

На правах рукописи



ХЛЫБОВ Артём Владимирович

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ
ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2004

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор С.И. Марков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.Н. Кожевников (СПбГПУ),
кандидат технических наук Б.В. Михайлов (ЗАО «ПРОЭЛ»)

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

Защита состоится 21 октября 2004 года в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан 20 сентября 2004 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01

доктор физ.-мат. наук, профессор



Водоватов И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Несмотря на 30-летнюю историю развития волоконно-оптических датчиков внимание к ним исследователей не ослабевает и по сей день [1]. Объясняется это уникальными свойствами таких датчиков: возможностью работы в агрессивных средах, при наличии электромагнитных помех, малым весом, высокой разрешающей способностью, широкой полосой частот, простотой передачи оптического сигнала, возможностью дистанционных измерений и создания распределённых измерительных систем [2]. Наилучшими характеристиками обладают интерферометрические волоконные датчики, среди которых наибольшее распространение нашли двухлучевые схемы на основе интерферометров Маха-Цендера, Майкельсона, Саньяка. Именно такие датчики доведены до коммерческого уровня и применяются для измерения скорости вращения, тока, акустического давления, вибраций и т.д. К интерферометрическим волоконным датчикам относятся и поляриметрические, в которых используется интерференция двух ортогонально поляризованных волн, приводящая к изменению состояния поляризации света на выходе волокна. Наиболее привлекательной особенностью поляриметрических датчиков является существенная простота оптической схемы по сравнению с традиционными двухлучевыми интерферометрами. Поляриметры допускают безразрывную одноволоконную конфигурацию, т.е. использование оптических разветвителей или соединителей не является необходимым. Однако, общепризнанным считается, что поляриметрические датчики на 2-3 порядка уступают по чувствительности и разрешающей способности двухлучевым интерферометрическим датчикам. Как показал анализ литературы, причиной такого положения является недостаточность исследований механизмов создания поляризационной модуляции, а также методов приёма и обработки поляризационно модулированных сигналов, отсутствие простых и эффективных методов поляризационного согласования оптических элементов поляриметров. Решение отмеченных проблем необходимо для разработки волоконного датчика широкого применения, обладающего всеми преимуществами поляриметров, и, вместе с тем, имеющего высокую разрешающую способность, поэтому представляется актуальным.

Цель работы. Разработка физико-теоретических основ создания эффективных поляриметрических волоконных датчиков, сравнимых по характеристикам с двухлучевыми интерферометрическими датчиками. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать критерий эффективности для способов создания поляризационной модуляции с помощью упругооптического эффекта и провести их сравнительный анализ с целью выявления наиболее эффективного.

2. Теоретически и экспериментально исследовать наиболее эффективные механизмы поляризационной модуляции с изменением разности фаз поляризационных мод и изучить возможность их применения для поляризационных модуляторов и чувствительных элементов поляриметров.
3. Реализовать оптимальный метод приёма и обработки поляризационных сигналов, наиболее подходящий для создания дистанционных поляриметрических датчиков.
4. Разработать простую и высокоточную методику поляризационного согласования оптических элементов поляриметров при условии когерентного источника света.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые

1. На основе предложенных критериев эффективности выполнен сравнительный анализ механизмов модуляции линейного двулучепреломления одномодового волокна с помощью упругооптического эффекта. Выявлен наиболее эффективный способ модуляции разности фаз поляризационных мод при поперечном сдавливании стеклянного световода, решена упругооптическая задача определения его эффективности.
2. Экспериментально и теоретически исследованы поляризационные модуляторы и чувствительные элементы поляриметрических датчиков, использующих эффективные способы создания поляризационной модуляции. Созданы модуляторы с эффективностью более чем в 10^2 раз превышающие известные из литературы аналоги. Продемонстрированы чувствительные элементы виброметрических и акустических поляриметрических датчиков с параметрами, близкими к двухлучевым интерферометрам.
3. Реализована и исследована дистанционная схема поляриметрического датчика с псевдогетеродинным приёмом сигналов, обладающая низким уровнем шумов, высокой устойчивостью к паразитным внешним воздействиям, простотой оптоэлектронных устройств.
4. Разработана и исследована методика определения поляризационных свойств двулучепреломляющих волокон с применением когерентных источников света, отличающаяся простотой реализации и высокой точностью.

Достоверность результатов, полученных теоретически, основывается на согласии с многочисленными экспериментальными данными. При нахождении аналитического выражения для эффективности поляризационного модулятора, работающего за счёт поперечного сдавливания волокна, было получено согласие результатов теоретических (строгими методами теории упругости), экспериментальных (проведены необходимые эксперименты, точность которых вполне удовлетворительна) и расчётных (численное решение задачи методом конечных элементов с помощью специального программного обеспечения). Достоверность некоторых результатов подтверждается согласием с результатами других работ, посвящённых данной тематике.

Практическая ценность данной работы состоит в непосредственной применимости её результатов для конструирования и расчёта характеристик волоконных поляризационных модуляторов и чувствительных элементов поляриметров. Особенно ценным является подробный теоретический расчёт упругооптического эффекта, связанного с поперечным сдавливанием волокна, полученные результаты могут применяться для создания новых типов модуляторов двулучепреломления и чувствительных элементов поляриметров.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В классе волоконных поляриметрических датчиков наибольшей эффективностью (чувствительностью, разрешением, стабильностью, дистанционностью измерений) обладают волоконно-оптические поляриметрические датчики с псевдогетеродинным режимом приема сигналов и модуляцией разности фаз поляризационных мод.
2. Для характеристики модуляции разности фаз поляризационных мод наибольшую информативность имеет коэффициент эффективности, представляющий отношение наведенной разности фаз поляризационных мод к длине световода и величине геометрического перемещения элемента воздействия размерностью [радиан/мкм·м].
3. Максимальной эффективностью обладает волоконно-оптический модулятор двулучепреломления на основе поперечного сдавливания световода, превосходящий другие известные волоконно-оптические модуляторы более чем на два порядка.
4. На основе эффекта поляризационной модуляции при поперечном сдавливании волокна возможно создание высокочувствительных одноволоконных датчиков с параметрами, близкими к параметрам двулучевых интерферометрических преобразователей.
5. В когерентных волоконно-оптических устройствах с двулучепреломляющими световодами для точного поляризационного согласования элементов целесообразно применять интерференционный метод с использованием модуляционных сигналов.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: «Лазеры. Измерения. Информация». Международная научная конференция, Санкт-Петербург, июнь 2003 и июнь 2004; «Молодые учёные – промышленности Северо-Запада», научно-технический симпозиум, Санкт-Петербург, декабрь 2002; «Неделя науки СПбГПУ», межвузовская научная конференция, Санкт-Петербург, ноябрь 2002.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 8 статей в сборниках тезисов конференций и научно-технических журналах.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа изложена на 215 страницах, состоит из введения, обзора литературы и 7-и глав, содержащих результаты, заключения, приложения и списка ис-

