

На правах рукописи

Малинин Антон Владимирович

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ,  
КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ СРЕД НА  
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛЫХ МИКРОСТРУКТУРНЫХ  
ВОЛНОВОДОВ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика,  
03.01.02 – биофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена на кафедре оптики и биофотоники физического факультета СГУ им. Н.Г.Чернышевского

**Научный руководитель:**

Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Тучин** Валерий Викторович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Зимняков** Дмитрий Александрович, кафедра физики СГТУ им. Гагарина Ю.А.

кандидат физико-математических наук, доцент  
**Конюхов** Андрей Иванович, кафедра компьютерной физики СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Ведущая организация:** ФГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», Москва, Россия

Защита состоится «6» сентября 2013 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.243.05 при Саратовском государственном университете им. Н.Г.Чернышевского по адресу: 410026, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корпус III.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013г.

Ученый секретарь Совета  
д.ф.-м.н., профессор



В.Л. Дербов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Процесс поиска возможных применений для микро- и наноструктурных оптических волноводов начался вслед за появлением первых сообщений о создании таких структур. Наноструктурные волноводы, называемые также фотонно-кристаллическими, успешно применяются в нелинейной оптике для генерации когерентного излучения в пределах широкого диапазона (суперконтинуума), а также для гибкой передачи сверхкоротких лазерных импульсов без значительного уширения.

Перспективная область применения микроструктурных волноводов – разработка оптических сенсоров физических и биофизических величин. В наибольшей степени это относится к микроструктурным волноводам с поллой сердцевиной. Конструктивные особенности таких волноводов предполагают высокую степень взаимодействия вводимого оптического излучения со средой, заполняющей полые каналы в структуре волновода.

Впервые подобный сенсор был реализован на базе микроструктурного волновода с твердой сердцевиной, в котором излучение, распространяющееся по твердому дефекту за счет полного внутреннего отражения, взаимодействовало в форме быстро затухающей волны со средой, заполняющей полые каналы в структурированной оболочке, однако, применение микро- и наноструктурных волноводов с поллой сердцевиной позволило значительно увеличить долю излучения, которое взаимодействует с анализируемой средой, так как стала возможной инжекция анализируемой среды непосредственно в световедущий дефект.

С точки зрения применения микро- и наноструктурных волноводов в качестве оптических датчиков, актуальной задачей является разработка

новых конструкций волноводов, изучение их оптических свойств и исследование влияния оптических параметров сред на оптические характеристики волноводов.

Использование микро- и наноструктурных волноводов в качестве оптического инструмента исследования биологических объектов предполагает четкое понимание того, каким образом и в какой степени такие эффекты как рассеяние и поглощение оптического излучения в среде, заполняющей каналы волновода, влияют на оптические характеристики волновода (спектральный состав, интенсивность оптического сигнала на выходе).

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование оптических свойств полых микроструктурных волноводов (спектральные характеристики, пространственные характеристики пучка лазерного излучения на выходе, величина оптических потерь) различных геометрических конфигураций, а также исследование влияния оптических параметров сред (показатель преломления, коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния), заполняющих внутреннюю структуру волноводов, на их оптические характеристики – модификацию спектральных свойств излучения на выходе.

В рамках работы решались следующие **задачи**:

- Разработка конструкций микроструктурных волноводов (МСВ) с различной топологией структурной оболочки и полым дефектом.
- Разработка методического обеспечения работ, а именно: техника и методики проведения экспериментов с МСВ: получение спектрального состава излучения, профиля пучка излучения, измерение оптических потерь.
- Определение спектральных характеристик образцов полых микроструктурных волноводов.

- Определение пространственных характеристик пучка лазерного излучения на выходе из образцов МСВ.
- Измерение величины оптических потерь в микроструктурных волноводах на длинах волн 532 нм и 633 нм, в зависимости от положения максимумов в спектрах пропускания образцов.
- Определение оптимальной внутренней геометрии МСВ для измерения показателя преломления сред по результатам исследования линейных оптических свойств микроструктурных волнопроводов.
- Теоретический расчет сдвига полос в спектре пропускания микроструктурных кювет-датчиков при изменении показателя преломления среды, заполняющей внутренние каналы датчика.
- Разработка экспериментального оснащения для проверки теоретических расчетов экспериментом на модельных средах с различными значениями показателя преломления.
- Экспериментальная оценка диапазона значений коэффициента поглощения и коэффициента рассеяния среды (при заданной мощности источника зондирующего излучения), для измерения которых применима микроструктурная кювета – датчик.
- Апробация методов измерения в эксперименте по определению количества глюкозы (на уровне физиологических концентраций) в модельной жидкости, и методе регистрации положительной/отрицательной реакции агглютинации эритроцитов при определении группы крови человека с использованием специфичных агглютинирующих сывороток.

