

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

- 3 Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения
Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н.
- 7 ИК фурье-спектроскопическое исследование механизма парофазной экстракции из водных растворов
Бехтерев В.Н., Бехтерев А.Н., Золотарев В.М.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

- 11 Оптимизация воздействия лазерного излучения на мягкие биоткани
Беликов А.В., Карасев В.Б., Пушкарева А.Е., Скрипник А.В., Смирнов М.З., Овчаренко Я.С., Храмов В.Ю.
- 15 Нелинейные явления в оптических волокнах с примесью
Савин Е.З., Осипова Н.Г., Ливашвили А.И.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- 19 Оптимизация системы телевизионной визуализации люминесцирующих объектов методом компьютерного моделирования
Корнышев Н.П., Тимофеев А.В.

ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

- 22 Современные методы измерения разрешающей способности зрительной системы
Коскин С.А., Бойко Э.В., Шелепин Ю.Е.
- 28 Моделирование тепловизионных изображений наземных объектов
Мочалин В.Д.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

- 32 Флуоресцентный видеодерматоскоп
Kang Uk, Папаян Г.В., Вае Soo-Jin, Березин В.Б., Ким С.
- 39 Оценка диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра
Кузнецов А.В.

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

- 43 Оптические свойства наночастиц диоксида ванадия в нанопористых стеклах
Сидоров А.И., Виноградова О.П., Хрушева Т.А., Обыкновенная И.Е., Ермолаева Г.Н., Шилов В.Б.

- 49 **Механизм просветления пассивных лазерных затворов YAG:V³⁺ при ВКР преобразовании в кристаллах KGW:Nd³⁺**
Титов А.Н., Иванов В.Н., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Сторошук О.Б., Крутова Л.И., Дукельский К.В., Медоволкин В.В., Урбанович Е.В., Иванов Д.В.
- 53 **К теории эллипсометрии реальной поверхности**
Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Шаймарданов Р.Г., Иванов В.А., Михайлов А.В.
- 57 **Корреляция спектральных параметров и цветовых характеристик интерференционных фильтров**
Азаматов М.Х., Гайнутдинов И.С., Михайлов А.В., Сабиров Р.С., Сафин Р.Г.
- 63 **Просветление оптических элементов в области спектра 2,5–3,5 мкм**
Сабиров Р.С., Гайнутдинов И.С., Алиакберов Р.Д., Гареев Р.Р., Каримов Р.Т., Шувалов Н.Ю., Михайлов А.В.
- 66 **Оценка параллакса изображения мениска выращиваемого кристалла**
Михляев С.В.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

- 71 **Установка для измерения спектрального коэффициента направленного пропускания широкоапертурных оптических элементов**
Дмитриев Е.И., Филиппов О.К., Филиппов В.Г.
- 73 **Оптический датчик угла положения автоматизированного телескопа ЗА-320М Пулковской обсерватории**
Девяткин А.В., Верещагина И.А., Кулиш А.П., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С.

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- 80 **Квазилучевое описание межмодовой интерференции излучения оптических вихрей в коротких волоконных световодах**
Кизеветтер Д.В.
- 83 **Упрочнение прозрачных проводящих покрытий и “мягких” материалов ИК-диапазона спектра при применении нанотехнологий**
Каманина Н.В., Васильев П.Я., Студенов В.И., Усанов Ю.Е.

ИНФОРМАЦИЯ

- 85 **Международная конференция “Оптоинформатика 2008”**
- 86 **Коллективная монография “Оптика наноструктур”**

Сдано в набор 01.10.07. Подписано в печать 00.00.06. Формат бумаги 60×84/8.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Заказ № 00. Отпечатано в ООО «ЦТТ». Тираж 300 экз. Цена подписная.

Адрес типографии: 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 16.

Качество графических материалов соответствует представленным оригиналам.

