

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 681.586.5:53.08(043.3)

РЯБЦЕВ
Виталий Николаевич

**ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
И МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Могилев, 2019

Работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Научный руководитель

Гончаренко Игорь Андреевич,

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественных наук государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Официальные оппоненты:

Борисов Василий Иванович,

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физические методы контроля» межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет»

Урядов Владимир Николаевич,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

Белорусский национальный технический университет

Защита состоится 18 декабря 2019 года в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43, корп. 1, каб. 323, e-mail: bru@bru.by, тел.: +375-222-31-06-26, факс: +375-222-31-06-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан 15 ноября 2019 года.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат технических наук, доцент



С.В. Болотов

ВВЕДЕНИЕ

Нормативное техническое состояние конструкций зданий, сооружений и технических устройств в значительной степени определяется неизменностью и стабильностью их геометрических параметров (пространственное положение, деформации, перемещения). Их эксплуатация возможна до достижения конструкциями предельного состояния, когда их эксплуатация недопустима, затруднена или нецелесообразна.

Наиболее эффективным способом прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций является контроль технического состояния зданий, сооружений и технических устройств, проводящийся на регулярной или постоянной основе. Внедрив сенсорные элементы в структуру объекта, можно отслеживать изменение их состояния в течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число непрерывных измерений. Для контроля состояния объекта в ряде случаев важно определять не только величину, но и направление деформаций. Определение направления деформаций весьма важно в робототехнике и автоматизированных производствах. Предельные деформации несущих конструкций находятся в диапазоне от мм до десятков см. Отдельные элементы зданий и сооружений испытывают деформации порядка долей мм.

Эксплуатация физически изношенного оборудования, в первую очередь, подъемных сооружений, сосудов под давлением, магистральных трубопроводов и т. д., является причиной происшествий на опасных производственных и потенциально опасных объектах. Допустимые деформации подобных объектов не превышают мм.

Аварии на коммунально-энергетических сетях могут стать причиной поражения электрическим током, возникновения пожаров вследствие коротких замыканий и возгораний газа. В связи с этим чрезвычайно важно определение наличия электрического поля и измерение его параметров. Сведения о напряженности электростатических полей требуются и в тех областях, где возникает вероятность появления электрических зарядов, приводящих к взрывам или пожарам – в нефтяной, химической, текстильной и электронной промышленности. Таким образом, большое значение приобретает разработка новых средств обнаружения и получения информации о параметрах электростатических полей.

Для измерения деформаций зданий, сооружений и технических устройств, а также определения параметров электрических полей перспективно применение измерительных устройств на основе оптических волокон, имеющих ряд преимуществ, таких как отсутствие побочных электромагнитных излучений; высокая скорость передачи данных; малые габариты и вес; существенно меньшая электрическая опасность. Волоконно-оптические датчики могут использоваться во взрывоопасной среде, они химически инертны, имеют высокую стойкость к повышенным температурам, позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585, п. 7.5), на 2016–2020 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190, п. 6 и 13), а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166, п. 3.5 и 9.1).

Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в рамках задания 16 «Разработать методику расчета времени эвакуации людей при пожарах в высотных зданиях» ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций» (№ госрегистрации 20121923, 2012–2013 гг.), научно-исследовательской работы «Разработка методов измерений величины и направления изгибов и напряжений инженерных объектов и сооружений на основе векторных волоконно-оптических датчиков интерферометрического типа и их реализация» гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ госрегистрации 20151199, 2015–2017 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка принципов функционирования и конструкций датчиков на основе оптических волноводных структур, позволяющих измерять механические деформации (как величину, так и направление) и напряженность внешних электрических полей.

Для достижения поставленной цели в процессе исследований потребовалось решить следующие задачи:

– проанализировать основные физические эффекты, используемые для измерения деформаций контролируемых объектов и внешних электрических полей, провести анализ конструкций волоконно-оптических датчиков этих величин и возможные пути повышения их эффективности;

– разработать методику расчета и провести анализ распределения полей и характеристик мод изогнутых микроструктурированных волокон с тремя сердцевинами в зависимости от их параметров и длины волны оптического излучения, определить закономерности изменения распределения полей мод в сердцевинах волокна при его изгибе;

– разработать структурную схему и принципы функционирования векторных датчиков деформаций на основе микроструктурированных волокон с тремя сердцевинами в зависимости от назначения;

– разработать математические модели и провести анализ влияния параметров оптических волокон и интерферометров на их основе на спектральные и простран-

ственно-временные характеристики оптического излучения, структуру и форму интерференционной картины, разработать структурную схему и принципы функционирования векторных датчиков деформаций на основе волоконно-оптических интерферометров;

– провести анализ влияния внешних электрических полей на параметры и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с заполнением жидким кристаллом, а также параметры микрокольцевых резонаторов на их основе, разработать способ измерения напряженности внешних электрических полей на основе волноводных микрокольцевых резонаторов.

Объектом исследования являются датчики на основе оптических волноводных структур для измерения параметров электрических полей и механических деформаций, **предметом исследования** – спектральные и пространственно-временные характеристики оптического излучения в волноводных структурах, находящихся под влиянием внешних воздействий.

Научная новизна

Установлен физический механизм влияния величины и направления изгиба микроструктурированного оптического волокна гексагональной структуры, отличающегося наличием трех сердцевин, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, на распределение интенсивности оптического излучения между его сердцевинами, что позволяет определять величину, направление и локализацию деформации контролируемого объекта путем синхронизации изгибов объекта и волокна.

Теоретически и экспериментально установлены закономерности смещения интерференционных картин в зависимости от набега фаз в плечах волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, отличающегося использованием излучения на двух длинах волн. Установленную зависимость возможно использовать для определения одновременно величины и направления деформации контролируемого объекта путем синхронизации его деформаций и растяжения оптических волокон, составляющих плечо интерферометра.

Установлены закономерности влияния внешних электрических полей на параметры и распределение полей мод изогнутых волноводов, отличающихся наличием горизонтальной и вертикальной щелей, заполненных жидким кристаллом, а также параметры микрокольцевых резонаторов на их основе, что позволяет измерять напряженность внешних электрических полей на основе оценки интенсивности оптического излучения на выходе микрокольцевого резонатора.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета параметров изогнутых микроструктурированных волноводов с тремя сердцевинами, базирующаяся на основе метода линий с использованием полярных координат и позволяющая рассчитывать постоянные распространения, коэффициенты потерь и распределение полей связанных мод с заданной точностью и уменьшенными численными затратами.

2. Применение эффекта перераспределения интенсивности оптического излучения между тремя сердцевинами микроструктурированного оптического волокна, расположенными в вершинах равностороннего треугольника, при его изгибе и излучения обратного рассеяния для определения величины, направления и локализации деформаций по всей длине контролируемого объекта путем синхронизации изгибов объекта и волокна, а также конструкция и принципы функционирования датчика на этой основе, позволяющего определять величину изгиба с радиусом в диапазоне от 9 до 0,03 м и точностью до 0,0012 м.

3. Определение величины и направления деформаций контролируемого объекта путем синхронизации деформации объекта и растяжения оптических волокон, составляющих плечо волоконно-оптического интерферометра, на основе анализа интерференционных картин на двух длинах волн, а также конструкция и принципы функционирования векторного датчика на этой основе, позволяющего определять величину деформации до 3 мм с точностью до 10 мкм на используемой в эксперименте элементной базе.

