

Цирухин Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
НА ОСНОВЕ ДЛИННОПЕРИОДНОЙ ВОЛОКОННОЙ РЕШЁТКИ

Специальности: 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Сидоров Александр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Никоноров Николай Валентинович

доктор физико-математических наук, профессор
Шадрин Евгений Борисович

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет

Защита диссертации состоится “22” июня 2010 года в ___ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ ” _____ 2010 года.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Совершенствование систем автоматического контроля для медицины, экологии и управления различными объектами, процессами производства во многом определяется достижениями в области измерительных преобразователей (датчиков). В связи с этим, актуальной является задача исследования и разработки надежных, малогабаритных и дешёвых чувствительных элементов для датчиков различных физических величин, обладающих малым энергопотреблением, высокой чувствительностью и отвечающих современным техническим требованиям.

Создание информационно-измерительных систем (ИИС) до недавнего времени было чрезмерно дорогостоящим решением, в том числе и в смысле затрат на обслуживание и эксплуатацию таких систем. Дело в том, что традиционные измерительные преобразователи (датчики), применяемые в таких ИИС, как правило, требуют подачи электропитания и собственной линии передачи сигнала измерительной информации, а также линии для подачи управляющих сигналов. Кроме того, условия эксплуатации датчиков достаточно жестко ограничены параметрами окружающей среды, воздействием агрессивных сред, высоковольтным напряжением и электромагнитными помехами. Именно поэтому в последнее время интенсифицировались работы по созданию волоконно-оптических измерительных систем, которые в большинстве случаев лишены указанных недостатков. Их главными достоинствами являются потенциально высокая точность измерений, нечувствительность к электромагнитным помехам, возможность работы в агрессивных и взрывоопасных средах. В этой связи наиболее перспективными датчиками являются датчики на основе длиннопериодных волоконных решёток (ДВР), так как они обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям и на их основе могут создаваться ИИС, содержащие множество датчиков с использованием WDM (Wavelength Division Multiplexing)-технологии: мультиплексирование по длине волны.

Работы по созданию оптико-электронных измерительных систем на основе ДВР ведутся в Научном центре волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте радиотехники и электроники РАН, Дальневосточном государственном техническом университете, ФГУП ВНИИОФИ и МГТУ им. Н.Э. Баумана. За рубежом данными вопросами занимались такие организации как IPHT - Institute of Photonic Technology Optical Fibers and Fiber Applications, CIDRA, Blue Road Research Group, Micron Optics и многие другие, которые предложили множество методов изготовления ДВР.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в результате этих работ, особенно в плане разработки методов изготовления ДВР, до настоящего времени не разработаны методики позволяющие, уменьшить стоимость и трудоемкость изготовления ДВР для волоконных сенсоров. На решение указанной проблемы и направлена настоящая диссертационная работа.

Цель работы и задачи исследования Основной целью диссертационной работы является разработка, исследование и оптимизация компактных, надежных и экономичных чувствительных элементов для волоконно-оптических датчиков, позволяющих проводить измерение нескольких параметров одновременно.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка основ технологий создания ДВР на полимерной основе. Выявление физических закономерностей формирования периодических полимерных структур на поверхности оптических волокон.

2. Разработка методов модификации полимерных ДВР для расширения их функциональных возможностей. Создание композитных периодических покрытий на оптических волокнах, в том числе – из неорганических материалов.

3. Разработка основ технологий создания спиральных ДВР на полимерной основе.

4. Проведение экспериментальных исследований оптических характеристик ДВР и влияния на них температуры и показателя преломления окружающей среды.

5. Проведение теоретического анализа оптических характеристик ДВР с целью их оптимизации.

Научная новизна работы

1. Впервые получены полимерные периодические структуры на оптическом волокне методом самоорганизации жидкого слоя полимера.

2. Впервые созданы полимерные спиральные ДВР.

3. Определены закономерности влияния геометрии и оптических характеристик гофров на чувствительность ДВР для разных физических воздействий.

4. Проведено экспериментальное исследование оптических характеристик полимерных ДВР, включая их оптическую реакцию на внешние физические воздействия.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Самоорганизация слоя жидкого полимера на поверхности волокна приводит к формированию периодических гофрированных структур с периодом 0,1...2 мм, который определяется диаметром волокна и вязкостью слоя полимера.

2. В оптических волокнах с гофрированным или спиральным полимерным покрытием возникают резонансы волноводных мод сердечника и полимерной оболочки, причем спектральная ширина резонансов лежит в пределах 0,1...2 нм.

3. Внешние воздействия (изменение температуры или показателя преломления окружающей среды) на волоконную структуру с периодическим полимерным покрытием приводят к спектральному сдвигу резонансных полос пропускания и изменению их амплитуды. Температурная чувствительность спектрального сдвига полос

достигает $0,14 \text{ нм}/^{\circ}\text{C}$, Температурная чувствительность амплитуды резонансов может достигать $0,11 \text{ дБ}/^{\circ}\text{C}$. Чувствительность к изменению показателя преломления окружающей среды может составлять $\Delta\lambda/\Delta n = 4,54 \text{ нм}/\text{отн.ед.}$

4. Для телекоммуникационных длин волн одномодовые ДВР имеют преобладающую чувствительность к изменению температуры и давления по сравнению с изменением показателя преломления окружающей среды при толщине гофра большей 5 мкм и $3,5 \text{ мкм}$ для отношения показателей преломления гофра и сердечника большего или меньшего 1 соответственно. При толщинах гофра меньших вышеуказанных возрастает чувствительность к показателю преломления окружающей среды, а чувствительность к температуре и давлению уменьшается.

