

Гурбатов Станислав Олегович

МОДУЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ В  
ИЗГИБАЕМЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ОДНОМОДОВЫХ  
ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

01.04.21 - Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Владивосток – 2012

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Витрик Олег Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Каменев Олег Тимурович, ИАПУ ДВО РАН, в.н.с.  
  
кандидат физико-математических наук  
Беловолов Михаил Иванович, НЦВО РАН, в.н.с.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт автоматики и  
электрометрии Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Защита диссертации состоится «25» октября 2012 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д005.007.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН.

Автореферат разослан “20” сентября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент



Гамаюнов Е.Л.

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность проблемы**

Освоение новых прогрессивных технологий, ввод в строй крупных и сложных инженерных объектов и интенсификация их эксплуатации требует разработки современных средств контроля таких объектов и систем. Значительное улучшение характеристик измерительных преобразователей, используемых для решения задач контроля параметров объектов, достигается при использовании волоконно-оптической элементной базы. К достоинствам волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОИП) относятся невосприимчивость к электромагнитным помехам, химическая устойчивость, малые размеры, высокая чувствительность и широкий диапазон длин измерительной базы, а также возможность проведения эффективных удаленных измерений. Успехи применения ВОИП в системах мониторинга параметров объектов в строительстве, авиации, флоте и космической технике вызвали значительный интерес научного сообщества к развитию этого направления. В настоящее время основные усилия ученых направлены на дальнейшее улучшение измерительных параметров ВОИП, расширение диапазона их применений в задачах мониторинга, упрощение методов обработки сигналов, и снижение их стоимости.

Одной из самых привлекательных схем ВОИП с точки зрения упрощения оптической схемы и методов обработки сигналов, а также снижения стоимости является схема модуляции амплитуды направляемого излучения вследствие макроизгибов одномодового волоконного световода, индуцированных внешним воздействием. Однако, при использовании в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) стандартных световодов, какие, например, используются в волоконно-оптических системах связи, чувствительность ВОИП оказывается низкой. Дело в том, что заметные модуляции вследствие потерь появляются в таких ВС при радиусах изгиба менее сантиметра, что не позволяет применять их для измерения параметров слабых деформационных воздействий. Данную трудность можно преодолеть за счет возбуждения волоконного световода в нестандартном режиме со сниженным значением приведенной частоты  $V_{NORM}$ . Однако, с этой точки

зрения процессы модуляции амплитуды направляемого оптического излучения в изгибаемых одномодовых ВС изучены слабо.

До настоящего времени амплитудная модуляция направляемого излучения в изгибаемых одномодовых ВС исследовалась в основном с точки зрения анализа причины увеличения затухания передаваемых по волоконно-оптическим линиям связи сигналов. При этом одномодовый ВС в большинстве случаев рассматривался, как двухслойная структура, состоящая из световедущей сердцевины с показателем преломления  $n_1$ , и «бесконечной» кварцевой оболочки с показателем преломления  $n_2$ , и влияние среды, окружающей кварцевую оболочку ВС, в большинстве случаев не учитывалось. В действительности, одномодовый ВС имеет третий оптический слой, образованный полимерным покрытием или иной средой, с показателем преломления  $n_3$ , который может оказывать существенное влияние на процесс модуляции параметров фундаментальной моды при изгибе одномодового ВС. Такое влияние в частности может быть обусловлено взаимодействием направляемой моды сердцевины с модами оптической оболочки, параметры которых зависят от  $n_3$ . В случае, когда на границе раздела кварцевая оболочка/внешняя среда выполняются условия полного внутреннего отражения, при  $n_3 < n_2$ , в кварцевой оболочке возбуждается широкий спектр собственных волн. В результате картина их взаимодействия с направляемой модой сердцевины при изгибе ВС становится сложной и труднопредсказуемой. Для решения этой проблемы большинство производимых в настоящее время телекоммуникационных световодов покрываются полимерным чехлом с показателем преломления  $n_3 > n_2$ . Тем не менее, даже в таком случае в кварцевой оболочке могут распространяться моды шепчущей галереи, которые скользят вдоль ее границы раздела с внешней средой, как это показано на рисунке 1. Согласно соотношениям Френеля, за счет большого угла падения, близкого к  $90^\circ$  на границе  $n_2/n_3$ , коэффициент отражения для таких лучей может быть достаточно высок, несмотря на то, что условия полного внутреннего отражения для них не выполняются. Такие моды, проявляющиеся при изгибе ВС, могут влиять на потери направляемого излучения в волоконно-оптических линиях связи за счет их взаимодействия с фундаментальной

модой (ФМ).