4. Применение микрокольцевого резонатора на базе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной жидким кристаллом, для измерения напряженности внешнего электрического поля путем определения интенсивности оптического излучения на выходе резонатора, а также принципы функционирования датчика на основе таких структур, позволяющего отслеживать изменения напряженности электрического поля с разрешением до 1 В/м в диапазоне от 1 до 10^6 В/м.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены автором самостоятельно. Цель и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором И.А. Гончаренко. Научный руководитель, а также соавторы совместных публикаций доктор наук, профессор М. Марсиньяк, кандидат физико-математических наук, доцент А.В. Ильюшонок, кандидат технических наук, доцент А.Г. Иваницкий, кандидат физико-математических наук, доцент А.И. Конойко принимали участие в обсуждении полученных результатов. Автором диссертации разработано программное обеспечение с использованием пакета MATLAB, проведено численное моделирование, монтаж и калибровка измерительного оборудования, экспериментальные исследования, обработка и анализ экспериментальных данных. А.И. Конойко оказывал помощь в постановке эксперимента.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы представлялись автором на 18 международных конференциях: VI Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (Минск, 2011); V и IX Международных научно-практических конференциях молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, 2011, 2015); 5-й, 7-й, 8-й и 10-й Международных научно-технических конференциях «Приборостроение» (Минск, 2012, 2014, 2015, 2017); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций» (Минск, 2013); IX, X и XI Международных научно-технических конференциях «Квантовая электроника» (Минск, 2013, 2015, 2017); Международной Гумбольдтовской научной конференции «Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития» (Минск, 2014); Международной видеоконференции «Предупреждение, ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций и спасение людей на местах проведения спортивно-массовых мероприятий» (Баку, 2015); Всеукраинской научно-практической конференции с международным участием «Чрезвычайные ситуации: безопасность и защита» (Черкассы, 2015); Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» (Гомель, 2016); Международной онлайн-конференции «Гражданская защита и управление в чрезвычайных ситуациях: наука и технология» (Минск, 2017); 11-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения (Минск, 2018); Международной научно-практической конференции «Национальная стратегия по снижению рисков чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь на 2019-2030 годы» (Минск, 2018).

Результаты диссертационных исследований внедрены в образовательный процесс кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета и кафедры промышленной безопасности Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, а также в практическое производство ОАО «Электромодуль» и ЗАО «Институт информационных технологий».

За разработку методов измерения деформаций контролируемых объектов, напряженности внешних электрических полей, конструкций и принципов функционирования датчиков контроля параметров безопасной эксплуатации зданий, сооружений и технических устройств на основе данных методов, соискателю назначена стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым на 2019 год (распоряжение Президента Республики Беларусь от 22.12.2018 № 253рп).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 печатных работах, в том числе 12 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых сте-

пений и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 7,37 авторского листа (из них без соавторов – 2 статьи), 23 работах в сборниках материалов международных конференций. Получены 4 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 134 страницах, содержит 44 рисунка, 4 таблицы, 2 приложения на 10 страницах, список использованных источников из 167 наименований.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проанализированы основные физические эффекты, используемые для измерения деформаций объектов и внешних электрических полей, проведен анализ конструкций волоконно-оптических датчиков (ВОД) этих величин, рассмотрены возможные пути повышения их эффективности. Проведена оценка диапазона деформаций объектов контроля. На основании анализа сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Отмечено, что недостатком существующих датчиков является отсутствие возможности определения направления деформации, что в ряде случаев играет важную роль для обеспечения безопасной эксплуатации зданий, сооружений и технических устройств. Определение направления деформаций весьма важно в робототехнике и автоматизированных производствах. В качестве базы для разработки таких датчиков перспективными являются микроструктурированные волокна (МВ) с тремя сердцевинами и волоконно-оптические интерферометры (ВОИ).

Измерение параметров электрических полей целесообразно проводить с помощью микрокольцевого резонатора (МР) на основе щелевых волноводов (ЩВ) с заполнением жидким кристаллом (ЖК).

Во второй главе изложен способ определения величины и направления деформаций путем синхронизации изгибов объекта и МВ с тремя сердцевинами на основе оценки перераспределения интенсивности оптического излучения в сердцевинах волокна, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. Предложена конструкция и принципы функционирования датчика на основе МВ с тремя сердцевинами, позволяющего определять величину, направление и локализацию деформаций контролируемых объектов.

Для расчета параметров и распределения полей мод изогнутых МВ с тремя сердцевинами разработан алгоритм на основе модификации метода линий с использованием цилиндрической системы координат. Исследуемая структура и система координат представлены на рисунке 1. Угловая координата φ соответствует изгибу. В соответствии с методом линий структура разделяется на слои в направлении оси z . В каждом слое диэлектрическая проницаемость считается функцией только радиальной координаты r . Для каждого слоя в направлении z выводятся волновые уравнения

для электрического и магнитного полей. Эти уравнения в частных производных дискретизируются по координате r . В результате получаются обыкновенные дифференциальные уравнения, решаемые аналитически. Для учета потерь на излучение на границах структуры вводятся поглощающие граничные условия (ПГС). Диагонализация полей приводит к несвязанным уравнениям в преобразованной области. Решая задачу на собственные значения, связанную с этими уравнениями, получаем матрицы преобразования и собственные вектора для каждого слоя структуры.

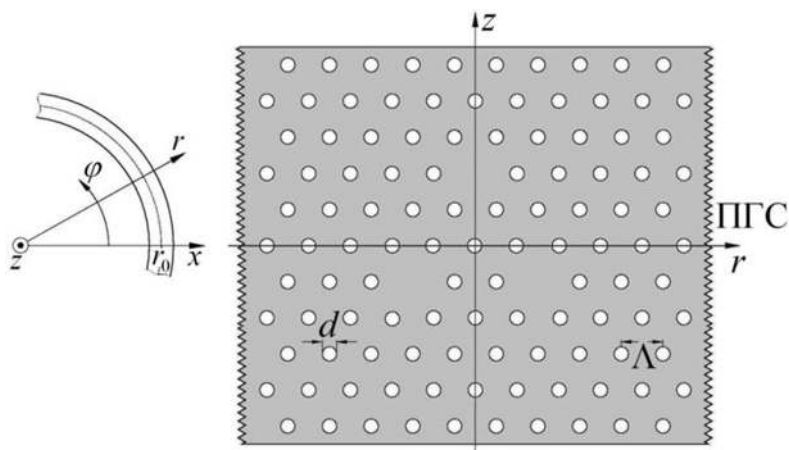


Рисунок 1. – Поперечное сечение микроструктурированного волокна

Для получения связи между составляющими полей на границах слоев в направлении оси z , вводится коэффициент отражения \mathbf{p} как отношение между волнами, распространяющимися в прямом и обратном направлениях. Коэффициент отражения последовательно переносится с верхнего и нижнего слоев структуры, где $\mathbf{p} = 0$, на плоскость согласования, которая расположена в середине центрального слоя. В результате получим однородную систему уравнений относительно полей мод:

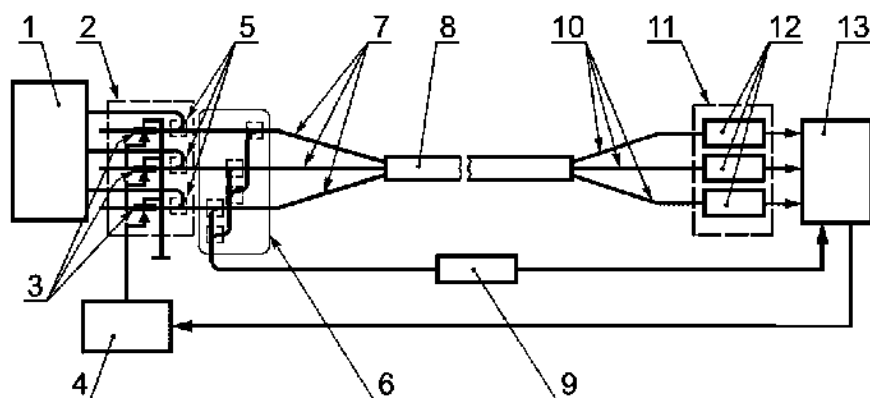
$$[\mathbf{I} - \mathbf{p}_l(\varepsilon_{re})\mathbf{p}_u(\varepsilon_{re})]\bar{\mathbf{F}}^f = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{p}_l и \mathbf{p}_u – коэффициенты отражения, переносимые соответственно с нижнего и верхнего слоев, \mathbf{I} обозначает единичную матрицу, $\mathbf{F}^f = \mathbf{E}^f, \mathbf{H}^f$ – электрическое либо магнитное поле распространяющейся в прямом направлении волны.