Практическая значимость работы

Использование предложенного в работе метода изготовления ДВР позволяет построить надёжные и дешёвые волоконные оптические датчики, основной особенностью которых, является лёгкость изготовления и возможность одновременного измерения нескольких физических величин. Результаты исследований могут найти применение при разработке и создании волоконно-оптических датчиков для энергетики, нефтеперерабатывающей и химической промышленности, транспорта и строительства. Практическая значимость работы подтверждена 3 Патентами РФ.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались: на XIII Laser Optics Conference, SPb, 2008, 61 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2008, 62 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2009, 63 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2010.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 статьях и докладах, из них по теме диссертации 14, среди которых 4 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 3 статьи в других изданиях. Доклады доложены и получили одобрение на 4 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях перечисленных в конце автореферата. Основные положения защищены 3 патентами РФ. Одна статья находится в печати в журнале, входящим в ведущее рецензируемое издание, рекомендованное в действующем перечне ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 204 наименования. Основная часть работы изложена на 125 страницах машинописного текста. Работа содержит 72 рисунков и 9 таблиц.

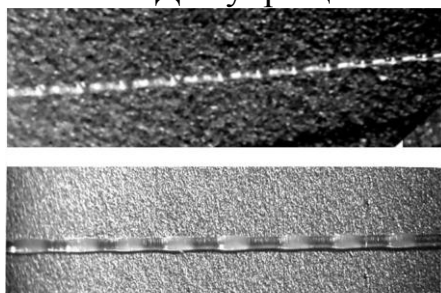
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы, ее научная новизна и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по различным типам волоконно-оптических датчиков (ВОД) и методам обработки их сигналов, а так же оптические свойства полимеров и их применение в оптике.

Аналитический обзор показал, что ДВР являются перспективными чувствительными элементами (ЧЭ) для многофункциональных ИИС. ДВР применяются в качестве чувствительных элементов в сенсорных системах для измерения температуры, давления, химического состава жидких сред и др. Основными их достоинствами являются высокая чувствительность к внешним воздействиям и возможность мультиплексирования, т.е. использование в одной сенсорной системе большого количества датчиков. Поэтому, целями данной диссертационной работы были разработка, исследование и оптимизация новых типов компактных, надежных и экономичных ЧЭ для ВОД, позволяющих проводить измерение нескольких параметров одновременно.

Во второй главе описана разработка методов формирования полимерных и неорганических периодических структур на поверхности оптических волокон. Для упрощения технологии изготовления ДВР в качестве первого



а Рис.1. Продольные периодические структуры на стеклянных оптических волокнах. Полимер – НЦ, а – волокно из силикатного стекла, диаметр волокна – 50 мкм; б - волокно из кварцевого стекла, диаметр волокна – 150 мкм.

метода было предложено использовать самоорганизацию жидкого слоя полимера на поверхности волокна.

Исследовалось формирование периодических структур (гофров) из следующих полимеров: полиуретан (ПУ), нитроцеллюлоза (НЦ), полиметилметакрилат (ПММА), полистирол (ПС) и оптический эпоксидный компаунд (ЭК). В качестве сердцевины ДВР использовались волокна из кварцевого, силикатного стекла и полимера (полиамид) диаметром от 50 до 200 мкм. Наши исследования показали, что при стекании жидкого полимера по волокну на нём образуются периодические структуры. Формирование периодических структур при стекании раствора полимера по круглому волокну в основном связано с конкуренцией нескольких процессов. Во-первых, вязкое течение раствора под действием силы тяжести. Во-вторых, стремление раствора полимера принять форму с минимальной площадью

поверхности под действием сил поверхностного натяжения. В-третьих, неравномерное распределение растворителя по толщине полимера при его высыхании. В результате, после высыхания или полимеризации жидкого полимера, на поверхности волокна формируется гофрированная периодическая структура из полимера (рис.1).

На рис. 2 представлены зависимости периода гофров от диаметра волокна при фиксированной концентрации полимера 10 % - (а) и концентрации полимера (НЦ) в растворе при фиксированном диаметре волокна 150 мкм. - (б).

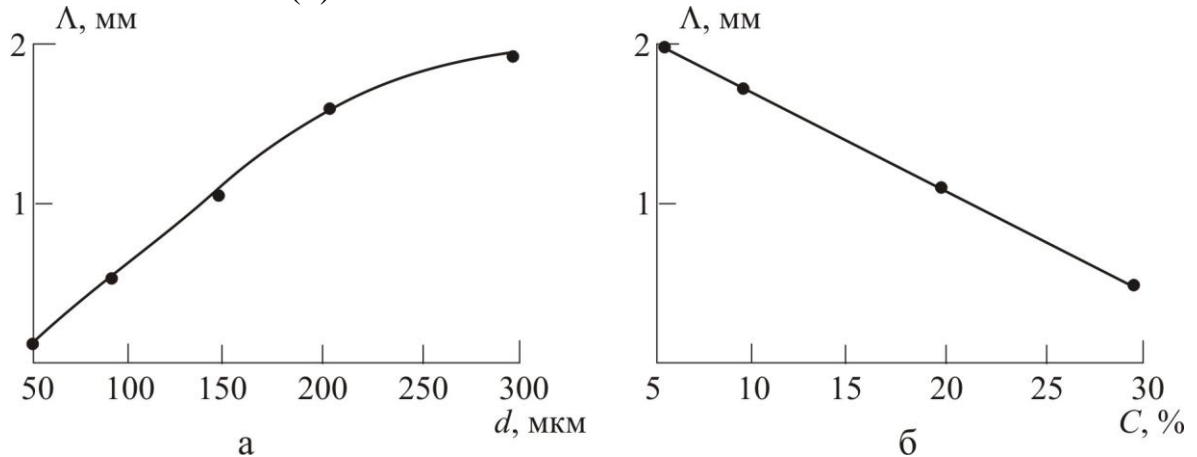


Рис.2. Зависимости периода гофров от диаметра волокна (а) и концентрации полимера (НЦ) в растворе (б); а – концентрация полимера 10%; б – диаметр волокна 150 мкм.