Из представления о взаимодействии фундаментальной моды с узким спектром мод шепчущей галереи (МШГ) вытекает, что картина такого взаимодействия может стать существенно более регулярной и удобной для обработки. Кроме того, моды шепчущей галереи кварцевой оболочки

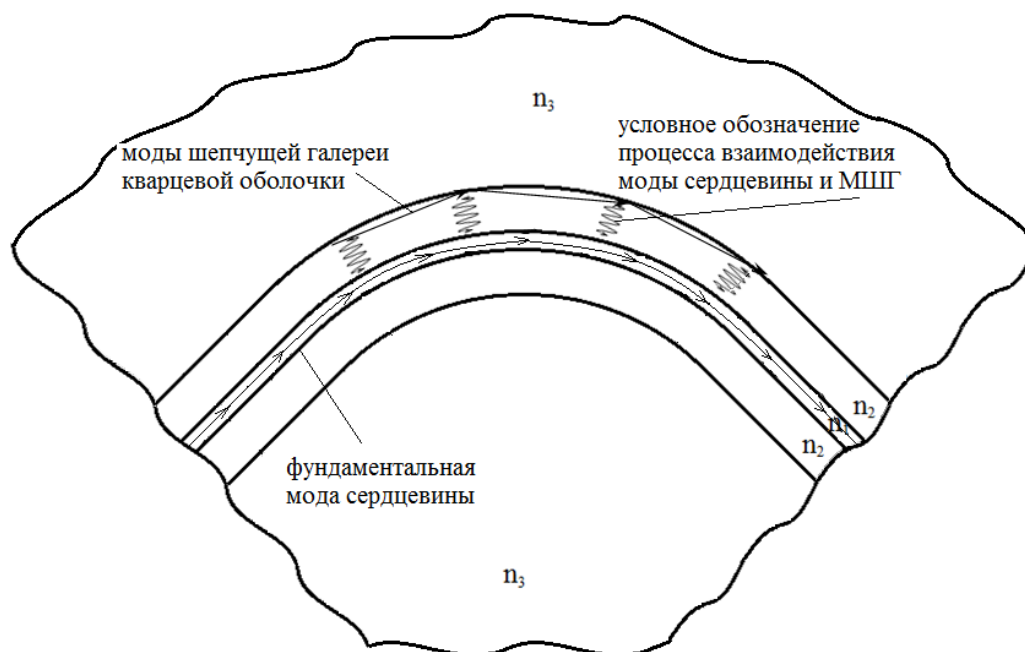


Рисунок 1 Одномодовый волоконный световод. Связь основной моды сердцевины с модами шепчущей галереи, распространяющимися в кварцевой оболочке.

изогнутого ВС могут частично проникать во внешнюю среду, поэтому их фаза будет зависеть от  $n_3$ . Будучи связанными с фундаментальной модой кварцевой сердцевины световода фазовые изменения мод шепчущей галереи будут влиять на нее. Поэтому, изгибаемый световод может рассматриваться не только как амплитудный, но и как фазовый модулятор для направляемого по нему излучения. В основном глубина модуляции амплитуды и фазы излучения в таком устройстве будет определяться величиной радиуса изгиба ВС, и показателем преломления внешней по отношению к оптической оболочке ВС среды. Поэтому, такой модулятор может быть использован в качестве чувствительных элементов рефрактометров и измерителей изгибов. Однако, вопрос об эффективности связи мод шепчущей галереи с фундаментальной модой ВС применительно к измерительным преобразователям физических величин изучен слабо. Действительно, при взаимодействии мод сердцевины и кварцевой оболочки в изогнутом ВС могут возникнуть резонансные явления, которые могут повысить или

снизить чувствительность при измерении физических величин. Условия, обеспечивающие максимальную чувствительность одномодовых волоконных световодов к радиусу его изгиба и показателю преломления среды, окружающей его кварцевую оболочку, требуют дополнительного исследования. Кроме того, для случая рефрактометров не изучалась функциональная зависимость для фазы и коэффициента ослабления мощности направляемого излучения  $\alpha_{LOSS}$  в одномодовом ВС от показателя преломления внешней по отношению к кварцевой оболочке ВС среды  $n_3$ .

Следует также отметить, что в случае измерения радиусов изгиба волоконный световод в чувствительном элементе может иметь практически любую длину, что обеспечивает возможность создания измерительных преобразователей, как с протяженной, так и с локальной измерительной базой. Причем изменение радиуса изгиба ВС в чувствительном элементе может быть обусловлено не только статическими, но и динамическими деформациями волоконного световода. Однако, невыясненным остается вопрос о том, как адаптировать чувствительность волоконных световодов для случая измерения радиусов изгиба протяженных объектов, и для случая измерения параметров локальных деформационных полей, в том числе динамических.

### **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является исследование процессов модуляции параметров направляемого оптического излучения в изгибаемых трехслойных одномодовых волоконных световодах в условиях связи мод сердцевины и оболочки; исследование физических процессов, обеспечивающих измерение показателя преломления и параметров статических и динамических деформационных полей с использованием трехслойных волоконных световодов; и создание физических основ для построения элементной базы волоконно-оптических измерительных преобразователей параметров деформаций и рефрактометров, использующих амплитудную и фазовую чувствительность к внешним воздействиям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать физические процессы, приводящие к амплитудной и фазовой модуляции направляемого оптического излучения в изгибаемых трехслойных одномодовых волоконных световодах с учетом связи моды сердцевины и мод шепчущей галереи первой оптической оболочки; установить условия, обеспечивающие резонансную связь таких мод.
- Выявить механизмы, обуславливающие возникновение дополнительных потерь мощности направляемого оптического излучения при изгибе одномодовых ВС при низких значениях приведенной частоты и в условиях резонансной связи мод сердцевины и кварцевой оболочки.
- Выявить условия, обеспечивающие максимальную чувствительность одномодовых волоконных световодов к радиусу его изгиба и показателю преломления среды, окружающей кварцевую оболочку в зависимости от длины чувствительного ВС и условий измерения.
- Разработать физические основы для построения элементной базы волоконно-оптических измерительных преобразователей параметров деформаций и рефрактометров, использующих амплитудную и фазовую чувствительность к внешним воздействиям.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