Научный редактор **В.П. Белошеев**

Корректор **Т.Л. Широкова**

УДК 681.586.5:621.395

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТОРЦЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР – УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ СМЕЩЕНИЯ

© 2008 г. А. А. Ветров*, канд. техн. наук; С. С. Комиссаров*, А. Н. Сергушичев**, канд. техн. наук

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Санкт-Петербург

** Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Санкт-Петербург
E-mail: a_vetrov@mail.ru

Рассмотрена оптическая схема волоконно-оптического торцевого интерферометра, в котором происходит интерференция двух пучков – отраженного от свободного торца оптического волокна и возвращенного в волокно внешним отражателем. Проведен теоретический анализ и экспериментальные исследования интерферометра, указаны его оптимальные параметры с точки зрения “видности” интерференционной картины. Экспериментально определена чувствительность к перемещению внешнего зеркала, равная 0,014 нм, в широкой полосе частот. Отмечена перспективность данной схемы для построения различных типов волоконно-оптических сенсоров.

Коды OCIS: 060.0060.

Поступила в редакцию 19.06.2007.

Введение

Интерферометрические оптические схемы широко используются при создании высокоточных измерительных систем линейного перемещения, а также датчиков других физических величин (вибраций, давления, температуры, скорости и т. п.), определение которых может быть сведено к измерению перемещения соответствующего чувствительного элемента. К несомненным достоинствам интерферометров относятся очень высокие чувствительность и точность, поскольку эталоном сравнения в них служит длина волны оптического излучения, а также высокое быстродействие при фотоэлектрической регистрации отклика.

В то же время классические интерферометры – это, как правило, достаточно сложные и громоздкие устройства, требующие прецизионной механики и оптики, тщательной настройки и специальных мер защиты от внешних воздействий. Эти обстоятельства приводят к высокой стоимости, неудобствам при установке и работе таких устройств, и в конечном счете к ограничению области их возможного использования.

Создание интерферометров на основе волоконно-оптических элементов позволяет в основном устранить отмеченные недостатки и создавать простые, компактные и недорогие устройства. Кроме того, современный прогресс в области оптической связи и телекоммуникаций обеспечил широкую рыночную доступность необходимых элементов для

реализации волоконно-оптических интерферометров: излучателей, приемников, коннекторов, разветвителей и т. д.

Одним из простейших устройств такого типа можно считать волоконно-оптический торцевой интерферометр (ВОТИ) [1, 2], по сути являющийся двухлучевым интерферометром Фабри–Перо, в котором оптическое излучение частично отражается от торца волокна (первый луч), а частично выходит в свободное пространство и возвращается в торец волокна внешним отражателем (второй луч). Такой интерферометр, наряду с высокой чувствительностью, отличается простой конструкцией, компактностью, устойчивостью к внешним воздействиям и невысокой стоимостью. Он может служить основой для широкого класса датчиков физических величин.

В данной работе дан краткий теоретический анализ ВОТИ, приведены экспериментальные результаты его лабораторных исследований, а также намечены возможные области его применения.

1. Теоретическое описание схемы ВОТИ

Принцип действия ВОТИ состоит в следующем (рис. 1). Излучение лазерного диода 1 вводится в оптическое волокно 2 и через разветвитель 3 передается на волокно 4. При этом часть излучения отражается от торца оптоволокну 4, а другая его часть, отражаясь от зеркала 5, возвращается обратно в оптоволокну 4. Излучение, отраженное от торца

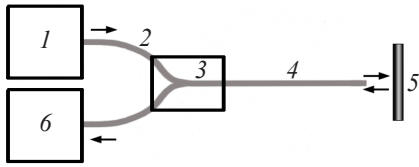


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического интерферометра.

оптоволокна, интерферирует с излучением, отраженным от зеркала, и на фотоприемнике 6 регистрируется интенсивность излучения, изменяющаяся в зависимости от расстояния между торцом волокна и зеркалом (d),

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(4\pi\frac{d}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности излучений, отраженного от торца волокна и возвращенного в волокно после отражения от зеркала соответственно; γ – степень когерентности излучений I_1 и I_2 , λ – длина волны излучения лазера.

В общем случае γ излучения лазера определяется соотношением

$$\gamma = \frac{\sin\beta}{\beta}, \quad \text{где } \beta = \frac{\pi l}{l_{\text{ког}}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{ког}}$ – длина когерентности излучения лазера, l – разность хода интерферирующих лучей.

Однако на практике для малых расстояний от зеркала до торца волокна и высокой когерентности лазерного излучения можно полагать $\gamma \approx 1$.