Таким образом, экспериментально показано, что эффекты самоорганизации растворов полимеров на поверхности оптических волокон приводят к образованию продольных структур в виде гофров. Период продольных структур определяется концентрацией раствора и диаметром волокна и может варьироваться от 100 мкм до 2 мм. Для создания ДВР с неорганическими гофраами, обладающими более высокой термической стойкостью, была использована модифицированная методика покрытия. В экспериментах для создания нанопористых неорганических слоев на волокнах из кварцевого стекла использовались суспензии наночастиц TiO_2 (средний размер 100 нм) и SiO_2 (средний размер 50 нм) в растворе НЦ в этилацетате. Концентрация наночастиц в растворе составляла 1-5 %. Волокно погружалось в раствор полимера, содержащий суспензию неорганических наночастиц. При его извлечении из раствора на нем формировался гофрированный полимерный слой (рис. 3, а). После высушивания полимера производился отжиг волокна на воздухе при температуре 300 °С для

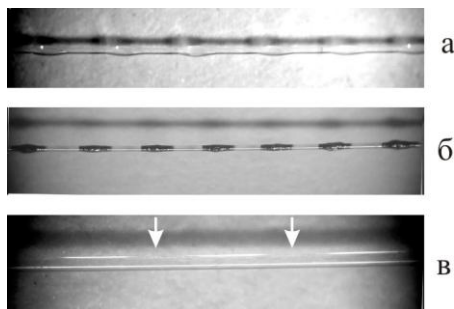


Рис.3. Формирование периодических структур из нанопористого TiO_2 . а – исходные полимерные (НЦ) структуры; б – вид волокна после термического разложения полимера ($t = 300$ °С); в – вид волокна после отжига ($t = 700$ °С). Стрелками показаны области, покрытые нанопористым TiO_2

термического разложения полимера (рис. 3, б) и повторный отжиг на воздухе при температуре 700°C для спекания неорганических наночастиц в нанопористые слои в виде гофров (рис. 3, в).

Для изготовления оболочки в виде полимерной спирали были разработаны четыре метода.

Первый метод заключался в намотке на сердечник из кварцевого волокна спирали из полиэтиленового волокна диаметром 60-150 мкм виток к витку (рис.4, а).

Согласно второму методу сердечник предварительно покрывался слоем жидкого полимера, после чего проводилась намотка полимерной спирали до

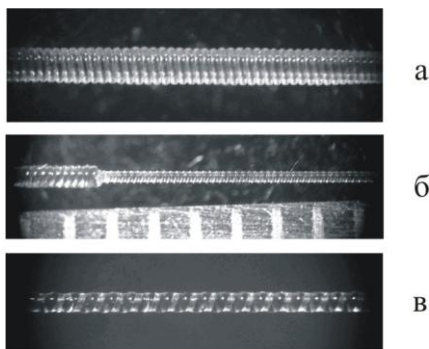


Рис. 4. Фотографии участков спиральных ДВР. а - спираль из полимерного волокна, диаметр волокна 150 мкм. б, в – спираль из эпоксидного компаунда диаметр волокна 150 мкм.

момента затвердевания слоя полимера. В качестве материалов для оболочки в данном случае использовались полиэтиленовое волокно и оптический эпоксидный компаунд.

Третий метод заключался в намотке полимерной спирали из волокна на слой жидкого полимера и удалении полимерной спирали после затвердевания полимерного слоя. При этом на сердечнике оставался затвердевший слой полимера в виде витков спирали, не контактирующих друг с другом. Фотографии таких спиральных ДВР, изготовленных из кварцевого волокна и оптического эпоксидного компаунда, показаны на рис. 4, б и рис. 4, в.

Согласно четвёртому методу каплю раствора поливинилацетата в этилацетате с концентрацией 70 % и объемом 3 мм^3 помещают в зазор между торцами волокон. Длину зазора увеличивают путем сдвигания одного из волокон со скоростью 0.5 мм/с с одновременным вращением волокна вдоль оси со скоростью 1 об/с. В результате формируется полимерное волокно в виде спирали с плотно упакованными витками. Затем волокно смачивают этилацетатом в течение 5 с и высушивают. При этом происходит склеивание поверхностей соседних витков спирали и формируется сплошное волокно со спиральной гофрированной поверхностью. Диаметр волокна равен 50 мкм, период спирального гофра равен 55 мкм, высота гофра – 15 мкм.

Таким образом, эффекты самоорганизации растворов полимеров на поверхности оптических волокон приводят к образованию продольных и поперечных периодических структур в виде гофров. Период продольных структур определяется концентрацией раствора и диаметром волокна и может варьироваться от 100 мкм до 2 мм. Предложенные методы формирования периодических структур позволяют создавать гофрированные

покрытия из органических и неорганических полимеров, а также в виде нанопористых и сплошных слоев из неорганических материалов.

Разработанные методы изготовления спиральных ДВР позволяют упростить технологию создания чувствительных элементов и расширить диапазон используемых материалов.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию оптических характеристик ДВР и изучению влияния внешних факторов – температуры и показателя преломления окружающей среды на спектры пропускания в области резонансов ДВР с полимерным гофрированным покрытием и спиральных ДВР.

Спектральные характеристики ДВР с полимерным покрытием. Экспериментально исследовались ДВР из кварцевого волокна ($n = 1,45$) диаметром 150 мкм с периодическим гофрированным покрытием из полиуретана ($n = 1,5$).

