

*На правах рукописи*



Комиссаров Станислав Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МИКРОМЕХАНИЧЕСКИМ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

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

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: **Корляков Андрей Владимирович**,  
доктор технических наук, директор НОЦ «Нанотехнологии»,  
профессор кафедры микро- и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Официальные оппоненты: **Мурашкина Татьяна Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Приборостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» (г. Пенза)

**Шамрай Александр Валерьевич**,  
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией  
квантовой электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики" (Университет ИТМО) (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «6» декабря 2016 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат разослан «4» октября 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.238.08, к.т.н.



Смирнов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Последнее десятилетие характеризуется ростом исследований в области волоконной оптики. Успехи в этой области, связанные с серийным производством компонентов и уменьшением их стоимости, позволили расширить границы применения стандартных волоконно-оптических элементов за рамки задач телекоммуникации и внедрить их в разработки, связанные с созданием волоконно-оптических сенсорных систем (ВОСС) для регистрации различных физических воздействий. Применение ВОСС обеспечивает высокую устойчивость к электромагнитным помехам и большую удалённость первичного преобразователя (ПП) физических величин от систем обработки, взрыво-, пожаро-, искробезопасность, малый вес и габариты. Эти особенности обуславливают перспективность применений ВОСС и постоянно растущий объем выполняемых исследований и разработок в этой области.

Схема построения ВОСС зависит от регистрируемого физического воздействия, требуемой чувствительности и особенностей условий эксплуатации. В ряде задач основными требованиями к ВОСС являются высокая чувствительность при минимально возможных габаритных размерах ПП. В этом случае целесообразно применять интерферометрические ВОСС, обеспечивающие регистрацию сверхмалых смещений чувствительного элемента (ЧЭ), обусловленных регистрируемым воздействием, а ЧЭ (балки, струны, мембраны) создавать с применением интегрально-групповой технологии микромеханики. Микромеханические конструкции позволяют получить уникальные параметры, такие как высокая прочность, высокая чувствительность, хорошая воспроизводимость характеристик от образца к образцу и низкая стоимость.

Однако, несмотря на значительный объём работ в данном направлении, существуют реальные возможности для дальнейшего повышения чувствительности интерферометрических ВОСС за счет оптимизации параметров ПП и оптико-электронной схемы. Кроме того, интерферометрические ВОСС подвержены влиянию внешних возмущающих факторов, в частности, изменению температуры окружающей среды, что отрицательно сказывается на стабильности их характеристик.

**Целью диссертационной работы** является разработка волоконно-оптической интерферометрической системы с микромеханическим первичным преобразователем для регистрации давления и вибрации, обладающей высокой чувствительностью и устойчивостью к изменению температуры внешней среды.

Для достижения указанной цели в диссертации решались следующие **основные задачи**:

1. разработка математической модели интерферометрической ВОСС регистрации сверхмалых смещений чувствительного элемента и расчет оптимальных конструктивно-геометрических параметров первичного преобразователя для обеспечения максимальной чувствительности к регистрируемому смещению чувствительного элемента,
2. исследование основных источников собственных шумов оптико-электронной схемы интерферометрической ВОСС и определение ее основных параметров, при которых достигается наилучшее значение пороговой чувствительности к смещению чувствительного элемента,

3. исследование температурной зависимости параметров интерферометрической ВОСС с микромеханическим преобразователем и разработка методов повышения ее устойчивости к изменению температуры внешней среды,
4. техническая реализация интерферометрической ВОСС с микромеханическим преобразователем динамического давления и вибрационного ускорения и экспериментальные исследования ее характеристик.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в работе:

1. разработана математическая модель ВОСС регистрации сверхмалых смещений на основе оптической интерференции в системе «торец оптического волокна – чувствительный элемент», позволяющая рассчитать оптимальные конструктивно-геометрические параметры микромеханического первичного преобразователя с чувствительными элементами в виде мембран, балок, струн для обеспечения максимальной чувствительности к их смещению,
2. исследованы основные источники шумов ВОСС на основе торцевого интерферометра, образованного торцом оптического волокна и чувствительным элементом, и установлено, что определяющий вклад в интегральный шум вносят флуктуации излучения лазера, минимальный уровень которых достигается при оптимальной мощности лазерного излучения,
3. предложен и реализован метод сохранения стабильной высокой чувствительности ВОСС с микромеханическим первичным преобразователем мембранного типа при изменении температуры внешней среды, основанный на применении в системе регистрации многоканального интерферометрического преобразователя.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработаны интерферометрические микромеханические первичные преобразователи динамического давления и вибрационного ускорения с чувствительными элементами в виде мембраны и упруго подвешенной массы и оптимальными конструктивно-геометрическими параметрами для достижения максимальной чувствительности;
2. Разработана оптико-электронная схема ВОСС регистрации сверхмалых смещений чувствительного элемента в микромеханическом преобразователе и экспериментально определена реально достижимая чувствительность к смещению при использовании серийно выпускаемых полупроводниковых лазерных источников излучения;
3. Разработаны ВОСС на основе многоканального интерферометра с микромеханическими первичными преобразователями динамического давления и вибрационного ускорения, обеспечивающие сохранение стабильной высокой чувствительности в широком интервале изменения температуры внешней среды;
4. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

**На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

1. Теоретически и экспериментально показано, что в интерферометрической ВОСС регистрации смещения, образованной торцом оптического волокна и чувствительным

элементом, существует оптимальное расстояние между ними, при котором достигается наилучшая пороговая чувствительность

2. Определяющим фактором, ограничивающим значение пороговой чувствительности интерферометрической ВОСС, являются флуктуации лазерного излучения, которые имеют минимум при оптимальной мощности лазерного излучения
3. Экспериментально подтверждено, что при изменении температуры внешней среды стабилизация чувствительности интерферометрической ВОСС с микромеханическим преобразователем обеспечивается применением в первичном преобразователе многоканального интерферометра.

(Положение защищено патентом РФ)

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Датчики и системы – 2005», Пенза, 6-10 июня 2005 г.; 6-я Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника-2006», Минск, 14-17 ноября 2006 г.; XI Международная конференция «Прикладная оптика», Санкт-Петербург 20-24 октября 2014 г.; 69-я Научно-техническая конференции профессорско-преподавательского состава университета, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 26 января – 4 февраля 2016 г.