Для существования нетривиального решения определитель системы (1) должен обращаться в нуль. В результате решения полученного детерминантного уравнения находим нормализованную постоянную распространения $\sqrt{\varepsilon_{re}}$, которая из-за наличия потерь на излучение является комплексной величиной. Действительная часть $\sqrt{\varepsilon_{re}}$ является эффективным показателем преломления, а мнимая – определяет коэффициент потерь на излучение. Определив $\sqrt{\varepsilon_{re}}$, с помощью выражения (1) можно рассчитать распределение полей мод в плоскости согласования, а затем, путем обратного переноса, – распределение полей во всей структуре.

На основании разработанного алгоритма создана программа с использованием программного пакета MATLAB, проведена ее отладка и тестирование.

В качестве чувствительного элемента векторного датчика деформаций (рисунок 2) использовано МВ с тремя сердцевинами, расположенными в вершинах равно-стороннего треугольника, что соответствует симметрии гексагональной структуры волокна и позволяет вычислять направления изгиба по наиболее простому алгоритму. Деформации объекта синхронизированы с изгибом волокна. Изгиб МВ вызывает перераспределение оптической мощности световых мод между сердцевинами. Разность между амплитудами мод в различных сердцевинах возрастает с уменьшением радиуса изгиба (рисунок 3). Сравнивая измеренную мощность в сердцевинах МВ, можно определить радиус его изгиба, а направление изгиба находить по соотношению амплитуд излучения в сердцевинах (рисунок 4). Усредняя выходящие из чувствительного элемента сигналы на разных длинах волн, можно определять направление и величину изгиба с большей точностью.



- 1 – широкополосный источник излучения; 2 – управляемый спектральный фильтр;
 3 – волоконно-оптическая брэгговская решетка; 4 – блок управляющего напряжения;
 5, 6 – разветвители; 7, 10 – входные и выходные оптические волокна; 8 – МВ;
 9 – фотоприемник излучения обратного хода; 11 – блок фотоприемников 12;
 13 – измеряющее устройство

**Рисунок 2. – Структурная схема векторного ВОД деформаций
на основе МВ с тремя сердцевинами**

При распространении оптического излучения по волокну возникает обратное излучение, которое регистрируется фотоприемником излучения обратного хода. Время прихода этого излучения позволяет вычислить положение изгиба, т. е. определять локализацию внешнего воздействия на сенсорный элемент.

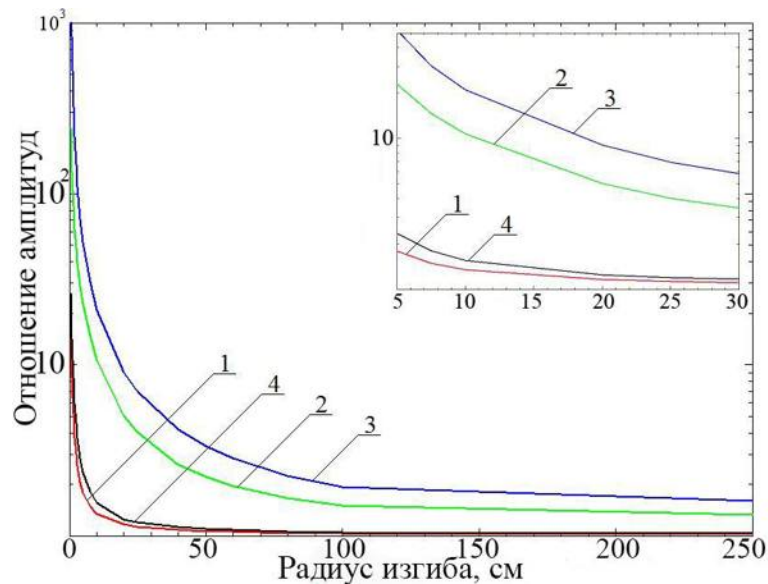


Рисунок 3. – Относительные амплитуды полей в сердцевинах, расположенных на оси изгиба с разнесением сердцевин в два отверстия и $d/\Lambda = 0,2$ (кривая 1), $d/\Lambda = 0,4$ (2), и разнесением в пять отверстий и $d/\Lambda = 0,2$ (3) для длины волны 1,5 мкм. Кривая 4 построена для параметров, аналогичных кривой 1, но для длины волны 1,3 мкм

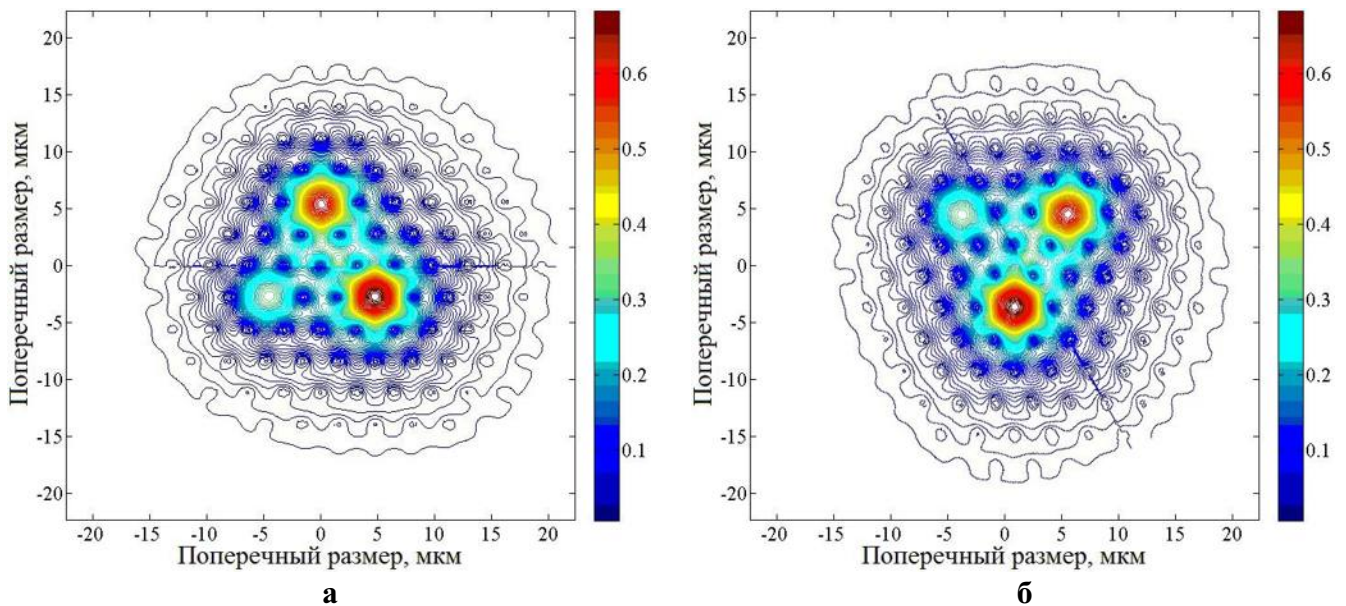


Рисунок 4. – Распределение интенсивности оптического излучения длиной волны 1,5 мкм в сердцевинах изогнутого МВ с разнесением сердцевин в два отверстия, $d/\Lambda = 0,2$ и радиусами изгиба 4 см при направлении изгиба волокна 0° (а) и 60° (б)

Проведенное моделирование показало, что датчики на основе волокна с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением сердцевин в два отверстия позволяют измерять изгибы с радиусом от 5 до 0,03 м. Чувствительность датчика зависит от параметров источника и приемника излучения, и для выбранной элементной базы составляет 0,25 см. Для волокна с $d/\Lambda = 0,4$ и разнесением сердцевин в два отверстия диапазон изменения радиуса изгиба составляет от 9 до 0,2 м, для волокна с разнесением сердцевин в пять от-