Так как толщина гофров значительно превышает длину волны, на которой проводятся измерения, то в области гофров возникают моды оболочки. Результатом этого является появление резонансов, связанных с модами оболочки. В отличие от резонансов мод сердечника, формирующих минимумы на спектре пропускания ДВР, резонансы мод оболочки приводят к появлению на спектре максимумов пропускания. Подобный эффект возникает и при малом изменении периода решетки по ее длине (квазипериодичность). В нашем случае, квазипериодичность связана с несовершенством технологии изготовления ДВР.

В процессе экспериментов измерения спектров пропускания ДВР проводились как в области «отрицательных» резонансов мод сердечника (рис. 5, а), так и в области «положительных» резонансов мод оболочки (рис. 5, б).

Из рис. 5 видно, что при увеличении температуры происходит спектральный сдвиг резонансов в коротковолновую область спектра, уширение и уменьшение их амплитуды. Причиной, этих эффектов является уменьшение показателя преломления полимера в области гофра при увеличении температуры. Спектральное положение резонанса ДВР определяется ее эффективным периодом, который, в свою очередь, зависит от эффективных показателей преломления соседних участков ДВР.

Расчет показывает, что влияние изменения показателя преломления полимера на эффективный показатель преломления ДВР в области гофров

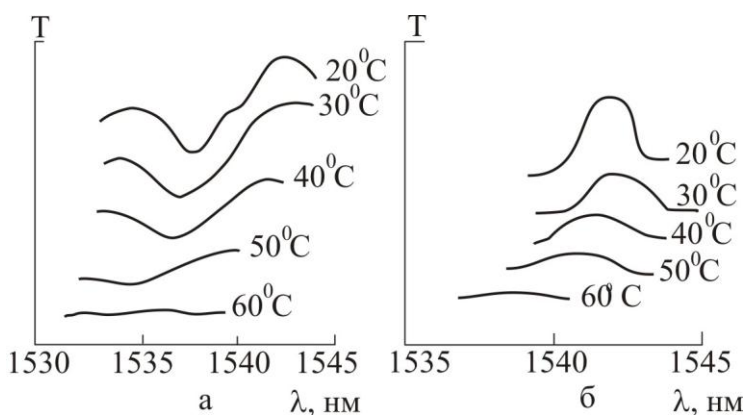


Рис. 5. Изменение спектров пропускания ДВР в области «отрицательного» резонанса мод сердечника (а) и «положительного» резонанса мод оболочки (б). $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм

существенно больше, чем в промежуточных областях. Причем, с увеличением толщины гофра это влияние также увеличивается. Это иллюстрирует расчетная зависимость изменения эффективного показателя преломления Δ_1 в области гофра от толщины гофра h при изменении его показателя преломления на $\Delta n = 10^{-3}$ (рис.6, б, кривая 2).

Температурные зависимости спектрального положения «отрицательного» и «положительного» резонансов ДВР показаны на рис. 6 а.

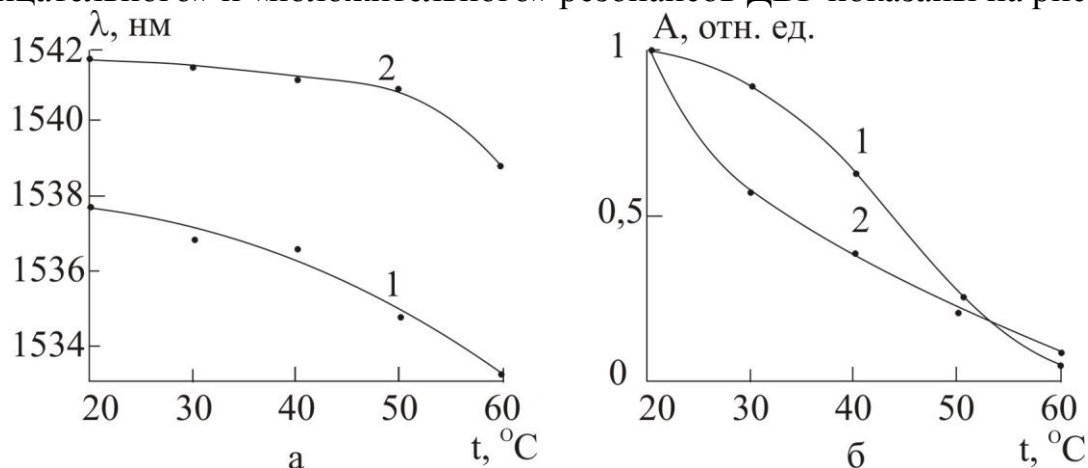


Рис. 6. а - температурные зависимости спектрального положения резонансов ДВР. 1 - «отрицательный» резонанс мод сердечника; 2 - «положительный» резонанс мод оболочки. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм. б - зависимость относительной амплитуды резонансов моды сердечника (1) и моды оболочки (2) от температуры. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм

Чувствительность спектрального сдвига резонансов увеличивается с ростом температуры. Средняя чувствительность при этом составляет $\delta = 0,14$ нм/°С. Спектральный сдвиг резонансов мод оболочки в температурном интервале 20-50 °С незначителен. Ему соответствует $\delta = 0,02$ нм/°С. Однако при $t > 50$ °С наблюдается рост чувствительности и δ достигает значения 0,2 нм/°С.

На рис. 6, б показаны экспериментальные зависимости относительной амплитуды резонансов моды сердечника и моды оболочки от температуры.