### **Научная новизна работы:**

1. Экспериментально показано, что при изменении соотношения показателей преломления материала, из которого изготовлен полый микроструктурный волновод и среды, заполняющей каналы внутренней структуры волновода, происходит смещение

максимумов в спектре пропускания волновода, при этом зависимость длин волн максимумов в спектре пропускания микроструктурного волновода от показателя преломления среды, заполняющей каналы волновода, линейная.

2. Получено экспериментальное подтверждение антирезонансного механизма локализации электромагнитных волн в полый сердцевине волновода с большим периодом решетки микроструктурной оболочки.
3. Экспериментально показано, что волноводный эффект в микроструктурных волноводах сохраняется при заполнении их внутренней структуры средой, содержащей рассеиватели оптического излучения.
4. Показано, что увеличение коэффициента поглощения среды, заполняющей полую сердцевину микроструктурного волновода, в некотором диапазоне из спектральной области 400 – 1000 нм инициирует сильное затухание оптического сигнала в волноводе, поэтому полые микроструктурные волноводы могут применяться для измерения низких значений коэффициента поглощения сред в видимом диапазоне спектра.

### **Практическая значимость результатов**

1. Разработаны новые типы микроструктурных волнопроводов с различной топологией структурной оболочки и полым дефектом;
2. Разработана методика получения калибровочных кривых для измерения показателя преломления и коэффициента поглощения среды с помощью полого микроструктурного волновода;
3. Определена нижняя граница чувствительности микроструктурных кювет-датчиков к изменению показателя преломления;

4. Впервые полый микроструктурный волновод применялся в качестве средства регистрации положительной/отрицательной реакции агглютинации эритроцитов.
5. Разработан метод определения низких концентраций глюкозы (единицы ммоль/л) в жидкости с применением полого микроструктурного волновода в качестве протяженной фотометрической кюветы малого объема (50 мкл). Метод позволяет определять концентрацию глюкозы в анализе на физиологическом уровне (концентрация глюкозы в крови здорового человека в среднем составляет величину 4 – 7 ммоль/л).

### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту**

1. Полый микроструктурный волновод с круглой формой сердцевины может применяться для измерения показателя преломления среды, заполняющей каналы его внутренней структуры, с погрешностью 0,001.

2. При заполнении внутренней структуры полого микроструктурного волновода средой, содержащей частицы, рассеивающие оптическое излучение, волноводный эффект сохраняется, полый микроструктурный волновод может применяться в качестве протяженной фотометрической кюветы малого объема для измерения коэффициентов рассеяния и поглощения сред.

3. Эффективность оксидазного метода определения концентрации глюкозы в биологических жидкостях может быть увеличена при использовании полого микроструктурного волновода вместо стандартной фотометрической кюветы за счет многократного снижения объема пробы, требуемого для получения отклика на присутствие глюкозы в пробе.

## **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

- Международная школа для молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике (Saratov Fall Meeting 2010), г. Саратов, Россия.
- Optical Sensors and Biophotonics III, Communications and Photonics 2011, Shanghai, China.
- Международная школа для молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике (Saratov Fall Meeting 2011), г. Саратов, Россия.
- The 3<sup>rd</sup> Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (NANOMETA 2011), Seefeld-in-Tirol, Austria.
- Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics VIII, SPIE Photonics West 2011, San-Francisco, USA.
- Photonic Solutions for Better Health Care III, SPIE Photonics Europe 2012, Brussels, Belgium.
- Dynamics Fluctuations in Biomedical Photonics IX, SPIE Photonics West 2012, San-Francisco, USA
- Международная школа для молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике (Saratov Fall Meeting 2012), г. Саратов, Россия.
- Photonic Solutions for Better Health Care III, SPIE Photonics Europe 2012, Brussels, Belgium.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 10 работ (из них 1 патент и 8 статей в изданиях, входящих в список ВАК).