пользуемой литературы из 130 наименований, иллюстрируется 112 рисунками и графиками и содержит 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором приведены данные из различных источников по физике двулучепреломляющих волоконных световодов, их типам, характеристикам и способам описания поляризационных свойств (п. 1.1); рассматривается упругооптический эффект в волокнах (п. 1.2), а также дано описание чувствительных элементов поляриметрических и эквивалентных двухлучевых интерферометрических волоконных датчиков (п. 1.3) некоторых физических величин.

Во второй главе подробно рассматриваются упругооптические эффекты, с помощью которых можно создать модуляцию разности фаз поляризационных мод волокна без изменения их амплитуд. Все рассматриваемые эффекты приводят к изменению величины полного линейного двулучепреломления волокна β , из них выбирается наиболее эффективный способ с точки зрения энергетических затрат на деформацию волокна.

Результаты расчётов производной двулучепреломления β (в рад/м) по удельной энергии деформации V (в Дж/м) для каждого способа изменения двулучепреломления дают возможность выбрать для дальнейшего подробного изучения поперечное сдавливание волокна. В таблице 1 приведены соответствующие формулы и расчёт для типичных параметров волокна.

$\frac{d\beta}{dV}$	Продольное растяжение	Изгиб с натяжением	Чистый изгиб	Поперечное давление
Аналитическое выражение	$\frac{\beta_0 Q}{2\pi r^2 E \varepsilon}$	$C_s \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{\pi r^2 E \varepsilon}$	$\frac{4C_s}{\pi r^2 E}$	$\frac{C_s}{rA(P)}$
Расчётная величина, [рад/Дж]	$3,95 \cdot 10^7$	$2,26 \cdot 10^6$	$1,81 \cdot 10^4$	$5,63 \cdot 10^9$

Таблица 1.

В таблице обозначено: $\beta_0 = 2\pi/\Lambda$ - величина собственного двулучепреломления волокна, Λ - длина биений; $Q = \frac{d\beta \cdot L}{dL \cdot \beta}$ - безразмерный коэффициент, характеризующий изменение собственного двулучепреломления при растяжении волокна; E, r - модуль Юнга и радиус волокна; ε - продольная деформация при растяжении; R - радиус изгиба; $C_s = 2,7 \cdot 10^6$ рад/м (при длине волны $\lambda = 0,633$ мкм) - упругооптический коэффициент кварца; P - начальное поперечное давление; $A(P)$ - безразмерная функция, явный вид которой приведён ниже.

В третьей главе рассмотрены поляризационные модуляторы, изменяющие разность фаз поляризационных мод без изменения их амплитуд с помощью рассмотренных выше упругооптических эффектов. Для сравнения этих модуляторов вводится величина эффективности K преобразования абсолютных механических деформаций δl в разность фаз поляризационных мод $\delta\varphi$ на единицу активной длины волокна L : $K = \frac{\delta\varphi}{\delta l \cdot L}$, $\left[\frac{рад}{мкм \cdot м} \right]$.

Почти все модуляторы были изготовлены на базе пьезокерамических резонаторов, преобразующих электрическое напряжение в деформацию (пьезоэффект). Пьезокерамики хорошо подходят для создания волоконных модуляторов, т.к. хорошо согласованы с волокном по жёсткости и могут сообщать ему большую механическую энергию, имеют линейный отклик в большом диапазоне амплитуды электрического напряжения, обладают низкой стоимостью и возможностью безразъёмной установки на волоконный тракт.

В таблице 2 представлены внешний вид модуляторов, расчётные и экспериментальные данные их эффективности K и формулы для вычисления K . В экспериментах использовались изотропное волокно и двулучепреломляющее с эллиптической напрягающей оболочкой. Величина δl измерялась волоконным интерферометром Фабри-Перо или «открытым» интерферометром Майкельсона. В большинстве случаев достигнуто хорошее согласие расчётных и экспериментальных данных. Различная эффективность разных способов создания поляризационной модуляции объясняется тем, что изменение двулучепреломления для них зависит от поперечной деформации, имеющей различный порядок малости относительно наибольшей главной деформации. Например, для чистого изгиба – эффект второго порядка малости, для продольного растяжения и изгиба с натяжением – первого порядка малости, для поперечного давления – прямая пропорциональность.

Дополнительные результаты экспериментальных исследований следующие. Продемонстрированы способы экспериментального определения а) константы Q волокна с упруго-неоднородным профилем поперечного сечения с помощью результатов эксперимента с волоконным резонатором Фабри-Перо и б) упругооптической постоянной C_S изотропного волокна методом чистого изгиба. Для модулятора, использующего чистое растяжение, продемонстрировано отсутствие влияния наведённого двулучепреломления от изгиба с натяжением (если пьезокерамический резонатор представляет собой цилиндр). Показано, что эффективность модулятора, использующего изгиб с натяжением, не зависит от начального натяжения волокна. Кроме того, показано, что защитная оболочка сильно уменьшает потенциальную эффективность модуляторов, использующих поперечное давление, т.к. её модуль Юнга на 2-3 порядка ниже, чем стеклянной части волокна; в связи с чем оболочке передаётся пропорционально большая часть механической энергии.