**Основные публикации по теме работы.** По теме диссертации получены 3 патента РФ и опубликованы 6 статей в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК, 4 публикации в материалах конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Общий объём работы составляет 137 стр., среди них 62 рисунка, 20 таблиц, библиография содержит 59 использованных источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и основные задачи диссертационной работы

***В первой главе*** проводится обзор литературы по теме диссертации, анализ и классификация основных вариантов построения ВОСС для регистрации различных физических воздействий, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

ВОСС могут быть реализованы по амплитудной или интерферометрической схемам. Амплитудные ВОСС получили достаточно широкое распространение, главным образом, из-за их относительной невысокой стоимости и простоты. Однако необходимость повышения чувствительности приводит к их существенному усложнению и увеличению габаритов.

Наиболее чувствительные ВОСС могут быть технически реализованы на основе оптических интерферометров с применением унифицированных компонентов, промышленно выпускаемых для волоконно-оптических линий связи. В частности, для преобразования вибрации и акустического давления в параметры оптического сигнала может быть использовано как непосредственно оптическое волокно, так и внешний преобразователь. Однако повышение чувствительности датчиков на основе волоконных интерферометров Маха-Цандера или

Майкельсона требует применения достаточно габаритных преобразователей в виде катушек для получения требуемой длины оптоволоконна.

В связи с этим, для создания высокочувствительных ВОСС при жестких ограничениях на их габариты наиболее целесообразно применение оптического интерферометра Фабри-Перо с внешним ПП, в котором фаза оптического сигнала изменяется за счет смещения ЧЭ под действием регистрируемого физического воздействия. В качестве основы для построения ВОСС в работе был выбран наиболее простой аналог интерферометра Фабри-Перо – волоконно-оптический торцевой интерферометр (ВОТИ), образованный частично отражающим торцом (сколом) оптического волокна и зеркально отражающей поверхностью ЧЭ. Однако, несмотря на наличие работ, связанных с разработкой систем на основе ВОТИ, существуют реальные возможности для повышения их чувствительности за счет оптимизации параметров ПП и снижения собственных шумов оптико-электронной схемы (ОЭС). Кроме того, такая ВОСС подвержена влиянию внешних возмущающих факторов, в частности, изменению температуры окружающей среды, что отрицательно сказывается на стабильности ее характеристик.

В конце главы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели ВОСС регистрации сверхмалых смещений с преобразователем на основе торцевого интерферометра и оптимизации его параметров.

Общая схема ВОСС с преобразователем на основе ВОТИ представлена на рисунке 1, а и включает лазерный источник излучения 1, оптические волокна 2, волоконно-оптический разветвитель 3, первичный преобразователь 6, зеркально отражающий ЧЭ 5, смещающийся под действием регистрируемого физического воздействия, и фотоприёмный модуль (ФПМ) 7.

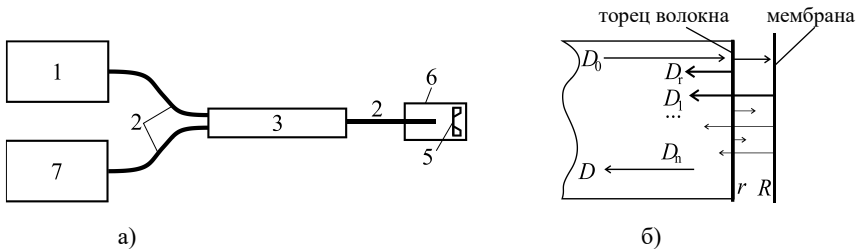


Рисунок 1. Общая схема ВОИС на основе торцевого интерферометра – а, и схема рабочего зазора интерферометра – б.

Рассмотрим общий случай многолучевой интерференции (рисунок 1, б), когда коэффициент отражения по амплитуде от торца волокна равен  $r$ , а от зеркала –  $R$ . Часть света, распространяющегося по волокну, отражается назад от торца волокна, а часть проходит в зазор между волоком и зеркалом. Торцевое волокно и зеркало образуют интерферометр. Найдём амплитуду излучения, отражаемую таким преобразователем обратно в волокно.

Обозначим комплексную амплитуду оптического излучения в волокне  $D_0$ , тогда от торца волокна назад отразится излучение с амплитудой  $D_r = D_0 r$ . После первого отражения от зеркала обратно в волокно попадёт излучение с комплексной амплитудой

$D_1 = -D_0(1-r^2)RT(l)$ , после второго отражения – излучение с амплитудой  $D_2 = -D_0 \cdot (1-r^2) \cdot RT(l) \cdot rRT(l)$  и т.д. В волокно будут проходить составляющие излучения с уменьшающейся амплитудой. После интерференции всех этих составляющих нормированная относительно  $D_0$  амплитуда излучения, отражённого преобразователем в волокно, может быть представлена соотношением:

$$D(l) = r - (1 - r^2)RT(l)[1 + rRT(l) + (rRT(l))^2 + \dots + (rRT(l))^N] \quad (1)$$

где

$$T(l) = \exp(-i 4\pi l/\lambda) / \sqrt{1 + (l/l_0)^2} \quad (2)$$

- коэффициент передачи между двумя торцами одномодовых оптических волокон, расположенных на расстоянии  $2l$ ,  $l_0 = \pi n b^2/\lambda$ ;  $n$  – показатель преломления,  $\lambda$  – длина волны оптического излучения,  $b$  – радиус поля оптической моды в волокне. Для стандартного кварцевого одномодового волокна при  $\lambda = 1,55$  мкм,  $n = 1,468$  и  $a = 5,25$  мкм параметр  $l_0 \approx 82$  мкм.

Коэффициент отражения Френеля торца кварцевого волокна  $r^2 = 0,036$ , а коэффициент отражения зеркала  $R$  обычно выбирают близким к единице.

