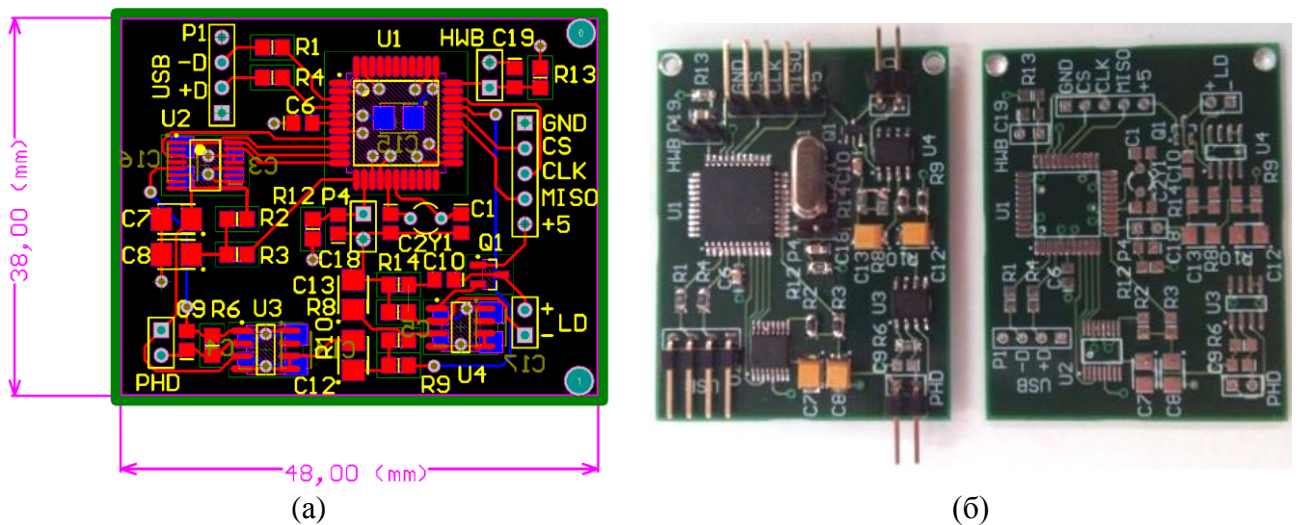


Рисунок 5.3 – Печатная плата электронного блока КФДД: (а) чертеж с указанием габаритных размеров; (б) вид на плату в сборе с двух сторон

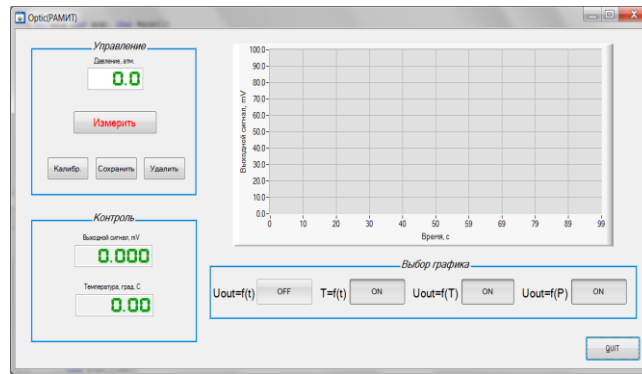


Рисунок 5.4 – Вид лицевой панели программы калибровки датчика давления на ЭВМ

Блок «Контроль» включает индикаторы текущих значений выходного сигнала и температуры датчика. На графике отображаются измеряемые зависимости температуры от времени  $T=f(t)$ , выходного сигнала датчика давления от времени  $U_{out}=f(t)$  и выходного сигнала датчика от давления  $U_{out}=f(P)$ . Лицевая панель программы измерения давления КФДД показана на Рисунке 5.5.

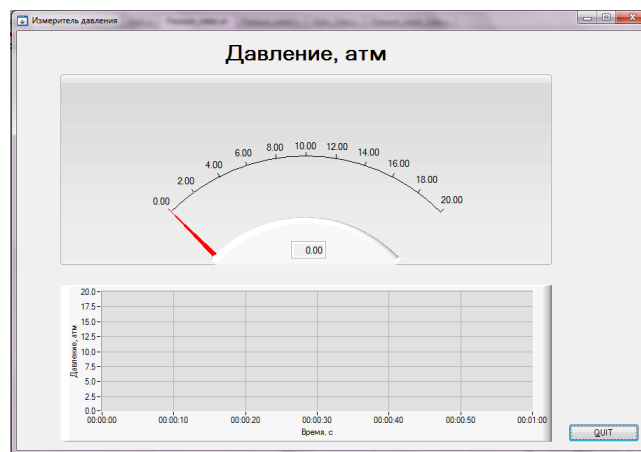


Рисунок 5.5 – Лицевая панель программы измерения давления КФДД

## 5.2 Измерение характеристик элементов кремниевого фотовольтаического датчика давления

### 5.2.1 Измерение характеристик источника излучения

Для измерения характеристик КФДД и фотодиодов, входящих в состав ФВУ КФДД, был выбран лазерный диод WSLP-635-005m-M-PD с оптическим выводом и фотодиодом обратной связи, коннектором типа FC и максимальная мощность 3 мВт, при длине волны 635 нм. Подробные характеристики лазерного диода приведены в таблице 5.1.

Для оценки ватт-амперной характеристики использовался прибор для оценки мощности оптического излучения FOD 1204 Fiber optic devices S/N 05349 850nm, внешний вид которого

приведен на Рисунке 5.6. Порог чувствительности -80 дБ (При этом мощность  $P_0 = 1$  мкВт принимается за 0 дБ). Разрешение 0.001 дБ. Максимальная спектральная чувствительность - на длине волны  $\lambda = 850$  нм.

Полупроводниковый лазер WSLP-635-005m-M подключался к измерителю оптической мощности с помощью коннектора типа FC. Ток управления лазерного диода задавался программно, через панель управления с ПК. Результаты измерений приведены на рисунках 5.7(а-б). Как видно из графиков характеристики при токах управления  $<36$  мА, лазерный диод работает в подпороговом режиме, т.е. режиме малой мощности, и сравним с обычным светодиодом.

Таблица 5.1 – Технические параметры лазерного диода WSLP-635-005m-M-PD

Параметр	Значение		
	Миним.	Типовое	Максим.
Обратное напряжение, В	2,0		
Рабочий диапазон T, °C	-10...+50		
Температура хранения °C	-40...+85		
Температура пайки (10 сек.) °C	260		
Длина волны, нм	650		
Тип оптоволокна	многомодовое		
Фотодиод обратной связи	встроенный		
	Миним.	Типовое	Максим.
Центральная дл. волны, при 25°C, нм	630	635	640
FWHM, нм	--	2	--
Макс. выходная мощность, мВт		3	
$d_{серд.}$ , мкм		105	
Эффективность накачки, мВт/мА	0,4	0,6	1,0
$U_{обр}$ фотодиода, В		30	
Тип коннектора ОВ	FC/PC/SMA905		
Длина ОВ, см		80	100
Пороговый ток, мА		30	35
Рабочий ток, мА		55	65
Рабочее напряжение, В		2,3	2,6



Рисунок 5.6 – Измеритель оптической мощности FOD 1204

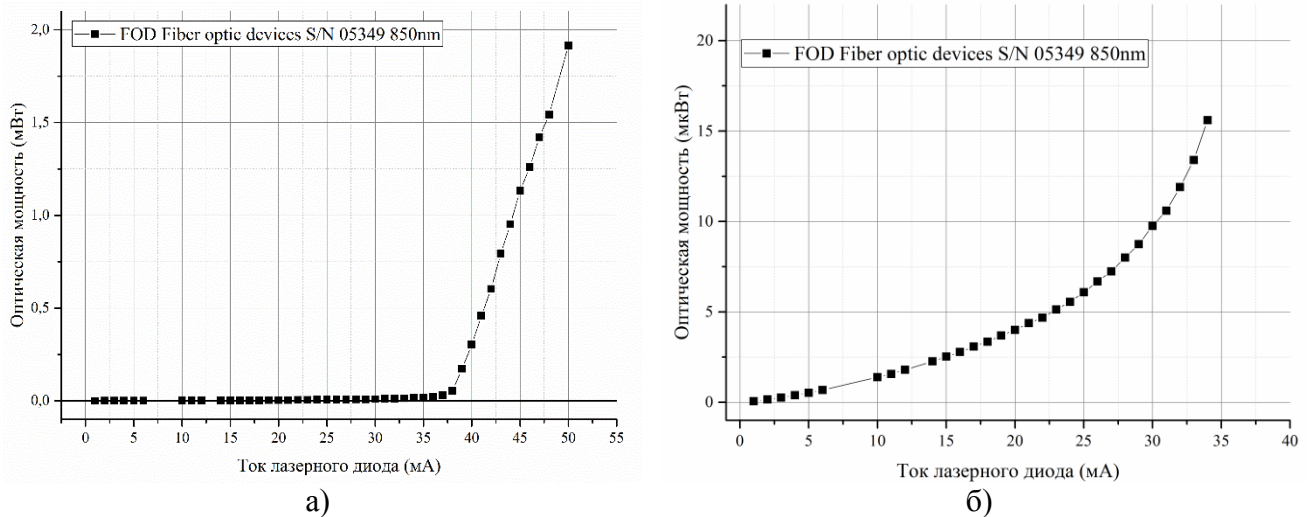


Рисунок 5.7 – Ватт-амперная характеристика WSLP-635-005m-M в диапазоне тока накачки 0÷50 мА, и укрупненная характеристика в диапазоне 0÷34 мА

### 5.2.2 Исследование величины поверхностного сопротивления слоев фотодиода

Для контроля электрофизических параметров слоев структуры фотодиода использовалась структура типа «греческий крест», приведенная на Рисунке 5.8.

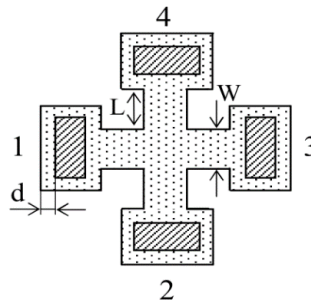


Рисунок 5.8 – Структура для измерения поверхностного сопротивления типа «греческий крест»

Эта структура позволяет измерять поверхностное сопротивление  $\rho_s$ , холловскую подвижность  $\mu$  и концентрацию носителей заряда. Такие структуры имеют очень низкую чувствительность к качеству металлических контактов, простую и симметричную форму, высокую степень точности определения поправочной функции, учитывающей особенности поля растекания тока в крестообразной структуре. При выборе соотношения между линейными размерами греческого креста  $L=3W$ , поверхностное сопротивление может рассчитываться по формуле [122]:

$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V_{34}}{I_{12}} = 4.532 * \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (5.1)$$

В результате измерений было установлено, что поверхностные сопротивления слоев составили значения, показанные в таблице 5.2.

Методом шарикового скрайбирования на предприятии изготовителе были получены глубины залегания p-n переходов базового слоя  $x_{j1}$  составила  $\sim 6$  мкм, а перехода эмиттер-база  $x_{j2}$  - 0.9 мкм. Полученные значения сопротивлений соответствуют расчетным параметрам с точностью  $\pm 10\%$ .

Таблица 5.2 – Поверхностные сопротивления слоев

Номер пластины	3-4н2		1-4н2		7-342	
	$\rho_s, \Omega/\text{кв}$	$N, \text{см}^{-3}$	$\rho_s, \Omega/\text{кв}$	$N, \text{см}^{-3}$	$\rho_s, \Omega/\text{кв}$	$N, \text{см}^{-3}$
Базовый слой $N_A$	1643	$1.529 \cdot 10^{16}$	1193	$2.179 \cdot 10^{16}$	1193	$2.179 \cdot 10^{16}$
			$\div$	$\div$	$\div$	$\div$
			1335	$1.933 \cdot 10^{16}$	1335	$1.933 \cdot 10^{16}$
Слой подлегирования контакта к базе $N_A$	26-28	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$	25-28	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$	25-28	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$
Эмиттерный слой $N_D$	27	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$	27,5	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$	27,5	$\sim 4.5 \cdot 10^{21}$

### 5.2.3 Исследование темновых характеристик фотодиодов

Измерение темновой ВАХ фотодиодов ФВУ КФДД необходимо для их разбраковки с целью унификации начальных параметров фотодиодов. Темновая ВАХ фотодиодов измеряется на лабораторной установке, электрическая схема которой представлена на Рисунке 5.9. Исследуемый фотодиод (на кристалле ФВУ КФДД) находится в колпаке, экранирующем от постороннего излучения. Для темновых измерений источник монохроматического излучения отключен, нагрузочное сопротивление  $R_H=0$ .