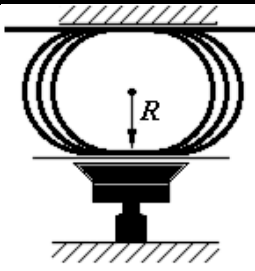

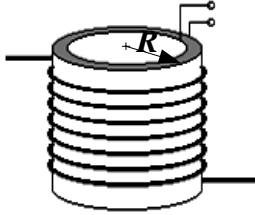

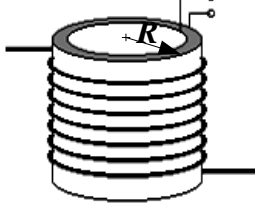

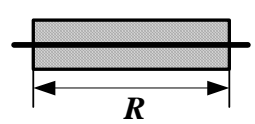

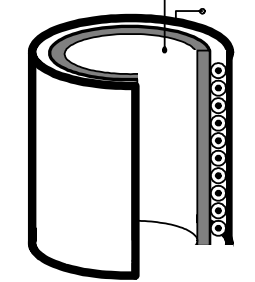

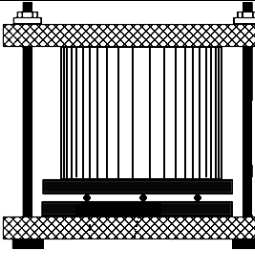

	Коэфф-т эффективности K	Вид модуляторов	Тип волокна	Расчёт K , рад/(мкм·м)	Эксперимент K , рад/(мкм·м)
1. Чистый изгиб	$\frac{1}{2} C_s \frac{r^2}{R^2}$			$2,79 \cdot 10^{-3}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$
				$R = 1,1$ см (радиус изгиба), $r = 50$ мкм (радиус волокна), $L = 0,35$ м (активная длина)	
2. Изгиб с натяжением	$2C_s \cdot \frac{r}{R^2}$			2,68	2,2
				$R = 0,95$ см, $r = 50$ мкм, $L = 2,21$ м	
3. Чистое растяжение	$\frac{(1+Q) \cdot \beta}{R}$			7,93	7,27
				$Q = 20,6$, $\Lambda = 1,8$ мм (длина биений), $R = 0,95$ см, $L = 2,45$ м	
				0,754	1
4. Поперечное давление	$\frac{2C_s}{r} \cdot \frac{1}{A(P)}$			7300	25*
				$P = 100$ Н/м (начальное давление), $r = 62,5$ мкм, $L = 2,21$ м	
				8300	2000
				$P = 100$ Н/м, $r = 62,5$ мкм, $L = 0,08$ м	

Таблица 2.

В четвёртой главе подробно изучается самый эффективный способ создания модуляции разности фаз поляризационных мод из рассмотренных – поперечное сдавливание

волокна без защитной оболочки. Для нахождения величины K в явном виде здесь необходимо найти зависимость полного перемещения l сдвигивающих пластин в поперечном направлении от приложенного давления P . Для этого решается задача о стержне, сжатом между плоскопараллельными пластинами. Используется обобщённое решение плоской задачи теории упругости – о полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой, выбираются соответствующие граничные условия. Поскольку это решение имеет особенность в точке контакта двух тел, то применяются методы контактной теории упругости (задача Герца) [3]. В результате, после нахождения в явном виде интеграла перемещений, найдена искомая зависимость

$$l(P) = \frac{2P}{\pi} \cdot \left\{ \left[\ln \left[\frac{\pi r E_1 E_2}{P \cdot (E_1 + E_2 - \mu_1^2 E_1 - \mu_2^2 E_2)} \right] + 1 \right] \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) - \frac{E_1 + E_2 + \mu_1 E_2 + \mu_2 E_1}{E_1 E_2} \right\},$$

где E_1, μ_1, E_2, μ_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона волокна (индекс «1») и пластин (индекс «2»), r – радиус стеклянной части волокна.

Этот результат был проверен с помощью численных расчётов методом конечных элементов (МКЭ). Получено хорошее согласие теории и расчёта – см. рис. 1.

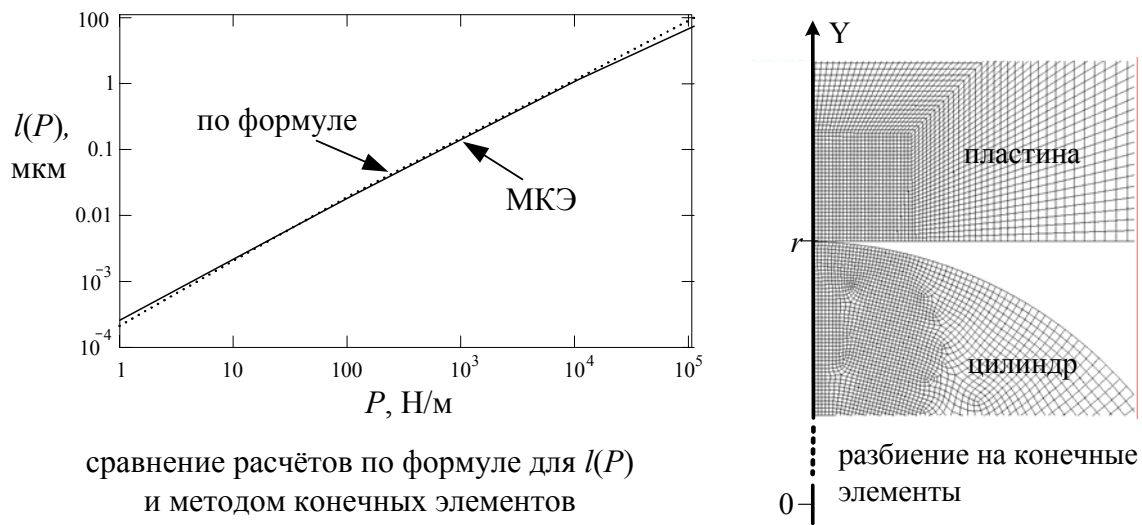


Рис.1.

В итоге найдено выражение для эффективности: $K = \frac{2C_s}{r} \cdot \frac{1}{A(P)}$, где

$$A(P) = \left(1 - \mu_1^2 + \frac{E_1}{E_2} (1 - \mu_2^2) \right) \ln \left[\frac{\pi r E_1 E_2}{P (E_1 + E_2 - \mu_1^2 E_1 - \mu_2^2 E_2)} \right] - \left[1 + \mu_1 + \frac{E_1}{E_2} (1 + \mu_2) \right].$$

Пункт 4.4 посвящён экспериментальной проверке величины K с помощью конструкции, приведённой на рис. 2 (вид сверху). Исследовалось изотропное волокно радиусом $r = 62,5$ мкм, активная длина $L = 1,7$ см, сдвигивающие пластины алюминиевые. Величина начального давления $P = 500$ Н/м. Результаты эксперимента достаточно хорошо соот-

ветствуют теории (рис. 3). Измерение амплитуды сдвигания δl проводилось открытым интерферометром Майкельсона, индекса модуляции $\delta\varphi$ - по осциллографу.