Из рис. 6, б видно, что при увеличении температуры амплитуда резонансов уменьшается. Причем, для мод сердечника крутизна зависимости растет с ростом температуры, а для мод оболочки – уменьшается. Изменение амплитуды резонансов также может быть использовано в качестве измеряемого параметра при построении волоконного датчика. Сравнение чувствительности стеклянных ДВР изготовленных на основе традиционных технологий и полимерных ДВР, изготовленных разработанными нами методами показывает, что ДВР с полимерным покрытием имеют сопоставимую чувствительность.

Влияние показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания ДВР с полимерным гофром исследовалось для четырех сред: воздух ($n = 1$), вода ($n = 1,32$), смесь воды с глицерином ($n = 1,38$) и глицерин ($n = 1,46$). Измерения проводились при комнатной температуре. На рис. 7. показана эволюция участка спектра пропускания ДВР при увеличении показателя преломления окружающей среды. При изменении показателя

преломления окружающей среды происходит изменение амплитуды резонансов и их спектральный сдвиг. Отсюда следует, что ДВР с полимерным периодическим покрытием перспективны в качестве чувствительных элементов в датчиках показателя преломления.

Спектральные характеристики ДВР со спиральным полимерным покрытием. На рис. 8 показаны спектры пропускания спиральной ДВР с сердечником из кварцевого стекла диаметром 150 мкм и спиралью из полиэтиленового волокна диаметром 60 мкм. Период ДВР – 60 мкм. Полная длина спирали равна 30 мм.

Из рис. 8 видно, что в спиральной ДВР могут возникать как «отрицательные», так и «положительные» резонансы. Обращает на себя внимание то, что, несмотря на высокие потери на светорассеяние в полимере, спектральная ширина резонансов по полувысоте не превышает 0,3 нм. Таким образом, в многомодовых спиральных ДВР с полимерной оболочкой могут быть реализованы узкие резонансные полосы отражения и пропускания.

На рис. 9, а показана спектральная зависимость коэффициента пропускания спиральной ДВР с полным заполнением зазоров спирали оптическим эпоксидным компаундом в спектральном интервале вторичного резонанса мод сердечника. Сердечник ДВР изготовлен из кварцевого стекла диаметром 220 мкм, спираль из полиэтиленового волокна диаметром 150 мкм. Период ДВР – 150 мкм. Полная длина спирали равна 25 мм. Спектральная ширина резонанса на длине волны 1542,5 по полувысоте не превышает 2 нм. На рис. 9, б показана спектральная зависимость коэффициента пропускания спиральной ДВР из эпоксидного компаунда, изготовленной методом намотки и удаления полимерного волокна.

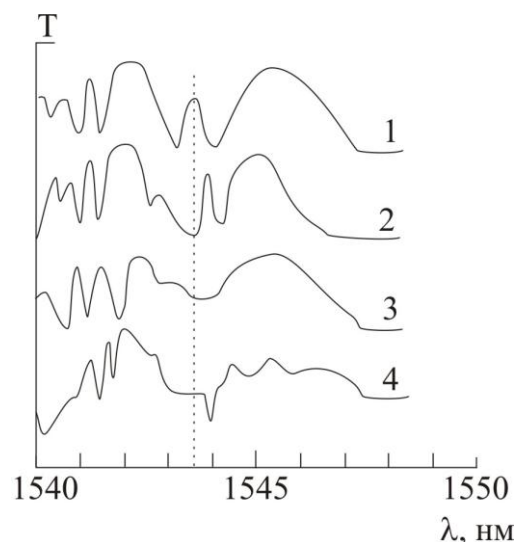


Рис. 7. Влияние показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания ДВР. 1 – $n=1$; 2 – 1,32; 3 – 1,38; 4 – 1,46. $L=50$ мм, $\Lambda = 1$ мм

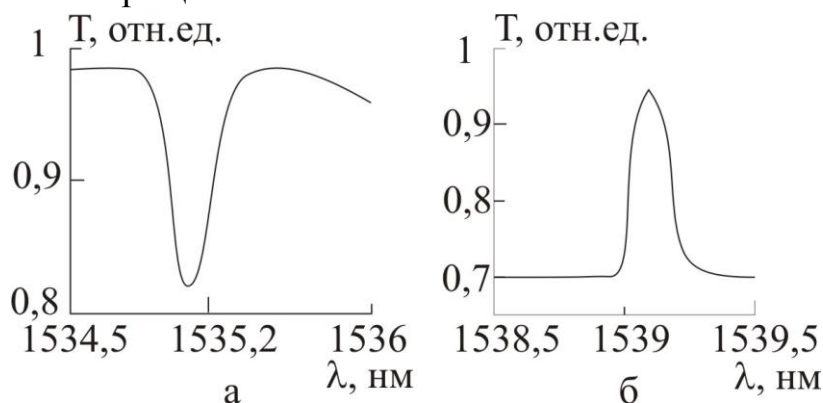


Рис. 8. Спектральные характеристики спиральной ДВР со спиралью из полиэтиленового волокна. а – резонанс моды сердечника; б – резонанс моды оболочки

Сердечник изготовлен из кварцевого стекла диаметром 220 мкм. Поперечное сечение спирали – треугольник с двумя вогнутыми сторонами. Период ДВР – 120 мкм. Полная длина спирали равна 25 мм. Спектральная ширина резонанса на длине волны 1543,6 нм по полувысоте не превышает 2 нм.