Измерение тока фотодиода осуществляется по падению напряжения на эталонном сопротивлении  $R_3=100$  Ом. В процессе измерений ЭДС регулируемого источника тока меняется от  $-12$  В до  $+0.6$  мВ. Отбраковка фотодиодов производится по величине обратного тока  $I_0$ .

В процессе проектирования в топологию фотошаблонов закладывались 4 варианта фотодиодов: два варианта топологии, содержащие по 2 фотодиода, и два варианта, содержащих 4 фотодиода, топология которых приведена в главе 4 (см Рисунок 4.17). Все варианты различались между собой площадью активной области фотодиодов и топологией металлизации. Изготовлены были кристаллы со всеми вариантами ФД, однако в диссертации для исследования использовались кристаллы типа 1 с двумя фотодиодами с наименьшей площадью.

На Рисунке 5.10 представлены прямая и обратная ветвь ВАХ полученных фотодиодов, которая имеет стандартный вид. Обратный ток составляет 0,4 нА, что является вполне приемлемым значением, учитывая специфику фотодиодов и их большую площадь. Обратный

темновой ток был измерен с помощью прецизионного операционного усилителя с минимально регистрируемым током 10 пА.

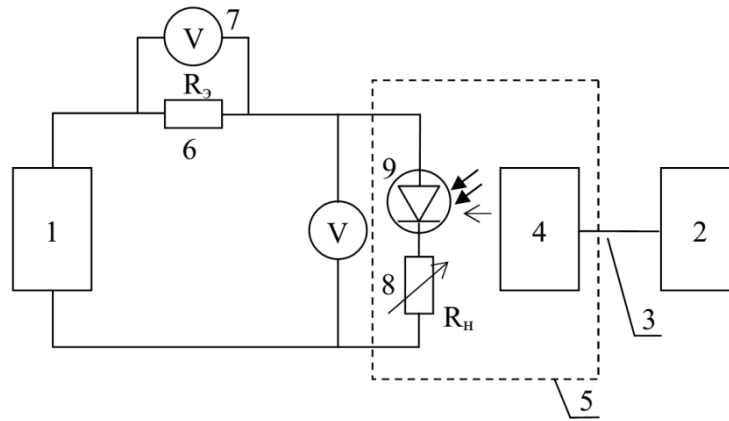


Рисунок 5.9 – Электрическая схема лабораторной установки, предназначенной для измерений темновой и световой ВАХ фотодиодов. Обозначения: 1 – регулируемый источник постоянного напряжения YPS-60300; 2 – регулируемый источник монохроматического излучения на лазере WSLP-650-003m-M; 3 – оптоволоконно; 4 – устройства позиционирования оптоволоконна относительно фотодиода; 5 – экранирующий колпак; 6 – эталонное сопротивление  $R_3=100$  Ом; 7 – измерительный вольтметр APPA-227; 8 – сопротивление нагрузки  $R_n$ ; 9 – исследуемый ФД

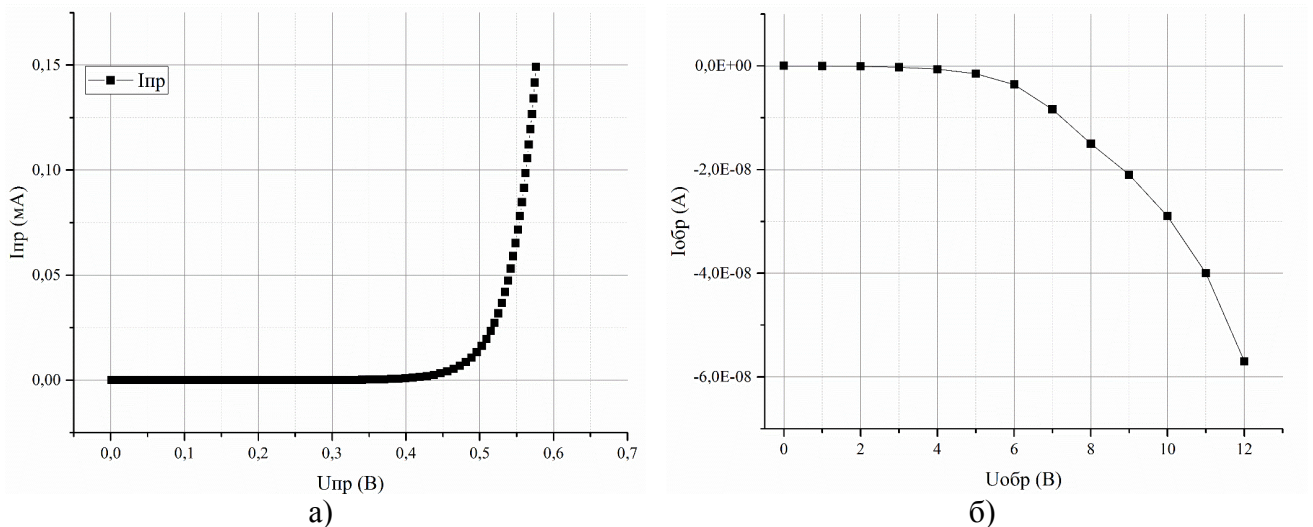


Рисунок 5.10 – Прямая - а) и обратная - б) темновая ветвь ВАХ исследуемых фотодиодов

Также получено семейство характеристик обратной ветви ВАХ для температур до 150 °С, приведенных на Рисунке 5.11. Температурная зависимость обратного темнового тока  $I_0(T)$  при  $U_{обр} = 1$  В, хорошо аппроксимируется соотношением:

$$I_0(T) = I_0(T_0) \exp[a_I(T - T_0)] \quad (5.2)$$

где  $\alpha_{I0} = 0,061/^\circ\text{C}$ , что соответствует литературным данным [123].



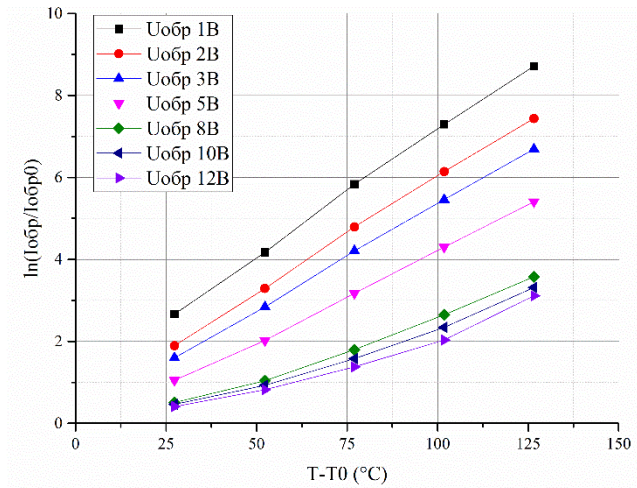


Рисунок 5.11 – Семейство температурных зависимостей обратного темного тока

#### 5.2.4 Исследование световых характеристик фотодиодов

Экспериментальное исследование ФД производилось с применением электронного узла, блок-схема которого приведена Рисунке 5.1. Излучение к фотодиодам подводилось от лазерного диода с оптоволоконным выходом WSLP-635-005m-M-PD соединенным с оптоволоконным пигтейлом, свободный конец которого был направлен ортогонально поверхности ФД.

Световые ВАХ измерялись на фотодиодах при подаче освещения от излучателя через оптоволоконно. На Рисунке 5.12 представлен четвертый квадрант ВАХ разработанных фотодиодов типа 1. Как следует из экспериментальных данных, максимальное значение ЭДС холостого хода составляет  $\sim 450$  мВ, при освещении фотодиода  $12,5$  мкВт падающего излучения (соответствующего  $32,5$  мА управляющего тока). Ток короткого замыкания ( $U_{пр} \rightarrow 0$ ), заметно зависит от конструктивных особенностей фотодиода. Общий характер зависимостей полностью соответствует результатам теоретических исследований [123].

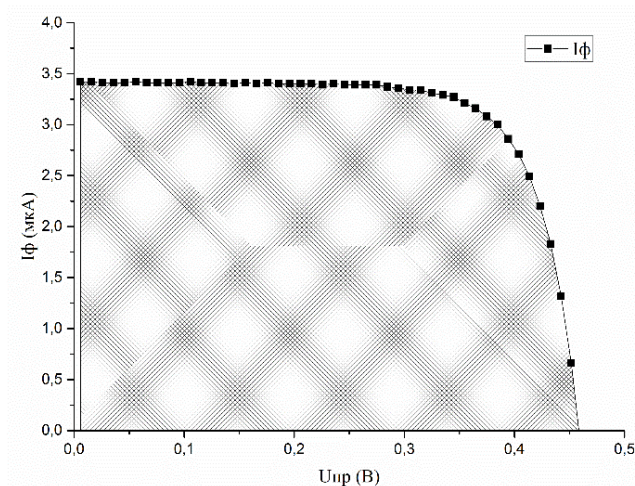


Рисунок 5.12 – Экспериментальная ВАХ ФД типа 1 при мощности падающего излучения  $P = 15$  мкВт

Исследования зависимости параметров образцов от температуры и максимальной мощности излучения проведены с использованием образцов кремниевых кристаллов с ФД различной конфигурации и площади, как показано на рисунках 5.13 (а-б). Свободный конец оптоволоконна направлялся по нормали к поверхности, как показано на рисунках 5.13 (б-в).

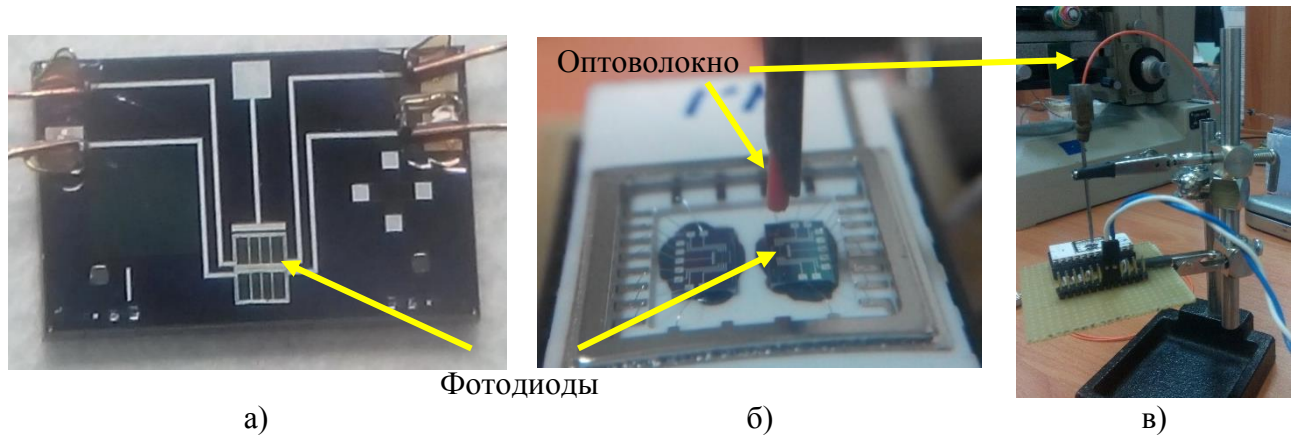


Рисунок 5.13 – Кремниевый кристалл ФВУ с фотодиодами типа 1 для КФДД (а); кристаллы с фотодиодами типа 3 для КФДД и направленное по нормали к поверхности оптоволоконно в ходе исследования генерируемой мощности (б); ортогональное позиционирование оптоволоконна к поверхности фотодиодов (в)

Максимальная мощность лазера при токе управления 55 мА составила  $\sim 3.72$  мВт. При таких условиях освещения для фотодиодов, отличающихся топологическими решениями и площадью (см. Рисунок 4.17), были получены следующие характеристики (таблица 5.3):

Таблица 5.3 – Параметры фотодиодов ФД КФДД

	$S$ ФД, мм <sup>2</sup>	$I_{кз}$ , мкА	$U_{xx}$ , В	$I_{кз}$ в импульсном режиме, мкА
Тип 1	0.1416	408	0,604	До 660, в режиме включения лазера на 1 сек.
Тип 2	0.2891	450	0,603	
Тип 3	0.10002	373	0,602	
Тип 4	0.16992	400	0,602	

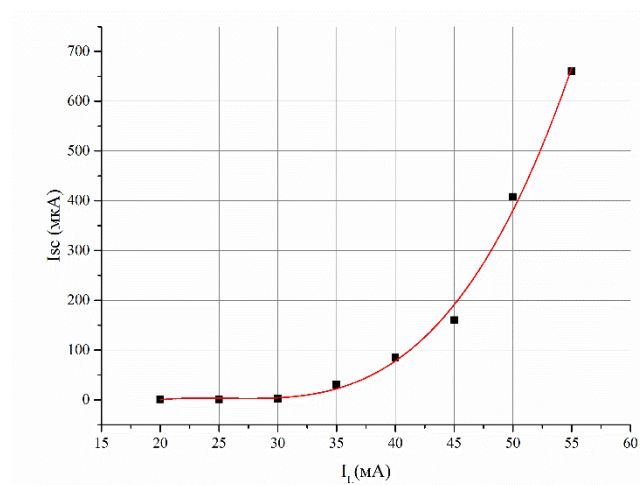


Рисунок 5.14 – Зависимость тока короткого замыкания фотодиодов типа 1 от тока накачки лазерного диода.