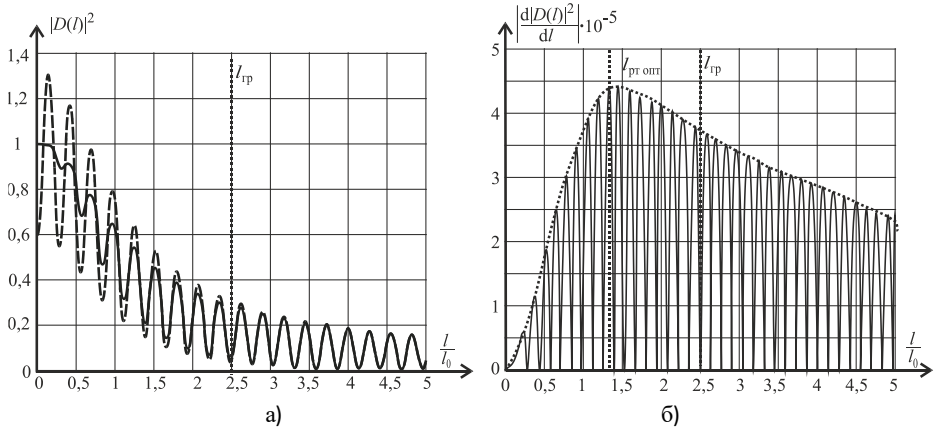


Рисунок 2. Графики статической характеристикой преобразования ВОТИ – а, и ее производной – б

На рисунке 2,а приведен график функции  $|D(l)|^2$ , соответствующей мощности отраженного излучения, которую будем называть статической характеристикой преобразования ВОТИ. Масштаб осцилляций для наглядности существенно трансформирован – на самом деле их период равен  $\lambda/2$  (при  $\lambda = 1,55$  мкм это около 0,8 мкм), что примерно в 100 раз меньше  $l_0$ . Сплошная линия приведена с учетом интерференции всех отраженных составляющих, пунктирная – с учетом только первого отражения от зеркала. Из графика видно, что для расчета  $|D(l)|^2$  при малом расстоянии  $l$  необходимо учитывать интерференцию всех отраженных составляющих, однако на значительном удалении зеркала от торца оптоволокна при  $l > l_{гр} \approx 2,5l_0$  с достаточной точностью можно учитывать только две основные составляющие: моду,

отражённую непосредственно от торца оптоволокна амплитудой  $D_r$ , и первую отраженную моду от зеркала амплитудой  $D_1$ .

Определим чувствительность ВОСС к смещению зеркально отражающего ЧЭ как производную статической характеристики преобразования ВОТИ. Эта зависимость от нормированного расстояния  $l/l_0$  представлена на рисунке 2, б и носит вид периодической функции с переменной амплитудой. Набор расстояний, при которых чувствительность имеет локальные экстремумы, представляет собой совокупность возможных *рабочих точек* преобразователя, то есть начальных положений ЧЭ в отсутствие регистрируемого физического воздействия:

$$l_{\text{пр}} = \lambda/8 + n\lambda/4, \quad (3)$$

где  $(n = 0, 1, \dots, N)$ . При этом глобальный максимум чувствительности достигается на определенном расстоянии  $l_{\text{пр опт}} \approx 1,4 l_0$ .

Величина пороговой чувствительности ВОСС к перемещению, т.е. минимального регистрируемого перемещения, зависит от отношения сигнал/шум системы. В работе показано, что определяющей составляющей шума системы с преобразователем на основе ВОТИ являются флуктуации излучения лазера, уровень которых пропорционален постоянной составляющей мощности излучения, т.е. функции  $|D(l)|^2$ .

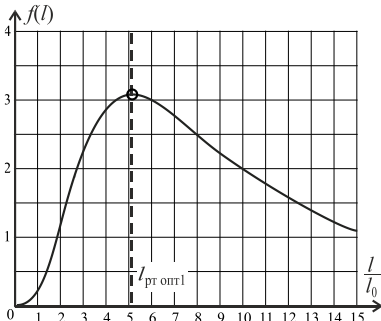


Рисунок 3. График зависимости сигнал-шум от нормированного расстояния

На рисунке 3 представлен график зависимости функции  $f(l) = \left| \frac{d|D(l)|^2}{dl} \right| / |D(l)|^2$ , рассчитанной на совокупности дискретных расстояний  $l_{\text{пр}}$ . Эта функция с точностью до некоторого постоянного множителя  $\Delta l$ , характеризующего смещение ЧЭ относительно  $l_{\text{пр}}$ , описывает отношение сигнал/шум системы на основе ВОТИ. Из графика видно, что для обеспечения максимального отношения сигнал/шум в такой ВОСС оптимальное расстояние между торцом оптоволокна и ЧЭ необходимо выбирать из условия  $l_{\text{пр опт}} \approx 5l_0$ .

Полученное значение  $l_{\text{пр опт}} > l_{\text{пр}}$ . В этом случае, как видно из рисунка 2, а с высокой точностью можно считать, что в формировании отраженного ВОТИ излучения с комплексной амплитудой  $D(l)$  принимают участие только две составляющие: мода, отраженная непосредственно от торца волокна с мощностью

$$P_r = D_r^2 = r^2 D_0^2 \quad (4)$$

и первая отраженная от ЧЭ мода с мощностью

$$P_1(l) = D_1^2 = D_0^2 (1-r^2)^2 R^2 |T(l)|^2 \quad (5)$$

Статическая характеристика преобразования ВОТИ как интерференция двух этих мод представляется уравнением:

$$P_D(l) = P_r + P_1(l) + 2\sqrt{P_r P_1(l)} \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right), \quad (6)$$

а максимальная чувствительность, как производная этого выражения в точке  $l = l_{\text{пр}}$ , уравнением

$$S(l) = S_H [P_{\text{max}}(l) - P_{\text{min}}(l)], \quad (7)$$



где

$$S_n = (2\pi/\lambda) \quad (8)$$

– нормированная чувствительность, которая для случая двухлучевой интерференции зависит только от длины волны излучения;  $P_{\max}(l)$  и  $P_{\min}(l)$  – максимальная и минимальная мощность оптического излучения, определяемая из выражения (7);  $P_{\max}(l) - P_{\min}(l) = 4\sqrt{P_r P_1(l)}$  – размах статической характеристики преобразования.