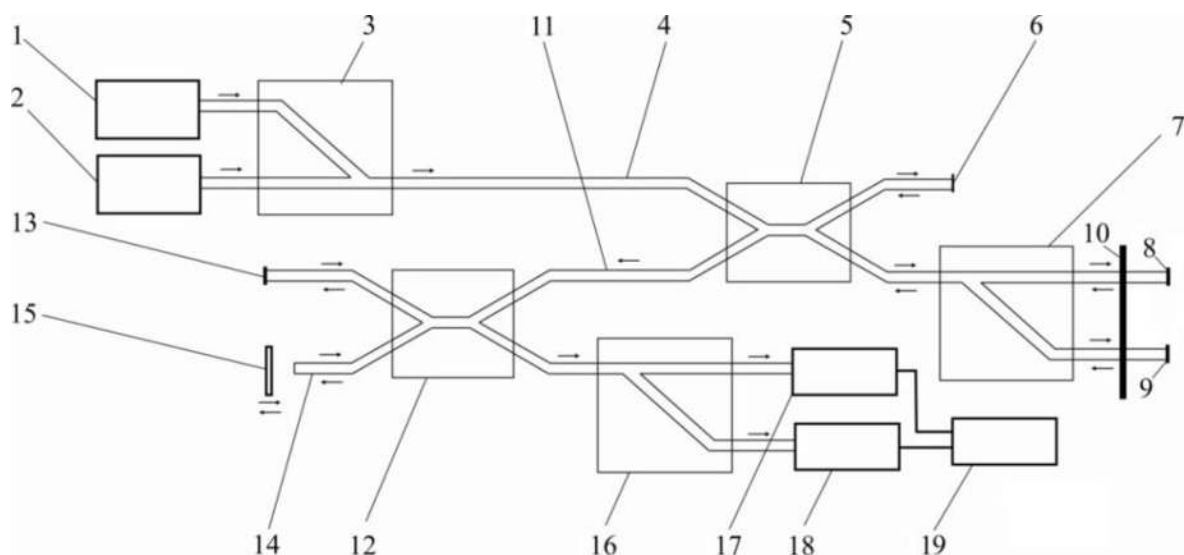
верстий – от 8 до 0,1 м. Чувствительность датчика соответственно 0,12 и 0,13 см. Таким образом, для измерения гибких конструкций, подверженных большим изгибам, удобнее использовать датчики, сенсорным элементом которых служит МВ с малым разнесением сердцевин и малым воздушным заполнением. Волокна с большим значением d/Λ и/или большим разнесением сердцевин целесообразнее использовать для измерения малых изгибов и отклонений жестких конструкций.

Датчик является распределенным и может применяться для измерения деформации по всей длине контролируемого объекта. Чтобы исключить возможность неправильного монтажа датчика на протяженных объектах, предложено придавать МВ ленточную форму и размещать в полимерном материале с контрольной нитью.

Третья глава предложен способ определения направления деформации контролируемых объектов с помощью волоконно-оптических интерферометров на основе анализа интерференционных картин на двух длинах волн. Представлена конструкция, принципы функционирования и экспериментальная верификация векторного датчика деформаций на базе данного способа.

Основу датчика составляют два ВОИ Майкельсона (рисунок 5). Вход первого ВОИ соединен с источником оптического излучения. Оптический сигнал делится в разветвителе и поступает на два отрезка волокна, которые служат плечами ВОИ. Одно плечо далее разделяется на два волокна. Эти волокна (измерительные волокна) жестко связаны с контролируемым объектом и следуют всем его деформациям. Второе плечо (опорное волокно) расположено свободно и не подвергается деформациям. Отраженные от торцов волокна оптические сигналы поступают на разветвитель, где интерферируют. Интерференционный сигнал на выходе ВОИ зависит от разности оптических длин плеч интерферометра. Деформация объекта и связанного с ним измерительных волокон приводит к изменению разности плеч ВОИ и, соответственно, к смещению интерференционной картины. Это смещение является относительным, и для отслеживания деформации волокна необходимо производить измерения непрерывно. Для измерения абсолютной деформации используется второй ВОИ, на вход которого поступает суммарный сигнал с выхода первого интерферометра.

Разность оптических длин плеч второго ВОИ регулируется линией задержки. Огибающая интерференционной картины на выходе второго ВОИ содержит три пика. Центральный пик образуется при равновесии двух плеч второго ВОИ, т. е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики возникают при соответствии разности оптических длин плеч второго ВОИ оптической разности хода в первом ВОИ. Таким образом, разность между положением центрального и одним из боковых пиков соответствует разности плеч первого ВОИ.



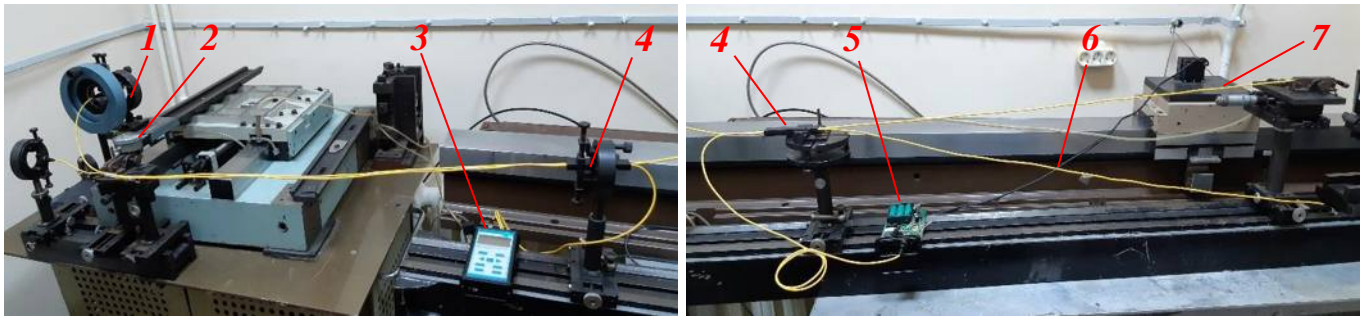
1, 2 – источники излучения; 3 – Y-образный разветвитель; 4, 11 – подводящее волокно; 5, 12 – X-образный разветвитель; 6 – опорное волокно; 7, 16 – Y-образный разветвитель с разделением по длинам волн; 8, 9 – измерительное волокно; 10 – соединительный стержень; 13, 14 – эталонное волокно; 15 – регулируемая линия задержки; 17, 18 – фотодетектор; 19 – блок обработки сигналов

Рисунок 5. – Структурная схема векторного ВОД деформаций на основе интерферометров Майкельсона

Воздействие на измерительное волокно приводит к дополнительному набегу фаз оптического сигнала в этом волокне. В случае, когда длина измерительного волокна в исходном состоянии превышает длину опорного волокна, дополнительное растяжение измерительного волокна приводит к смещению боковых пиков в сторону от центрального пика. Смещение пика прямопропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Таким образом, величина деформации определяется по смещению боковых пиков относительно их положения в исходном состоянии.

Для определения направления деформации используется второе измерительное волокно, на которое подается оптический сигнал на другой длине волны. При выпуклой или вогнутой деформации объекта дополнительный набег фазы по отношению к опорному волокну испытывает сигнал, проходящий по волокну, расположенному соответственно ближе либо дальше к объекту. Следовательно, будет наблюдаться смещение бокового пика интерференционной картины на длине волны, соответствующей этому измерительному волокну. Сравнивая смещение боковых пиков на разных длинах волн по отношению к исходному состоянию, можно определить направление деформации контролируемого объекта в плоскости его изгиба.

Общий вид лабораторной установки интерферометрического датчика, позволяющего определять величину и направление деформации контролируемых объектов в плоскости смещения, т. е. фиксировать его выпуклость или вогнутость, представлен на рисунке 6.