График зависимости тока короткого замыкания от тока лазерного диода приведен на Рисунке 5.14. Полученные результаты показывают возможность получения с фотодиодов больших фототоков при увеличении мощности падающего излучения. Такой метод позволяет при необходимости увеличивать общую чувствительность ФВУ КФДД, и обеспечивает конструктивный запас для датчика.

### 5.2.5 Исследование влияния латерального перемещения излучающего оптоволоконна относительно сдвоенных фотодиодов

В эксперименте, светоизлучающее оптоволоконно оставалось неподвижным и ориентированным перпендикулярно плоскости фотодиодов. Фотодиоды перемещались микрометрическим винтом таким образом, что световое пятно перемещалось перпендикулярно границе раздела между фотодиодами.

В первой группе экспериментов регистрировалась ЭДС холостого хода каждого фотодиода в отдельности. Типичные зависимости приведены на Рисунке 5.15. Они имеют колоколообразную форму с плоским верхом, что соответствует подходу светового пятна к фотодиоду, перемещению вдоль поверхности фотодиода и выходу светового пятна из зоны восприятия фотодиода. Зависимости для обоих фотодиодов имеют одинаковый вид. Точка пересечения обеих зависимостей соответствует центральному положению оптоволоконна и одинаковой засветке фотодиодов. Общая форма зависимости  $U_{xx}(z)$  качественно согласуется с результатами работы [23], где размеры мембраны были существенно больше ( $5 \times 5$  мм), а фотодиод располагался на толстой части профилированной рамки.

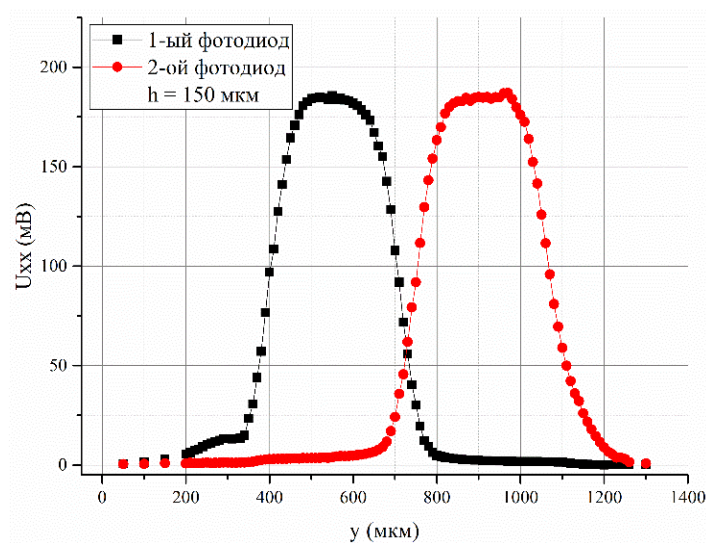


Рисунок 5.15 – Зависимость напряжения холостого хода  $U_{xx}$  ФД ФВУ типа 1 от перемещения светового пятна по поверхности кристалла при расстоянии от поверхности кристалла до конца оптоволоконна 150 мкм. Ток генерации 45 нА при  $P = 1.39$  мкВт

Наибольший практический интерес случай совместной работы двух фотодиодов при их дифференциальном включении. Уровень начального разбаланса выходного сигнала зависит от идентичности характеристик фотодиодов и попадания оси оптического волокна и светового пятна на середину расстояния между фотодиодами. Максимально возможная идентичность характеристик ФД обеспечивается их интегральным и топологическим исполнением. Попадание светового пятна на середину между фотодиодами обеспечивается направляющими V-канавками, оптоволоконными и сквозными отверстиями в ФВУ. Смещения рабочего оптоволоконного могут быть как в положительном, так и в отрицательном направлениях, что соответствует избыточным давлениям разных знаков.

На Рисунке 5.16 представлена зависимость ЭДС холостого хода  $U_{xx}(z)$  и зависимость тока короткого замыкания (ток генерации)  $I_{кз}(z)$  от смещения светового пятна для фотодиодов в дифференциальном включении. Зависимости носят асимметричный характер, на которых можно выделить три участка.

1. Квазилинейный участок, соответствующий небольшим перемещениям светового пятна ( $z < \pm 70$  мкм). Как рассматривалось ранее в главе 3, дифференциальное включение при идентичности характеристик фотодиодов и равномерной засветке площадей позволяет уменьшить нелинейность преобразовательной характеристики, по сравнению со случаем применения одиночного фотодиода. При этом разностный сигнал с фотодиодов равен нулю при симметричной засветке.

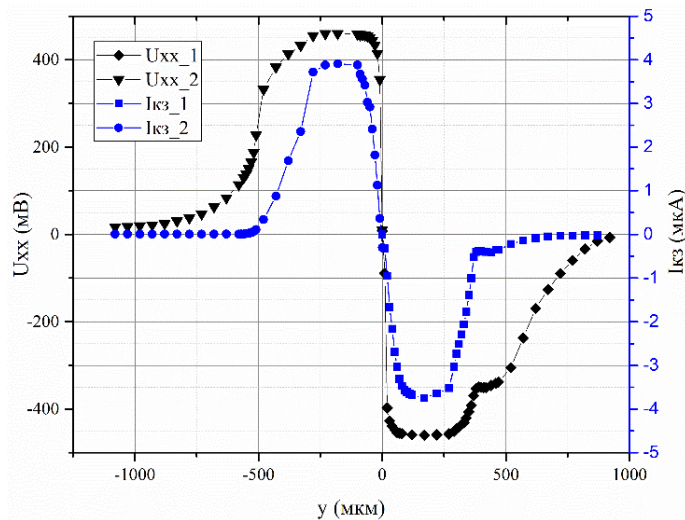


Рисунок 5.16 – Зависимости  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  фотодиодов кристалла ФВУ типа 1 от перемещения светового пятна по поверхности кристалла в дифференциальном включении при  $P = 15$  мВт

2. Участки пологих максимумов с постоянным значением напряжения холостого хода  $U_{xx} \approx \pm 450$  мВ и тока короткого замыкания  $I_{кз} > \pm 3,5$  мкА. Эти участки соответствуют полному световому пятну на поверхности одного из фотодиодов. При этом действует только один фотодиод, второй фотодиод в этом случае не освещен.

3. Хвостовые участки зависимостей связаны с постепенным уходом светового пятна с внешней границы фотодиода. Данный участок имеет большую протяженность в сравнении с площадью фотодиодов.

Характеристика по току  $I_{кз}$ , как показано на Рисунке 5.16, имеет такой же характер, как и зависимость  $U_{xx}=f(z)$ , но «внешние» края в диапазонах перемещений - 1000 ÷ - 500 мкм и + 500 ÷ + 1000 мкм определены намного лучше и имеют более резкую форму. Из приведенных зависимостей очевидны преимущества первого линейного участка характеристики.

Во второй серии измерений фотодиоды работали в режиме короткого замыкания и генерировали фототок, пропорциональный величине светового потока. Встречное включение фотодиодов позволило сразу получить сигнал в виде разности фототоков пропорциональных смещению светового пятна относительно центральной точки между фотодиодами. При симметричной засветке, т.е. когда световое пятно находится в центральной точке между фотодиодами, разница фототоков равна нулю. В эксперименте имитировалась работа ФД в составе датчика путем перемещения оптоволоконна  $z$ , ориентированного по нормали к плоскости фотодиодов с помощью микрометрического столика микроскопа с шагом перемещений 10 мкм, при температуре  $T = 20$  °С. Эта зависимость представляет частную преобразовательную характеристику  $\Delta S=f_2(\Delta z)$ , которой соответствует чувствительность  $S_3$ , как рассматривалось ранее в разделе 2.1.

Преобразовательная характеристика ФД  $f_3=\Delta I(\Delta S)$ , приведена на Рисунке 5.17. На Рисунке показана часть характеристики, которая представляет практический интерес. Максимальное значение разности токов короткого замыкания, при полной засветке одного из двух фотодиодов при токе управления лазерного диода 30 мА равно  $\Delta I_{\max}=0,07$  мА. Величина  $\Delta I_{\max}$  пропорциональна освещенности фотодиодов и, при необходимости, может быть увеличена.

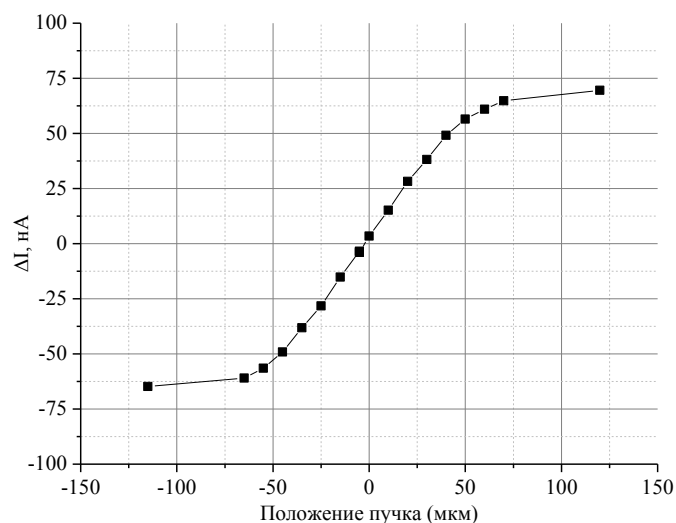


Рисунок 5.17 – Изменение выходного сигнала ФД в дифференциальном включении при перемещении светового пучка с помощью микрометрического столика [124]

Преобразовательная характеристика нечетна относительно нуля. Участок характеристики -50 до 50 мкм перемещения линейен и может быть использован для измерений. Для практических применений начальное положение светового пятна должно находиться в центральной или отрицательной части характеристики  $z \leq 0$ . Таким образом характеристика не будет выходить за пределы линейного участка. Эффективный диаметр светового пятна равен 130 мкм. Чувствительность на линейном участке характеристики  $S_3 = 1,15$  нА/мкм.

### 5.2.6 Исследования характеристик фотодиодов кремниевого фотовольтаического датчика давления в расширенном температурном диапазоне

Для проведения температурных исследований КФДД были использованы программные и контрольно-измерительные средства, разработанные ранее, а также модернизированная промышленная термокамера ТК-500. Модернизация последней состояла в замене устаревшего электронного блока управления на компьютеризированную систему управления позволяющую создавать современные автоматизированные измерительные системы. Блок схема устройства приведена на Рисунке 5.18. Для измерения температуры в термокамере ТК использовалась термопара типа К (хромель-алюмель). Аналоговый сигнал с термопары преобразовывался в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП AD7731 фирмы AnalogDevices. Температура холодного спая термопары контролировалась цифровым датчиком температуры ДТ ADT301ARTZ той же фирмы. Микроконтроллер МК AT90USB162 фирмы Atmel, исходя из разности между текущей и заданной температурой, вырабатывает сигнал, поступающий на тиристорный блок управления мощностью БУ. В микроконтроллере реализован дискретный пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) алгоритм регулирования, обеспечивающий точность поддержания температуры не хуже  $\pm 0.1$  °С. Задание температуры и контроль процесса регулирования осуществляется с помощью ЭВМ.