Уровень флуктуаций излучения лазера в рабочей точке определяется мощностью постоянной составляющей оптического излучения:

$$P_{\text{пр}}(l) = 1/2 [P_{\max}(l) + P_{\min}(l)]$$

Тогда отношение сигнал/шум при регистрации малого смещения  $\Delta l$  относительно  $l_{\text{пр}}$  определяется соотношением:

$$SNR(l) = \frac{S(l)}{P_{\text{пр}}} \Delta l = 2S_n K(l) \Delta l, \quad (9)$$

где

$$K(l) = \frac{P_{\max}(l) - P_{\min}(l)}{P_{\max}(l) + P_{\min}(l)}. \quad (10)$$

– контраст интерференционной картины, изменяющийся в пределах от 0 до 1.

Поскольку мощность  $P$  – величина неотрицательная, очевидно, что отношение сигнал/шум имеет максимум при условии  $P_{\min}(l) = 0$ , которое, как нетрудно показать из выражения (6), достигается при равенстве мод  $P_r = P_1(l)$ . Приравняв выражения (4) и (5), найдём оптимальное расстояние, при котором достигается максимальное отношение сигнал/шум и, соответственно, наилучшая пороговая чувствительность:

$$l_{\text{пр опт 1}} = l_0 \sqrt{\frac{R^2(1-r^2)^2 - r^2}{r^2}} \quad (11)$$

Численно при  $R^2=1$ ,  $r^2 = 0,036$  оптимальное расстояние от торца оптоволокна до ЧЭ  $l_{\text{пр опт 1}} \approx 5l_0$ . Это значение, полученное из упрощенной двухлучевой модели ВОТИ, хорошо согласуется с

результатом точного расчёта с учётом всех интерферирующих мод, что свидетельствует о правомерности принятых допущений в упрощенной модели.

Таким образом, на основании разработанной модели ВОСС регистрации сверхмалых механических смещений с преобразователем на основе ВОТИ показано, что существует оптимальное расстояние между ЧЭ и торцом волокна, при котором достигается наилучшая пороговая чувствительность ВОСС к смещению ЧЭ.

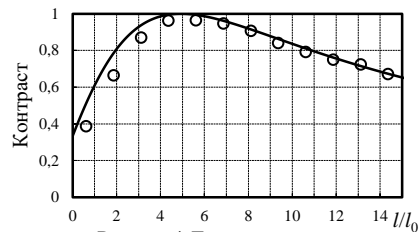


Рисунок 4. Теоретическая и экспериментальная зависимости контраста интерференционной картины от нормированного расстояния

**В главе 3** проведена экспериментальная проверка адекватности разработанной математической модели ВОСС с преобразователем на основе ВОТИ, экспериментальные

исследования собственных электрических шумов системы и определена ее пороговая чувствительность к смещению ЧЭ.

Для проверки адекватности математической модели ВОСС с преобразователем на основе ВОТИ и теоретических результатов, по оптимизации его параметров, была разработана экспериментальная установка, представленная на рисунке 1, а, в которой вместо ЧЭ использовалось глухое зеркало с  $R=1$ , закрепленное на пьезоэлектрической подвижке. Подвижка обеспечивала прецизионное перемещение зеркала относительно неподвижного торца волокна для получения на выходе ВОСС напряжений, соответствующих минимальному  $P_{\min}$  и максимальному  $P_{\max}$  значениям оптической мощности. По результатам измерений был произведен расчет контраста интерференционной картины по соотношению (10). Теоретические расчеты по разработанной модели и экспериментальные результаты измерения контраста, представленные на рисунке 4, в виде графика и дискретных отсчетов соответственно, свидетельствуют об их хорошем совпадении, что подтверждает адекватность разработанной математической модели и справедливость выражения (11) для определения оптимального расстояния от торца волокна до ЧЭ.

Для оценки вклада различных составляющих в результирующий уровень шума ВОСС был использован метод последовательного введения отдельных элементов в схему, представленную на рисунке 1. В эксперименте производились измерения напряжения интегрального шума на выходе ВОСС в полосе частот до 10 кГц. Результаты измерений нормировались к напряжению, соответствующему размаху статической характеристики преобразования ВОТИ, или к двойному значению постоянной составляющей напряжения, при отсутствии в схеме интерферометра.

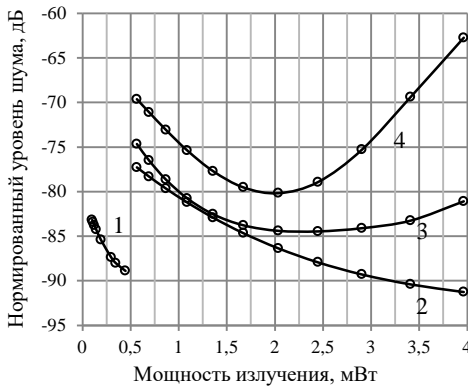


Рисунок 5. Зависимость собственных шумов оптико-электронной схемы от мощности излучения. 1 – светодиод, 2 – лазер, 3 – лазер с разветвителем – 50/50, 4 – лазер с разветвителем и глухим зеркалом

Для проведения исследований был реализован малошумящий ФПМ на основе  $p-i-n$  фотодиода на InGaAs/InP с чувствительностью 0,9 А/Вт и преобразователя ток-напряжение на базе операционного усилителя (ОУ) AD795 с коэффициентом преобразования  $5 \cdot 10^4$  В/А. Для обеспечения высокой линейности и отсутствия темнового тока фотодиод включен по схеме короткого замыкания (с нулевым смещением). Измеренное напряжение электрического шума ФПМ при отсутствии оптической засветки составило 6,3 мкВ. Для схемы, приведенной на рисунке 1, при типовой мощности лазерного излучения  $P_{\text{изл}} = 2$  мВт, постоянное напряжение составляет примерно 1,8 В, а нормированный электрический шум ФПМ составляет  $3,5 \cdot 10^{-6}$  или –109 дБ.

Из рисунка 5, где приведены результаты измерений уровня шума в зависимости от мощности оптического излучения, видно, что наименьший нормированный шум в ВОСС достигается при использовании амплитудной схемы со светоизлучающим диодом.

В интерферометрических ВОСС применяются полупроводниковые лазеры, которые характеризуются значительно большей сложностью физических процессов по сравнению со светодиодами и, соответственно, более высоким уровнем флуктуаций излучения. В лазерах появляется как дополнительный амплитудный шум, обусловленный флуктуациями оптической мощности, так и частотный (фазовый) шум, связанный с колебаниями рабочей длины волны излучения лазера. Нормированный шум при засветке ФПМ серийно выпускаемым одночастотным полупроводниковым лазером с распределенной обратной связью (лазер DFB) для  $\lambda = 1550$  нм представлен кривой 2.