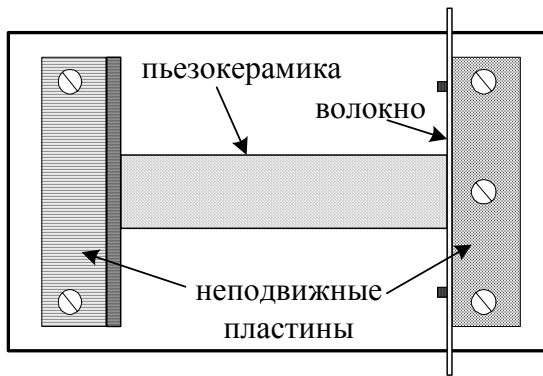


Рис.2.

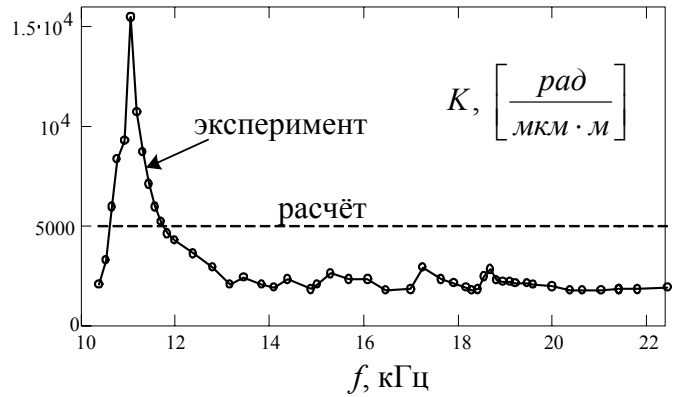
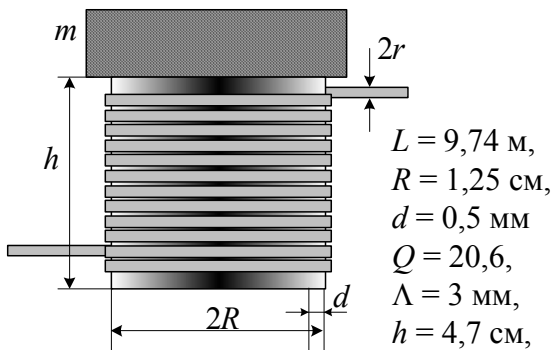


Рис.3.

Пятая глава посвящена исследованию чувствительных элементов волоконных поляриметрических датчиков некоторых физических величин. В пункте 5.1. рассмотрены принципы измерения вибраций и ускорений с помощью простейшей колебательной механической системы, называемой пружинным маятником [4]. Рассматриваются предельные случаи функции отклика этой системы: виброметрический режим (соответствует послерезонансной области) и акселерометрический (область частот от нуля до резонанса). Обсуждается влияние дополнительного демпфирования на характеристики системы.

Пункты 5.2. и 5.3. посвящены исследованию чувствительных элементов поляриметра для измерения вибраций и ускорений: 1) работающего за счёт растяжения волокна (волокно деформируется в результате изменения радиальных размеров алюминиевой мандреллы) – рис. 4-6; 2) в пункте 5.3. рассматривается чувствительный элемент, работающий за счёт сдвигания волокна – рис. 7-9. С помощью методов теории упругости получены формулы для оценки чувствительности таких элементов в вибро- и акселерометрическом режимах (обозначено соответственно В и А).



Мандрельный чувствительный элемент (растяжение волокна)

Рис. 4.

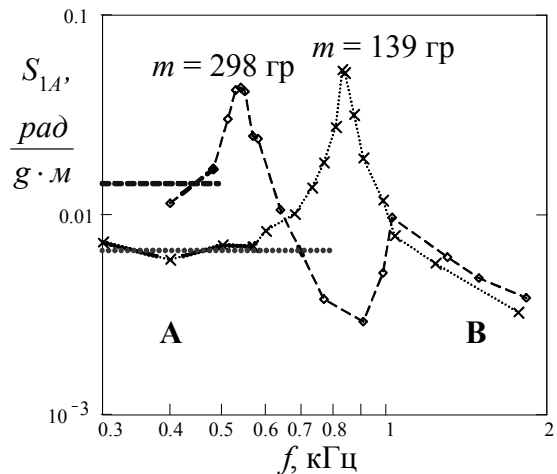
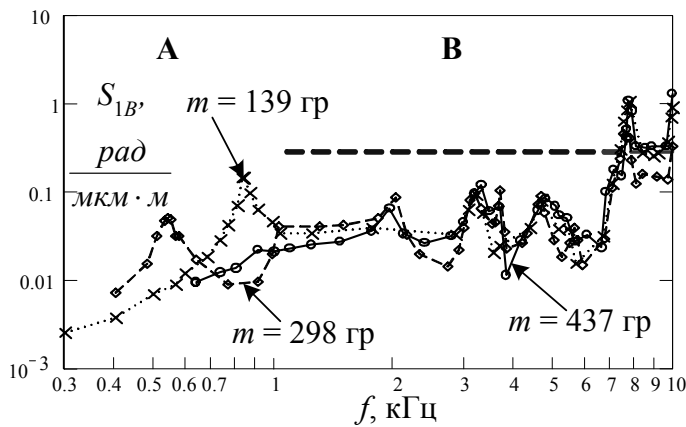


Рис. 5.



$$S_{1A} = 9,8 \cdot \frac{(1+Q) \cdot \beta \cdot \mu \cdot m}{2\pi \cdot R \cdot d \cdot E}$$

$$S_{1B} = \frac{\delta\varphi}{L \cdot \delta l} = \frac{(1+Q) \cdot \beta \cdot \mu}{h}$$

$$E = 7,7 \cdot 10^{10} \text{ Па,}$$

$$\mu = 0,17$$

Рис. 6.

На рисунках m – величина инерционной массы, индекс «1» – для элемента, где волокно испытывает продольную деформацию, «2» – для элемента, где волокно испытывает поперечную деформацию. Горизонтальными линиями отмечены расчётные значения.