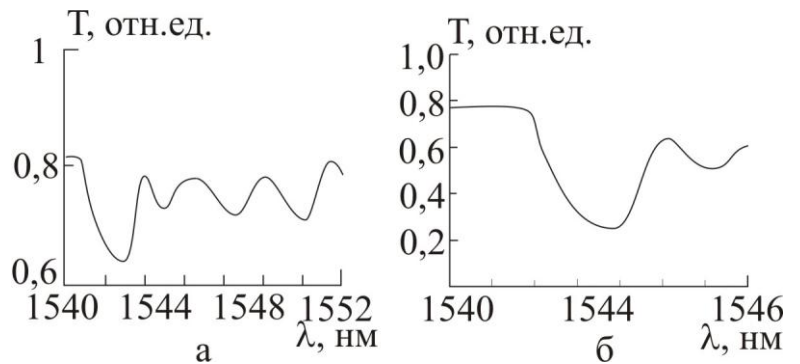


Рис. 9. Спектральные характеристики спиральных ДВР. а – со спиралью из полиэтиленового волокна с заполнением эпоксидным компаундом; б – со спиралью из эпоксидного компаунда

Важной характеристикой ДВР является чувствительность ее оптических свойств к температуре. На рис. 10 показаны спектральные характеристики спиральной ДВР при разной температуре окружающей среды. При увеличении температуры в интервале 20 - 40°C происходит спектральный сдвиг резонансов мод сердечника в сторону меньших длин волн, а затем резонансы смещаются в сторону больших длин волн. Для резонансов мод оболочки наблюдается обратный процесс.

Спектральный сдвиг резонансов для указанного интервала температур в среднем составляет $0,025 \text{ нм}/^\circ\text{C}$.

Аналогичный результат получен для ДВР со спиралью из эпоксидного компаунда в интервале температур 20-60°C.

Для сравнения, спектральный сдвиг резонансов ДВР с гофрированным полимерным покрытием при тех же условиях составляет $0,02 \text{ нм}/^\circ\text{C}$, а при $t > 50^\circ\text{C}$ – $0,2 \text{ нм}/^\circ\text{C}$. Таким образом, малая чувствительность спектрального положения резонансов спиральных ДВР с полимерным покрытием к температуре делает их перспективными для использования в качестве фильтров, а также в качестве датчиков физических величин в тех случаях, когда требуется исключить влияние температуры. Представленные результаты показывают, что ДВР с полимерным периодическим покрытием обладают резонансными свойствами, а их чувствительность к изменению температуры и показателя преломления не уступает чувствительности ДВР,

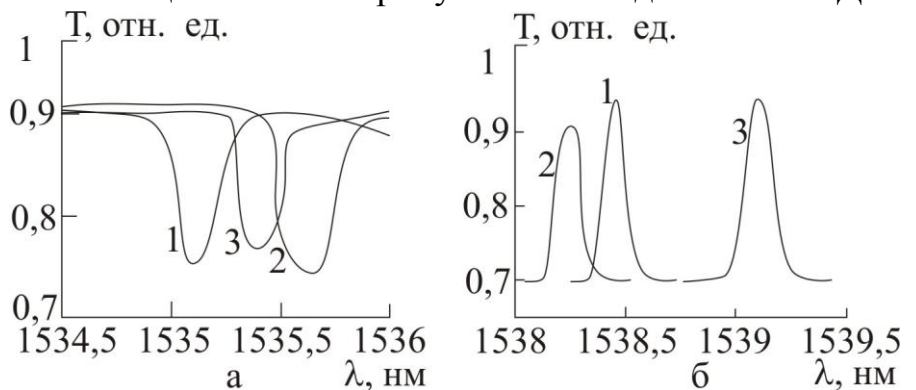


Рис. 10. Влияние температуры на спектральные характеристики спиральной ДВР со спиралью из полиэтиленового волокна. а – резонанс моды сердечника; б – резонанс моды оболочки. 1 – $t = 20^\circ\text{C}$, 2 – 30°C , 3 – 40°C

изготовленных по классическим технологиям. ДВР могут быть использованы и для измерения показателя преломления жидких сред. Их достоинствами являются большое разнообразие выбора материала для гофра, спирали и сердечника волокна, простота изготовления и низкая стоимость.

В четвёртой главе представлены результаты численного моделирования влияния материалов сердечника и оболочки, а также периода ДВР на её спектральную чувствительность к изменению температуры и показателя преломления окружающей среды, и результаты оптимизации параметров ДВР с целью повышения чувствительности к определённому виду воздействия.

Оптимизация параметров ДВР. Практический интерес представляют два случая: когда $n_2 > n_1$ и когда $n_2 < n_1$. В обоих случаях предполагается, что $n_3 < n_{1,2}$. В оптических волокнах круглого сечения наиболее часто используются гибридные моды EH_{11} . Поэтому, анализ проводится для мод указанного типа.

Необходимо отметить, что при $n_2 > n_1$ имеет место нарушение полного внутреннего отражения на границе «сердечник-оболочка». Поэтому компоненты поля электромагнитной волны в оболочке существуют не в виде затухающих волн, как в классическом случае ($n_2 < n_1$), а описываются выражениями, типичными для направляемых мод.

Случай $n_2 > n_1$. (Рис.11, а). Из рисунка видно, что существенное изменение $n_{эф}$ имеет место при толщине оболочки менее 5 мкм. При больших толщинах зависимость $n_{эф}(r_2 - r_1)$ выходит на насыщение и приближается к предельной величине, соответствующей бесконечной толщине оболочки.

Таким образом, использование гофров с $n_2 > n_1$ позволяет изменять эффективный показатель преломления ДВР в широких пределах путем изменения толщины гофра. Увеличение n_2 дает возможность увеличить диапазон варьирования $n_{эф}$.