Нормированный шум схемы, включающей лазер и оптический разветвитель с коэффициентом деления 50/50, представлен кривой 3. Из этого графика видно, что при увеличении мощности лазерного излучения шум схемы сначала уменьшается из-за снижения собственных шумов лазера, а затем начинает возрастать из-за увеличения паразитных обратных отражений света от элементов оптической схемы – разветвителей, оптических коннекторов и т.д. Эта ситуация, как показывает кривая 4, усугубляется при подключении к разветвителю глухого зеркала, закреплённого на расстоянии  $l_{\text{рт опт1}}$  от торца волокна. В этом случае к вышеперечисленным составляющим шумов добавляются частотные шумы, вызванные флуктуациями длины волны излучения лазера из-за обратного отражения излучения от торцевого интерферометра.

Таким образом, приведенные экспериментальные результаты доказывают, что в ВОСС с преобразователем на основе ВОТИ при использовании лазера DFB минимальный нормированный интегральный уровень шума достигается при оптимальной мощности излучения порядка 2 мВт.

В работе экспериментально определена пороговая чувствительность к смещению ВОСС с преобразователем на основе ВОТИ с оптимальными параметрами ( $l_{\text{рт опт1}} \approx 5l_0$ ,  $P_{\text{изл}} = 2$  мВт). С этой целью для серии из 10 образцов ВОСС с лазерами DFB были измерены уровни нормированного шума и получено усредненное значение  $U_{\text{ш н}} = P_{\text{ш н}} \approx 1 \cdot 10^{-4}$  в полосе частот 10 кГц. Тогда, с учетом выражения (9) и при условии отношения сигнал/шум  $SNR = 1$ , для  $\lambda = 1550$  нм реальная пороговая чувствительность ВОИС к смещению составляет величину:

$$\delta l = 10^{-4} \lambda / 2\pi \approx 25 \text{ пм}. \quad (12)$$

Для сравнения, в идеализированном случае, когда шум ВОСС определяется только электрическим шумом ФПМ, ее пороговая чувствительность к перемещению ЧЭ  $\delta l = 3,5 \cdot 10^{-6} \lambda / 2\pi \approx 0,86$  пм. Это значение можно рассматривать как предельно достижимое для разработанного ВОД с ФПМ такого типа.

**В главе 4** проводится исследование чувствительности ВОСС с микромеханическим преобразователем на основе ВОТИ при изменении температуры внешней среды и разработка метода повышения ее стабильности.

Для поддержания высокой чувствительности ВОСС к смещению ЧЭ необходимо, прежде всего, обеспечить стабильность положения рабочей точки ВОТИ, которая при

фиксированном расстоянии от торца волокна до ЧЭ, определяется стабильностью параметров лазерного излучения. Будем считать допустимым снижение чувствительности ВОСС относительно номинального значения не более 3 дБ. В работе показано, что для выполнения этого требования, уход длины волны лазерного излучения  $\delta\lambda$  в области 1,55 мкм должен составлять не более 0,1 нм.

В работе проведены исследования спектров серийных DFB лазеров в зависимости от температуры лазерного кристалла и тока инжекции. В результате установлено, что изменение тока инжекции от порогового значения порядка 10 мА до величины 20 мА, при котором оптическая мощность составляет порядка 2 мВт, практически не влияет на длину волны излучения лазера. Напротив, выявлена более сильная зависимость максимума спектра излучения

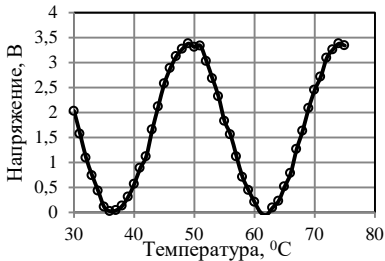


Рисунок 6. График температурной зависимости выходного напряжения ВОС с микромеханическим преобразователем

лазера  $\lambda_{max}$  от температуры  $T$ , которая может быть представлена в виде уравнения  $\lambda_{max}(T) = \chi(T - T_0)^2 + \beta(T - T_0) + \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – паспортное значение длины волны излучения при  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ;  $\beta \approx 0,1 \text{ нм}^\circ\text{C}$ ;  $\chi \approx 0,4 \text{ пм}^\circ\text{C}^2$ . Отсюда нетрудно показать, что для  $\delta\lambda \leq 0,1 \text{ нм}$ , необходимая точность поддержания температуры лазера должна составлять не хуже  $1^\circ\text{C}$ . Это требование в данной работе было учтено при схемотехнической реализации драйвера лазера.

Экспериментальные исследования стабильности параметров ВОСС с микромеханическим ПП на основе ВОТИ и мембранным чувствительным элементом при изменении температуры внешней среды показали, что температурная зависимость выходного напряжения ВОСС, т.е. положения рабочей точки, а, следовательно, и чувствительности, носит периодический характер (рисунок 6), что существенно ограничивает рабочий температурный диапазон системы. В связи с этим, в работе рассмотрены различные пути стабилизации положения рабочей точки и предложен метод, основанный на применении многоканального ВОТИ, в котором для разных каналов реализованы различные расстояния от торца волокна до ЧЭ. При этом выбор канала с рабочей точкой интерферометра, наиболее близкой к значению, определяемому соотношением (3), проводится на основе анализа сигналов в реальном масштабе времени.

Теоретически количество каналов в многоканальном ВОТИ, необходимое для поддержания заданной стабильности чувствительности, нетрудно определить в предположении оптимального взаимного смещения фаз  $\Delta\phi$  синусоидальных статических характеристик преобразования каналов. Для 2-х каналов при  $\Delta\phi = 90^\circ$  максимальное снижение чувствительности составит 2,7 дБ, для 3-х каналов и  $\Delta\phi = 60^\circ$  – 1,2 дБ, для 4-х каналов и  $\Delta\phi = 45^\circ$  – 0,7 дБ. Для такого идеализированного случая для сохранения стабильной чувствительности в диапазоне 3 дБ от максимального значения было бы достаточно всего двух каналов. Однако на практике из-за существующих технологических ограничений при реализации ПП оптимальное

взаимное смещение фаз в различных каналах реализовать не удастся, поэтому число каналов оказывается больше и определяется опытным путем.