- впервые проведена экспериментальная верификация физико-математических моделей для расчета зависимости коэффициента ослабления направляемого излучения от радиуса изгиба  $\alpha_{LOSS}(R)$  трехслойного одномодового ВС, и световода с «бесконечной кварцевой» оболочкой в диапазоне значений приведенной частоты  $0,5 \div 2,1$ . Установлены условия, при которых достигается резонансная связь между фундаментальной модой кварцевой сердцевины ВС и модами шепчущей галереи его кварцевой оболочки в данном диапазоне.
- впервые найдены условия, обеспечивающие максимальную чувствительность одномодовых волоконных световодов к изменению радиуса их изгиба и показателю преломления среды, окружающей их кварцевую оболочку. Показано, что резонансные явления, возникающие при взаимодействии мод шепчущей галереи с фундаментальной модой изогнутого ВС, позволяют адаптировать чувствительность волоконных

световодов для случая измерения радиусов изгиба протяженных объектов, и для случая измерения параметров локальных деформационных полей, в том числе динамических, а также для измерения малых вариаций показателя преломления внешней по отношению к ВС среды.

- впервые предложены схемы волоконно-оптических измерительных преобразователей параметров статических и динамических (ускорения) деформаций, использующие амплитудную чувствительность изгибаемого ВС к внешним воздействиям. Достигнута пороговая чувствительность измерителя радиуса изгиба протяженных объектов –  $18\text{м}$ , макета акселерометра -  $3,7 \cdot 10^{-2} \text{м/с}^2$ .
- впервые изучена модуляция фазы и коэффициента ослабления мощности направляемого излучения в одномодовом ВС в зависимости от показателя преломления внешней по отношению к кварцевой оболочке изогнутого ВС среды. Предложены схемы волоконно-оптических рефрактометров на основе витка одномодового ВС, использующие амплитудную и фазовую чувствительность к внешним воздействиям. Достигнута пороговая чувствительность макета рефрактометра  $5 \cdot 10^{-6}$ .

**Практическая значимость работы заключается в том, что:** представленные в работе результаты открывают возможность создания чувствительных элементов широкого круга измерительных преобразователей параметров статических и динамических деформаций, а также показателя преломления жидких сред.

### **Выносимые на защиту положения**

1. Изгибаемый одномодовый волоконный световод следует рассматривать как трехслойную структуру с кварцевой сердцевиной и двумя оптическими оболочками (кварцевая оболочка и внешняя среда). Показатель преломления второй оболочки влияет амплитуду и фазу фундаментальной моды изгибаемого одномодового волоконного световода, причем соответствующие зависимости являются детерминированными и монотонными в случае, если на границе между первой и второй оболочками не реализуются условия полного внутреннего отражения.



2. Высокая амплитудная и фазовая чувствительность к изменению показателя преломления внешней среды, составляющей вторую оптическую оболочку трехслойного ВС, достигается при обеспечении условий резонансной связи между фундаментальной модой кварцевой сердцевины волоконного световода и модами шепчущей галереи его первой оболочки. Эти условия обеспечиваются при определенном соотношении между радиусом изгиба и оптическими параметрами кварцевого волоконного световода.

3. Высокая амплитудная чувствительность одномодовых кварцевых волоконных световодов к радиусу изгиба достигается за счет понижения их приведенной частоты до  $0,5 \div 0,8$ . При этом чувствительность может быть адаптирована как для случая измерения радиусов изгиба протяженных объектов, так и для случая измерения параметров локальных деформационных полей за счет выбора показателя преломления второй оптической оболочки. Это позволяет создавать чувствительные элементы широкого спектра измерительных преобразователей параметров статических и динамических деформаций.

### **Апробация результатов работы**

Апробация результатов работы проводилась на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях:

1. XII Межрегиональная конференция молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов: сборник трудов, Владивосток (Россия) 2009.
2. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2009, Vladivostok (Russia) 2009.
3. Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2009, Пермь (Россия) 2009.
4. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2010, Daejion (South Korea) 2010.
5. Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва (Россия) 2010.
6. Всероссийский конкурс-конференция молодых физиков, Москва (Россия) 2010.

7. Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2011, Пермь (Россия) 2011.
8. Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва (Россия) 2011.
9. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2011, Samara (Russia) 2011.
10. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2012, Dalian (P.R. of China) 2012.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, включая 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК России.

### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертационной работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 135 страниц, включая список литературы, 44 рисунка и 1 таблицу. Список цитированной литературы содержит 134 наименований, включая публикации автора по теме диссертации.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность работы, дается общая характеристика научной проблемы, формулируется цель диссертационной работы, ставятся задачи проводимого исследования, намечаются возможные пути решения поставленных задач.

В первой главе теоретически и экспериментально исследованы зависимости коэффициента ослабления направляемого излучения  $\alpha_{Loss}$  от радиуса изгиба  $R$  трехслойного одномодового ВС в диапазоне значений приведенной частоты  $0,5 \div 2,1$ . Показано, что для расчета характеристик амплитудных измерительных преобразователей на основе таких ВС

целесообразно использовать модель «мод изогнутого ВС», а в частном случае при  $n_3=n_2$  может быть также использована модель «токовой антенны». Установлено, что характер зависимости  $\alpha_{LOSS}(R)$  для трехслойного одномодового ВС может быть объяснен в рамках взаимодействия фундаментальной моды сердцевины с узким спектром мод шепчущей галереи кварцевой оболочки ВС.