## **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов по исследованию оптических и сенсорных свойств микроструктурных волноводов, модификации экспериментальных установок, обработке и интерпретации экспериментальных результатов. Постановка исследовательских задач осуществлялась профессором, д.ф.-м.н. В.В. Тучиным (СГУ им. Чернышевского), старшим научным исследователем, к.ф.-м.н. Скибиной Ю.С. (ООО НПП «Наноструктурные Технологии Стекла», СГУ им. Чернышевского), обсуждение результатов проводилось при участии к.ф.-м.н., доц. В.А. Дубровского (СГМУ им. Разумовского), Dr. G. Steinmeyer (Max-Born Institute, Berlin, Germany), Dr A. Vjeoumikhov (Institute for Scientific Instruments, Berlin, Germany), Dr R. Wedell (Institute of Applied Photonics, Berlin, Germany).

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы из 186 наименований. Общий объем диссертации составляет 134 страницы текста, иллюстрированного 31 рисунком.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, ее новизна и практическая значимость, определена цель работы, представлены основные результаты, полученные в ходе работы и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору работ в области разработки и применения оптических сенсоров на базе микро- и наноструктурных волноводов, показана технология изготовления микро- и наноструктурных волноводов, представлен обзор материалов для их производства.

В первом разделе вводится понятие микро- и наноструктурных волноводов, а также фотонно-кристаллических волноводов, дается понятие термину «фотонный кристалл».

Второй раздел посвящен технологии изготовления микро- и наноструктурных волноводов, представлен обзор материалов, применяемых для производства волноводов, рассматриваются преимущества и недостатки разных типов материалов.

В третьем разделе первой главы представлен обзор публикаций, посвященных сенсорам на базе микроструктурных и фотонно-кристаллических волноводов.

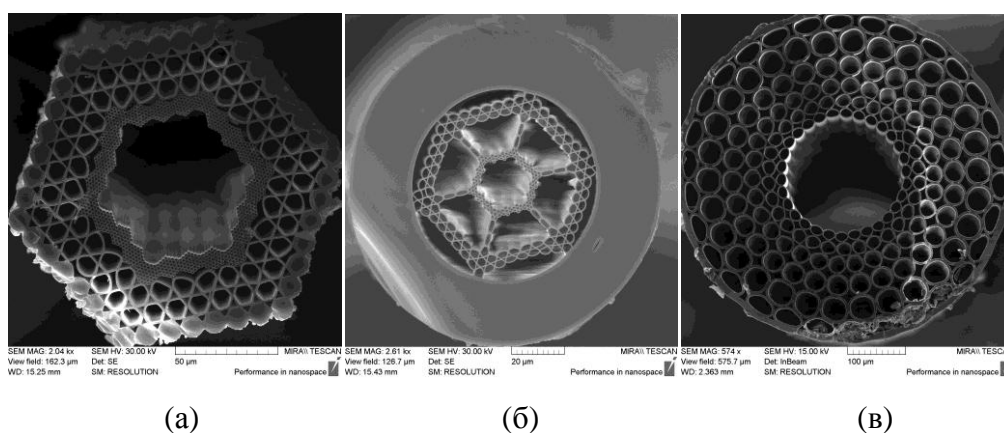
**Вторая глава** посвящена исследованию оптических свойств полых микроструктурных волноводов. Первый раздел главы посвящен описанию объекта исследования – микроструктурных волноводов десяти различных типов. Каждому типу соответствует несколько образцов волноводов с различным масштабом структуры (всего 42 образца). Примеры структур исследуемых образцов волноводов представлены на рис. 1. Изображения структур получены с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В рамках исследования определялись следующие параметры волноводов:

- Пространственные характеристики лазерного пучка на выходе из образца волновода длиной 50 мм;
- Величина потерь лазерного излучения в волноводе на единицу длины волновода;
- Спектральный состав излучения от широкополосного источника, прошедшего по образцу волновода длиной 50 мм.

Исследование оптических свойств микроструктурных волноводов проводилось с применением широкополосного источника оптического излучения (галогенная лампа Ocean Optics HL-2000) и монохроматических источников оптического излучения: твердотельный лазер, излучающий на длине волны 532 нм, и HeNe-лазер, излучающий на длине волны 633 нм. В качестве приемников оптического излучения применялись: цифровой спектроанализатор Ocean Optics HR4000 (спектральный диапазон 400 –

1000 нм), CCD-камера Gentec Beamage, измеритель оптической мощности Ophir PD300-3W-V1.