Для определения числа каналов, при котором обеспечивается наименьшая величина снижения чувствительности при изменении температуры окружающей среды, была разработана ВОСС на основе четырехканального ВОТИ, схема которой приведена на рисунке 7.

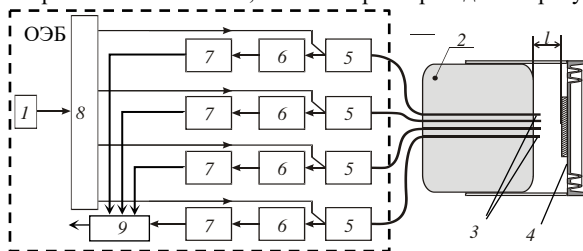


Рисунок 7. Функциональная схема четырехканальной ВОСС с микромеханическим преобразователем

ВОСС содержит лазерный источник 1 оптического излучения, излучение которого делится на четыре равные части разветвителем 8, первичный преобразователь 2, оснащенный чувствительной мембраной 4, четыре оптико-электронных модуля 4, каждый из которых включает волоконно-оптический разветвитель 5, выполненный из одномодовых оптических волокон, фотодетектор 6 и усилитель-преобразователь 7 электрического сигнала. Торцы оптических волокон 3 установлены от мембранного ЧЭ 4 на различных расстояниях, находящихся в окрестности значения  $l_{\text{рт опт}}$ , определяемого выражением (11). Возвращенные от преобразователя 2 оптические сигналы с выхода разветвителей 5 поступают на фотодиоды 6 и далее через усилители-преобразователи 7 – на соответствующие информационные входы селектора 9 на основе микроконтроллера, где выбирается канал с наилучшей чувствительностью.

При разработке алгоритма выбора рабочего канала, в котором обеспечивается наилучшая чувствительность, было учтено то обстоятельство, что при нахождении рабочей точки интерферометра в положении  $l_{\text{рт}}$ , соответствующем условию (3), уровень полезного сигнала максимален. На основании этого в работе был предложен критерий, согласно которому в ВОСС с микромеханическим ПП на основе многоканального ВОТИ в качестве рабочего выбирается тот канал, в котором среднееквадратическое значение переменной составляющей сигнала максимально.

Результаты экспериментов по воздействию рабочих температур в интервале от  $25^{\circ}$  до  $85^{\circ}\text{C}$  на микромеханический ПП с мембранным ЧЭ на основе одно-, двух- и четырехканального ВОТИ представлены на рисунке 8. На рисунках сплошной линией показано изменение чувствительности, а пунктирной – изменение температуры от времени. В качестве характеристики чувствительности использовался уровень первой гармоники в спектре выходного сигнала ВОСС при входном акустическом воздействии с частотой 1 кГц. Как видно из графиков, применение четырехканального ВОТИ позволяет сохранить высокую чувствительность ВОСС с отклонением от номинального значения не более 6 дБ во всем исследованном диапазоне изменения температур.

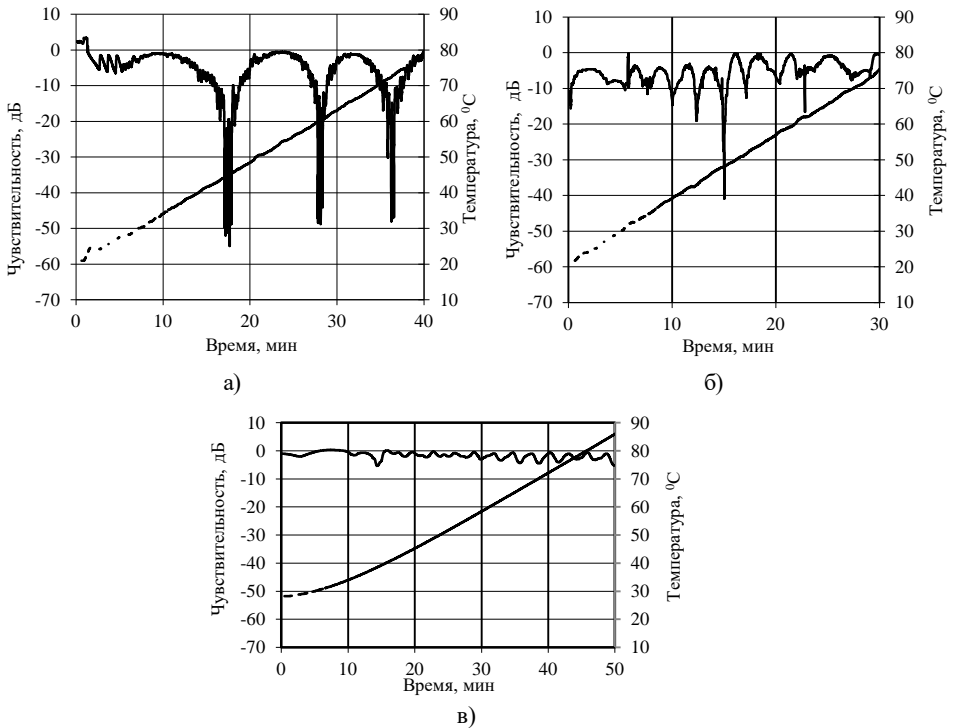


Рисунок 8. Температурная зависимость чувствительности ВОСС на основе многоканального ВОТИ: один канал - а, два канала - б, четыре канала - в

Таким образом, применение в микромеханическом преобразователе с мембранным ЧЭ четырехканального интерферометра с различными расстояниями от торцов оптических волокон до мембраны позволяет снизить температурную нестабильность чувствительности ВОС на величину до 40 дБ, по сравнению с одноканальным интерферометром.

**В пятой главе** проводится техническая реализация ВОСС с различными микромеханическими преобразователями на основе многоканального ВОТИ и результаты исследований их характеристик.