Установлены зависимости нормированной мощности  $P/P_0$  от радиуса

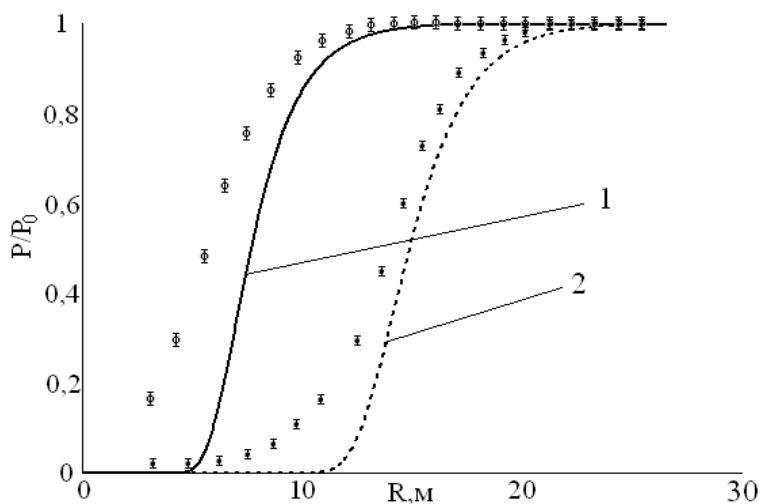


Рисунок 2 Зависимости  $P(R)/P_0$  для отрезков одномодовых ВС длиной 30м, имеющих  $V_{NORM}=0,74$ . Кривая 1 – ВС имеет конечную оптическую оболочку. Кривая 2 – «бесконечную». Маркеры  $\circ, \bullet$  – результаты экспериментальных исследований.

изгиба  $R$  отрезков одномодовых ВС (рисунок 2). Продемонстрирована возможность измерения радиусов изгиба в объектах протяженностью в десятки метров и более за счет регистрации интенсивности света на выходе

протяженного изгибаемого ВС. Теоретически и экспериментально показано, что наилучшую чувствительность при

проведении таких измерений обеспечивают одномодовые ВС со значением приведенной частоты  $V_{NORM} \sim 0,7 \div 0,8$ , возбуждаемые в режиме «бесконечной кварцевой» оболочкой (при  $n_3=n_2$ ). При  $n_3 \neq n_2$ , как это следует из рисунка 2, пороговая чувствительность существенно ниже. Это объясняется тем, что при больших значениях  $R$  зависимость  $\alpha_{LOSS}(R)$  для трехслойного ВС находится в окрестности минимума интерференции ФМ и МШГ. Сформулированы и экспериментально реализованы условия, позволяющие реальный световод с конечной кварцевой оболочкой возбуждать в режиме, близком к режиму «бесконечной» оболочки. Экспериментально продемонстрирован ЧЭ измерительного преобразователя радиуса изгиба в виде отрезка одномодового ВС с «бесконечной кварцевой» оболочкой и параметрами  $V_{NORM}=0,74$ , и длину 30м. Установлено, что пороговая

чувствительность такого ЧЭ к радиусу изгиба составляет  $18\mu\text{м}$ , диапазон линейного участка зависимости выходной мощности от радиуса изгиба:  $5\div 18\mu\text{м}$ .

Продемонстрирована возможность измерения локальных параметров деформационных полей за счет регистрации интенсивности света на выходе

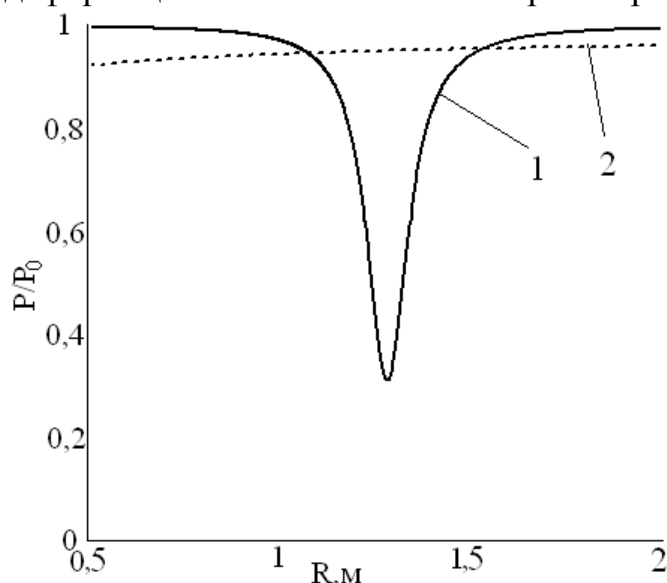


Рисунок 3 Зависимости  $P(R)/P_0$  для отрезков одномодовых ВС длиной  $1\text{мм}$ , имеющих  $V_{NORM}=0,54$ . Кривая 1 – ВС имеет конечную оптическую оболочку. Кривая 2 – «бесконечную».