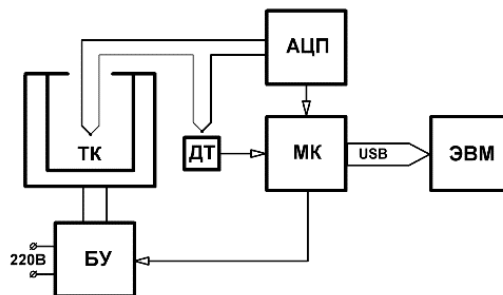


Рисунок 5.18 – Блок схема устройства управления температурой. Обозначения: ТК – термокамера, БУ – блок управления мощностью нагревателя, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, ДТ – датчик температуры, ЭВМ – компьютер

Исследование температурных зависимостей ФД и образцов разработанного КФДД представляет интерес в первую очередь потому, что до сих пор в доступной литературе

отсутствуют какие-либо теоретические или экспериментальные данные температурных исследований датчиков такого типа.

В связи с этим сначала будут рассмотрены температурные зависимости с теоретической точки зрения, а во второй – будут приведены результаты эксперимента.

При анализе будем рассматривать ЭДС холостого хода  $U_{xx}$  в двух предельных режимах: малого и большого уровня возбуждения.

**Малый уровень возбуждения.** В случае  $I_{ген} \ll I_s$  ЭДС холостого хода равна [125]:

$$U_{xx} = kT \frac{I_{ген}}{I_s(T)} \quad (5.3)$$

где  $I_{ген}$  – генерационный ток,  $I_s$  - обратный ток фотодиода.

Генерационный ток определяется величиной падающего светового потока, квантовым выходом, долей непрорекомбинировавших носителей, дошедших до p-n перехода. При анализе температурных зависимостей в первом приближении его можно считать постоянным. Основной вклад в температурные зависимости вносит обратный ток фотодиода. Обратный ток имеет несколько составляющих: тепловую, генерационно-рекомбинационную, токи утечки.

**Большой уровень возбуждения.** В этом случае  $I_{ген} \gg I_s$  и напряжение холостого хода равно [125]:

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{ген}}{I_s(T)} \quad (5.4)$$

Основной вклад в температурную зависимость также вносит обратный ток фотодиода. Согласно стандартной теории тепловой и генерационные токи могут быть представлен в виде [125]:

$$I_s(T) = I_s(T_0) \exp\left[ m \frac{E_g}{k} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5.5)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны кремния, а  $m$  – коэффициент неидеальности, который зависит от температуры и находится в пределах  $0,5 \leq m \leq 1$ .

Учитывая это, ЭДС холостого хода можно представить в виде:

1) для малого уровня возбуждения:

$$U_{xx}(T) = U_{xx}(T_0) \cdot F(T) \quad (5.6)$$

где температурная функция имеет вид:

$$F(T) = \frac{T}{T_0} \exp\left[ m \frac{E_g}{k} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5.7)$$

2) для высокого уровня возбуждения

$$U_{xx}(T) = \frac{T}{T_0} \left[ U_{xx}(T_0) - m \cdot \frac{T_0 E_g}{e} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5.8)$$

здесь  $T_0$  – комнатная температура.

В обоих предельных случаях заметна зависимость от температуры: с повышением температуры напряжение холостого хода уменьшается.

На Рисунке 5.19 приведены температурная зависимость ЭДС холостого хода для единичного фотодиода ФВУ типа 1 КФДД, которая иллюстрирует эти особенности в сравнении с теоретической зависимостью (5.8). Резкое возрастание обратных токов обращает в ноль  $U_{xx}$  при температуре  $T \sim 120$  °С. Температурный коэффициент напряжения холостого хода  $\alpha_{U_{xx}} = -0,0071/^\circ\text{C}$ .

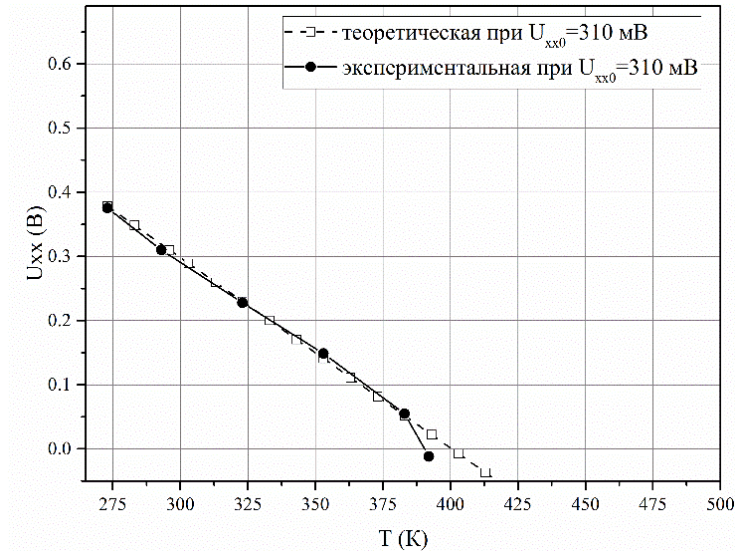


Рисунок 5.19 – Зависимость напряжения холостого хода от температуры

Приведенная зависимость иллюстрирует общую тенденцию изменения  $U_{xx}$  от температуры. Общий характер зависимости показывает, что в экспериментах реализуется случай сильного возбуждения. Верхний предел рабочих температур изготовленных вариантов датчиков в режиме холостого хода для единичного фотодиода ограничивается температурой 115 – 120 °С. Характер температурной зависимости напряжения холостого хода  $dU/dT$  показывает ограниченность применения такого режима для измерений давлений. На Рисунке 5.20 представлена температурная зависимость тока короткого замыкания  $I_{кз}=f(T)$  единичного фотодиода в рассматриваемой структуре. Она может быть аппроксимирована линейной зависимостью [126]:

$$I_{кз}(T) = I_{кз}(T_0)[1 + \alpha_I(T - T_0)] \quad (5.9)$$

где  $T_0$  комнатная температура.

Температурный коэффициент тока короткого замыкания для разработанного фотодиода равен  $\alpha_{I_{кз}}=0,0014/^\circ\text{C}$ . Увеличение  $I_{кз}$  с повышением температуры связано с уменьшением ширины запрещенной зоны кремния при нагреве [127]. Это увеличение приводит к повышению чувствительности  $S_3$  и общей чувствительности  $S$  фотовольтаического датчика давления. Температурная зависимость чувствительности примерно равна по величине, но противоположна по знаку температурной зависимости чувствительности тензорезистивных датчиков.

Экспериментальное значение  $\alpha_{\text{КЗ}}$  оказывается в 2,3 раза больше значения, предсказанного теорией идеального фотодиода ( $\alpha_{\text{КЗ}} \approx 0,0006/^\circ\text{C}$ ) [127], что, по видимому связано с большим влиянием последовательного сопротивления и шунтирующего сопротивления из-за неполной засветки площади фотодиода световым пятном [44, 127]. Возможный путь к уменьшению  $\alpha_{\text{КЗ}}$  является оптимизация топологических и технологических параметров фотодиодов. Темновой ток фотодиодов влияет на все характеристики фотовольтаического датчика давления. Благодаря близкому расположению фотодиодов на кристалле и интегральной технологии характеристики фотодиодов почти идентичны, что позволяет улучшить метрологические характеристики датчика за счет компенсации токов.

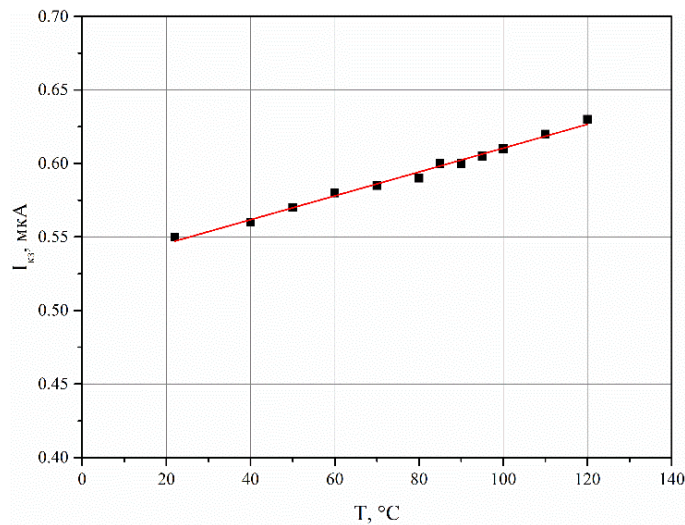


Рисунок 5.20 – Температурная зависимость тока короткого замыкания одиночного фотодиода при управляющем токе лазерного диода  $I_{\text{лаз}}=30 \text{ мА} = P=2.67 \text{ мкВт}$

Величина обратного темнового тока зависит от физико-технологических особенностей фотодиодов и как упоминалось ранее в параграфе 5.2.3 равна  $I_0(T_0) = 0,4 \text{ нА}$ . ФВУ сохраняет работоспособность до температуры  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.3. Исследование характеристик кремниевого фотовольтаического датчика давления

#### 5.3.1 Исследование влияния температуры на начальный выходной сигнал

Основным источником начального выходного сигнала  $U_0$  КФДД могут являться:

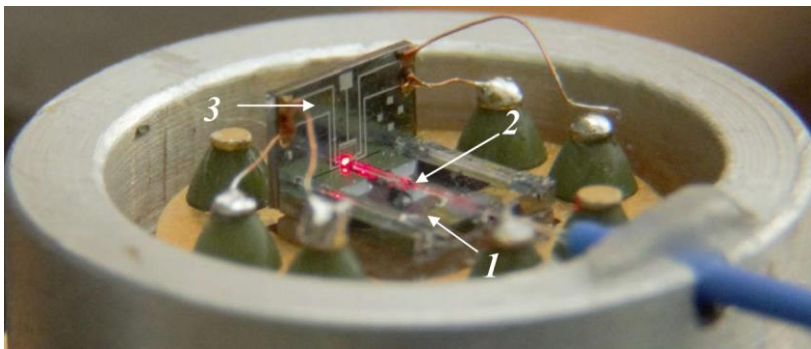
- 1) Разница в электрических характеристиках двух ФД (разные токи генерации и темновые токи);
- 2) Конструктивные факторы, такие как несовпадение оси оптоволокну и оси симметрии двух фотодиодов.

Интегральное исполнение ФД, расположенных на одном кристалле близко друг к другу обеспечивает их практически идентичными характеристиками. Поэтому сдвиг оси оптоволокну

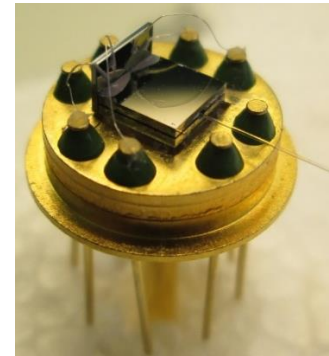


относительно оси симметрии ФД при комнатной температуре обеспечивает большой фототок у того ФД, который больше освещен. При дифференциальном включении ФД это приводит к положительному или отрицательному значению начального выходного сигнала.

Изменение температуры может влиять на пространственное расположение оси оптоволокну, что приводит к изменению засветки ФД. Такой эффект может быть, например, связан с предварительным изгибом светопроводящего оптоволокну, в силу конструктивных особенностей сборки ОМУ КФДД. В идеальном ОМУ положение оптической оси оптоволокну постоянно и начальный выходной сигнал не должен зависеть от температуры. Однако при изменении температуры меняется эффективность работы ФД в режиме большого уровня возбуждения. Это позволяет в первом приближении не учитывать температурные зависимости темновых токов. Величины токов фотогенерации при повышении температуры, с одной стороны уменьшаются, поскольку из-за уменьшения времени жизни  $\tau_p$  и  $\tau_n$  уменьшаются и длины свободного пробега  $L_n$ ,  $L_p$ , и как следствие снижается доля непрорекомбинированных неравновесных носителей, дошедших до p-n перехода. С другой стороны, ток фотогенерации немного увеличивается с повышением температуры, так как уменьшается высота потенциального барьера  $E_g$  и становится больше фотонов обладающих достаточной энергией для образования электрон-дырочных пар.



а)



б)

Рисунок 5.21 – Общий вид лабораторного образца 2 (а), где 1 - УЭ, 2 - оптоволокну, 3 – ФД и тестового образца

В разработанном варианте КФДД фотодиоды могут работать в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания. Режим холостого хода удобен для физического анализа характеристик датчика. В режиме короткого замыкания измеряются токи, текущие через фотодиоды в режиме генерации. В этом случае, в дифференциальном включении измеряется разность токов фотодиодов и этот режим используется в КФДД:

$$\Delta I(P) = (I_{f1} - I_{f2}) + (I_{s1} - I_{s2}) \quad (5.10)$$

где  $I_{f1}, I_{f2}$  – токи световой генерации,  $I_{s1}, I_{s2}$  – темновые обратные токи.