*Рис. 1 Примеры изображений внутренней структуры полых МСВ: а – структура в форме шестигранника, сформированная из одного ряда мультикапилляров, двух рядов капилляров и внешнего ряда стеклянных стержней; б – шестигранная структура, состоящая из одного ряда мультикапилляров, формирующих полулю сердцевины, двух рядов капилляров и подвесов, каждый из которых сформирован из трех капилляров; в – структура сформирована из пяти concentрических слоев капилляров, диаметр капилляров увеличивается от центра к периферии.*

Во втором разделе представлены результаты исследования спектральных характеристик полых микроструктурных волноводов. Измерение спектров пропускания волноводов производилось с помощью установки (рис. 2), включающей в себя следующие элементы: в качестве источника оптического излучения видимого диапазона использовалась галогенная лампа Ocean Optics HL-2000-HP (360-1700 нм, оптоволоконный выход SMA 905), для ввода излучения в волновод использовался микроскопический объектив (40x); в качестве приемника оптического излучения применялся цифровой анализатор спектра Ocean Optics HR4000 (спектральный диапазон 400 – 1000 нм).

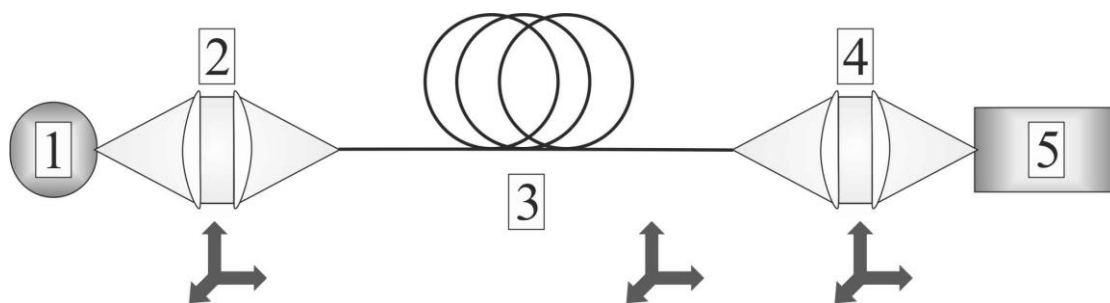


Рис. 2. Схема установки для определения спектров пропускания полых МСВ: 1 – широкополосный источник излучения (галогенная лампа), 2 – оптический элемент (микрообъектив) для ввода излучения в сердцевину волновода с механической юстировкой, 3 – исследуемый образец МСВ, закрепленный на юстируемых платформах, 4 – оптический элемент для фокусировки излучения, выходящего из МСВ, на вход оптоволоконного кабеля спектроанализатора, 5 – спектроанализатор.

На установке, схематично изображенной на рис. 2, были получены спектры пропускания всех исследуемых образцов микроструктурных волноводов. Установлено, что все образцы имеют не менее одной полосы пропускания в спектральном диапазоне 400 – 1000 нм.