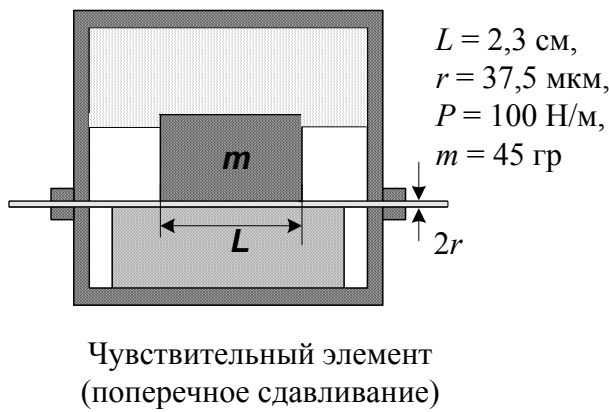


Рис. 7.

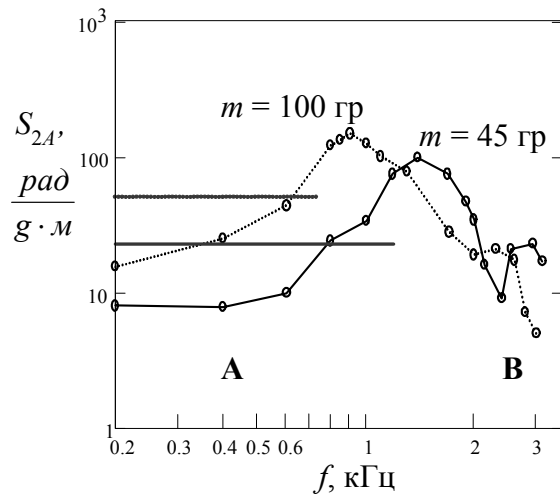
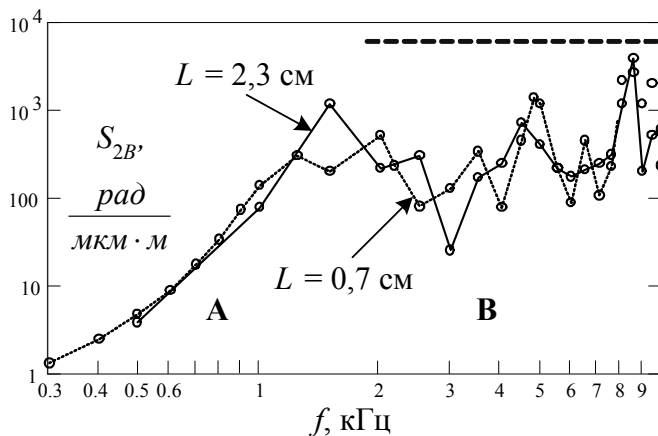


Рис. 8.



$$S_{2A} = \frac{\delta\varphi}{a \cdot L} = 9,8 \cdot \frac{4C_s \cdot m}{\pi r E \cdot L}$$

$$S_{2B} = \frac{\delta\varphi}{\delta l \cdot L} = \frac{2C_s}{r} \cdot \frac{1}{A(P)}$$

$$C_s = 2,7 \cdot 10^6 \text{ рад/м}$$

Рис. 9.

Результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с расчётами, их расхождение для второго чувствительного элемента вызвано неидеальностью поверхности волокна, освобождённого от защитной оболочки, и недостатками конструкции. Показана

возможность описания таких сложных механических колебательных систем, какими являются чувствительные элементы, упрощённым линейным дифференциальным уравнением второго порядка, соответствующего уравнению пружинного маятника. Для виброметрического режима чувствительность второго элемента оказалась сравнима с элементами двухлучевых интерферометрических датчиков. Применение таких чувствительных элементов будет привлекательным там, где можно обеспечить достаточно большую длину взаимодействия с волокном без потери чувствительности. Это возможно, например, при измерении сейсмических колебаний, вибраций тяжёлого оборудования и т.п., т.е. где энергия измеряемых колебаний может быть велика.

Пункты 6.4. и 6.5. посвящены исследованию акустических чувствительного элемента, использующих продольное растяжение и поперечное давление волокна. Первый изготовлен мандрельным способом, второй – преобразует давление звуковой волны на диафрагму в давление на волокно – мембранного типа. Найдены оценки для чувствительности таких элементов в низкочастотном диапазоне (соответственно индексы «1» и «2»), когда длина звуковой волны больше размеров элемента:

$$S_1 = \frac{\delta\varphi}{\delta P \cdot L} \approx \frac{\beta(Q+1)R}{E_0 \cdot d}, \quad S_2 = \frac{\delta\varphi}{\delta P} = \frac{4C_s}{\pi r E} \cdot S,$$

где E_0 – модуль Юнга цилиндрической алюминиевой мандреллы, имеющей радиус $R = 4,25$ см и толщину стенок $d = 0,1$ мм. Константа $Q = 20,6$. S – площадь диафрагмы (50 см^2). Для элемента, использующего поперечное сдавливание, чувствительность не зависит от активной длины волокна, а только от площади мембраны S , в связи с чем в выражение для чувствительности не входит L .

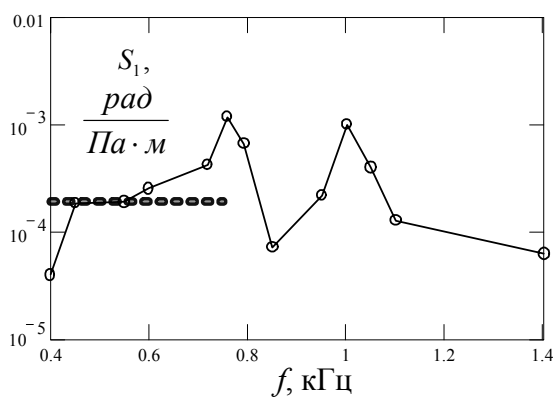


Рис. 10.

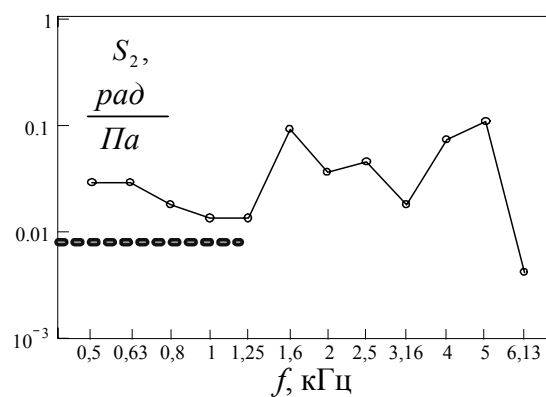


Рис. 11.