В эксперименте использовались собранные лабораторные образцы КФДД, изображение которых приведено на Рисунке 5.21(а-б). Исследуемые образцы помещались в термокамеру



Terchy UC-20CE, которая позволяет изменять температуру от  $-60$  до  $+150$  °C с точностью до  $\pm 0,2$  °C. Избыточное давление в диапазоне от 0 до 7 атм подавалось от компрессора Patriot Euro 24-240, и контролировалось прецизионным манометром с цифровым интерфейсом ДМ5002. На Рисунке 5.22 приведены температурные зависимости начального выходного сигнала  $U_0$  образцов КФДД от температуры.

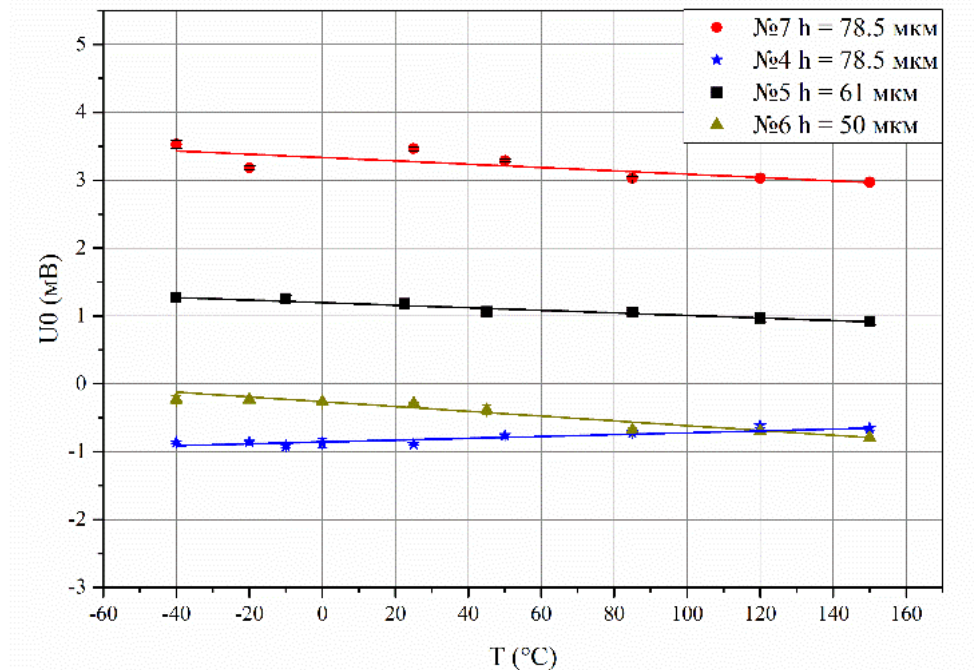


Рисунок 5.22 – Температурная зависимость начального выходного сигнала  $U_0$  образцов КФДД

Разброс  $U_0$  образцов № 7 и 4 обусловлен неравномерной световой засветкой фотодиодов, связанной с неточностью сборки КФДД. Температурные изменения  $U_0$  в диапазоне температур до 150 °C не превосходит 1,5 мВ. Температурные коэффициенты изменения начального выходного сигнала рассчитывались по формуле:

$$\beta = \frac{U_o(T) - U_o(T_0)}{U_{ном.(T_0)}(T - T_0)} \cdot 100\%. \quad (5.11)$$

Температурный коэффициент изменения начального выходного сигнала для датчиков давления, как это видно из формулы 5.11 зависит помимо физических составляющих еще и от величины номинального выходного сигнала  $U_n(T_0)$  и диапазона температур. Для выборки датчиков, представленных на Рисунке 5.22, неоткалиброванных по величине  $U_n(T_0)$  получено значение  $\beta = -0,093$  %/°C. Этот результат может быть дополнительно улучшен путем отработки технологии сборки: подбора клея, использование микроманипуляторов при сборке образцов, дополнительный визуальный контроль и т.д.

### 5.3.2 Исследование преобразовательной характеристики кремниевого фотовольтаического датчика давления

Измерение преобразовательной характеристики датчика давления проводилось с использованием электронного узла, блок-схема которого приведена на Рисунке 5.2. Давление подавалось через соединительную трубку, и контролировалось прецизионным манометром с цифровым интерфейсом ДМ5002, подключенным к компьютеру. Эта зависимость представляет преобразовательную характеристику  $U_{\text{вых}}=f(P)$ , которой соответствует чувствительность  $S_3$ , как показано в разделе 2.1.

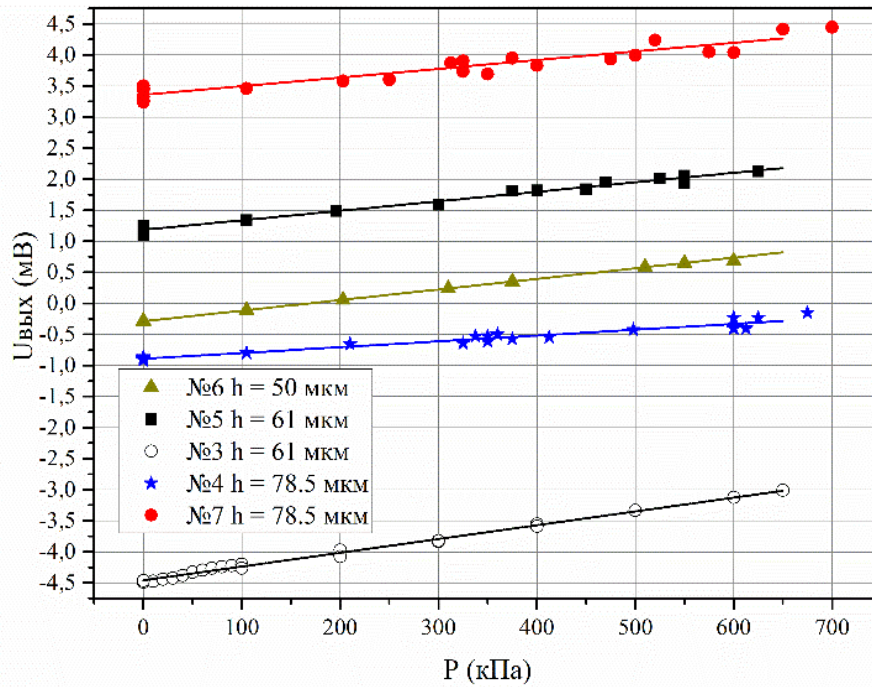
Давление задавалось в диапазоне от 0 до 650 кПа, при комнатной температуре. Использовались лабораторные образцы датчика с толщиной мембраны 50, 61,0 и 78,5 мкм. На Рисунке 5.23а приведены зависимости выходного сигнала лабораторных образцов КФДД от измеряемого давления при комнатной температуре, а на Рисунке 5.23б показаны приведенные к нулевому значению зависимости выходного сигнала при  $P=0$  кПа. На характеристике показаны зависимости выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  от измеряемого давления в диапазоне от 0 до 650 кПа: симуляция с использованием микрометрического позиционирования, и преобразовательные характеристики лабораторных образцов датчика с мембранами толщиной 50, 61,0 и 78,5 мкм. В сравнении с выходным сигналом прототипа датчика [23], см. рис. 1.16, характеристика имеет линейный характер на всем диапазоне измеряемых давлений, однако имеет меньшее выходное напряжение, что связано с меньшим размером УЭ (у нас  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>, а у авторов прототипа [23]  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>) и особенностями схемы измерения. При необходимости выходной сигнал можно увеличить, выбрав соответствующее сопротивление обратной связи  $R_{\text{ООС}}$  измерительной схемы приведенной на Рисунке 5.2 или увеличением мощности излучения.

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. Если, разделить полученные значения чувствительности для образцов №3 и №7 на  $S_z=0,115$  мВ/мкм (см. раздел 5.2.5), то получается чувствительность по перемещению свободного конца оптоволоконной нити составит 2,26 мкм/атм для мембраны 61,0 мкм и 1,21 мкм/атм для мембраны 78,5 мкм. На Рисунке 5.24 приведено сравнение экспериментальных результатов для образцов датчиков №3 и №7 со значениями полученными методом численного моделирования в главе 2. Отличие не превосходит 5%

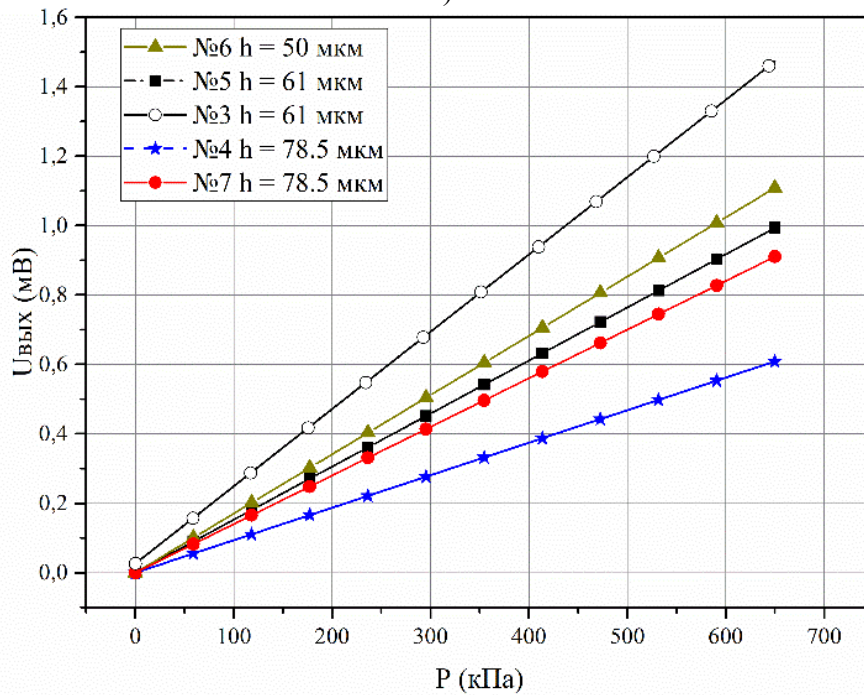
Оценка нелинейности преобразовательной характеристики выборки образцов датчиков, проведена по формуле 2.7 и показывает значения в интервале  $0,37 \div 0,69$  %.

Особенностью работы ОМУ КФДД является преобразование давления в перемещение ЖЦ УЭ и смещение оптоволоконной нити в точке приложения силы через ЖЦ. В этой точке происходит

скольжение граней ЖЦ по оптоволокну с одновременным небольшим смещением точки приложения силы. Эти смещения весьма малы ( $<1$  мкм), и могут приводить к отличию преобразовательной характеристики датчика на этапах увеличения и уменьшения давления (гистерезис преобразовательной характеристики). На Рисунке 5.25 приведена преобразовательная характеристика образца №3 датчика (ЖЦ УЭ без зубчатых структур) в диапазоне давлений от 0 до 550 кПа в приведенных единицах. Величина гистерезиса не превышает 0.1%, что связано с высоким качеством контактирующих поверхностей.



а)



б)

Рисунок 5.23 – Преобразовательные характеристики образцов КФДД при  $T_0$  – а) и характеристики, приведенные к нулю при  $P = 0$  кПа – б) [124]

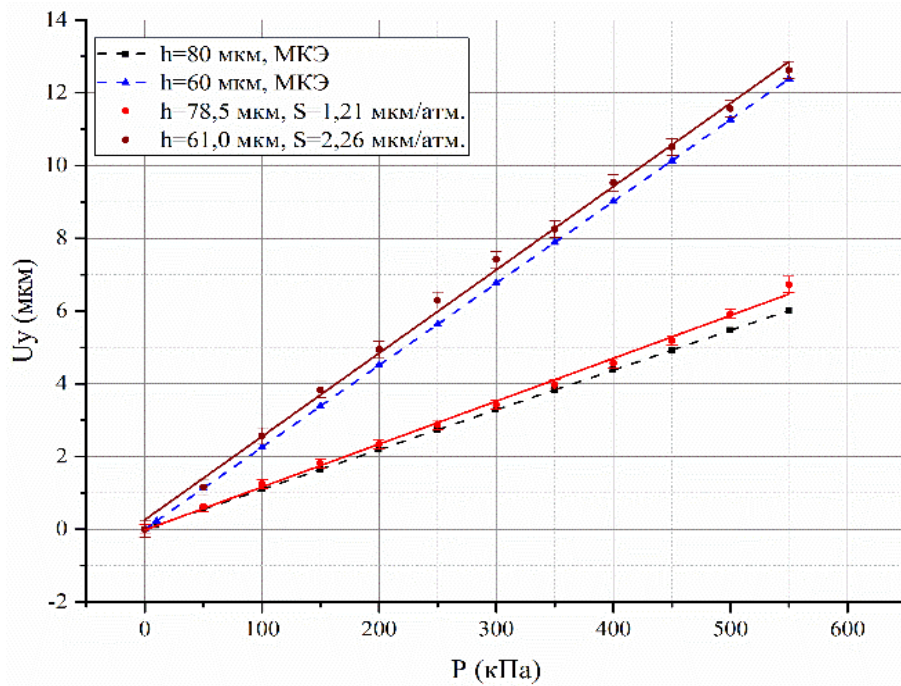


Рисунок 5.24 – Зависимости  $U_y$  на измеренных образцах - сплошная линия, и полученные методом численного моделирования – штрих-линия) – б) [89]

При формировании ЖЦ может оставаться зубчатая структура, как описано в разделе 4.1.2. Наличие зубчатых структур может оказывать влияние на характеристику КФДД.