1 – подвижное брэгговское зеркало; 2 – микрометр; 3 – измеритель оптической мощности;
 4 – разветвители; 5 – источник оптического излучения; 6 – опорное волокно;
 7 – измерительные волокна

Рисунок 6. – Общий вид лабораторной установки

Для генерации стабилизированного излучения в одномодовых оптических волокнах использовался источник оптического излучения ОТ-2-7/ИИ на базе лазерных светодиодов, излучающих на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм. Полуширина спектра излучения светодиодов составляла 10 нм. Излучение с длиной волны 1,31 мкм поступало на измерительное волокно, расположенное ближе к контролируемому объекту. На дальнейшее волокно подавалось излучение на длине волны 1,55 мкм.

Регулируемая линия задержки представляет собой подвижное зеркало на механическом приводе и смонтирована на воздушной подушке, для исключения влияния вибрационных помех на результаты измерений и нарушения юстировки. Зеркало представляет собой многослойную диэлектрическую структуру из периодических слоев с большими и меньшими показателями преломления.

Для регистрации выходных сигналов использовались измерители оптической мощности ОТ-2-7/ИМ на основе фотодиода InGaAs с размером фоточувствительной площадки 1 мм, погрешность измерения оптической мощности $\pm 0,22$ дБ. Обработка и визуализация сигналов производилась на персональном компьютере.

Для имитации деформации контролируемого объекта использовался оптический столик с микровинтом с ценой деления 10 мкм. В зависимости от хода винта растягивалось одно из измерительных волокон, что приводило к смещению бокового пика интерференционной картины на выходе второго ВОИ. Зеркало линии задержки смещалось при помощи микрометра с точностью позиционирования 10 мкм. Шаг перемещения зеркала линии задержки составлял 50 мкм при переходе между пиками и 10 мкм – внутри пика для более точного определения положения его максимума. Значения измеряемых сигналов сохранялись и использовались для построения интерференционной картины в графическом редакторе.

Начальные измерения проводились при отсутствии воздействия на измерительные волокна. Далее имитировалась деформация контролируемого объекта с шагом 50 мкм. На рисунке 7 представлено измеренное суммарное распределение сигналов на двух длинах волн на выходе второго ВОИ. Кривые 1 и 2 описывают экспериментальные значения интерференционного сигнала на длинах волн соответственно 1,31

и 1,55 мкм при отсутствии воздействия на измерительные волокна, кривая 3 описывает интерференционный сигнал при выпуклой деформации контролируемого объекта, т. е. при растяжении ближнего к объекту измерительного волокна, в котором распространяется сигнал на длине волны 1,31 мкм, на 0,5 мм.

Как видно из рисунка 8, смещение пика интерференционной картины на выходе второго интерферометра прямопропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Точность определения максимума (величины деформации) обуславливается ошибкой позиционирования сканирующего зеркала. Поскольку шаг смещения зеркала при перемещении внутри пика равен 10 мкм, ошибка позиционирования принята равной 5 мкм.

Результаты экспериментальной верификации способа показали соответствие положения боковых пиков интерференционной картины на выходе из второго ВОИ величине и направлению реальной деформации измерительного волокна. Ошибка определения положения максимума интерференционной картины зависит от шага позиционирования сканирующего зеркала линии задержки.

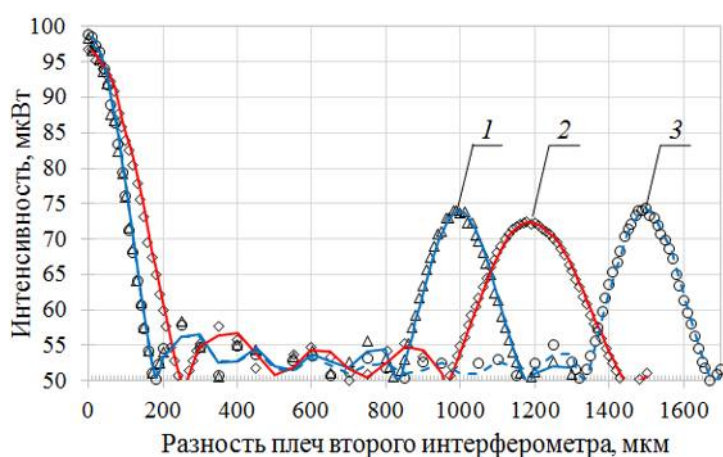


Рисунок 7. – Экспериментальная кривая огибающей интерференционной картины на выходе второго интерферометра

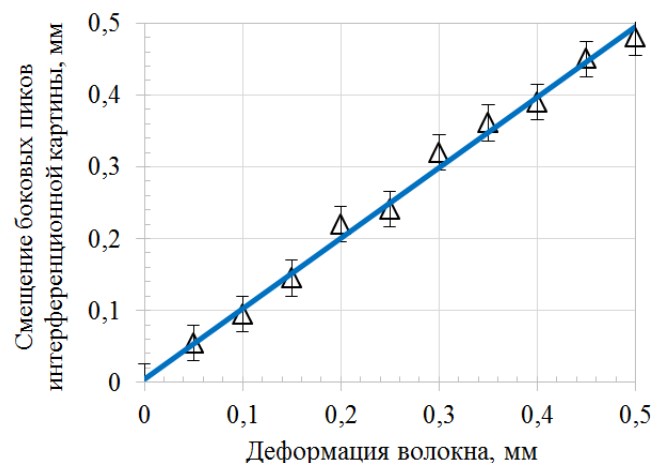


Рисунок 8. – Зависимость смещения боковых пиков интерференционной картины от растяжения волокна

В четвертой главе представлен способ измерения напряженности электрических полей за счет оценки интенсивности оптического излучения на выходе МР на базе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной ЖК, а также принципы функционирования ВОД на основе таких структур.

Если ЩВ с заполнением ЖК внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЖК, заполняющего щель, изменится пропорционально величине электрического поля. В результате изменится эффективный показатель преломления ЩВ, т. е. оптическая длина МР, и сместится его резонансная длина волны. Это приведет к изменению интенсивности выходного сигнала на несущей длине волны, совпадаю-

щей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора. Таким образом, измеряя интенсивность выходного оптического сигнала на выходе резонатора, можно определять напряженность электрического поля, воздействующего на резонатор.

Структура МР на основе волноводов с вертикальной и горизонтальной щелью с заполнением ЖК представлена на рисунке 9.

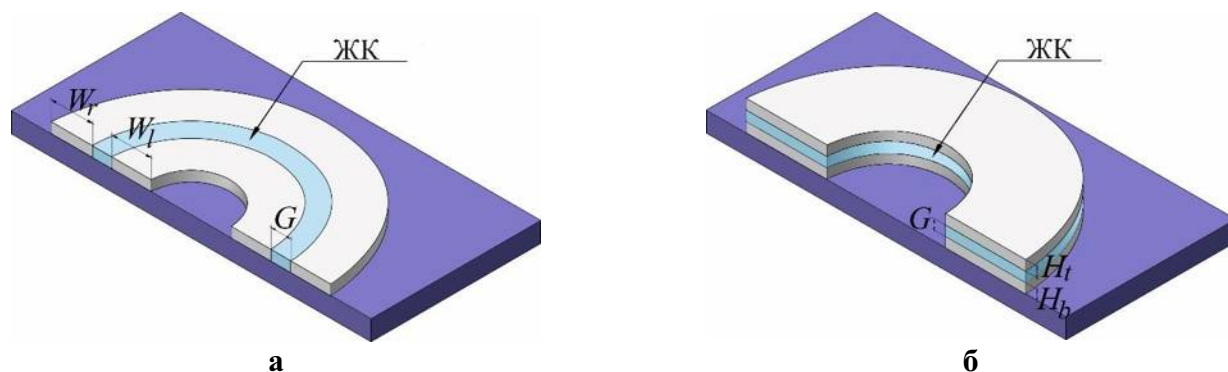


Рисунок 9. – Структуры МР на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с заполнением ЖК (G – ширина щели, W_r, W_l – ширина правой и левой полоски, H_t, H_b – толщина верхней и нижней полоски ЩВ)

Проведен численный анализ эффективного показателя преломления и распределения полей мод изогнутых ЩВ с заполнением ЖК. Расчет проводился с помощью метода линий, модифицированного для исследуемой структуры. При расчетах использовались параметры излучения полупроводникового лазера FU-68PDF-V510M с выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1,5 мкм и параметры р-і-п фотодиода ФД161 на основе соединения InGaAs (токовая чувствительность 0,8 А/Вт, темновой ток 20 нА).