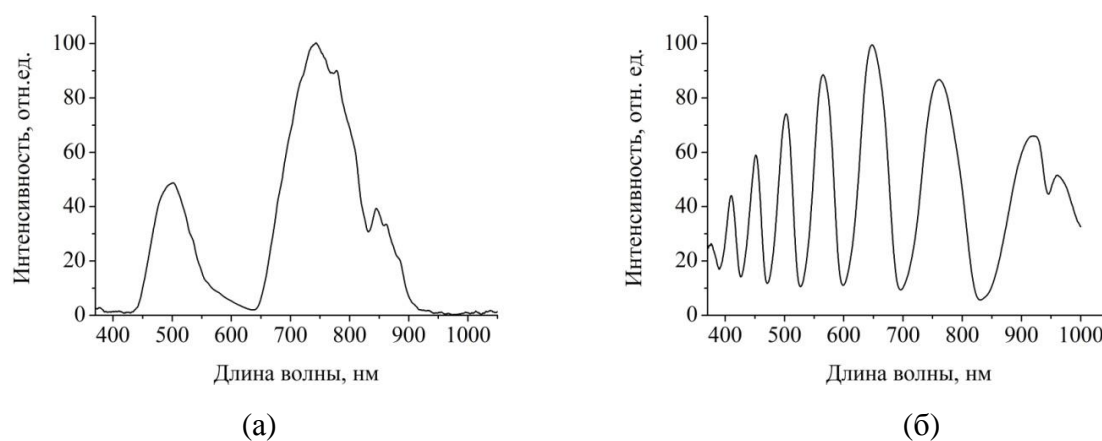
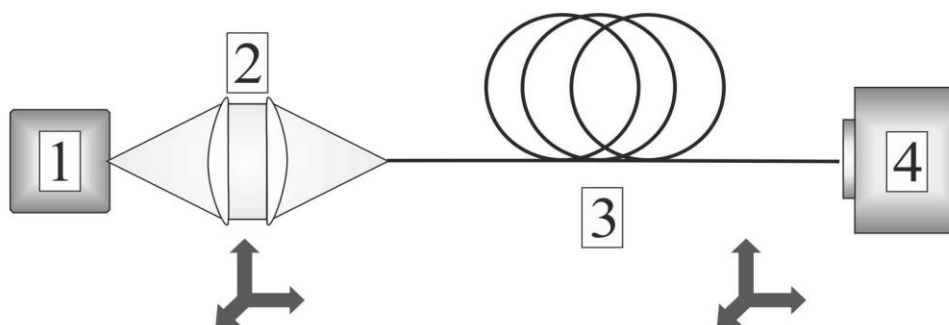


Рис. 3 Спектр пропускания полого МСВ с сердцевинной круглой формы и радиально увеличивающимся диаметром капилляров в структурной оболочке: а – диаметр полой сердцевины МСВ 51 мкм, толщина стенки капилляров первого ряда 0,48 мкм; б – диаметр полой сердцевины МСВ 200 мкм, толщина стенки капилляров первого ряда 1,88 мкм;

Для всех образцов характерно уменьшение ширины полос пропускания с увеличением толщины стенок капилляров в структурной оболочке волноводов. Так, например, в спектре пропускания микроструктурного волновода с полую сердцевину круглой формы и радиально увеличивающимся диаметром капилляров в структурной оболочке (рис. 1 (в)) в спектральном диапазоне 400 – 1000 нм количество полос пропускания увеличивается с двух до семи при увеличении масштаба структуры в 4 раза (рис. 3).

С пропорциональным уменьшением размеров структуры наблюдается не только уменьшение количества максимумов в спектре пропускания волновода, но и искажение формы пиков пропускания. Искажения формы пиков можно объяснить неидеальностью структуры (разнотолщинность стенок капилляров оболочки по длине образца), степень влияния которой возрастает с уменьшением масштабов структуры волновода относительно длины волны взаимодействующего излучения.

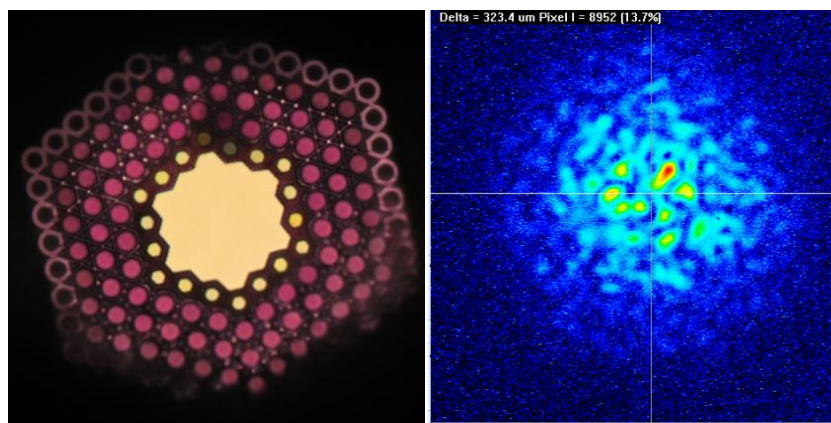
Третий раздел главы посвящен экспериментальному исследованию пространственных характеристик лазерных пучков на выходе из образцов полых микроструктурных волноводов. С этой целью применялась схема, показанная на рис. 4. Установка позволяла вводить излучение от лазера в полую сердцевину исследуемого волновода и регистрировать пространственное распределение интенсивности излучения в пучке в плоскости, перпендикулярной продольной оси волновода, на выходе из образца. В качестве источника в установке применялся твердотельный лазер с длиной волны излучения 532 нм. Диаметр коллимированного пучка излучения от источника составлял 3 мм. С помощью микрообъектива (40х), установленного на юстировочной платформе с возможностью перемещения по трем пространственным координатам, излучение от лазера вводилось в полую сердцевину образцов микроструктурных волноводов длиной 50 мм.