короткого чувствительного отрезка волоконного световода. На основании расчетов установлено, что при создании ЧЭ такого типа длиной  $\sim 1\text{мм}$  наибольшую чувствительность обеспечивает использование трехслойного ВС со значением приведенной частоты  $V_{NORM}\sim 0,5\div 0,6$  и  $n_3-n_2\sim 5\cdot 10^{-3}$ , работающего в режиме резонансной связи мод сердцевин и первой оптической оболочки, что достигается

заданием начального прогиба ВС в ЧЭ. Для этого случая установлены зависимости нормированной мощности  $P(R)/P_0$  от радиуса изгиба (рисунок 3). Показано, что использование трехслойного световода с  $V_{NORM}=0,54$  ( $\rho=1,5\mu\text{км}$ ,  $b=62,5\mu\text{км}$ ,  $n_1=1,4682$ ,  $n_2=1,4626$ ,  $n_3=1,4977$ ,  $\lambda=1,6\mu\text{км}$ ) обеспечивает пороговую чувствительность  $\sim 1,4\mu\text{м}$  (что соответствует смещению  $\sim 100\text{нм}$ ), и линейную характеристику преобразования измеряемого радиуса в выходную мощность в диапазоне  $1,3\div 1,4\mu\text{м}$ . Показано, что резонансная связь мод такого световода достигается при начальном поперечном прогибе центральной части чувствительного участка ВС на  $\sim 0,1\mu\text{км}$ .

Продемонстрирована и экспериментально реализована возможность прецизионного измерения показателя преломления среды, окружающей кварцевую оболочку ВС, за счет регистрации интенсивности света на выходе изогнутого ВС при обеспечении в нем условий резонансной связи

фундаментальной моды сердцевины и мод шепчущей галереи кварцевой оболочки. Показано, что для ЧЭ в виде кольцеобразного участка световода с приведенной частотой  $V_{NORM}=2,13$  наилучшая пороговая чувствительность достигается при радиусе кольца  $7,5\text{мкм}$ , и составляет  $10^{-4}$ .

Во второй главе предложена методика создания на участках одномодовых ВС волоконных структур типа «перетяжка». На участке ВС с параметрами  $\rho=4,15\text{мкм}$ ,  $b=62,5\text{мкм}$ ,  $n_1=1,467$ ,  $n_2=1,4619$  сформированы данные волоконные структуры длиной  $\sim 500\text{мкм}$ , обеспечивающие значение приведенной частоты  $V_{NORM}=0,51$ , и  $V_{NORM}=0,61$  на длине волны  $\lambda=1,55\text{мкм}$ .

Исследованы процессы амплитудной модуляции направляемого оптического излучения в созданных «перетяжках» под воздействием поперечного и продольного смещения ее центральной части (рисунок 4).

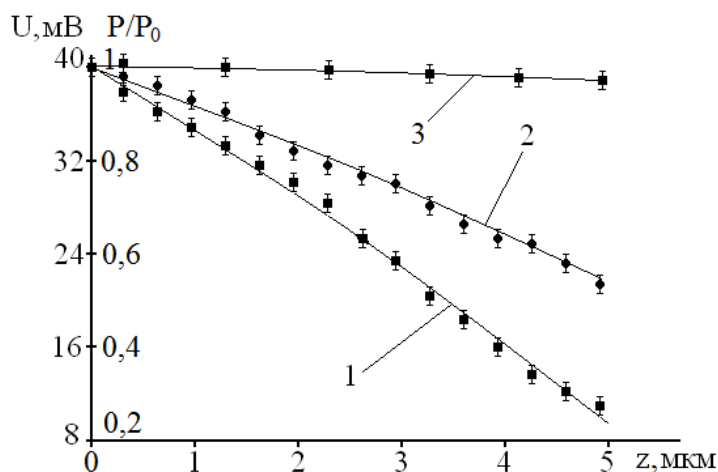


Рисунок 4 Экспериментальные зависимости нормированной мощности направляемого излучения от величины смещения «перетяжки». Вдоль оси ВС: Кривая 1 (маркер ■) -  $V_{NORM}=0,51$ . Кривая 2 (маркер ●) -  $V_{NORM}=0,61$ . В поперечном направлении: Кривая 3 (маркер ■) -  $V_{NORM}=0,51$ .

Показано, что при  $V_{NORM}=0,51$  пороговая чувствительность к поперечному смещению «перетяжки» достигает  $1,1\text{мкм}$ , при  $V_{NORM}=0,61$  -  $1,5\text{мкм}$ ; при аксиальном (вдоль оси ВС) смещении эти величины составляют, соответственно,  $85\text{нм}$  и  $140\text{нм}$ , что приблизительно в 15 раз лучше, чем при поперечном смещении. Это объясняется

тем, что при «сжимающем» аксиальном смещении достигается больший изгиб волоконного световода в области «перетяжки», чем при поперечном смещении. Поэтому, при создании измерительных преобразователей локальных деформационных полей с ЧЭ в виде «перетяжки» целесообразно

располагать ее таким образом, чтобы обеспечить возможность ее смещения в направлении вдоль оси волоконного световода. Показано, что в таком случае для обеспечения линейности характеристики преобразования величины смещения в выходной сигнал измерительного преобразователя необходимо обеспечить начальное продольное смещение «перетяжки» приблизительно на  $2,5\text{ мкм}$ .