Оценки удовлетворительно описывают экспериментально полученные данные (рис. 10 и 11). АЧХ элементов имеет сильную неравномерность в звуковом диапазоне, обусловленную их достаточно большими размерами. Конструкции чувствительных элементов не оптимизировались. Типичная чувствительность акустических элементов двухлучевых дат-

чиков примерно на 2 порядка выше, чем исследованных поляриметрических. Эксперименты продемонстрировали возможность регистрации акустических колебаний с помощью чувствительного элемента нового типа, в котором осуществляется преобразование энергии звуковых волн в энергию поперечной деформации оптического волокна.

Шестая глава посвящена исследованию волоконного поляриметрического датчика с псевдогетеродинным приёмом сигналов. Рассматриваемая схема псевдогетеродина [5] для волоконных поляриметрических датчиков предлагается впервые. Её реализация стала возможной после создания эффективных поляризационных модуляторов, не приводящих к связи мод волокна, а также чувствительных элементов поляриметров.

Для работы схемы требуется гармоническая вспомогательная поляризационная модуляция с индексом порядка π рад (частота $f = 15$ кГц), что может быть реализовано с помощью одного из рассмотренных в работе эффективных поляризационных модуляторов. Чувствительный элемент в данной схеме может быть удалён на расстояние порядка сотен метров от других элементов схемы. Датчик может быть выполнен с использованием единого отрезка волокна для всех оптических элементов, что уменьшает потери энергии и экстинкцию по сравнению с разъёмными соединениями элементов.

В пункте 6.1 описана схема датчика (рис. 12), показана её работоспособность, т.е. возможность формирования гетеродинного сигнала путём полупериодного стробирования сигнала фотоприёмного устройства (ФПУ) с последующим выделением второй гармоники вспомогательной частоты ($2f = 30$ кГц), которая является опорной частотой гетеродина. Полупериодное стробирование, синхронизированное с вспомогательной модуляцией, осуществляется ключевой схемой.

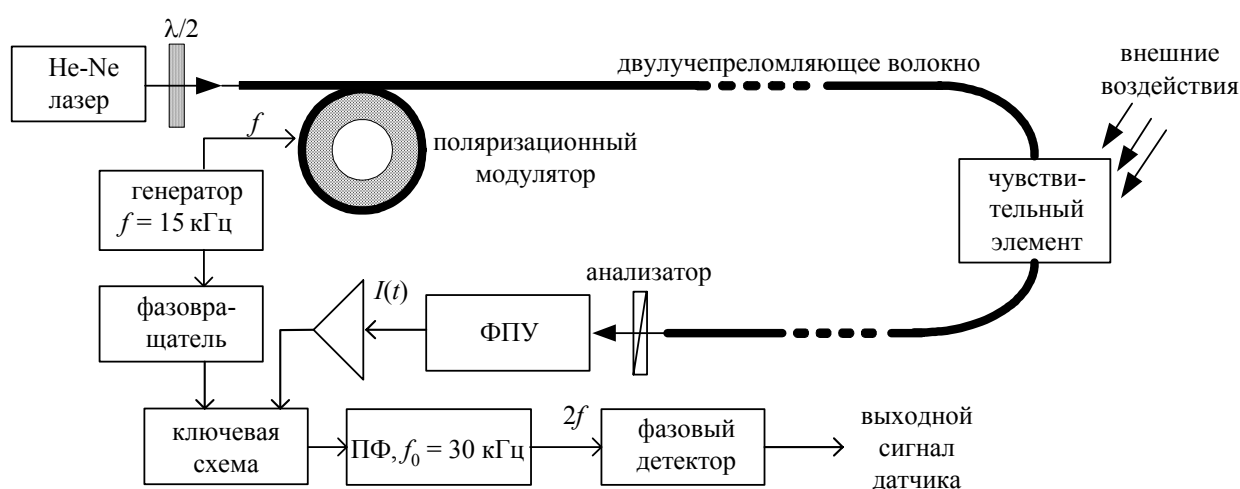


Рис. 12.

На осциллограмме, представленной на рис. 13, показан сигнал ФПУ; информационная поляризационная модуляция (низкочастотная), внесённая чувствительным элементом, хорошо заметна на фоне вспомогательной. На рис. 14 показан сформированный в результате

электронной обработки этого сигнала гетеродинный (т.е. фазомодулированный) сигнал, из которого фазовым детектором извлекается полезный сигнал.

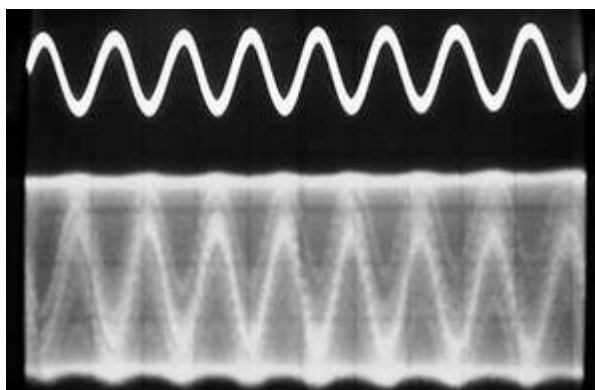


Рис.13.

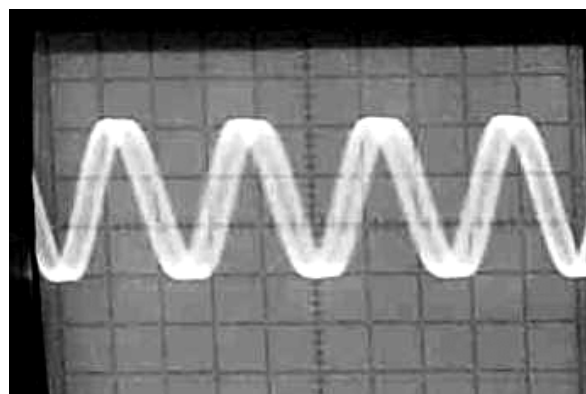


Рис.14.

