

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО ОмГТУ

А. В. Косых

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Омский государственный технический
университет» (ОмГТУ)**

на диссертационную работу Чернова Артёма Сергеевича «Исследование и разработка оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления», представленной в диссертационный совет Д.212.173.03 при Новосибирском государственном техническом университете на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

1. Актуальность темы

Диссертационная работа А. С. Чернова посвящена разработке конструктивно-технологических основ создания оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического (МОЭМС) кремниевого фотовольтаического датчика давления (КФДД) и исследованию характеристик разработанных и изготовленных образцов датчиков. Увеличение областей применения датчиков давления побуждает разработчиков на поиск новых конструктивных решений для удовлетворения все усиливающихся требований по массогабаритным параметрам, чувствительности, помехоустойчивости, работе без источника питания, взрыво- и пожаробезопасности. Данным требованиям в большей степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОД).

В настоящее время наиболее популярными ВОД являются датчики на решетках Брэгга. Однако для них характерны ряд недостатков, к которым

относятся высокая цена, как на сами датчики, так и на дополнительное оборудование для работы с ними, а также невозможность изготовления по групповым технологиям. Конкуренцию датчикам на решетках Брэгга в ряде приложений (измерение давления в сейсморазведке, шахтах, авиационной и ракетно-космической отраслях) могут составить кремниевые фотовольтаические датчики давления. Они имеют низкую стоимость, могут изготавливаться по технологиям ИМС и МЭМС, и не требуют сложной схемы обработки выходного сигнала. Для многих практических применений важным является отсутствие питания датчика и работа в квазистатическом режиме. Однако к настоящему времени ряд вопросов, связанных с проектированием, моделированием, технологией изготовления фотовольтаических датчиков давления и их применением остаются открытыми и требуют дополнительных исследований.

В связи с этим, диссертационная работа А. С. Чернова посвящена решению ряда важных научных и практических задач в приложении к фотовольтаическим датчикам давления является актуальной. Полученные в работе результаты имеют значение для развития твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микроэлектроники, и для создания новых типов датчиков на фотовольтаическом эффекте.

2. Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников литературы из 128 наименований, и двух приложений, содержащих акты внедрения.

Первая глава диссертации представляет собой обзор и анализ существующих современных конструкций волоконно-оптических датчиков давления микрофонного типа, на решетках Брэгга и фотовольтаическом эффекте, в том числе с использованием МЭМС технологии и технологии современных оптических приборов. Автор проанализировал большой объем источников информации и образцы датчиков давления с оптическим принципом преобразования измеряемой величины и сделал вывод о том, что

наиболее перспективным направлением исследования являются оптоволоконные датчики на фотовольтаическом эффекте. Основой настоящего исследования, по мнению автора, являются малогабаритные конструкции фотовольтаических датчиков, выполненных с применением технологии микросистемной техники и современных оптических и оптоволоконных составляющих. Проведен обзор существующих методик формирования фотодиодов на базе современных КМОП технологии. На основе анализа существующих конструкций автором определено, что для изготовления фотодиодов фотовольтаического узла возможно использование стандартных процессов отечественной КМОП технологии с проектными нормами 3 мкм. Данная глава заканчивается формулировкой задач исследования.

Во второй главе автором рассмотрены общая концепция и принципы построения МОЭМС КФДД, определены основные направления исследования и моделирования. Разработаны аналитические модели оптомеханического узла датчика для одноточечной и двухточечной схем нагружения. Проведено математическое моделирование оптомеханического узла методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Используя предложенные аналитические и конечно-элементные модели, исследовано влияние конструктивных и технологических параметров датчика на чувствительность и нелинейность функции преобразования. Предложены критерии, согласно которым выбираются конструктивные решения для обеспечения оптимальной чувствительности датчика и его режим работы. В результате исследований определены основные характеристики и требования к оптомеханическому узлу КФДД с одноточечной и двухточечной схемами нагружения. Предложены аналитические выражения для определения изгиба волокна или отклонения свободного конца оптоволоконна, учитывающие геометрические параметры мембраны упругого элемента оптомеханического узла, длину рабочего оптоволоконна и положение точек приложения силы.

В третьей главе автором рассмотрены особенности преобразовательной характеристики фотовольтаического узла КФДД, и разработана структура

кристалла с несколькими фотодиодами. Методом конечных элементов проведено математическое моделирование характеристик фотодиодов. В результате исследований автором показана возможность реализации структуры фотодиодов на подложке n-типа, удовлетворяющей требованиям конструкции датчика.

В четвертой главе рассмотрены технологические аспекты формирования кремниевого упругого элемента, фотовольтаического узла и конструкции датчика в целом. В данной главе описана разработанная топология упругого и фоточувствительного элементов датчика. Охарактеризованы особенности формирования островковой структуры с V-канавкой, влияние рассогласования фотошаблона и кристаллографической ориентации пластины на форму жесткого центра упругого элемента с V-канавкой, а также процесс двустороннего формирования сквозных отверстий в кристалла фотовольтаического узла для юстировки элементов датчика. Автором приводится маршрут изготовления кристаллов, который включает в себя стандартные операции КМОП технологии и методы анизотропного жидкостного и изотропного плазмохимического травления. Описывается алгоритм сборки всех узлов в конечное устройство датчика.