Разработанная ВОСС состоит из четырехканального оптико-электронного блока (ОЭБ), аналогичного представленному на рисунке 7, и первичного преобразователя, соединенных волоконно-оптическим кабелем. Для обеспечения одновременных требований высокой чувствительности и минимальных габаритов при технической реализации преобразователя регистрируемого



Рисунок 9. Фотография ВОСС на базе четырехканального интерферометра с микромеханическим преобразователем

физического воздействия в работе применялись современные технологии микромеханики. Фотография разработанной ВОСС с микромеханическим преобразователем приведена на рисунке 9.

В работе техническая реализация микромеханического преобразователя динамического давления производилась на основе мембранных ЧЭ. Рассмотрены плоские однокомпонентные мембраны из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; композиционные мембраны из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с нанесенной пленкой SiC и гофрированные мембраны из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (рисунок 10) с металлизированной отражающей поверхностью, создаваемые с применением технологий микромеханики.

Измеренные значения подвижности мембранных ЧЭ при воздействии динамического давления показали, что гофрированные мембраны за счет более низкого уровня остаточных напряжений в центральной области и изгибной деформации в области гофра обладают наилучшей подвижностью, которая на частоте 1 кГц, составила 35-50 нм/Па. При таких параметрах мембран, с учетом (12), для  $\lambda = 550$  нм расчетные значения пороговой чувствительности ВОСС к динамическому давлению  $p_{\min}$ , обусловленной собственным шумом системы в рабочей полосе частот 10 кГц, находятся в области от  $7 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  Па.

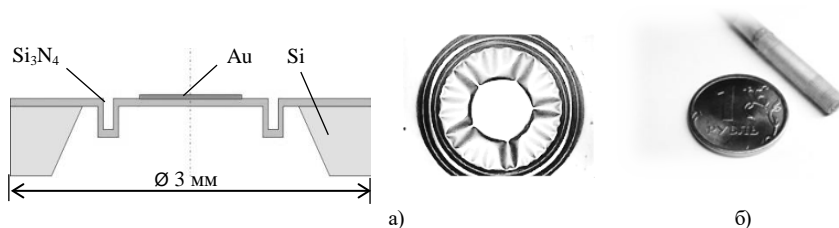


Рисунок 10. Конструкция и внешний вид гофрированной мембраны – а, внешний вид микромеханического преобразователя динамического давления – б

Результаты измерений пороговой чувствительности к динамическому давлению разработанной ВОСС с микромеханическим преобразователем с различными образцами мембранных ЧЭ М1, М2, М3, приведенные в таблице 1, показывают хорошее согласование экспериментальных результатов с расчетными данными. Измерения проводились в звукозаглушенной камере методом сравнения с эталонным микрофоном при подаче широкополосного акустического сигнала.

Таблица 1  
Пороговая чувствительность ВОСС  
с микромеханическим преобразователем динамического давления

Тип ПП	М1	М2	М3	Optimic 1190
$p_{\min}$ , Па	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Размеры, мм	ø4x25			ø6x16

Из таблицы также видно, что разработанные интерферометрические ВОСС с микромеханическим преобразователем имеют значительно лучшую пороговую чувствительность к динамическому давлению и меньшие габариты по сравнению с зарубежным

амплитудным аналогом Optimic 1140 фирмы OptoAcoustics.

Основой разработанного микромеханического преобразователя вибрационного ускорения является ЧЭ в виде инерционной массы 1, подвешенной к основанию 3 на упругих элементах (струнах) 2 (рисунок 10, а). Общий вид конструкции преобразователя с крышками 4 и подведенными к нему волокнами 5, представлен на рисунке 10, б. В таком преобразователе смещение инерционной массы относительно исходного положения, пропорционально воздействию на него вибрационному ускорению.

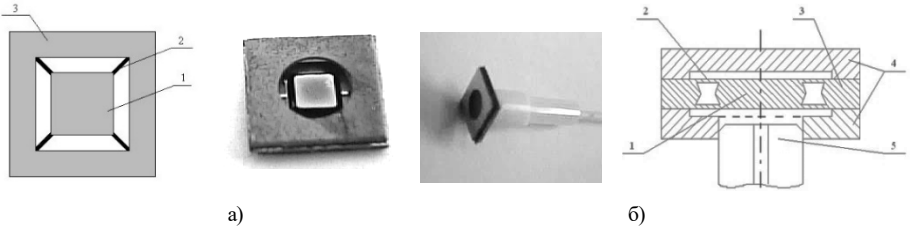


Рисунок 10. Конструкция и внешний вид вибрационного чувствительного элемента – а, внешний вид микромеханического преобразователя вибрации – б

Результаты измерений пороговой чувствительности к вибрационному ускорению  $a_{\min}$ , обусловленной собственным шумом ВОСС в полосе частот 5 кГц, с различными образцами ЧЭ В1 и В2 размерами 5x5x1,5 мм представлены в таблице 2.

Таблица 2

Пороговая чувствительность ВОСС  
с вибрационным микромеханическим преобразователем

Тип ПШ	В1	В2	FOA Phone-Or
$a_{\min}, \text{M/c}^2$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Размеры, мм	5x5x12		Ø6x15

Из таблицы видно, что разработанная интерферометрическая ВОСС с микромеханическим преобразователем вибрационного ускорения с ЧЭ в виде упруго подвешенной инерционной массы по пороговой чувствительности примерно в 3 раза превосходит амплитудный аналог FOA фирмы Phone-Or с ЧЭ в виде гофрированной мембраны с инерционной массой.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных ВОСС с микромеханическим преобразователем при изменении температуры внешней среды показали результаты, аналогичные представленным на рисунке 7, и подтвердили достаточно высокую стабильность чувствительности.

Таким образом, разработанные ВОСС на основе четырёхканального торцевого интерферометра с микромеханическими преобразователями с ЧЭ мембранного типа и в виде упруго подвешенной инерционной массы показали высокую пороговую чувствительность к динамическому давлению и вибрационному ускорению соответственно при миниатюрных размерах преобразователей, в том числе, при изменении температуры внешней среды.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель ВОСС с преобразователем смещения на основе торцевого интерферометра, образованного торцом оптического волокна и отражающим ЧЭ, позволяющая рассчитать оптимальные конструктивно-геометрические параметры преобразователя для получения максимальной чувствительности к смещению, и экспериментально подтверждена ее адекватность. Установлено, что основным фактором в оптимизации конструкции первичного преобразователя является расстояние между отражающей плоскостью ЧЭ и торцом волокна. Получено аналитическое выражение для определения оптимального значения этого расстояния.