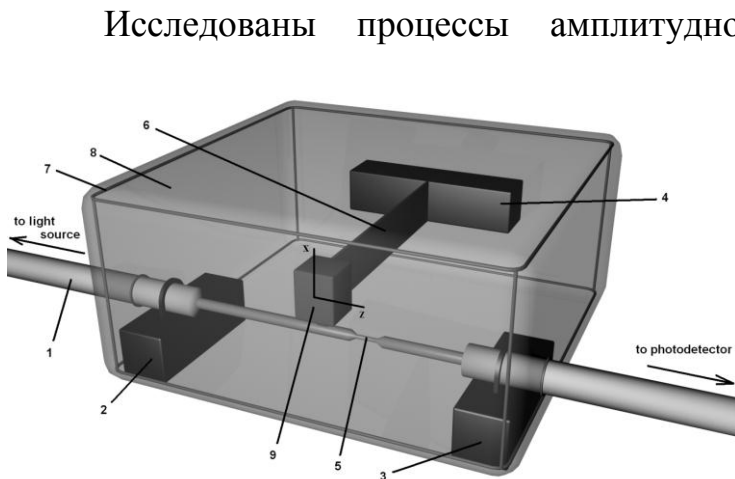


Рисунок 5 Схема волоконно-оптического измерительного преобразователя ускорения. 1) одномодовый волоконный световод. 2,3,4) неподвижные крепления. 5) перетяжка на участке одномодового волоконного световода. 6) плоский маятник. 7) герметичный корпус. 8) вязкая жидкость. 9) инерционная масса.

оптического излучения в волоконных структурах типа «перетяжка» под воздействием динамических деформаций в случае, когда вибрационные воздействия передаются чувствительному отрезку волоконного световода за счет движений пружинного маятника в направлении оси ВС. В результате предложен и исследован макет волоконно-

оптического измерительного преобразователя ускорения, в котором в качестве чувствительного элемента используется «перетяжка» одномодового ВС с  $V_{NORM}=0,51$  (рисунок 5).

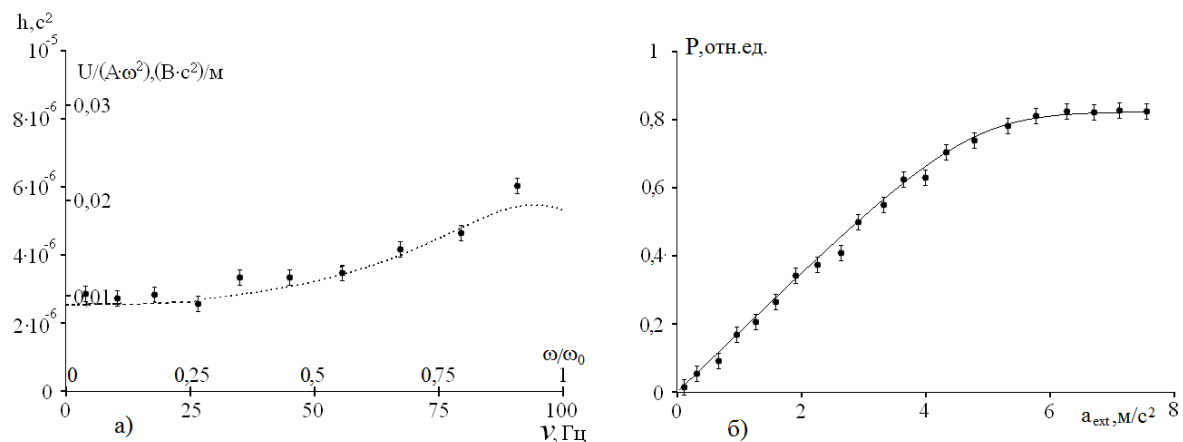


Рисунок 6 Характеристики измерительного преобразователя ускорения. а) Амплитудно-частотная характеристика чувствительного элемента

измерительного преобразователя. б) Зависимость выходного сигнала измерительного преобразователя от амплитуды ускорения внешней среды.

Достигнуты следующие характеристики измерительного преобразователя: пороговая чувствительность к ускорению на линейном участке АЧХ -  $3,7 \cdot 10^2 \text{ м/с}^2$ , диапазон линейности АЧХ  $2 \div 50 \text{ Гц}$ , динамический диапазон измерений -  $42 \text{ дБ}$ , дрейф выходного сигнала не более  $0,1 \text{ \% / сут}$ , температурный дрейф – не более  $0,2 \text{ \%}$  на  $1^\circ \text{C}$ . На рисунке 6 представлены зависимость выходного сигнала измерительного преобразователя от амплитуды ускорения внешней среды и его АЧХ.

В третьей главе разработана технология изготовления волоконных интерферометров Фабри-Перо, предназначенных для исследования фазовой модуляции направляемого оптического излучения в изгибаемых трехслойных одномодовых волоконных световодах. На основе стандартного одномодового ВС были созданы волоконные интерферометры Фабри-Перо длиной  $20 \text{ мм}$ , с коэффициентами отражения входного и выходного зеркал  $0,5$  и  $0,94$ , и радиусами изгиба  $7,5 \text{ мм}$ ;  $8,9 \text{ мм}$ , обеспечивающими условия резонансной связи между модами сердцевины и кварцевой оболочки.