В фазовом детекторе происходит выделение полезной составляющей сигнала. Также предусмотрено подавление медленных флуктуаций фазы, вызванных тепловым дрейфом. Определены коэффициенты преобразования и собственные шумы фазовых детекторов, использованных в экспериментах. Разрешающая способность фазового детектора составила величину порядка 1 мкрад/Гц^{1/2}.

В пункте 6.3. получено аналитическое выражение для выходного сигнала $I(t)$ оптической части схемы датчика; используется матричный метод Джонса [6].

$$I = I_0 + I_{\sim}(t), \quad I_0 = \cos^2 2\alpha \cdot \cos^2 \rho + \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \rho,$$

$$I_{\sim}(t) = \frac{1}{2} \sin 4\alpha \cdot \sin 2\rho \cdot \sin[p \cdot \cos(\omega t) + \delta\varphi(t) + \varphi_0],$$

где α - угол поворота пластинки $\lambda/2$ на входе, ρ - угол поворота анализатора, p - индекс вспомогательной модуляции, ω - её частота, $\delta\varphi(t)$ – полезный сигнал, φ_0 – начальная фаза (подвержена медленным уходам). Приведены экспериментальные и расчётные зависимости оптического сигнала при вращающемся анализаторе, с помощью которых можно определить входной угол 2α и степень возбуждения собственных мод волокна. Предложены методики визуального определения с высокой точностью оптимального входного угла $2\alpha = 45^\circ$ (равномерное возбуждение мод) и коэффициента экстинкции оптической схемы по осциллограмме сигнала фотоприёмника при вращающемся анализаторе.

Пункт 6.4. посвящён нахождению оптимального индекса вспомогательной модуляции, при котором отсутствует паразитная амплитудная модуляция сигнала на входе фазового детектора. Для этого сигнал фотоприёмника в аналитической форме подвергается преобразованиям, соответствующим его обработке в электронной части датчика. Находится условие равенства амплитуд квадратурных составляющих, которое определяет оптимальный индекс: $p = 2,82$ рад. Также рассмотрен случай влияния расстройки p от опти-

мального значения на искажения передаточной характеристики датчика. Продемонстрировано, что это может приводить к систематической погрешности измерений.

В пункте 6.5. изучаются шумы на выходе ФПУ. Они складываются из фазовых шумов, связанных с частотными и интенсивностными шумами источника, и шумов фотодетектирования. Частотные шумы источника характеризуются его спектральной полушириной линии $\Delta\nu_{1/2}$, интенсивностные – величиной RIN (относительной нестабильностью интенсивности). Шумы фотодетектирования включают дробовый шум фототока, дробовый шум фоновой засветки и темнового тока, и тепловые шумы нагрузочного сопротивления. Получена формула для полных фазовых шумов датчика в полосе Δf , включающая в себя все перечисленные виды шумов

$$\delta\phi_o = \sqrt{\Delta f} \cdot \sqrt{4\pi \cdot \Delta\nu_{1/2} \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda}{c \cdot n \cdot \Lambda}\right)^2 + \frac{(U \cdot RIN)^2 + 2q \cdot (R \cdot U + I_T \cdot R^2) + 4k \cdot T \cdot R}{(0,48 \cdot U)^2}},$$

где n , Λ – показатель преломления и длина биений поляризационных мод волокна, L – длина трассы, U , R , I_T – напряжение фотоприёмника, его нагрузка и темновой ток, T – температура, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана. Показано, что наибольший вклад в шумы вносят интенсивностные шумы лазера и частотные при большой длине волоконной трассы. Экспериментально получен уровень шумов на выходе ФПУ 3 мкрад/Гц^{1/2} для He-Ne лазера и 0,3 мкрад/Гц^{1/2} для полупроводникового лазера, длина трассы составляла $L = 2$ м. Полученные значения близки к расчётным.

Влияние частотных шумов лазера может быть устранено балансировкой разности хода поляризационных мод [7], что позволяет дополнительно повысить разрешающую способность датчика. Требования к точности балансировки датчика на 2-3 порядка ниже, чем для классической двухлучевой схемы.

Динамический диапазон датчика определялся фазовым детектором (около $1,5 \cdot 10^6$), а не чувствительным элементом. Частотный диапазон датчика ограничивался полосовым фильтром и АЧХ фильтра фазового детектора – в нашем случае от 200 Гц до 7 кГц.

Седьмая глава посвящена описанию методики определения собственных оптических осей волокна с помощью интерференционного подхода. Методика заключается в регистрации интенсивности интерферирующих на анализаторе поляризационных мод волокна, а именно наибольшего и наименьшего значения интенсивности. При этом изменение разности фаз мод на величину более π рад происходит, например, за счёт нагрева участка волокна. Полученные значения I_{\min} и I_{\max} используются для вычисления функций

$$K(\rho, \alpha) = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{I_0} = \sin^2(\rho) \cdot \cos^2(\rho) + \cos^2(\alpha) \cdot \cos^4(\rho) + \sin^2(\alpha) \cdot \sin^4(\rho),$$

$$M(\rho, \alpha) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \left| \frac{\sin(2\alpha) \cdot \sin(2\rho)}{2(\cos^2(\rho) \cdot \sin^2\rho + \cos^2(\alpha) \cdot \cos^4(\rho) + \sin^2(\alpha) \sin^4(\rho))} \right|,$$

где угол α определяет степень возбуждения мод ($\alpha = \arctg(C_1/C_2)$), ρ - угол поворота анализатора, I_0 – максимально возможная величина интенсивности во всём диапазоне угла ρ . Значения функций K и M измеряются в диапазоне $\rho \in [0, 180^\circ]$ с шагом 1° - 5° . По 30-40 точкам этих функций с помощью метода наименьших квадратов представляется возможным определить α с точностью выше 1° , а также направления оптических осей волокна ρ_1 и ρ_2 ; пример приведён на рис. 15. Коэффициент экстинкции определяется по формуле

$$\eta = 10 \lg \left(\frac{M_{\min 1} \cdot M_{\min 2}}{4} \right).$$

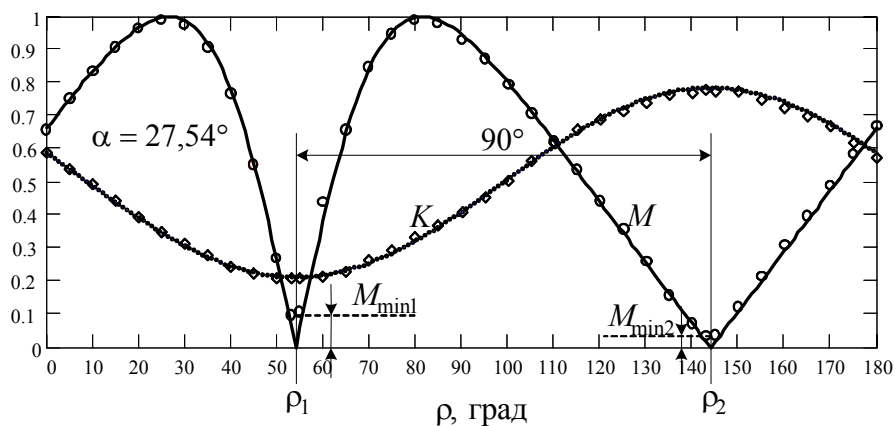


Рис. 15.