Из соотношения (1) видно, что смещение зеркала на половину длины волны света изменяет разность фаз интерферирующих лучей на 2π , что соответствует одному периоду изменения интенсивности излучения на фотоприемнике. Зависимость уровня сигнала на фотоприемнике от расстояния между торцом волокна и зеркалом приведена на рис. 2. Очевидно, что для достижения минимума искажений сигнала необходимо рабочую точку выбирать на расстоянии, кратном $\lambda/4$, а амплитуда перемещений зеркала должна находиться в линейной области изменения уровня сигнала.

Для волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо интенсивность света, отраженного от торца волокна,

$$I_1 = R_1 I_0, \quad (3)$$

а интенсивность света, отраженного от зеркала,

$$I_2 = (1 - R_1)^2 R T(d) I_0, \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность излучения, подводимого к торцу волокна; R_1 и R – коэффициенты отражения

торца волокна и зеркала соответственно. В случае кварцевого волокна $R_1 = 0,036$ – френелевский коэффициент отражения границы раздела кварц–воздух, $T(d)$ – потери, возникающие из-за расходимости излучения в свободном пространстве и зависящие от расстояния d . Для плоского зеркала и одномодового волокна этот множитель имеет вид [3]

$$T(d) = 1/[1+(d/d_0)^2], \quad (5)$$

где $d_0 = \pi n \omega^2 / \lambda$; n – показатель преломления, λ – длина волны оптического излучения, а ω – радиус поля оптической моды в волокне. Численно для стандартного одномодового волокна при $\lambda = 1,55$ мкм $d_0 \approx 80$ мкм.

Совместное рассмотрение соотношений (1)–(5) позволяет проанализировать функцию отклика ИВОТИ в широком диапазоне расстояний d . Нетрудно видеть, что она содержит быстро осциллирующий интерференционный компонент, пропорциональный $\cos(4\pi d/\lambda)$, ограниченный сверху и снизу огибающими линиями интерференционных максимумов I_{max} и минимумов I_{min} , определяемых из условий

$$I_{\text{max}} = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2}, \quad I_{\text{min}} = I_1 + I_2 - \sqrt{I_1 I_2}. \quad (6)$$

Известно, что “видность” интерференционной картины определяется соотношением [4]

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}. \quad (7)$$

Анализ соотношения (7) с учетом (3)–(6) показывает, что наилучшая “видность” полезного сигнала на выходе фотоприемника будет наблюдаться в случае равенства интенсивностей I_1 и I_2 интерфе-

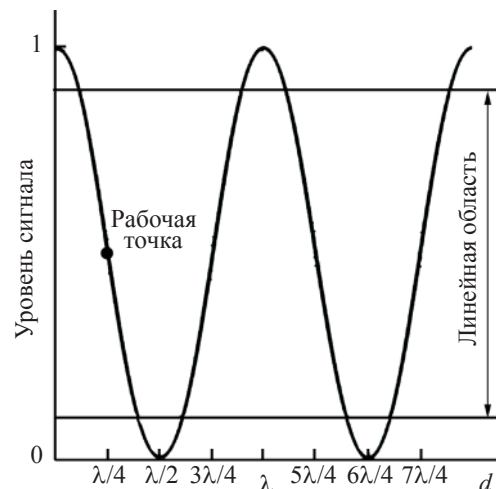


Рис. 2. Зависимость уровня сигнала от перемещений зеркала.

рирующих лучей, т. е. при некотором оптимальном расстоянии d от зеркала до торца волокна. При этом следует заметить, что $V(d)$ изменяется достаточно медленно по сравнению с интенсивностью излучения на фотоприемнике $I(d)$ и может быть определена экспериментально.

2. Экспериментальные результаты

Для исследования параметров ВОТИ была создана лабораторная установка, функциональная схема которой приведена на рис. 3.