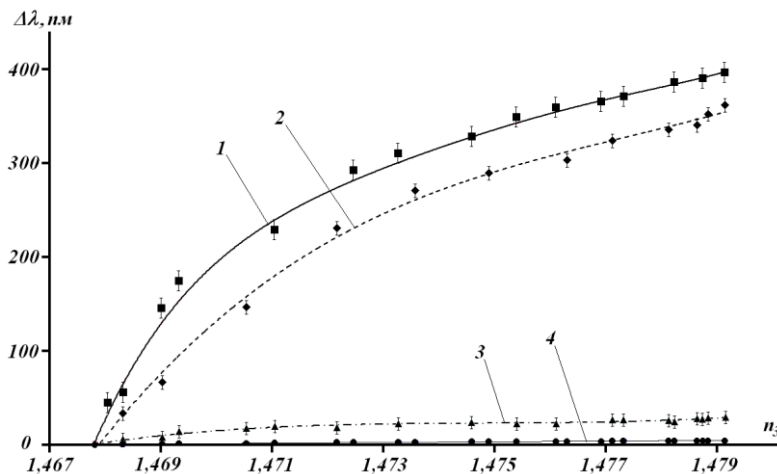


Рисунок 7 Зависимости величины сдвига интерференционных максимумов в волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо от показателя преломления внешней среды. Кривые 1,2 – при обеспечении резонансной связи ФМ и МШГ. Кривые 3,4 – при отсутствии такой связи.

оптической оболочки. Это приводит к соответствующему сдвигу

Показано, что фаза излучения, направляемого по изогнутому волоконному световоду наиболее эффективно изменяется в зависимости от показателя преломления внешней среды при обеспечения в нем резонансной связи направляемой моды сердцевины с модами

спектральных максимумов в изогнутом волоконном интерферометре Фабри-Перо. Зависимости величины сдвига интерференционных максимумов в волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо от показателя преломления внешней среды представлены на рисунке 7. Максимально достигнутые относительная фазовая  $\gamma_F = \frac{d\varphi \cdot \lambda}{dn_2 \cdot l_{FP}}$  и спектральная  $\gamma_S = \frac{d\lambda}{dn_2 \cdot \lambda}$  чувствительности изогнутого интерферометра Фабри-Перо с параметрами  $\rho=4,15\text{мкм}$ ,  $b=62,5\text{мкм}$ ,  $n_1=1,467$ ,  $n_2=1,4619$ ,  $l_{FP}=20\text{мм}$ ,  $R=7,9\text{мм}$  составляют, соответственно,  $0,71$  и  $0,077$ , что позволяет зарегистрировать минимальное изменение показателя преломления внешней среды на величину  $5 \cdot 10^{-6}$ .

В заклучении подводятся итоги проделанной работы и приводятся важнейшие результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

**Результаты данной диссертационной работы** сводятся в основном к следующему:

1. Теоретически и экспериментально исследованы процессы распространения направляемого оптического излучения в изгибаемых трехслойных одномодовых волоконных световодах, третий оптический слой которого образован внешней по отношению к кварцевой оболочке средой. В зависимости от соотношения показателей преломления внешней среды и кварцевой оболочки сформулированы условия, при которых достигается резонансная связь между фундаментальной модой кварцевой сердцевины ВС и модами шепчущей галереи его кварцевой оболочки. Разработана физико-математическая модель, позволяющая установить условия, обеспечивающие максимальную амплитудную и фазовую чувствительность направляемого по сердцевине ВС излучения к радиусу изгиба световода и показателю преломления среды, окружающей его кварцевую оболочку.

2. Теоретически и экспериментально показано, что в случае протяженных чувствительных элементов (ЧЭ) на основе трехслойных ВС



(используемых при проведении измерений радиусов изгиба в объектах протяженностью в десятки метров и более), наилучшую амплитудную чувствительность демонстрируют ЧЭ в виде ВС со значением приведенной частоты  $0,7 \div 0,8$ , погружаемые в иммерсионную среду с показателем преломления равным показателю преломления кварцевой оболочки ВС. Экспериментально продемонстрирован чувствительный элемент (ЧЭ) измерительного преобразователя радиуса изгиба на основе такого ВС. Установлено, что пороговая чувствительность данного ЧЭ к радиусу изгиба составляет  $18\text{м}$ , диапазон линейности измерений:  $5 \div 18\text{м}$ .

3. Теоретически и экспериментально показано, что при измерениях локальных параметров деформационных полей наилучшую амплитудную чувствительность к радиусу изгиба демонстрируют ЧЭ на основе трехслойных ВС со значением приведенной частоты  $0,5 \div 0,6$ , третий оптический слой которых образован полимерной оболочкой с показателем преломления выше, чем у кварцевой оболочки, в случае когда для такого световода обеспечиваются условия резонансной связи мод его кварцевой сердцевины и оболочки. Экспериментально продемонстрирован ЧЭ измерительного преобразователя деформационных полей на основе такого ВС. Установлено, что пороговая чувствительность данного ЧЭ к радиусу изгиба составляет  $\sim 1,4\text{м}$  (что соответствует смещению  $\sim 100\text{нм}$ ), диапазон линейности измерений:  $1,3 \div 1,4\text{м}$ .

4. Показано, что при измерении показателя преломления среды, окружающей кварцевую оболочку ВС, в качестве ЧЭ целесообразно использовать ВС со значением приведенной частоты  $V_{NORM} \sim 2,1$ , в случае когда для такого световода обеспечиваются условия резонансной связи мод его кварцевой сердцевины и оболочки. Показано, что для ЧЭ в виде кольцеобразного участка световода с приведенной частотой  $V_{NORM} = 2,13$  ( $\rho = 4,15\text{мм}$ ,  $b = 62,5\text{мм}$ ,  $n_1 = 1,467$ ,  $n_2 = 1,4619$ ) наилучшая пороговая чувствительность достигается при радиусе кольца  $7,5\text{мм}$ , и составляет  $10^{-4}$ .