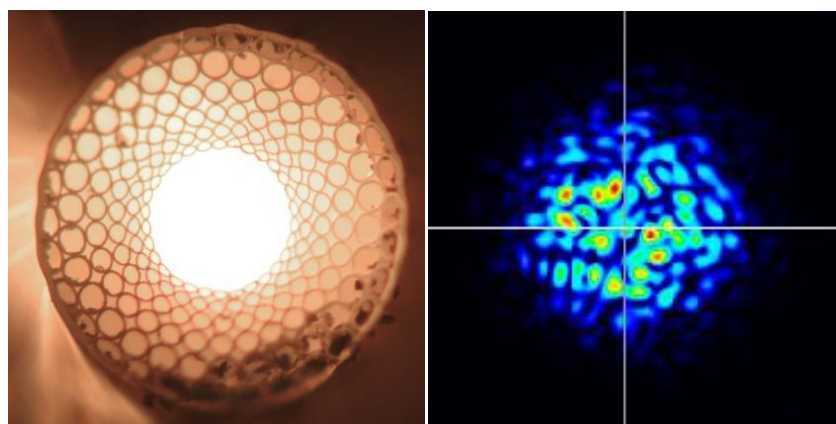
*Рис. 4. Схема установки для определения пространственных характеристик пучка лазерного излучения на выходе из полого МСВ: 1 – источник излучения (лазер), 2 – оптический элемент для ввода излучения в сердцевину волновода с механической юстировкой (микрообъектив 40х), 3 – исследуемый образец МСВ, закрепленный на юстируемых платформах, 4 – CCD-камера.*

CCD-камера в схеме (рис. 4) была установлена вблизи выходного торца волновода таким образом, что CCD-матрица располагалась в плоскости, перпендикулярной оси волновода. Камера регистрировала пространственное распределение интенсивности излучения в пучке на выходе из исследуемого образца волновода.

Анализ полученных пространственных характеристик пучков лазерного излучения на выходе из образцов полых микроструктурных волноводов позволяет сделать вывод о том, что исследуемые волноводы всех типов поддерживают многомодовый режим распространения излучения с длиной волны 532 нм. Для всех исследуемых образцов волноводов возможно возбуждение мод высшего порядка и наблюдение характерной спекл-картины (рис. 5), являющейся результатом интерференции мод с разным набегом фазы, в плоскости приемника (CCD-камеры).



(а)



(б)

*Рис. 5. Изображение поперечного сечения полого МСВ и поперечное распределение интенсивности излучения в пучке на выходе из образца: а – МСВ с сердцевинной в форме шестигранника и одним рядом мультикапилляров (размер сердцевинны по двойной апофеме – 52 мкм); б – МСВ с сердцевинной круглой формы и радиально увеличивающимся диаметром капилляров в структурной оболочке (диаметр сердцевинны – 280 мкм).*

Путем точной юстировки микрообъектива относительно торца волновода, в некоторых случаях удалось получить пучки с гауссовым распределением интенсивности на выходе (рис. б), однако, при незначительном изменении условий ввода происходило образование спекл-картины в плоскости приемника. Добиться гауссового распределения интенсивности в пучке удалось только на образцах с диаметром полой сердцевинны не более 60 мкм.