Установка содержит полупроводниковый лазерный диод 2, управляемый блоком питания 1. Выходное излучение через оптическую розетку поступает в плечо волоконно-оптического разветвителя 3 формата 2×1 , изготовленного на основе одно-модового оптического волокна. Торцы общего волокна разветвителя 3 укреплены неподвижно. Отражающее зеркало 4 укреплено на пьезостолбике 5, который используется для точной подстройки и модуляции расстояния d . Смещение пьезостолбика 5 на расстояние 750 нм происходит при подаче на него напряжения 260 В. Зеркало 4 с пьезостолбиком 5 снабжены угловыми и линейными юстировочными подвижками. Линейная подвижка 6 снабжена стрелочным индикатором для грубого изменения расстояния d (точность отсчета 10 мкм).

Для точной подстройки расстояния d , настройки на максимумы и минимумы интерференционного сигнала и на рабочие участки с максимальной крутизной характеристики используется источник постоянного и переменного напряжения блока управления 9. Источники напряжений блока 9 развязаны между собой резистивно-емкостным делителем и могут работать независимо друг от друга. Регистрация интерференционного сигнала проводится фотоприемником 7 с устройством смещения напряжения (на схеме не показано). Выходной сигнал фотоприемника 7 регистрируется по постоянному току микроамперметром (интенсивность измеряется в относительных единицах), а по переменному сигналу – полосовым вольтметром блока регистрации 8.

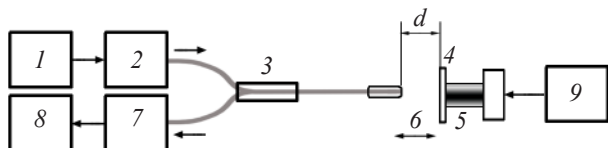


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки.

Весь комплекс аппаратуры смонтирован в виде экспериментальной установки на оптическом столе.

Эксперименты по исследованию зависимости уровня сигнала и “видности” V от расстояния d проводились путем фиксированных перемещений зеркала подвижкой 6 и последующей подстройкой расстояния до получения I_{\max} и I_{\min} блоком управления 9 и пьезостолбиком 5 по постоянному току. Результаты измерений приведены на рис. 4 совместно с теоретическими расчетными кривыми согласно соотношению (7).

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 4, можно заключить, что максимальная “видность” достигается на расстоянии $d \approx 5d_0$ и составляет $\sim 0,1$ мм. Зона с контрастом по уровню 0,9 составила диапазон d от $2,5d_0$ до $8d_0$, а по уровню 0,5 – от $0,6d_0$ до $21d_0$.

Эксперимент по определению чувствительности ВОТИ к линейному перемещению проводился путем подачи на пьезостолбик 5 переменного напряжения от блока управления 9 частотой ~ 1 кГц. Частота выбрана вдали от собственных резонансных частот пьезоэлемента. Селективный усилитель 8 обеспечивал эффективную полосовую фильтрацию выходного сигнала. Рабочее расстояние d было

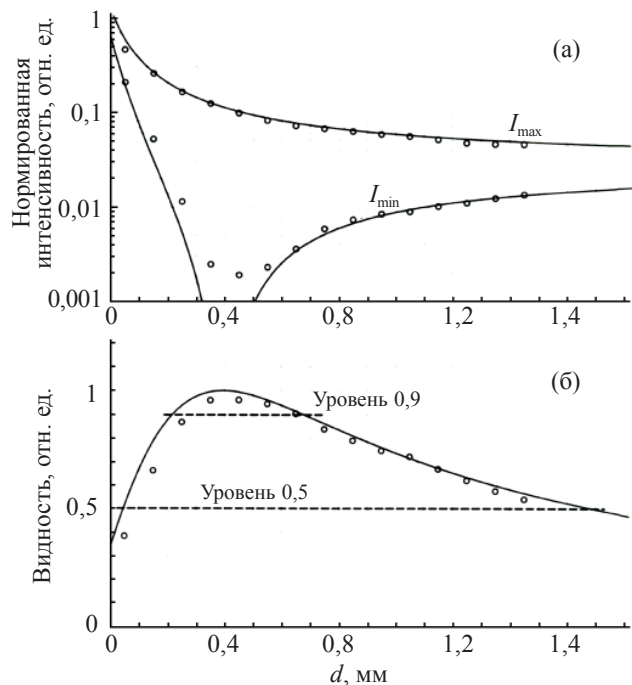


Рис. 4. Зависимости максимальных и минимальных уровней сигналов интерферометра (а) и “видности” (б) от расстояния d . Кружки на графике – результаты эксперимента, сплошные линии – расчетные зависимости.