Пятая глава посвящена исследованию характеристик разработанных фотодиодных структур и образцов датчика. Автором представлена разработанная измерительная схема для кремниевого фотовольтаического датчика давления, которая используется для исследования его характеристик. Установлено, что увеличение рабочей мощности источника излучения приводит к росту общей чувствительности. Исследованные образцы датчиков имеют слабую линейную температурную зависимость коэффициента чувствительности в интервале температур от -40 до $+85$ °C. Наблюдается хорошее соответствие результатов измерения преобразовательной характеристики датчика с результатами математического моделирования.

В заключении обобщены и сформулированы результаты диссертационной работы.

3. Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

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

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

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

4. Обоснованность и достоверность результатов

Научные положения и выводы, представленные в работе, их достоверность и научная новизна аргументированы и обоснованы результатами экспериментальных исследований, выполненных автором диссертации на современном оборудовании, и хорошим согласованием с результатами численного моделирования. По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ в том числе: 5 статей – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ; 6 статей – в материалах научно-технических конференций. Также получены 2 патента РФ на изобретение и 1 патент на

полезную модель. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях.

5. Практическая значимость

Результаты, полученные в диссертационной работе, ориентированы на решение прикладных задач и обладают практической ценностью. К основным практическим результатам можно отнести следующие:

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

2) Показано преимущество использования двухточечной схемы нагружения оптоволокон по сравнению с одноточечной и разработана практическая конструкция оптомеханического узла с двухточечной схемой нагружения.

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

4) Разработанные в ходе выполнения диссертации аналитические и конечно-элементные модели могут служить методической базой при проектировании взрыво- и пожаробезопасных оптоволоконных МОЭМС КФДД.

Полученные в диссертационной работе результаты 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. Разработанные узлы датчика использованы в учебном процессе при обучении студентов по профилю магистратуры 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 11.04.04 «Электроника и

наноэлектроника, а некоторые решения внедрены на предприятии АО «НЗПП с ОКБ» (г. Новосибирск).

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Анализ результатов диссертационного исследования свидетельствует о целесообразности использования, дальнейшего исследования и внедрения предложенных конструкций МОЭМС КФДД в производственный процесс предприятий, занимающихся разработкой и промышленным выпуском датчиков давления.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в следующих научных, образовательных и промышленных организациях страны: АО «НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс» (г. Москва), АО «Научно-производственное предприятие «Восток» (г. Новосибирск), ПАО «Микрон» (г. Зеленоград), АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (г. Омск), АО «Научно-производственное предприятие «Эталон» (г. Омск), ОАО «Манатомь» (г. Томск), АО ЭОКБ «Сигнал» им. А. И. Глухарёва (г. Энгельс), а также на других предприятиях микроэлектронной и приборостроительной промышленности РФ.

7. Общие замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе Чернова А.С. имеются следующие замечания:

1. В работе отсутствуют подробные описания метрологических характеристик оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления (оценка дополнительных погрешностей, диапазон измеряемых давлений, время выхода на режим).

2. Нет анализа влияния механических воздействий (вибрация, ускорение, удар) на характеристики оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления.

3. С какой целью в работе использовались поправочные коэффициенты $A(h)$ и γ в уравнениях (2.22) и (2.23), имеющих одинаковый вид и как определялись их зависимости от толщины мембраны (рис. 2.41)?

4. Требуется уточнения формулировка пункта 2 научной новизны, так как преобразовательные характеристики для варианта одиночного фотодиода и варианта с двумя интегральными светодиодами имеют разный вид.

5. В работе не обсуждается влияние температурных зависимостей характеристик источника оптического сигнала на температурную зависимость преобразовательной характеристики датчика.

6. Каким образом при разработке датчика учитывалось влияние боковой засветки на его характеристики?

Указанные недостатки работы не снижают ценности полученных результатов.

Заключение

Диссертация Чернова А.С. «Исследование и разработка оптоволоконного микро-оптоэлектромеханического кремниевого фотовольтаического датчика давления» является завершённой, самостоятельной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Представленная работа соответствует паспорту научной специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (пункты 2, 3, 4 паспорта специальности).

В целом диссертация хорошо оформлена, цветные графические и топологические материалы удобны для восприятия и анализа. Автором самостоятельно проведена трудоёмкая и обширная работа, затрагивающая несколько различных областей знаний, поэтому данное исследование находится в соответствии с современным мультидисциплинарным подходом. Представленные в работе результаты исследований достоверны, рекомендации по их применению и выводы обоснованы, публикации достаточно полно отражают основные положения и содержание работы. Результаты внедрены и достаточно апробированы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям, указанным в п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, предъявляемым к

кандидатским диссертациям. Автор работы Чернов Артём Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертация рассмотрена, отзыв на диссертацию, подготовленный профессором кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики, доктором технических наук по специальности 05.27.01 Александром Геннадьевичем Козловым, обсужден и принят на расширенном заседании кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики Омского государственного технического университета (протокол № 11 от 4 июня 2019 года).

Заместитель заведующего кафедрой
радиотехнических устройств и
систем диагностики,
кандидат технических наук

Валерий Иванович Левченко

Профессор кафедры радиотехнических
устройств и систем диагностики,
доктор технических наук, доцент

Александр Геннадьевич Козлов

Сведения о ведущей организации:

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»,

644050, г. Омск, Пр. Мира, д. 11

тел.: 8 (3812) 65-34-07; факс.: 8 (3812) 65-26-98;

Сайт: <https://omgtu.ru/>

E-mail: info@omgtu.ru, rtf@omgtu.ru