Проведена сравнительная оценка чувствительности и диапазона измерений датчиков на основе волноводов с горизонтальным и вертикальным расположением щели (таблицы 1 и 2). Датчики на основе вертикальных ЩВ с ЖК заполнением могут быть использованы для измерения внешних электрических полей в пределах от 10 до 3×10^6 В/м с точностью до 10 В/м. Датчики на основе волноводов с горизонтальной щелью позволяют отслеживать изменение интенсивности электрического поля в пределах 1 В/м. Однако ширина диапазона измерений значительно уже в сравнении с датчиком с вертикальной щелью (порядка 10^5 В/м). При этом диапазон измерений может быть смещен выбором параметров резонатора или несущей длины волны оптического излучения.

Датчик напряженности электрических полей может быть сконструирован одновременно из МР на базе вертикально- и горизонтально-щелевых волноводов. Волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля (десятичные разряды), а МР с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения (единичные разряды).

Таблица 1. – Параметры датчика на основе волновода с вертикальной щелью с заполнением ЖК с радиусом резонатора 32 мкм

| Параметры датчика | Ширина щели, нм | | |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 100 | 200 | 300 |
| Диапазон измерений, В/м | 10,0 ... 3,0×10 ⁶ | 10,0 ... 1,0×10 ⁶ | 10,0 ... 0,7×10 ⁶ |
| Чувствительность, нА/(В/м) | 6,3 | 16,8 | 20,6 |

Таблица 2. – Параметры датчика на основе волновода с горизонтальной щелью с заполнением ЖК с радиусом резонатора 32 мкм

| Параметры датчика | Высота щели, нм | | |
|---|-----------------|-------|-------|
| | 150 | 250 | 400 |
| Диапазон измерений, 10 ⁶ В/м | 2,01 ... 2,08 | | |
| Чувствительность, нА/(В/м) | 119,2 | 159,2 | 123,1 |

Проведена оптимизация параметров датчика с точки зрения максимальной чувствительности. Оптимальная высота щели горизонтально-щелевого волновода примерно равна 250 нм и не зависит от высоты волновода и от смещения щели по высоте волновода.

Установлено, что быстродействие датчика ограничено временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд, что позволяет измерять переменные электрические поля с частотами до десятков кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика расчета параметров и поперечного распределения полей направляемых мод изогнутых МВ с тремя сердцевинами на основе метода линий. В методике используется полуаналитический подход, что позволяет получать результаты с заданной точностью и меньшими численными затратами по сравнению с другими векторными методами расчета [5].

2. Установлена зависимость распределения интенсивности оптического излучения между сердцевинами микроструктурированного волокна от величины и направления его изгиба. Показана возможность определения величины и направления деформаций контролируемого объекта за счет синхронизации изгибов объекта и МВ с тремя сердцевинами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника. Предложена конструкция и принципы функционирования распределенного оптического векторного датчика, позволяющего с повышенной точностью определять величину, направление и локализацию деформаций по всей длине объекта. Повышение точности достигается за счет измерения на нескольких длинах волн с последующим усреднением регистрируемого сигнала. Использование волокна с тремя сердцевинами дает возможность определения направления деформаций, а измерение обратного рассеяния – определения их локализации по всей длине объекта [1–4, 9, 13–18, 22, 25, 36].

3. Проведена оптимизация параметров чувствительного элемента датчика в зависимости от назначения. Показано, что для контроля состояния конструкций, подверженных большим изгибам, удобнее использовать датчики, сенсорным элементом которых служит волокно с малым разнесением сердцевин и малым воздушным заполнением (меньшим d/Λ). Использование волокон с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением сердцевин в два отверстия позволит измерять изгибы с радиусом от 5 до 0,03 м. Датчик на выбранной элементной базе позволит определять изменения радиуса изгиба на величину до 0,25 см. Волокна с большим значением d/Λ и/или большим разнесением сердцевин могут обеспечить большую точность измерения малых изгибов. Чувствительность датчика на основе волокон с разнесением сердцевин в два отверстия и d/Λ равным 0,4 составит 0,12 см, а с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением в пять отверстий – 0,13 см. При этом диапазон измерений составит от 9 до 0,2 м и от 8 до 0,1 м соответственно [2, 3, 13, 15, 18].

4. Для исключения неправильного монтажа чувствительного элемента датчика на протяженных объектах предложено придавать МВ ленточную форму и размещать в полимерном материале с контрольной нитью [4, 19–21, 23, 24, 37].

5. Предложено определение величины и направления деформаций контролируемого объекта путем синхронизации деформации объекта и растяжения оптических волокон, составляющих плечо волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, на основе анализа интерференционных картин на двух длинах волн. Разработана конструкция и принципы функционирования векторного датчика на базе данного способа. Диапазон измерения деформации достигает 3 мм, точность определяется шагом перемещения сканирующего зеркала и на используемой элементной базе составила 10 мкм. Разработана лабораторная установка, проведена экспериментальная верификация датчика [6, 7, 9, 11, 12, 22, 26–29, 38].

6. Предложено применение МР на базе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной жидким кристаллом, для измерения напряженности внешнего электрического поля на основе оценки интенсивности оптического излучения на выходе МР. Предложена структура и принципы функционирования датчика для определения пожароопасных и поражающих проявлений электрического поля на этой основе [8–10, 12, 30–33, 35, 39].

7. Проведена сравнительная оценка чувствительности и диапазона измерений датчиков на основе волноводов с горизонтальным и вертикальным расположением щели. Горизонтально-щелевые волноводы более чувствительны к изменениям напряженности электрического поля, чем волноводы с вертикальной щелью (1 и 10 В/м соответственно). Однако ширина диапазона измерений датчика с горизонтальной щелью в 10 раз превышает диапазон датчика на основе волновода с вертикальной щелью (10^6 и 10^5 В/м соответственно). Поэтому, датчик может быть сконструирован одновременно из резонаторов на базе вертикально- и горизонтально-щелевых волноводов. Волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения

напряженности электрического поля (десятичные разряды), а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения (единичные разряды). Показано, что быстродействие датчика ограничено временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд, что позволяет измерять с их помощью переменные электрические поля с частотами до десятков кГц. Наибольшая чувствительность к изменениям напряженности электрического поля наблюдается при высоте щели 250 нм и не зависит от высоты волновода и смещения щели по высоте волновода от центрального положения [8–10, 12, 30–35].

Научная значимость работы состоит в разработке новых способов определения как величины, так и направления деформации контролируемых объектов, а также напряженности внешних электрических полей, разработке структурных схем и принципов функционирования датчиков на основе данных способов.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Результаты исследований могут найти применение при создании эффективных и надежных средств обеспечения безопасности зданий, сооружений и технических устройств за счет контроля напряжений, деформаций, параметров электрических полей.

2. Практически важными являются предложенные способы определения направления деформаций с использованием микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами и волоконно-оптических интерферометров Майкельсона на двух длинах волн, а также измерения напряженности электрических полей на основе кольцевых резонаторов на базе ЩВ с заполнением ЖК.

3. Конструкции и принципы функционирования датчиков на основе оптических волноводных структур, представленные в диссертационной работе, защищены патентами Республики Беларусь.

4. Разработанная методика расчета параметров и поперечного распределения полей направляемых мод изогнутых МВ с несколькими сердцевинами может быть использована при разработке перспективных устройств съема и обработки информации.

5. Способы измерения величины и направления деформации контролируемых конструкций с помощью волоконно-оптических интерферометров, а также способы и средства измерения напряженности внешнего электрического поля на основе оптических волноводных структур внедрены в практическое производство ОАО «Электромодуль» и ЗАО «Институт информационных технологий». Учреждением «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь дана справка о возможности практического использования векторного волоконно-оптического датчика деформаций на основе интерферометров Майкельсона для контроля напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений с целью обеспечения их безопасной эксплуатации.

6. Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в учреждениях образования. Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс Белорусского государственного университета и Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Гончаренко, И.А. Датчик контроля безопасности строительных конструкций на основе микроструктурированных оптических волноводов с несколькими сердцевинами / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // Вестн. Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 1 (13). – С. 79–85.

2. Goncharenko, I. Optimizing the structure of vector bend and strain sensor on the base of three-core microstructured fiber / I. Goncharenko, M. Marciniak, A. Konojko, V. Reabtsev // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2012. – № 4. – P. 63–69.

3. Гончаренко, И.А. Оптимизация структуры оптического векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами / И.А. Гончаренко, М. Марсиньяк, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев // Измерительная техника. – 2013. – Т. 56, № 1. – С. 45–49.

4. Гончаренко, И.А. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // Вестн. Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 118–132.

5. Гончаренко, И.А. Метод расчета изогнутых микроструктурированных волноводов с несколькими сердцевинами / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев / Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2015. – № 4. – С. 87–95.

6. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический векторный датчик изгибов и напряжений на основе интерферометров Майкельсона / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев, А.В. Ильюшонок / Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2015. – № 2 (38). – С. 45–56.

7. Рябцев, В.Н. Контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций с целью обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий / В.Н. Рябцев // Вестн. Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2015. – № 1 (21). – С. 11–16.

8. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Iss. 27. – P. 7629–7635.

9. Рябцев, В.Н. Разработка методов и средств измерения внешних воздействий на основе оптических волноводных структур / В.Н. Рябцев // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2017. – № 16. – С. 99–105.

10. Гончаренко, И.А. Измерение напряженности электрических полей с помощью кольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов с жидкокристаллическим заполнением / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // Измерительная техника. – 2018. – № 1. – С. 41–45.

11. Конойко, А.И. Определение величины и направления изгибов и деформаций с помощью датчиков на оптоволоконных интерферометрах / А.И. Конойко, В.Н. Рябцев // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 1 (2). – С. 18–23.

12. Рябцев, В.Н. Методы и средства измерения внешних воздействий на основе волоконно-оптических интерферометров / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшенок // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 5–12.

Материалы и тезисы докладов конференций

13. Гончаренко, И.А. Оптимизация структуры оптического векторного датчика изгибов и напряжений строительных конструкций / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // The Civil Protection – 2011: Proceedings of the VI Scientific Conference with International Participation and Exhibition, Sofia, 24–25 March 2011. – Sofia, 2011. – P. 177–181.

14. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический датчик контроля безопасности строительных конструкций / И.А. Гончаренко, В.П. Киреенко, В.Н. Рябцев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2011 г.: в 2 т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 192–194.

15. Рябцев, В.Н. Датчики контроля безопасности строительных конструкций на основе оптических волноводных структур / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. курсантов, студентов и слушателей, Минск, 25–27 мая 2011 г.: в 2 ч. – Минск: КИИ, 2011. – Ч. 1. – С. 48–50.

16. Рябцев, В.Н. Волоконно-оптический векторный датчик изгибов и напряжений строительных конструкций / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко // Чрезвычайные ситуации: теория и практика: материалы Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. курсантов, студентов, магистрантов, адъюнктов и аспирантов, Гомель, 28 апр. 2011 г.: в 2 ч. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2011. – Ч. 1. – С. 289–292.

17. Рябцев, В.Н. Векторный датчик изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами / В.Н. Рябцев // Проблемы техно-сферной безопасности – 2012: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых

ученых и специалистов, Москва, 10 апр. 2012 г. – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2012. – С. 153–155.

18. Рябцев, В.Н. Датчики контроля безопасности инженерных сооружений на основе оптических волноводных структур / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко // НИРС – 2011: сб. науч. труд. студентов Респ. Беларусь. – Минск: Изд. центр БГУ, 2012. – С. 217–223.

19. Гончаренко, И.А. Векторный датчик изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна ленточной формы / И.А. Гончаренко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев // Приборостроение – 2012: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2012 г. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 50–52.

20. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптическая система мониторинга состояния несущих конструкций высотных зданий / И.А. Гончаренко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев / Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 сент. 2013 г. – Минск: КИИ, 2013. – С. 122.

21. Гончаренко, И.А. Мониторинг напряженно-деформированного состояния строительных конструкций высотных зданий / И.А. Гончаренко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев // Квантовая электроника: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–21 нояб. 2013 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2013. – С. 226–227.

22. Goncharenko, I. Fiber optic sensor for condition monitoring of bearing structures of high-rise buildings / I. Goncharenko, V. Reabtsev // Science and Technology as a Basis of Modernization for Future Sustainable Development – SSF-2014: Proceedings of International Humboldt Conference, Minsk, 18-21 September 2014. – Minsk, 2014. – P. 41–42.

23. Гончаренко, И.А. Контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций с целью обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий / И.А. Гончаренко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев // Материалы 6-й Междунар. конф. по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, а также по вопросам технологий двойного применения, Минск, 10–11 июля 2014 г. – Минск: 2014. – С. 172–179.

24. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический датчик для мониторинга состояния несущих конструкций высотных зданий / И.А. Гончаренко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев // Приборостроение – 2014: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2014 г. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 66–67.

25. Рябцев, В.Н. Оптические датчики деформаций несущих конструкций зданий и сооружений / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко / Предупреждение, ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций и спасение людей на местах проведения спортивно-массовых мероприятий: материалы Междунар. видеоконф., Баку, 27 мая 2015 г. – Баку: Акад. МЧС Азерб. Респ., 2015. – С. 17–23.

26. Гончаренко, И.А. Векторный волоконно-оптический датчик деформаций несущих конструкций / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, А.В. Ильюшонок, В.Н. Рябцев // Квантовая электроника: материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 нояб. 2015 г. – Минск: РИВШ, 2015. – С. 127–128.

27. Рябцев, В.Н. Волоконно-оптический векторный датчик деформаций / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, А.В. Ильюшонок // Приборостроение – 2015: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 нояб. 2015 г.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 147–149.

28. Рябцев, В.Н. Разработка структуры и принципов функционирования векторного волоконно-оптического интерферометрического датчика состояния несущих конструкций / В.Н. Рябцев // Интегрированные системы безопасности: теория, практика, инновации: материалы Междунар. заочной науч.-практ. конф.; под общ. ред. А.В. Грачулина. – Минск: КИИ, 2016. – С. 9–11.

29. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический векторный датчик изгибов и напряжений на основе интерферометров Майкельсона / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев, Н.В. Зайнудинова // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: противодействие современным вызовам и угрозам: сб. науч. труд. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апр. 2017 г. – Минск: УГЗ, 2017. – С. 101–103.

30. Goncharenko, I.A. Optical electric field sensor on the base of waveguide structures / I. Goncharenko, V. Reabtsev // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: противодействие современным вызовам и угрозам: сб. науч. труд. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апр. 2017 г. – Минск: УГЗ, 2017. – С. 333–337.

31. Goncharenko, I. Electric field sensor on the base of horizontal and vertical slot waveguide ring microresonators with LC filling / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2017), Girona, Spain, 2-6 July 2017. – Invited Paper We.A4.2, Conference USB Proceedings, IEEE Catalog Number CFP16485-ART, ISBN 978-1-5386-0858-6/17.

32. Гончаренко, И.А. Датчик электрического поля на основе щелевых волноводных кольцевых резонаторов с ЖК заполнением / И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшонок, В.Н. Рябцев // Приборостроение – 2017: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1–3 нояб. 2017 г. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 66–68.

33. Гончаренко, И.А. Измерение напряженности электрического поля на основе щелевых волноводных кольцевых резонаторов с ЖК заполнением / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 13–17 нояб. 2017 г. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 134–135.