В рассмотренном методе предполагается, что свет полностью поляризован.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Проведено сравнение различных методов создания модуляции разности фаз поляризационных мод волокна (без изменения их амплитуд) с помощью упругооптического эффекта по энергетическим затратам и коэффициенту преобразования K (эффективности). Решена упругооптическая задача о сдавливании стеклянного цилиндрического световода между двумя плоскопараллельными пластинами. Получено, что метод поперечного сдавливания эффективнее других упругооптических методов на 2-3 порядка.
2. Показано, что максимальной эффективностью (до 10^4 рад/(мкм·м)) обладает волоконно-оптический модулятор двулучепреломления на основе поперечного сдавливания световода, превосходящий другие волоконные поляризационные модуляторы более чем на два порядка.
3. Разработаны чувствительные элементы поляриметрических датчиков для измерения вибраций и ускорений. Методами теории упругости были сделаны оценки их чувствительности в соответствии с моделью «пружинный маятник», удовлетворительно согла-

сующихся с экспериментальными данными. Экспериментальная чувствительность виброметра-акселерометра, использующего поперечное давление (соответственно 10^3 рад/(мкм·м) и 10 рад/(г·м)), оказалась сравнима по величине с чувствительностью двухлучевых интерферометрических измерителей. Также показана возможность регистрации акустических колебаний с помощью мандрельного и мембранного чувствительных элементов поляриметров, получены оценки их чувствительности в низкочастотном (гидростатическом) приближении.

4. Реализован лабораторный макет поляриметрического датчика физических величин с псевдогетеродинамным приёмом сигнала. Найдены оптимальные параметры настройки псевдогетеродина и приведена зависимость искажений передаточной характеристики датчика от расстройки режима. Схема датчика допускает дистанционность измерений, отличается простотой и низким уровнем шумов. Требования к точности балансировки датчика на 2-3 порядка ниже, чем для классической двухлучевой схемы. Сигнал датчика не подвержен замираниям вследствие влияний окружающей среды на трассу.

5. Предложенная методика определения поляризационных параметров двулучепреломляющих волокон позволяет с высокой точностью измерять экстинкцию, коэффициент возбуждения поляризационных мод, углы направления собственных осей. Методика может применяться для углового согласования волокон с точностью выше 1° .

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors", *Optical Fiber Technology*, 2003, № 9, pp. 57-79.
2. Ю.Н. Кульчин, «Распределённые волоконно-оптические измерительные системы», М.: Физматлит, 2001, 272 с.
3. А.М. Кац, «Теория упругости», СПб.: Изд-во «Лань», 2002, 208 с.
4. D.L. Gardner, T. Hofler, S.R. Baker, R.K. Yarber, S.L. Garrett, "A fiber-optic interferometric seismometer", *IEEE J. Lightwave Technol.*, July 1987, vol. LT-5, № 7, pp. 953-959.
5. A.D. Kersey, A.C. Lewin, D.A. Jackson, "Pseudo-heterodyne detection scheme for the fibre gyroscope", *IEEE Electronics Letters*, April 1984, vol. 20, № 9, pp. 368-370.
6. Р. Аззам, Н. Башара, «Эллипсометрия и поляризованный свет», М.: Мир, 1981, 584 с.
7. J.P. Dakin and C.A. Wade, "Compensated polarimetric sensor using polarization-maintaining fibre in a differential configuration", *IEEE Electronics Letters*, 1984, vol. 20, pp. 51-53.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Результаты диссертации опубликованы в сборниках тезисов докладов, в сборниках докладов конференций, в 4 статьях реферируемых журналов:

1. О.И. Котов, Л.Б. Лиокумович, С.И. Марков, А.В. Медведев, А.В. Хлыбов, «Модуляция разности фаз поляризационных мод в одномодовых волоконных световодах», Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 1, стр. 72-76.
2. A.V. Khlybov, O.I. Kotov, S.I. Markov, “Remote polarimetric fiber-optic sensor”, SPIE Proc., 2004, vol. 5381, pp. 83-91.
3. O.I. Kotov, L.B. Liokumovich, A.V. Medvedev, S.I. Markov and A.V. Khlybov, “Measuring the polarization characteristics of birefringent optical fibers using interference technique”, Technical Physics Letters, 2004, vol. 30, № 6, pp. 515-517.
4. О.И. Котов, А.В. Хлыбов, С.И. Марков, «Эффективный волоконно-оптический поляризационный модулятор», Письма в ЖТФ, Апрель 2004, том 30, вып. 7, стр. 7-13.
5. О.И. Котов, С.И. Марков, А.В. Хлыбов, «Дистанционный поляризационный волоконно-оптический датчик», тезисы докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Связь», СПб, июнь 2003.
6. Ю.В. Недзвецкий, А.В. Хлыбов, О.И. Котов, «Волоконно-оптический поляризационный модулятор», тезисы докладов межвузовской конференции «Неделя науки СПбГПУ», радиофизический факультет, ноябрь 2002.
7. А.В. Хлыбов, О.И. Котов, «Поляризационный волоконно-оптический датчик физических величин», тезисы докладов межвузовской конференции «Неделя науки СПбГПУ», радиофизический факультет, ноябрь 2002.
8. А.В. Хлыбов, О.И. Котов, «Волоконно-оптический поляризационный датчик с псевдогетеродинным приёмом сигналов», тезисы докладов Политехнического симпозиума «Молодые учёные – промышленности Северо-Западного региона», декабрь 2002.