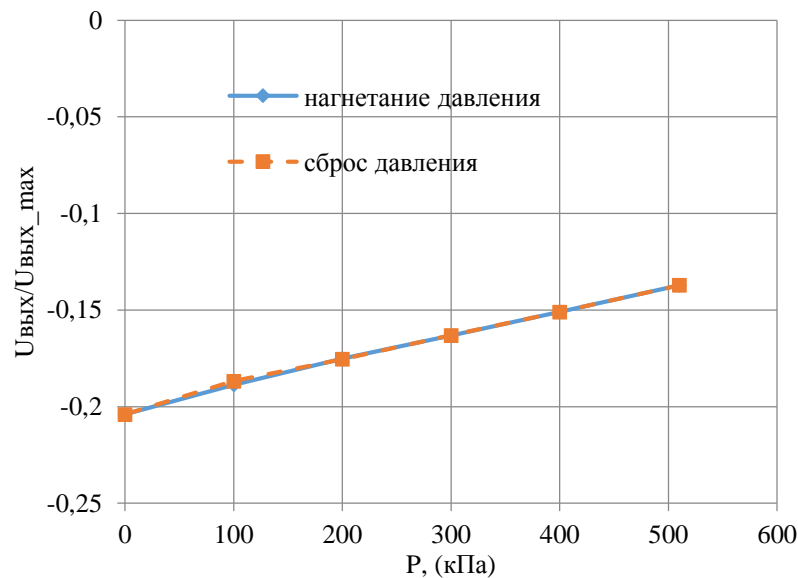


Рисунок 5.25 – Смещение преобразовательной характеристики КФДД

На образцах с зубчатыми структурами наблюдался гистерезис величина которого была 16%. Еще одной причиной возникновения гистерезиса может являться недостаточно жесткое защемление конца оптоволокну, которое позволяет перемещаться оптоволокну внутри сборки датчика.

### 5.3.3 Температурная зависимость чувствительности кремниевого фотovoltaического датчика давления

Эта зависимость весьма важна для любых датчиков давления и вносит основной вклад в дополнительную погрешность измерений. Причиной температурной зависимости являются физические особенности функционирования датчика, в том числе его конструктивные особенности и технология сборки.

В существующей литературе температурные характеристики фотovoltaических датчиков давления не рассмотрены. В данном параграфе характеристики КФДД исследовались в температурном диапазоне -40 до 85 °С. Исследование проводилось с использованием электронного узла, блок схема которого приведена на Рисунке 5.3, и прецизионного манометра ДМ5002. На Рисунке 5.26 приведены экспериментальные зависимости чувствительности лабораторных образцов датчиков, работающих в режиме КЗ и дифференциальном включении ФД, при различных температурах. Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) датчиков давления  $\alpha$  определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{S(T) - S(T_0)}{S(T_0)(T - T_0)} \cdot 100\%. \quad (5.12)$$

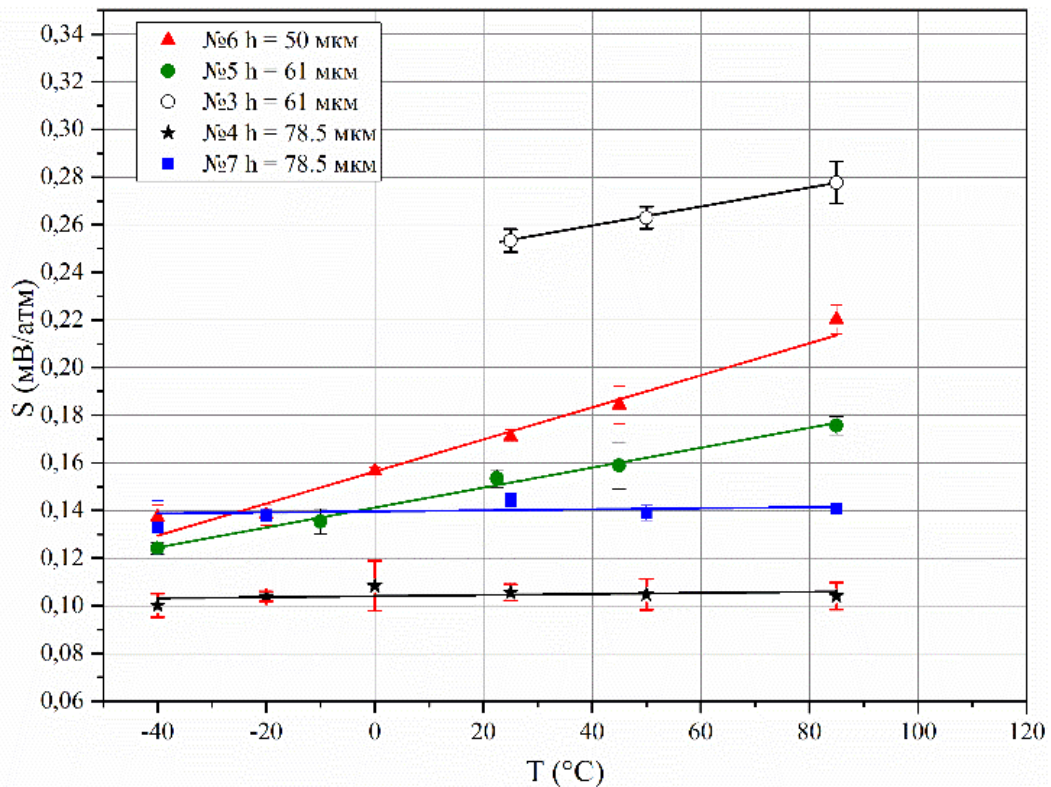


Рисунок 5.26 – Температурные зависимости чувствительности образцов КФДД [124, 128]

Из экспериментальных данных следует важная особенность рассматриваемого типа датчиков: их чувствительность может расти с повышением температуры либо может иметь очень

слабую температурную зависимость. Минимальное значение  $\alpha$  наблюдается для образца датчика №7 = 0,016 %/°C. Это выгодно отличает данный тип датчиков от широко распространенных тензорезистивных датчиков, ТКЧ которых составляет  $\sim 0,2$  %/°C без схемы компенсации. Применение специальных методов температурной компенсации позволяет уменьшить эту температурную зависимость, однако для исследуемых датчиков на фотовольтаическом эффекте малые значения  $\alpha$  достигаются за счет иных физических принципов действия и особенностей конструктивной реализации.

Температурные зависимости обратного тока, тока фотогенерации имеют свои особенности, однако в разработанном варианте датчика имеется и важная конструктивная особенность, отличающая его от обычных фотодиодов. Фотодиоды в КФДД освещены оптоволоконном лишь частично и всегда имеется затемненная область, которая вносит заметный вклад в температурную зависимость тока короткого замыкания.

### Выводы к главе 5

1. Разработанные и изготовленные по серийно способной технологии оригинальные фотовольтаические элементы на базе двух фотодиодов показали пригодность для построения КФДД.

2. Экспериментально реализована оригинальная технология сборки КФДД с 3D чувствительным элементом, созданным по МЭМС технологии и содержащим сборку, состоящую из оптомеханического и фотовольтаического узлов.

3. Показано, что измерения давления предпочтительнее проводить в режиме КЗ, чем в режиме ХХ. Предложена и реализована соответствующая измерительная схема.

4. Установлено хорошее соответствие результатов моделирования ОМУ и экспериментальных результатов образцов датчиков давления.

5. Установлено, что знак температурной зависимости чувствительности разработанных КФДД в интервале температур от -40 до 85 °C положителен и может быть близок к нулю ( $\alpha=0,016$  %/°C) без применения специальных схем компенсации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненной диссертационной работы можно сделать следующие 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-канавок 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 ( $\alpha=0,016$  %/°С) 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.



**СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

МОЭМС	– микрооптоэлектромеханические системы
МЭМС	– микроэлектромеханические системы
ВОД	– волоконно-оптические датчики
МОП	– структура металл-оксид-полупроводник
ИМС	– интегральная микросхема
УЭ	– упругий элемент
ОМУ	– оптомеханический узел
ФЭ	– фоточувствительный элемент
ФВУ	– фотовольтаический узел
ФЦП	– федеральная целевая программа
ФД	– фотодиод
КМОП	– технология изготовления ИМС – комплементарных МОП структур
САПР	– система автоматизированного проектирования
ОПЗ	– область пространственного заряда
ВАХ	– вольтамперная характеристика
КЭФ	– кремний электронной проводимости, легированный фосфором
КИС	– контрольно-измерительные средства
ТКС	– температурный коэффициент сопротивления
ТКН	– температурный коэффициент напряжения
ТКЧ	– температурный коэффициент чувствительности
ОУ	– операционный усилитель
ЧЭ	– чувствительный элемент

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Sze, S.M. Semiconductor Sensors / S.M. Sze. – New York: J. Wiley & sons – 1994. – P. 550.
- 2) Middelhoek, S. Silicon Sensors / S. Middelhoek, S.A. Audet. – Singapore: Academic press. – 1989. – P. 376.
- 3) Kuzmenko A.P. Monitoring the technical condition of dams of hydroelectric power plants with automated monitoring and earthquake registration system / A.P. Kuzmenko, D.B. Korolenko, E.P. Zolotukhin // Journal of Energy and Power Engineering – Vol. 8. – 2014. – P. 1468 -1474.
- 4) Kuzmenko A.P. Identification of natural oscillation modes for purposes of seismic assessment and monitoring of HPP dams / A P. Kuzmenko, S.V. Saburov // Power Tech. Eng. – Vol. 50. – Issue 2. – 2016 (July). – P. 152-163.
- 5) Optromix [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://fibergratings.com/sensors\\_pressure.html](https://fibergratings.com/sensors_pressure.html)
- 6) Optromix [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fibergratings.com/interrogators.html>
- 7) Oxsensis [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oxsensis.com/pressure-sensor-products-v2/pt3000-series-product-v2>
- 8) FBG Korea [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.fbg.co.kr/eng/bbs/board.php?bo\\_table=fbgp09&wr\\_id=1](http://www.fbg.co.kr/eng/bbs/board.php?bo_table=fbgp09&wr_id=1)
- 9) Smith C.S., Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon / C.S. Smith // Phys. Rev. –Vol. 94. – Issue 1. – 1954. – P. 42–49.
- 10) Tufte O.N., Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms / O.N. Tufte, P.W. Chapman, D Long // J. App. Phys. –Vol. 33. – 1962. – P. 3322.
- 11) An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems) / PRIME Faraday Partnership. Loughborough University. – 2002. – UK. – P. 51.
- 12) Sandia National Laboratories [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://MEMS.sandia.gov/gallery/images.html>
- 13) RP Photonics [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.rp-photonics.com/bragg\\_gratings.html](https://www.rp-photonics.com/bragg_gratings.html)
- 14) PV Education [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/the-photovoltaic-effect>
- 15) ANSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/>
- 16) Silvaco [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.silvaco.com/products/tcad.html>
- 17) Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат. –1990. – С.256.