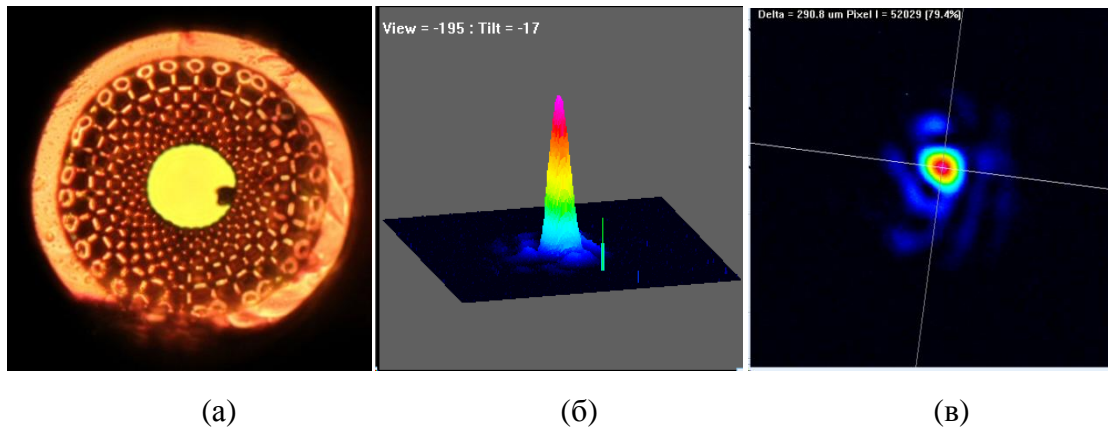


Рис. 6. а - Изображение поперечного сечения образца полого МСВ с диаметром поллой сердцевины 34 мкм; б – трехмерный график распределения интенсивности излучения в пучке на выходе из образца; в – двухмерный график распределения интенсивности излучения в пучке на выходе из образца.

Четвертый раздел главы посвящен измерению величины потерь лазерного излучения в полых микроструктурных волноводах. Для определения коэффициента затухания для исследуемых образцов МСВ, т.е. величины затухания оптического сигнала в волноводе на единицу длины волновода применялась схема (рис. 7), включающая в себя источник монохроматического излучения – твердотельный лазер ( $\lambda=532$  нм) либо газоразрядный HeNe-лазер ( $\lambda=633$  нм), микрообъектив для ввода излучения в сердцевину волновода, и измеритель оптической мощности (Ophir PD300-3W-V1).

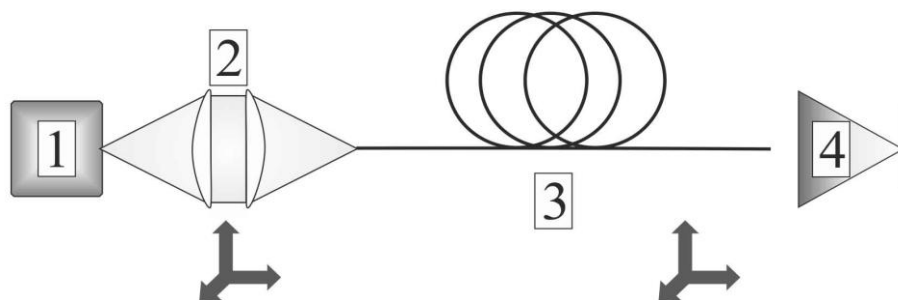
Измерение проводилось методом обрыва, т.е. путем сравнения значений мощности оптического излучения, измеренной на выходе длинного отрезка волновода и на выходе короткого отрезка, образованного отсечением части длины.

Коэффициент затухания, измеряемый в дБ/м рассчитывается по формуле:

$$\alpha = -\frac{10}{L} \lg \left( \frac{P}{P_0} \right); \quad (1)$$



где  $P_0$  – мощность оптического сигнала на выходе короткого из отрезка волновода,  $P$  – мощность оптического сигнала на выходе из длинного отрезка,  $L$  – длина отсекаемого отрезка в метрах.



*Рис. 7. Схема установки для измерения коэффициента затухания оптического сигнала в МСВ: 1 – источник монохроматического излучения (лазер), 2 – оптический элемент (микрообъектив 40x) для ввода излучения в сердцевину волновода с механической юстировкой, 3 – исследуемый образец МСВ, закрепленный на юстируемых платформах, 4 – измеритель оптической мощности.*

При измерении коэффициента затухания соблюдалась неизменность условий ввода излучения источника в волновод. Юстировка положения входного торца волновода относительно источника излучения и микрообъектива производилась однократно непосредственно перед началом измерений.

Образцы исследуемых МСВ имели длину равную 0,5 м. После измерения параметра  $P$  выходной торец волновода высвобождался из фиксатора и от волновода со стороны незакрепленного конца отсекался отрезок длиной  $L = 0,25$  м, после чего конец волновода вновь фиксировался и производилось измерение параметра  $P_0$ .