При анализе влияния толщины гофра на чувствительность волоконно-оптического датчика на основе ДВР следует рассмотреть два случая: во-первых, изменение эффективного показателя преломления Δ_1 при изменении показателя преломления окружающей среды δn_3 ; во-вторых, изменение эффективного показателя преломления Δ_2 при изменении показателя преломления гофра δn_2 , например, в результате изменения температуры или давления. Максимальная чувствительность датчика реализуется, когда показатели преломления сердечника, оболочки и окружающей среды мало отличаются друг от друга. Поэтому при моделировании были выбраны следующие значения показателей преломления: $n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,46$, $n_3 = 1,45$. На рис. 11, б показаны расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_{2,3} = 10^{-3}$. Из рис. 11, б видно, что наибольшая чувствительность к изменению показателя преломления окружающей среды для гофрированной ДВР с $n_2 > n_1$ имеет место при толщине гофра менее 1,5 мкм (кривая 1). Поэтому основной вклад наблюдаемых изменений спектра пропускания, показанных на рис. 7, вносят участки ДВР между гофрами, покрытые слоем полимера толщиной менее 0,5 мкм. Увеличение показателя преломления

окружающей среды приводит к увеличению эффективного показателя преломления этих участков и, в результате, к увеличению эффективного периода решетки. Это приводит к длинноволновому сдвигу резонансов. При значительном изменении показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания начинает влиять и изменение эффективного показателя преломления ДВР в области гофров. Однако, как видно из рис. 11, б, зависимость $\Delta_2(h)$ носит немонотонный характер, поэтому оптический отклик ДВР на изменение внешнего показателя преломления будет различным при различной толщине гофров.

Влияние толщины гофра на чувствительность

ДВР при изменении показателя преломления гофра иллюстрирует кривая 2 на рис. 11, б. Увеличение толщины гофра в данном случае приводит к практически монотонному увеличению чувствительности ДВР. Таким образом, выбор толщины гофра позволяет избирательно увеличить чувствительность ДВР с $n_2 > n_1$ либо к изменению показателя преломления окружающей среды, либо к изменению показателя преломления гофра.

Случай $n_2 < n_1$. Из рис. 12 видно, что при $n_2 < n_1$ толщина гофра оказывает слабое влияние на эффективный показатель преломления ДВР.

Влияние $r_2 - r_1$ на $n_{эф}$ проявляется, в основном при толщине гофра менее 1 мкм. Причиной этого является то, что при $n_2 < n_1$ с оболочкой взаимодействует только затухающая компонента поля волноводной моды (Рис. 12, а).

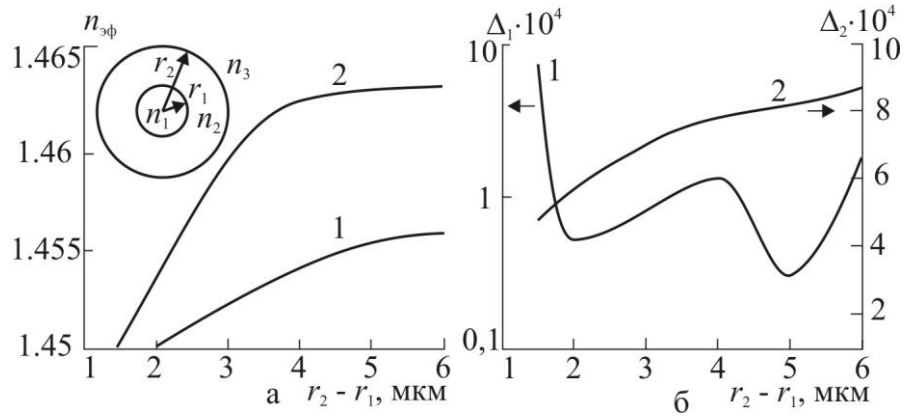


Рис. 11. а - расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра. 1 - $n_2 = 1,46$; 2 - $n_2 = 1,47$. $n_1 = 1,45$, $n_3 = 1$. б - расчетное распределение эффективного показателя преломления в продольном направлении для гофра длиной 100 мкм. $n_2 = 1,47$, б - расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_2 = 10^{-3}$ (1) и $\delta n_3 = 10^{-3}$ (2). $n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,46$, $n_3 = 1,45$. На вставке - геометрия ДВР.

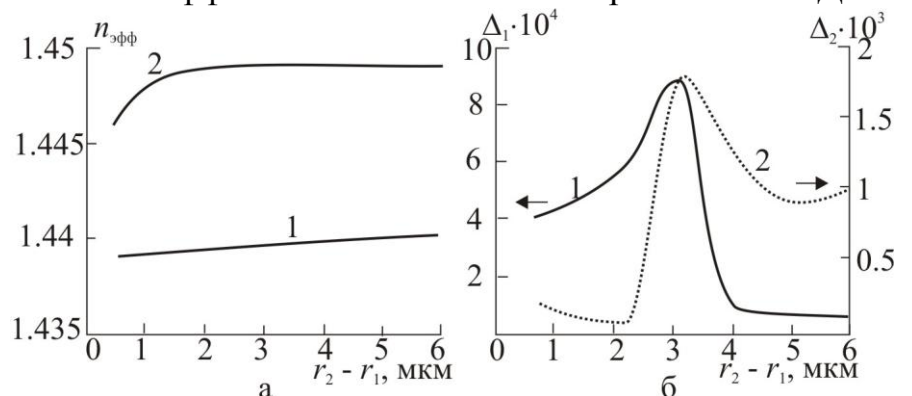


Рис. 12. а-расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра. 1 - $n_2 = 1,44$; 2 - $n_2 = 1,45$. $n_1 = 1,46$, $n_3 = 1$, б- расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_2 = 10^{-3}$ (1) и $\delta n_3 = 10^{-3}$ (2). $n_1 = 1,46$, $n_2 = 1,44$, $n_3 = 1,43$

Чувствительность эффективного показателя преломления ДВР с $n_2 < n_1$ к изменению n_2 и n_3 при различной толщине гофров иллюстрирует рис. 12,б.