- 18) Чесноков В. В. Физические основы получения информации / В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков – Новосибирск: СГГА. – 2011. – С. 447.
- 19) Годовицын И.В. Миниатюрные тензорезистивные преобразователи давления: итоги двадцатипятилетия / И.В. Годовицын, В.В. Амеличев, А.Н. Сайров, Р.О. Гаврилов, С.С. Генералов // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – №7. – С. 29-41.
- 20) Презентация отчета Yole Developpement “MEMS Pressure Sensor”, 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yole.fr/>
- 21) Chang C.Y. ULSI Technology / C.Y. Chang, S.M. Sze. – NY: McGraw-Hill. – 1996. – P. 650.
- 22) Quirk M. Semiconductor Manufacturing Technology / M. Quirk, J. Serda. – New Jersey: Pearson Prentice Hall. – 2001. – P. 666.
- 23) Dziuban J. A. Silicon optical pressure sensor / J. A. Dziuban, A. Gorecka-Drzazga, U. Lipowicz //Sensors and Actuators A. – Vol. 32. – 1992. – P. 628-631.
- 24) Пасынков В.И. Преобразователь давления / В.И. Пасынков, В.А. Кузьмин // Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе. – 1982. Патент. – Su 966514A1
- 25) Бялик А.Д. Амплитудный волоконно-оптический преобразователь механических величин / А.Д. Бялик // НГТУ. – 2002. Патент. – RU2180100 C2.
- 26) Peiner E. A micromachined vibration sensor based on the control of power transmitted between optical fibers/ E. Peiner, D.Scholz, A. Schlachetzki, P. Hauptmann //Sensors and Actuators A. – Vol. 65. – 1998. P. 23-29.
- 27) Hill, K.O Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication/ Hill, K.O.; Fujii, Y.; Johnson, D. C.; Kawasaki, B. S. // Appl. Phys. Lett. Vol. 32(10). – 1978. – P. 647.
- 28) Forc Photonics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://forc-photonics.ru/ru/sensor\\_systems/pressure%20sensors/1/135/](http://forc-photonics.ru/ru/sensor_systems/pressure%20sensors/1/135/)
- 29) ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарёва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dimes.ru/images/stories/images/2012.pdf>
- 30) Инверсия Сенсор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/datchiki-davleniya/90-produktsiya/tochechnye-volokonno-opticheskie-datchiki/166-astro-a565>
- 31) НПО автоматики им. Ак. Н.А. Семихатова [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.npoa.ru/catalog/pribornaya-produkciya/vysokochuvstvitel-nye-volokonno-opticheskie-datchiki.html>
- 32) ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарёва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dimes.ru/index.php/uslugi>
- 33) ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарёва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eposignal.ru/products/catalog/pressuresensors/catalog2016.pdf>

- 34) Гапанович В. А. Волоконно-оптический датчик давления/ В. А. Гапанович, К. В. Григорьев, А. Ф. Комиссаров // – М. – 2011. Патент. – RU 2420719.
- 35) Москалев С. А. Микромеханический волоконно-оптический датчик давления / С. А. Москалев, А. А. Родионов, В. А. Гафнер, А. В. Самошин // – 2013. Патент. – RU 2571448
- 36) Gustafsson K. A fibre optic pressure sensor in silicon based on fluorescence decay/ K. Gustafsson, B. Hok //Sensors and Actuators. – 1989, Vol. 19(4). – P. 327-332.
- 37) Zheng W. High-sensitivity photoelectric pressure sensor based on a monolithic dual photodiode/ W. Zheng, N. Cao, J. Qian //Proc. SPIE 2894, Detectors, Focal Plane Arrays, and Applications. – 1996. – P. 26-33.
- 38) Бонцаенко В.Е. Интегральный преобразователь давления/ В.Е. Бонцаенко, Т.В. Виговская, Е.П. Кокин, А.А. Смирнов, Ю.В. Сурин // – 2001. Патент. – RU2186438.
- 39) Цаплин А. И Волоконно-оптический датчик давления / А. И. Цаплин, В. Н. Репин, М. В. Репин, Р. А. Аксенов, Н. А. Ермаков // ГОУВПО Пермский государственный технический университет. – 2004. Патент. – RU 2269755С1.
- 40) Цаплин А. И. Волоконно-оптический датчик давления / А. И. Цаплин, В. Р. Каюмов // – 2012-2016. Патент – RU 2574227.
- 41) Корляков А., Физико-технологические основы формирования базовых элементов микросистемной техники / дис. ... док. тех. наук: 05.27.01 / Андрей Владимирович Корляков // – С.-Петербург.: ЛЭТИ. – 2010. – С. 280.
- 42) Бялик А.Д., Разработка и исследование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления: дис. ... канд. тех. наук: 05.27.01 / Александр Давидович Бялик. – Новосибирск. НГТУ – 2009. – С. 160.
- 43) Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва: Физматгиз 2-е изд. – 1963. – С. 635.
- 44) Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition / S.M. Sze. – М.: Mir. – 1984. – P. 398-417.
- 45) Atef M. High-speed photodiodes in 40 nm standard CMOS technology / M. Atef, A. Polzer, H. Zimmermann // Sensors and Actuators A. – Vol. 193. – 2013. – P.213– 219.
- 46) Taiwan Semiconductor Manufacturing Company [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tsmc.com>
- 47) Электронная библиотека [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shallow\\_trench\\_isolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Shallow_trench_isolation)
- 48) United Microelectronics Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.umc.com](http://www.umc.com)
- 49) Chen O.T.C Color-Selective CMOS Photodiodes Based on Junction Structures and Process Recipes / Oskal T.-C. Chen and Wei-Jean Liu // Advances in Photodiodes. InTech. – 2013. ISBN: 978-

953-307-163-3. – P. 159 – 180 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-photodiodes/color-selective-cmosphotodiodes-based-on-junction-structures-and-process-recipes>

50) Kostov P. Phototransistors for CMOS Optoelectronic Integrated Circuits / P. Kostov, K. Schneider-Hornstein, H. Zimmermann // Sensors and Actuators A. – Vol. 172. – 2011. – P. 140– 147.

51) Lee H. C. A Novel High-speed Silicon MSM Photodetector Operating at 830 nm Wavelength / H. C. Lee, B. Van Zeghbroeck // Electron device letters. – Vol. 16. – №5. – 1995. – P. 175-177.

52) G. de Graaf Smart optical sensor systems in CMOS for measuring light intensity and colour / G. de Graaf and R. F. Wolffenbuttel // Sensors & Actuators A-Physical. – Vol. A67. – 1998. – P. 115-119.

53) Brouk I. Dimensional effects in CMOS photodiodes / I. Brouk, Y. Nemirovsky // Solid-State Electronics. – Vol. 46 (1). – 2002. – P. 19–28.

54) Zimmermann H. Silicon Optoelectronic Integrated Circuits / H. Zimmermann. – Berlin: Springer-Verlag. – 2004. – P. 354.

55) Davenport M. Detection and Processing Strategies for Integrated Xerogel-based Sensor Systems / M. Davenport // Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering: University at Buffalo. The State University of New York. – 2004. – P. 210.

56) Vidal M.P. A bipolar photodetector compatible with standard CMOS technology / M.P. Vidal, et al // Solid-State Electronics. – Vol. 34. – 1991. – P. 809-814.

57) Sandage R. W. Producing phototransistors in a standard digital CMOS technology / R. W. Sandage, J. A. Connelly // Circuits and Systems (ISCAS '96). – Vol. 1. – 1996. – P. 369-372.

58) Sandage R. W. A 128x128 imaging array using lateral bipolar phototransistors in a standard CMOS process (fingerprint detection), / R. W. Sandage and J. A. Connelly // Circuits and Systems (ISCAS '98). – Vol. 6. – 1998. – P. 641-644.

59) Blanco-Filgueira B. Analytical modelling of size effects on the lateral photoresponse of CMOS photodiodes / B. Blanco-Filgueira, P. López, Juan B. Roldán // Solid-State Electronics. – Vol. 73. – 2012. – P. 15-20.

60) Brouk I. Characterization of crosstalk between CMOS photodiodes / I Brouk, Y Nemirovskya, S Lachowiczb, E.A Gluszakb, S Hinckleyb, K Eshraghianb // Solid-State Electronics. – Vol. 46. – №1. – 2002. – P. 53–59.

61) Brouk I. Dimensional effects in CMOS photodiodes / I. Brouk, Y. Nemirovsky // Solid-State Electronics. – Vol. 46. – №1. – 2002. – P. 19–28

62) Atef M. High-speed photodiodes in 40 nm standard CMOS technology / M. Atef, A. Polzer, H. Zimmermann // Sensors and Actuators A. – Vol. 193 – 2013. – P. 213– 219.

63) Kostov P. Phototransistors for CMOS Optoelectronic Integrated Circuits / P. Kostov, K. Schneider-Hornstein, H. Zimmermann // Sensors and Actuators A. – Vol. 172. – 2011. – P. 140– 147.

- 64) Liu W. J. A CMOS photodiode model / W. J. Liu, O. T.-C. Chen, L. K. Dai, P. K. Weng, K. H. Huang, F.-W. Jih // Proc. of IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. – 2001. – P. 102-105.
- 65) Blanco-Filgueira B. CMOS photodiode model and HDL implementation / B. Blanco-Filgueira, P. L'opez, M. Su'arez, J. B. Rold'an // Dresden, Germany. Circuit Theory and Design (ECCTD). – 2013. – P. 1-4
- 66) Atef M. High-speed photodiodes in 40 nm standard CMOS technology / M. Atef, A. Polzer, H. Zimmermann // Sensors and Actuators A. – Vol. 193 – 2013. – P. 213– 219.
- 67) Coura T. Quantum-efficiency enhancement of CMOS photodiodes by deliberate violation of design rules / T. Coura, L.P. Salles, D. W. de Lima Monteiro // Sensors and Actuators A. – Vol. 71. – 2011. – P. 109 – 117.
- 68) Yin T. Low-cost, high-efficiency, and high-speed SiGe phototransistors in commercial BiCMOS / T. Yin, A.M. Pappu, A.B. Apsel // IEEE Photonics Technology Letters. – Vol. 18. – №1. – 2006. – P. 55–57.
- 69) Stoppa D. Single-Photon Avalanche Diode CMOS Sensor for Time-Resolved Fluorescence Measurements / D. Stoppa, et al. // IEEE Sensors Journal. – Vol. 9. – 2009. – P. 1084-1090.
- 70) Niclass C. Design and characterization of a CMOS 3-D image sensor based on single photon avalanche diodes / C. Niclass, et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuit. – 2005.
- 71) Niclass C. A 4  $\mu$ s integration time imager based on CMOS single photon avalanche diode technology / C. Niclass, et al. // Sensors And Actuators A-Physical. – 2006.
- 72) Niclass C. A single photon avalanche diode implemented in 130-nm CMOS technology / C. Niclass // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – Vol. 13. – 2007. – P. 863-869.
- 73) Stoppa D. A CMOS 3-D imager based on single photon avalanche diode / D. Stoppa, et al. // IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers. – 2007.
- 74) Faramarzpour N. Fully integrated single photon avalanche diode detector in standard CMOS 0.18- $\mu$ m technology / N. Faramarzpour, et al. // IEEE Transactions On Electron Devices. – Vol. 55. – 2008. – P. 760-767.
- 75) Biber A. Avalanche photodiode image sensor in standard BiCMOS technology / A. Biber, et al // IEEE Transactions on Electron Devices, – Vol. 47. – 2000. – P. 2241-2243.
- 76) Biber A Avalanche photodiode image sensor in standard silicon BiCMOS technology / A. Biber, et al // Sensors and Actuators A-Physical. – Vol. 90. – 2001. – P. 82-88.
- 77) Rochas A. Low-noise silicon avalanche photodiodes fabricated in conventional CMOS technologies / A. Rochas, et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – Vol. 49. – 2002. – P. 387-394.