выбрано в середине рабочего диапазона, а его подстройка производилась постоянным смещением, формируемым блоком 9 так, чтобы постоянный уровень выходного сигнала соответствовал

$$I_{\text{const}} = (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})/2,$$

т. е. работа велась на участке наибольшей крутизны рабочей характеристики.

В результате эксперимента зафиксирована уверенная регистрация переменного сигнала (превышение его над уровнем шумов в рабочей полосе частот ~ 8 кГц) при подаче переменного управляющего напряжения от блока управления 9 величиной 5 мВ.

Учитывая коэффициент линейного смещения пьезостолбика, равный 750 нм/260 В, была получена окончательная оценка чувствительности ВОТИ к линейным перемещениям внешнего зеркала при регистрации узкополосных сигналов $\delta d = 0,014$ нм.

Следует отметить, что в широкополосном режиме регистрации схема установки весьма чувствительна к бытовым и техногенным шумам (вибрация самого здания, перемещения людей, закрывание дверей и др.), вследствие чего измерение чувствительности в низкочастотной области (до десятков герц) затруднительно и требует специальных мер по виброзащите измерительного стенда.

Таким образом, в результате выполненных измерений установлено, что чувствительность волоконно-оптического торцевого интерферометра к перемещению внешнего зеркала в селективном режиме составляет 0,014 нм. При этом определен оптимальный $(2,5-8)d_0$ и рабочий $(0,6-21)d_0$ диапазоны расстояний d от внешнего зеркала до торца волокна.

Заключение

Экспериментальные исследования волоконно-оптического торцевого интерферометра, в котором происходит интерференция двух пучков – отраженного от свободного торца оптического волокна и возвращенного в волокно внешним отражателем, показали его уверенную работоспособность и высокую чувствительность.

В режиме измерения линейных перемещений чувствительность волоконно-оптического торцевого интерферометра к перемещению составила 0,014 нм (при регистрации в полосе частот ~ 8 кГц).

Путем измерения “видности” интерференционной картины определены оптимальный $(2,5-8)d_0$ и рабочий $(0,6-21)d_0$ диапазоны расстояний от внешнего зеркала до торца волокна.

Следует особо подчеркнуть, что при построении оптико-волоконной схемы интерферометра использованы элементы (лазер, разветвитель, коннекторы и т. д.), доступные в свободной продаже. Это обстоятельство дает возможность конструирования универсального высокочувствительного волоконно-оптического модуля, пригодного для использования в качестве различных видов сенсоров [5, 6]. У этих сенсоров измеряемая величина (например, давление), порог чувствительности и диапазон измерений будут определяться конструкцией первичного преобразователя и могут варьироваться в широких пределах.

Основной технической проблемой при использовании рассмотренного в статье интерферометра является стабилизация положения рабочей точки на середине линейного участка характеристики. Она может быть решена либо путем управления длиной волны лазера (см., например, [7]), либо за счет многократного дублирования измерительных каналов, имеющих различные положения рабочих точек. Конкретные примеры таких решений будут даны в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Davis P.G., Bush I.J., Maurer G.S. Fiber Displacement Sensor // Proc. SPIE. 1998. V. 3489.
2. Meller S.A. et al. Development of Fiber Optic Sensors for Advanced Aircraft Testing and Controls // Proc. SPIE. 1998. V. 3541. P. 134–139.
3. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь. М.: Мир, 1984. 254 с.
4. Бусурин В.И., Носов Ю.П. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М., 1990.
5. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н. Малогабаритный унифицированный интегрированный модуль для оптических интерференционных датчиков // МНТК “Датчики и системы-2005”, 6–10 июня 2005. г. Пенза. Сборник докладов. С. 192–195.
6. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический микроинтерферометр как основа построения высокочувствительных сенсоров // 6-я МНТК “Квантовая электроника-2006”, 14–17 ноября 2006. г. Минск. Белоруссия. Сборник докладов. С. 117.
7. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптическая сенсорная система. Патент РФ № 2 279 112. Бюл. изобр. № 18. 2006.