5. Предложен чувствительный элемент в виде «перетяжки» стандартного одномодового ВС с приведенной частотой  $\sim 2,1$  со сниженным до  $\sim 0,5$  значением этого параметра в области шейки «перетяжки». Установлены требования к геометрии ЧЭ на основе такого ВС,

обеспечивающие высокую чувствительность к статическим и динамическим сдвиговым деформациям. Разработан макет волоконно-оптического измерительного преобразователя динамического ускорения на основе ЧЭ в виде «перетяжки» ВС. Достигнута пороговая чувствительность макета к динамическому ускорению на линейном участке АЧХ -  $3,7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$ , диапазон линейности АЧХ  $2 \div 50 \text{ Гц}$ , динамический диапазон измерений -  $42 \text{ дБ}$ , дрейф выходного сигнала не более  $0,1 \text{ \%}/\text{сут}$ , температурный дрейф – не более  $0,2\%$  на  $1^\circ\text{C}$ .

6. Продемонстрирована возможность измерения показателя преломления среды, окружающей кварцевую оболочку изогнутого ВС, за счет регистрации фазовых изменений в созданном на его основе интерферометре Фабри-Перо. Показано, что для обеспечения максимальной чувствительности к вариациям показателя преломления среды, окружающей кварцевую оболочку ВС целесообразно использование режима резонансной связи мод сердцевины и первой оптической оболочки для трехслойного ВС со значением приведенной частоты  $V_{NORM} \sim 2,1$ . Реализован макет прецизионного рефрактометра на основе ЧЭ в виде отрезка ВС с  $V_{NORM} \sim 2,1$  и радиусом изгиба  $7,9 \text{ мм}$ . Максимально достигнутые относительная фазовая  $\gamma_F = \frac{d\varphi \cdot \lambda}{dn_2 \cdot l_{FP}}$  и спектральная  $\gamma_S = \frac{d\lambda}{dn_2 \cdot \lambda}$  чувствительности составляют, соответственно,  $0,71$  и  $0,077$ . Установлено, что пороговая чувствительность макета достигает  $5 \cdot 10^{-6}$ .

**Материалы диссертационной работы полностью отражены в следующих публикациях:**

**В журналах из перечня ВАК:**

1. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.В. Дышлюк, С.О. Гурбатов. Метод регистрации деформаций изгиба с применением волоконных световодов с низким значением приведенной частоты. // Измерительная техника. - №2. – 2010. – с.47-49.
2. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, С.О. Гурбатов. Волоконно-оптический измерительный преобразователь вибраций. // Физическое образование в вузах. - т. 16. - №1. – 2010. – с. 39-40.
3. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.В. Дышлюк, С.О. Гурбатов. Амплитудная модуляция направляемого излучения в одномодовых волоконных световодах

с низкой приведенной частотой при воздействии сейсмических сигналов. // Измерительная техника. - №6. – 2011. – с. 30-32.

4. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, С.О. Гурбатов. Спектр изогнутого волоконного интерферометра Фабри—Перо при малых вариациях показателя преломления внешней среды. // Квантовая электроника, 2011, 41 (9), 821–823.

**В других журналах и сборниках трудов конференций:**

1. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.В. Дышлюк, С.О. Гурбатов. Волоконно-оптический метод мониторинга деформаций изгиба. // Фотон-экспресс. – т. 78. – №6. – 2009. – с.212-213.

2. Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk, S.O. Gurbatov. Optical fiber sensor of acoustic waves. // Pacific Science Review, vol.12, no.1, 2010. - pp.92.

3. Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, S.O. Gurbatov. Amplitude modulation of guided light in single-mode optical fibers with low normalized frequency under the influence of seismic signals. // Pacific Science Review, vol.12, no.1, 2010. - pp.89-91.

4. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, С.О. Гурбатов. Метод измерения показателя преломления на основе резонансной связи мод в изогнутом волоконном интерферометре Фабри-Перо // Фотон-экспресс. – т. 94. – №6. – 2011. – с.239-240.

5. Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, S.O. Gurbatov. The spectrum of a bent fiber Fabry-Perot interferometer under small variations of the refractive index of the environment // Proceedings of APCOM 2012. - pp.89-93.

6. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, С.О. Гурбатов. Амплитудная регистрация вибрационных процессов на основе одномодовых волоконных световодов с низкой приведенной частотой. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – с. 86-87.

7. С.О. Гурбатов, О.Б. Витрик, Ю.Н. Кульчин. Волоконно-оптический акселерометр для систем сейсмического зондирования. // Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике: тезисы докладов. – Владивосток: Издательство ДВГУ, 2010. – с.42-43.

8. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.В. Дышлюк, С.О. Гурбатов. Метод мониторинга деформаций изгиба с применением волоконных световодов с низким значением приведенной частоты. // Научная сессия НИЯУМИФИ-2010, сборник научных трудов: секция фотоника и информационная оптика. – Москва: МИФИ, 2010. – с. 36-38.

Гурбатов Станислав Олегович

Модуляция параметров фундаментальной моды в изгибаемых  
трехслойных одномодовых волоконных световодах

Автореферат

Подписано к печати 06.08.2012 г.

Усл.п.л. 1,2

Уч.-изд.л. 1,0

Формат 60×84/16.

Тираж 100 экз.

Заказ № 27

---

Издано ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, ул.Радио,5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.

690041, г. Владивосток, ул.Радио,5