34. Рябцев, В.Н. Оценка быстродействия оптического волноводного датчика электрического поля / В.Н. Рябцев, И.А. Гончаренко // Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 18–20 апр. 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 86.

35. Гончаренко, И.А. Методы и средства измерения внешних воздействий на основе оптических волноводных структур / И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшонок, В.Н. Рябцев // Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019-2030 годы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27 сент. 2018 г. – Минск, УГЗ, 2018. – С. 114–117.

Патенты

36. Волоконно-оптический векторный датчик изгиба: полезная модель 7714 U Респ. Беларусь, МПК G 01B 11/00, G 01N 21/00, G 02B 6/00 / И.А. Гончаренко, В.Б. Залесский, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев. – Оpubл. 30.10.2011.

37. Волоконно-оптический векторный датчик изгиба: полезная модель 8715 U Респ. Беларусь, МПК G 02B 6/00, G 01N 21/00 / И.А. Гончаренко, В.Б. Залесский, А.Г. Иваницкий, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев. – Оpubл. 30.10.2012.

38. Оптический датчик деформаций: полезная модель 10998 U Респ. Беларусь, МПК G 01R 31/00 / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев, А.В. Ильюшонок. – Оpubл. 30.03.2016.

39. Оптический датчик электрических полей: полезная модель 11554 U Респ. Беларусь, МПК G 01N 21/00 / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, В.Н. Рябцев. – Оpubл. 30.10.2017.

РЭЗІЮМЭ

Рабцаў Віталій Мікалаевіч

Датчыкі параметраў электрычных палёў і механічных дэфармацый
на аснове аптычных хваляводных структур

Ключавыя словы: валаконна-аптычны датчык, дэфармацыя, вадкі крыштал, выгіб, інтэрферометр Майкельсона, метады ліній, мікраколцавы рэзанатар, мікраструктураванае валакно, напружанасць электрычных палёў, шчылінны хвалявод.

Мэта работы – распрацоўка прынцыпаў функцыянавання і канструкцый датчыкаў на аснове аптычных хваляводных структур, якія дазваляюць вымяраць дэфармацыі (як іх велічыню, так і кірунак) і напружанасць знешніх электрычных палёў з высокай дакладнасцю.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура. Агульная метадалогія працы прадугледжвала спалучэнне тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў спектральных і прасторава-часавых характарыстык аптычнага выпраменьвання ў хваляводных структурах пад уплывам знешніх уздзеянняў. Для эксперыментальнага даследавання параметраў і апрацоўкі вынікаў выкарыстоўваліся: крыніца выпраменьвання, вымяральнік магутнасці, мікраметр, столік аптычны з мікраметрычным перамяшчэннем, персанальны камп’ютар у спалучэнні з матэматычнымі метадамі апрацоўкі эксперыментальных даных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны алгарытм разліку параметраў і размеркавання палёў мод выгнутых мікраструктураваных хваляводаў з трыма асяродкамі; прапанаваны спосабы вызначэння велічыні і кірунку дэфармацый кантраляваных аб’ектаў на аснове ўліку перамеркавання інтэнсіўнасці аптычнага выпраменьвання паміж трыма асяродкамі мікраструктураванага валакна і на аснове параўнання інтэрферэнцыйных карцін ад валаконна-аптычных інтэрферометраў на дзвюх даўжынях хваль, а таксама напружанасці знешніх электрычных палёў на аснове мікраколцавага рэзанатара на базе шчылінных хваляводаў з запаўненнем вадкім крышталём; канструкцыі і прынцыпы функцыянавання датчыкаў на аснове аптычных хваляводных структур з прымяненнем гэтых спосабаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны пры стварэнні эфектыўных і надзейных тэхнічных сродкаў забеспячэння бяспекі (датчыкаў дэфармацый, ціску, параметраў электрычных палёў).

Вобласць выкарыстання. Распрацоўка сродкаў тэхнічнай дыягностыкі і неразбуральнага кантролю, вымярэнне параметраў электрычных палёў і механічных дэфармацый у выбуха- і пажаранебяспечных умовах, у цяжкадаступных месцах.

РЕЗЮМЕ

Рябцев Виталий Николаевич

Датчики параметров электрических полей и механических деформаций
на основе оптических волноводных структур

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, деформация, жидкий кристалл, изгиб, интерферометр Майкельсона, метод линий, микрокольцевой резонатор, микроструктурированное волокно, напряженность электрических полей, щелевой волновод.

Цель работы – разработка принципов функционирования и конструкций датчиков на основе оптических волноводных структур, позволяющих измерять механические деформации (как их величину, так и направление) и напряженность внешних электрических полей с высокой точностью.

Методы исследования и использованная аппаратура. Общая методология работы предусматривала сочетание теоретических и экспериментальных исследований спектральных и пространственно-временных характеристик оптического излучения в волноводных структурах, находящихся под влиянием внешних воздействий. Для экспериментального исследования параметров и обработки результатов использовались: источник излучения, измеритель мощности, микрометр, столик оптический с микрометрическим перемещением, персональный компьютер в сочетании с математическими методами обработки экспериментальных данных.

Полученные результаты и их новизна. Разработан алгоритм расчета параметров и распределения полей мод изогнутых микроструктурированных волноводов с тремя сердцевинами; предложены способы определения величины и направления деформаций контролируемых объектов на основе учета перераспределения интенсивности оптического излучения между тремя сердцевинами микроструктурированного волокна и на основе сравнения интерференционных картин от волоконно-оптических интерферометров на двух длинах волн, а также напряженности внешних электрических полей на основе микрокольцевого резонатора на базе щелевых волноводов с заполнением жидким кристаллом; конструкции и принципы функционирования датчиков на основе оптических волноводных структур с применением этих способов.

Рекомендации по использованию. Результаты исследований могут быть использованы при создании эффективных и надежных технических средств обеспечения безопасности (датчиков деформаций, давления, параметров электрических полей).

Область применения. Разработка средств технической диагностики и неразрушающего контроля, измерение параметров электрических полей и механических деформаций во взрыво- и пожароопасных условиях, при затрудненном доступе для обследования.

SUMMARY

Rabtsau Vitali

Sensors for measuring the parameters of electrical fields and mechanical deformations on the base of optical waveguide structures

Key words: optical fiber sensor, deformation, liquid crystal, bend, Michelson interferometer, method of lines, microring resonator, microstructured fiber, electric field intensity, slot waveguide.

The purpose of the research is the development of the operation principles and design of sensors on the base of optical waveguide structures that allow measuring the deformations (both magnitude and direction) and the intensity of external electric fields with high accuracy.

Methods of the research and used equipment. The general methodology of the research included a combination of theoretical and experimental studies of the spectral and space-time characteristics of optical radiation in waveguide structures under the influence of the external effects. A radiation source, an optical power meter, a micrometer, an optical table with a micrometric displacement, a personal computer combined with mathematical methods of experimental data processing were used for the experimental study of the parameters and processing of the results.

Obtained results and their novelty. The algorithm for calculating the parameters and mode fields distribution of the bent microstructured three-core fibers were developed; the methods for determining the magnitude and direction of controlled objects deformations were proposed that are based on analyses of redistribution of the optical radiation intensity between the three cores of microstructured fiber and on the comparison of interference patterns from fiber optic interferometers at two wavelengths and also the external electric fields intensity based on a microring resonator formed by the slot waveguides filled with liquid crystal; designs and operation principles of the sensors based on optical waveguide structures using these methods were proposed.

Guidance for use. The results of the research can be used to create effective and reliable technical means to provide safety (sensors of deformation, pressure, parameters of electric fields).

Field of application. Development of the means for technical diagnostics and non-destructive testing, measurement of the parameters of electric fields and mechanical deformations in explosive and inflammable environment, in case of difficult access.



Научное издание

Рябцев Виталий Николаевич

**ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
И МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Подписано в печать 12.11.2019.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,74. Уч.-изд. л. 2,07.
Тираж 60. Заказ 068-2019.

Полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 14.10.2016.
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.