- 78) Marshall G. F. Avalanche photodiode-based active pixel imager / G. F. Marshall, et al.// IEEE Transactions On Electron Devices. – Vol. 51. – 2004. – P. 509- 511.
- 79) Pancheri Low-Noise Avalanche Photodiode in Standard 0.35- $\mu\text{m}$  CMOS Technology / Pancheri, et al. / IEEE Transactions On Electron Devices, – Vol. 55. – 2008. – P. 457-461.
- 80) Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients / M.A. Green. // Solar Energy Materials & Solar Cells. – Vol. 92. – 2008. – P. 1305–1310.
- 81) Чебанов М. А. Фотоэлектрический сенсор давления / М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // – 2015. – Патент RU155818 U1.
- 82) Электронный справочник [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.soprotmat.ru/izgib.htm>
- 83) Драгунов В., Физические основы и принципы проектирования интегральных полупроводниковых датчиков переменных давлений / дис. ... док. тех. наук: 05.27.01, 01.04.10 / Валерий Павлович Драгунов // – Новосибирск: НГТУ. – 2005. – С. 495.
- 84) Чебанов М. А. Фотоэлектрический сенсор давления / М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // – 2015. – Патент RU 2590315 С1.
- 85) Chernov A. S. 2D Modeling of photoelectric part of silicon pressure sensor/ A. S. Chernov, M. A. Chebanov, A. D. Byalik, V. A. Gridchin, V. Y. Vasilyev // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014). – 2014. – P. 67-71.
- 86) Чернов А. С. Фоточувствительный элемент для сенсора давления с оптической пространственной модуляцией/ А. С. Чернов, А. Л. Самородов, С. П. Хабаров, В. А. Гридчин // Нано- и микросистемная техника. - 2016. – Т. 18, № 7. – С. 416–423.
- 87) Чебанов М. А. Фотоэлектрический сенсор давления / М. А. Чебанов, А. С. Чернов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // – 2016. – Патент RU 167677U1.
- 88) Dziuban J.A. Bonding in Microsystem Technology / J.A. Dziuban. – Berlin: Springer. – 2006. – P. 331.
- 89) Chernov A. S. Analytical model of photoelectric pressure sensor / A. S. Chernov, V. A. Gridchin // The 18 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2017. – P. 37-40.
- 90) Sglavo V. M. Mechanical Properties of Phosphate Glass Optical Fibers / V. M. Sglavo, E. Mura, D. Milanese, J. Lousteau // International Journal of Applied Glass Science. – Vol. 5 (1). – 2014. – P 57–64.
- 91) Pigeon F. Optical fiber Young modulus measurement using an optical method / F. Pigeon, S. Pelissier, A. Mure-Ravaud, H. Gagnaire, C. Veillas // Electron. Lett. – Vol. 28- №11). – 1992. – Vol. – P. 1034 – 1035.

- 92) Korenko B. Optical fiber sensors with distributed parameters based on optical fiber reflectometry / B. Korenko, J. Jasenek, J. Červenova, M. Hlavac // *Optics and optoelectronics*. – Vol. 9 (1). – 2011. – P. 315 – 320.
- 93) Lenahan T. A. Thermal Buckling of Dual-Coated Fiber / T. A. Lenahan // *AT&T Technical Journal*. – Vol. 64 - №7. – 1985. – P. 118 – 122.
- 94) Antunes P. Mechanical Properties of Optical Fibers / P. Antunes, F. Domingues, M. Granada, P. André // *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, ISBN: 978-953-51-0091-1, InTech. – 2012. – P. 537 – 550. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/selected-topics-on-optical-fiber-technology/mechanicalproperties-of-optical-fibers>
- 95) El-Diasty F. Theory and measurement of Young's modulus radial profiles of bent single-mode optical fibers with the multiple-beam interference technique/ F El-Diasty // *J. Opt. Soc. Am. A*. – Vol. 18 - №5 – 2001. – P. 1171-1175.
- 96) Ahanchian M. Investigation of crack propagation in single optical fiber composite with thermal influence by finite element method / M.Ahanchian, H. Arzumanyan, S. Verlinski // *Frattura ed Integrità Strutturale*, – Vol. 13. – 2010. – P. 31-35.
- 97) Mastro S. A. Optomechanical behaviour of embedded fiber bragg grating strain sensors / Mastro S. A. // PhD thesis, Drexel university. – 2005.
- 98) Chean V. Study of the mechanical behavior of the optical fiber by a mark-tracking method/ V. Chean, E. Robin, R. El Abdi and J-C. Sangleboeuf // *EPJ Web of Conferences*. – Vol. 6. – 2010. – 34002. P. 1-8.
- 99) Справочник материалов Crystran Ltd. Silica Glass (SiO<sub>2</sub>) Materials Data [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.crystran.co.uk/>
- 100) Мильков А.В. Экспериментальное исследование прочности кратковременной и длительной прочности ОВ и расчет его надежности / А.В. Мильков, К.И. Романов, Б.В. Букеткин. – М.: МГТУ им. Баумана. – 2000. – С. 45.
- 101) Байкова Л.Г. О методике определения истинной прочности неорганических стекол / Л.Г. Байкова, Т.И. Песина, С.Р. Kurkjian, Zh. Tang, М.Ф. Киреенко, Л.В. Тихонова, В.П. Пух // *Журнал технической физики*. – Т. 83 вып. 10. – 2013. – С. 55-60.
- 102) Гридчин В. А. Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления / В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев, М. А. Чебанов, А. Д. Бялик, А. С. Чернов // *Нано- и микросистемная техника*. – 2014. – № 6. – С. 3–7.
- 103) Чернов А. С. Моделирование оптомеханического узла фотоэлектрического сенсора давлений / А. С. Чернов, В. А. Гридчин, А. Д. Бялик // *Омский научный вестник*. – 2017. – № 1. – С. 96–100.



- 104) Chernov A. S. A numerical simulation of the photoelectric pressure sensor optomechanical unit / A. S. Chernov, V. A. Gridchin // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – Vol. 1. – P. 58–61.
- 105) Электронная библиотека материалов Matprop [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://matprop.ru/Si\\_electric](http://matprop.ru/Si_electric)
- 106) Chernov A. S. 2D Modeling of photoelectric part of silicon pressure sensor / A. S. Chernov, M. A. Chebanov, A. D. Byalik, V. A. Gridchin, V. Y. Vasilyev // Proc. of the 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014). – 2014. – P. 67-71.
- 107) Bauer G. Absolutwerte der optischen Absorptionskonstanten von Alkalihalogenidkristallen im Gebiet ihrer ultravioletten Eigenfrequenzen / G. Bauer // Annalen der Physik. – Vol. 411. – №4. – 1934. – P. 434-464.
- 108) Электронная библиотека материалов Edmundoptics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/anti-reflection-coatings/>
- 109) Palik E. Handbook of Optical: Constants of Solids / E. Palik // Orlando. Academic Press. – Vol. 1. – P. 759.
- 110) Батыгин В.В. Сборник задач по электродинамике / В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. – М.: Ф-М. – 1962. – С.233.
- 111) Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – С. 256.
- 112) Зак Е. А. Особенности проектирования рефлектометрических ВОД перемещений / Е.А. Зак, А. Л. Тув // Измерительная техника. – № 1. – 1997. – С. 28-30
- 113) Бялик А. Д. Экспериментальное исследование осевой составляющей диаграммы направленности излучения многомодового оптоволокна / А. Д. Бялик, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев, А. Н. Игнатов, А. С. Чернов // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 191–197.
- 114) Photovoltaic Education [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>
- 115) Mayer G. K. Fabrication of Non-Underetched Convex Corners in Anisotropic Etching of (100)-Silicon in Aqueous KOH with Respect to Novel Micromechanic Elements / G. K. Mayer, H. L. Offereins, H. Sandmaier, K. Kuhl // J. Electrochem. Soc. – Vol. 137 (12). – 1990. – P. 3947-3951.
- 116) Wacogne B. A very simple compensation technique for bent V-grooves in KOH etched (100) silicon when thin structures or deep etching are required / B. Wacogne, R. Zeggari, Z. Sadani, T. Gharbi // Sensors and Actuators A. – Vol. 126. – 2006. P. 264–269.
- 117) Zhang Q. A new approach to convex corner compensation for anisotropic etching of (100)Si in KOH / Q. Zhang, L. Liu, Z. Li // Sensors and Actuators A. – Vol. 56. – 1996. – P. 251-254.

- 118) Offereins H. L. Methods for the fabrication of convex corners in anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH/ H. L. Offereins, K. Köhl, H. Sandmaier /Sensors and Actuators A. – Vol. 25. – 1991. – P. 9-13.
- 119) Wacogne B. Compensation structures for V-grooves connected to square apertures in KOH-etched (100) silicon: theory, simulation and experimentation / B. Wacogne, Z. Sadani, T. Gharbi // Sensors and Actuators A. – Vol. 112. – 2004. – P. 328–339.
- 120) Chernov A. S. A study of 3D boss structure formation in anisotropic etching of Si (100) in aqueous KOH / A. S. Chernov, M. A. Chebanov, V. A. Gridchin, V. Y. Vasilyev, A. D. Byalik // Proc. of 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM) –2015. – P. 83-86.
- 121) Чернов А. С. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si(100) при травлении в водном растворе KOH / А. С. Чернов, М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 9 (182). – С. 34–38
- 122) Schouder D. K. Semiconductor material and device characterization / D. K. Schouder // – 1998. – P. 260
- 123) Photovoltaic Education [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- 124) Чернов А. С. Физическая верификация сенсора давления с оптической модуляцией сигнала / А. С. Чернов, В. А. Гридчин // 1 Annual Russian national conference on nanotechnologies, nanomaterials and microsystems technologies (NMST–2016). – 2016. – P. 211–214.
- 125) Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. – М.: Изд. Энергия. – 1977. – С. 415.
- 126) Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М.: Госэнергоиздат. – 1987. – С. 475.
- 127) Photovoltaic Education [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- 128) Chernov A. S. Verification of Pressure Sensor with Optical Spatial Modulation / A. S. Chernov, V. A. Gridchin // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016). – 2016. – Vol. 1. - P. 34–37.

## Приложение А Акт об использовании в учебном процессе результатов работы

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по научной работе  
 \_\_\_\_\_ А.Г. Вострецов  
 \_\_\_\_\_ 02 \_\_\_\_\_ 2019 г.

**АКТ**



об использовании в учебном процессе Федерального государственного бюджетного  
 образовательного учреждения высшего образования  
 «Новосибирский государственный технический университет»  
 результатов диссертационной работы Чернова Артёма Сергеевича

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета Радиотехники и электроники, д.т.н., профессор Хрусталев В.А., заведующей кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники (ППиМЭ), к.т.н., доцент Остертак Д.И. составили настоящий акт, о том, что отдельные результаты диссертационной работы Чернова А.С. на тему «Исследование и разработка оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», в том числе разработанные и изготовленные в ходе исследования экспериментальные образцы кремниевых кристаллов фотовольтаического узла (ФВУ) датчика давления, используются в учебном процессе на кафедре ППиМЭ НГТУ в материалах курса «Материалы и процессы микросистемной техники» для студентов направлений 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» и 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Одна лекция (общим объемом 2 час), включает результаты, полученные в процессе выполнения вышеупомянутой диссертационной работы; образцы кристаллов ФВУ используются для практических занятий.

Декан факультета РЭФ

д.т.н., профессор

Хрусталев В. А.

Заведующий кафедрой ППиМЭ

к.т.н., доцент

Остертак Д. И

## Приложение Б Заключение об использовании результатов исследований



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

об использовании результатов исследований А.С. Чернова

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе А.С. Чернова на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Исследование и разработка оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления», реализованы для использования в технологиях ОКБ при Новосибирском заводе полупроводниковых приборов (ОКБ при НПП) следующим образом:

- разработан эскизный технологический процесс глубокого жидкостного анизотропного травления кремниевых кристаллов оптомеханического узла датчика давления, обеспечивающего прецизионное формирование размерных островковых структур с V-канавками с помощью рассчитываемых размерных угловых компенсаторов травления (документация ЭТК-002). На основе данного процесса разработан эскизный технологический процесс глубокого одновременного двустороннего жидкостного анизотропного травления кремниевых кристаллов оптомеханического узла датчика давления, с прецизионным формированием с одной стороны пластины размерных островковых структур, а с другой стороны пластины - глубокой кремниевой мембраны;

- разработан двухступенчатый технологический процесс сквозного травления кремниевых пластин для фотовольтаического узла датчика давления, включающий глубокое жидкостное анизотропное травление кремниевых кристаллов с одной стороны пластины и изотропное плазменное травление с другой стороны пластины (документация ЭТК-003);


- разработаны и оптимизированы эскизные маршруты изготовления кремниевых кристаллов оптомеханического (документация ЭМК-001-1) и фотовольтаического (документация ЭМК-001-2) узлов датчика с использованием стандартизированных (и при необходимости оптимизированных по частным параметрам) технологических процессов производства интегральных микросхем с 3-х микронными проектными нормами и нестандартных процессов глубокого анизотропного травления пластин монокристаллического кремния, включая методы и приемы контроля (с помощью растрового электронного и высокоразрешающего оптического микроскопов) размеров и толщин элементов кристаллов, глубин и качества травления, дефектности, влияния рассовмещения фотошаблонов и ориентации пластин при фотолитографии и т.д.

Разработанные по идеям и с участием А.С. Чернова технологические процессы будут использованы на предприятии при выполнении НИОКР в области МЭМС-технологий.

Главный инженер ОКБ при НПП

 В.В. Бодров

Начальник участка комплекса №4 АО «НПП с ОКБ»

 11.03.19  
А.Л. Самородов