Из рис. 12, б видно, что Δ_1 и Δ_2 достигают максимальных значений при $r_2 - r_1 \approx 3$ мкм. Как и в предыдущем случае, выбор толщины гофра позволяет избирательно увеличить чувствительность эффективного показателя ДВР либо к изменению показателя преломления окружающей среды, либо к изменению показателя преломления гофра. Так, при $r_2 - r_1 < 2,5$ мкм возрастает чувствительность к изменению n_3 . При $r_2 - r_1 > 3,5$ мкм возрастает чувствительность к изменению n_2 . Это дает возможность создавать датчики на основе ДВР с гофрированным покрытием, избирательно реагирующие только на один тип внешних воздействий.

Таким образом, сравнение случаев $n_2 > n_1$ и $n_2 < n_1$ показывает, что в первом случае варьирование толщины гофра оказывает более сильное влияние на эффективный показатель преломления ДВР. При разработке датчиков и сенсоров на основе ДВР это дает возможность в широких пределах изменять оптические характеристики ДВР, в частности, амплитуду и спектральную ширину их резонансов. Чувствительность и избирательность обоих типов ДВР к внешним воздействиям оказывается примерно одинаковой.

Проведённое численное моделирование влияния давления на оптические характеристики ДВР показало, что при изменении давления на 1 атм. происходит сдвиг резонансной длины волны на 10 нм. Таким образом, ДВР с полимерным покрытием могут быть использованы, в качестве ЧЭ датчика давления.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны основы технологий создания ДВР на полимерной основе. Формирования периодических полимерных структур на поверхности оптических волокон, связано с самоорганизации раствора полимера. Период продольных структур определяется концентрацией раствора и диаметром волокна и может варьироваться от 100 мкм до 2 мм;

2. Разработаны методы изготовления спиральных ДВР на полимерной основе. Их достоинствами являются простота изготовления и большой выбор оптических материалов, как для сердечника, так и для спирального покрытия.

3. Проведены экспериментальные исследования оптических характеристик ДВР и влияния на них внешних факторов – температуры и показателя преломления окружающей среды. Представленные результаты показывают, что ДВР с полимерным периодическим покрытием обладают резонансными свойствами, а их чувствительность к изменению температуры не уступает чувствительности ДВР, изготовленных по классическим технологиям. Температурная чувствительность спектрального сдвига полос достигает $0,14$ нм/ $^{\circ}\text{C}$, Температурная чувствительность амплитуды резонансов $0,11$ дБ/ $^{\circ}\text{C}$. Чувствительность к изменению показателя преломления окружающей среды – $\Delta\lambda/\Delta n = 4,54$ нм./отн.ед.;

4. Теоретический анализ оптических характеристик ДВР с целью их оптимизации показал, что в ДВР с полимерными гофрированными покрытиями появляется возможность изменять эффективный показатель преломления в широких пределах путем изменения показателя преломления и толщины гофра. Это позволяет оптимизировать оптические и резонансные характеристики ДВР применительно к их использованию в качестве чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков. Выбор оптимальной толщины гофра позволяет также обеспечить избирательную чувствительность ДВР к определенному типу внешнего воздействия.

ПУБЛИКАЦИИ, ВХОДЯЩИЕ В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК:

1. Сидоров, А.И., Цирухин, А.А. Влияние параметров гофров на модуляцию эффективного показателя преломления длиннопериодных волоконных решеток с полимерным покрытием [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Оптический журнал. - 2010. Т.77. Вып.2. - С.68-73.

2. Сидоров, А.И., Цирухин, А.А. Формирование полимерных периодических структур на поверхности оптических волокон [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Журнал технической физики, - 2010. Т.80. Вып.1. - С.125-129.

3. Цирухин, А.А. Влияние температуры на оптические характеристики длиннопериодной гофрированной волоконной решётки [Текст] / А.А. Цирухин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2010. №3, - С. 3-10.

4. Сидоров, А.И., Цирухин, А.А. Влияние температуры и показателя преломления окружающей среды на спектральные характеристики волоконных длиннопериодных решеток с полимерным гофрированным покрытием [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Оптический журнал, - 2010. Т.77. Вып.5. - С.55-60.

ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ:

5. Способ изготовления гофрированных оптических волокон / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Патент РФ, №2379717. приоритет 23.05.2008, зарегистрирован 20.01.2010.

6. Способ изготовления спиральных длиннопериодных волоконных решеток / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Заявка на Патент РФ, 2008 г. №2008143851/28. Положительное решение о выдаче патента от 25.01.2010.

7. Способ изготовления длиннопериодной волоконной решетки / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Заявка на Патент РФ, 2008 г. №2008143849/28. Положительное решение о выдаче патента от 29.03.2010.

8. Сидоров, А.И., Цирухин, А.А. Оптимизация параметров гофрированных ДВР с полимерным покрытием для ВОД [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2009. №8. - С.3-8.

9. Сидоров, А.И., Цирухин, А.А. Формирование и оптические свойства длиннопериодных волоконных решёток с полимерным покрытием [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2009. №3, - С. 15-24.

10. Сидоров, А.И. Цирухин, А.А. Длиннопериодные волоконные решётки с полимерным покрытием: возможности применения в качестве датчиков и сенсоров [Текст] / А.И. Сидоров, А.А. Цирухин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2009. №10.-С.17-22.

11. XIII Laser Optics Conference, SPb, 2008.

12. 61 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2008.

13. 62 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2009.

14. 63 Научно - техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2010.

Подписано в печать 13.05.2010. Формат 60x84/16
Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЗАО «КопиСервис».
Печать ризографическая. Заказ № 1/1006.
П. л. 1.0. Уч. –изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

ЗАО «КопиСервис»
Адрес: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 3.
тел.: (812) 327 5098