2. Разработана оптико-электронная схема ВОСС с преобразователем на основе торцевого интерферометра и показано, что фундаментальным фактором, ограничивающим достижение предельной пороговой чувствительности ВОСС к смещению, является уровень собственного электрического шума фотоприёмного модуля. Его нормированное значение составляет порядка  $-109$  дБ в полосе частот  $10$  кГц, что ограничивает предельно достижимое значение пороговой чувствительности ВОСС к смещению ЧЭ величиной  $\sim 0,86$  пм.

3. Экспериментально установлено, что реальное значение пороговой чувствительности к смещению в ВОСС на основе торцевого интерферометра определяется уровнем флуктуаций излучения лазера. Определена оптимальная мощность излучения серийных одночастотных полупроводниковых DFB лазеров, составляющая примерно  $2$  мВт, при которой достигается минимальный уровень нормированного шума порядка  $-80$  дБ в полосе частот  $10$  кГц, что ограничивает реальную пороговую чувствительность ВОСС к смещению ЧЭ величиной порядка  $25$  пм.

4. Предложен и реализован метод стабилизации чувствительности ВОСС к микромеханическим первичным преобразователям в условиях изменения температуры внешней среды за счет применения многоканального торцевого интерферометра с различными расстояниями от ЧЭ до торцов оптических волокон. Обоснован критерий и реализован алгоритм выбора наилучшего рабочего канала в многоканальном торцевом интерферометре. Экспериментально показано, что применение в микромеханическом первичном преобразователе мембранного типа четырехканального торцевого интерферометра позволяет снизить температурную нестабильность чувствительности ВОСС на величину до  $40$  дБ по сравнению с одноканальным вариантом.

5. Разработаны конструкции и реализованы с применением МЭМС технологий высокочувствительные ЧЭ в виде мембран и упруго подвешенной инерционной массы для микромеханических преобразователей динамического давления и вибрационного ускорения соответственно. На основе четырехканального торцевого интерферометра изготовлены ВОСС с микромеханическими преобразователями динамического давления и вибрационного ускорения и проведены экспериментальные исследования, которые показали высокую пороговую чувствительность порядка  $6 \cdot 10^{-4}$  Па и  $1 \cdot 10^{-2}$  м/с<sup>2</sup> соответственно.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:*

1. Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Корляков А.В., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический вибродатчик на основе микрооптомеханического преобразователя// Нано- и Микросистемная техника. 2007. №8(85). С. 8-13.
2. Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения// Оптический Журнал. 2008. Т.75. №1. С. 3-6
3. Ветров А.А., Данилов Д.А., Есипов С.С., **Комиссаров С.С.**, Сергушичев А.Н. Сравнение температурных и электрических методов управления длиной волны излучения полупроводниковых лазеров// Оптический журнал. Т. 76. № 8. С. 90–96. 2009
4. Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Сергушичев А.Н., Туркин М.В., Ширшов А.А. Анализ и оптимизация параметров интерференционного волоконно-оптического микрофона// Оптический журнал. 2011. Т.78. № 6. С. 31-38
5. Ветров А.А., Данилов Д.А., **Комиссаров С.С.**, Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н. Вибро-акустические волоконно-оптические микромеханические системы// Биотехносфера. 2011. № 1-2 (13-14). С.53-65
6. Ветров А.А., Власов Р.А., Данилов Д.А., **Комиссаров С.С.**, Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н. Многоволновый метод расширения диапазона регистрируемых перемещений в виброакустическом датчике на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо// Оптический журнал. 2015. Т.89. №9. С. 48-53

### *Патенты:*

7. Патент на изобретение №2 279 112 Российской Федерации МПК G02F 1/00, G01B 9/00 от 27.06.2006 Волоконно-оптическая сенсорная система// Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Лучинин В.В., Сергушичев А.Н. Заявка №2004128514/28, 27.09.2004. Оpubл. 27.06.2006. Бюл. №18. Приоритет 27.09.2004. - 9 с., - 3 ил., -1 табл.
8. Патент на изобретение №2 305 253 Российской Федерации МПК G01B 9/00 (2006.01) от 10.05.2006. Волоконно-оптическая сенсорная система// Ветров А.А., Ильков В.К., **Комиссаров С.С.**, Лучинин В.В., Сергушичев А.Н., Ширшов А.А. Заявка 2006115889/28 от 10.05.2006. Опубликовано 27.08.2007 Бюл. №24. Приоритет от 10.05.2006. -11 с., - 5 ил.
9. Патент на изобретение №2 365 064 Российской Федерации МПК H04R 23/00, H04R 7/00 от 20.08.2009. Оптический микрофон и способ изготовления его звукочувствительной мембраны // Ветров А.А., Ильков В.К., **Комиссаров С.С.**, Корляков А.В., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н., Ширшов А.А. Заявка 2008115400/28 от 18.04.2008. Опубликовано 20.08.2009. Бюл. №23. Приоритет от 18.04.2008. -15 с., - 4 ил., - 3 табл.

### *Материалы конференций:*

10. Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Сергушичев А.Н. Малогабаритный унифицированный интегрированный модуль «излучатель-оптоэлектронный преобразователь» для оптических интерференционных датчиков// Международная научно-техническая конференция «Датчики и системы – 2005» Пенза 6-10 июня 2005 г. Сборник докладов. С.192-195.
11. Ветров А.А., **Комиссаров С.С.**, Лучинин В.В., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический микроинтерферометр как основа построения высокочувствительных сенсоров// Сб. докладов VI Междунар. конф. “Квантовая электроника-2006”. Минск, 2006. С. 117.
12. Ветров А.А., Власов Р.А., **Комиссаров С.С.**, Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н. Применение многоволнового метода для расширения динамического диапазона волоконно-оптического виброакустического датчика интерференционного типа// XI Межд. Конф. “Прикладная оптика”, 20-24 Окт. 2014, С-Петербург, Сборник трудов, т. 2, с. 66-70, (2014).
13. **Комиссаров С.С.** Исследование собственных шумов интерферометрической волоконно-оптической сенсорной системы//69-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, С-Петербург, 26 янв. – 4 фев. 2016 г. Сборник докладов, С. 91-95.