Для всех исследуемых образцов были получены высокие значения коэффициента затухания. Минимальное значение коэффициента затухания, измеренное в эксперименте составило 0,4 дБ/м на длине волны

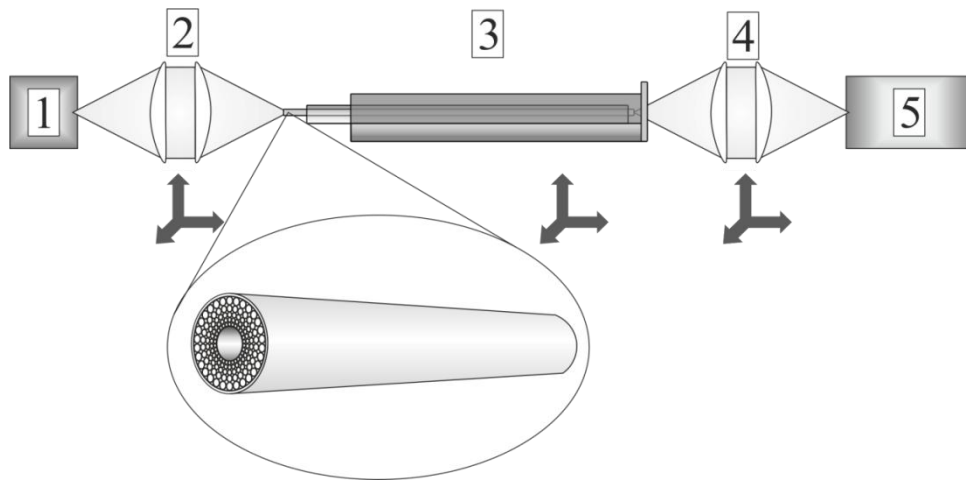
532 нм для волновода с полый сердцевинной круглой формы (рис. 1 в), с диаметром сердцевины 34 мкм.

В **третьей главе** представлены результаты исследования влияния оптических параметров (показатель преломления, коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния) среды, заполняющей внутреннюю структуру волновода с радиально увеличивающимся диаметром каналов в структурной оболочке, на спектральный состав оптического излучения, проходящего по волноводу.

В первом разделе дается описание объектам исследования – полым микроструктурным волноводам с радиально увеличивающимся диаметром каналов в структурной оболочке, большим диаметром полый сердцевинной (более 150 мкм) и толщиной резонансного слоя диэлектрика в оболочке (стенок капилляров внутреннего ряда) более 1 мкм.

Второй раздел посвящен описанию материалов и методов исследования, описывается экспериментальная установка и последовательность действий при проведении экспериментов.

Экспериментальная установка (рис. 8) состояла из источника оптического излучения широкого спектра (галогенная лампа Ocean Optics HL-2000-HP с оптоволоконным выходом), микрообъектива на трехкоординатной подвижке для фокусировки и ввода излучения в сердцевину волновода, исследуемый образец микроструктурного волновода, интегрированного со специально разработанной стеклянной кюветой стоящей на трехкоординатной подвижке, микрообъектив для фокусировки оптического излучения, выходящего из образца волновода, на оптоволоконный вход цифрового спектрометра Ocean Optics HR4000, соединенного с персональным компьютером через стандартный USB интерфейс.



*Рис. 8 Экспериментальная установка, включающая: 1 – широкополосный источник излучения (галогенная лампа с оптоволоконным выходом); 2, 4 – оптические элементы для фокусировки излучения, установленные на трехкоординатные подвижки; 3 – образец микроструктурного волновода, интегрированный в специальную стеклянную кювету-держатель, установленную на трехкоординатную подвижку; 5 – спектрометр Ocean Optics HR4000.*

Основные этапы эксперимента заключались в следующем:

- Фиксация опорного спектра излучения от источника;
- Установка кюветы-держателя с образцом МСВ в схему, юстировка входного торца волновода относительно микрообъектива для достижения условий максимально эффективного ввода оптического излучения в полую сердцевину МСВ;
- Фиксация спектра пропускания незаполненного образца МСВ;
- Заполнение с помощью пипет-дозатора камеры кюветы-держателя жидкостью с известными оптическими параметрами, сопровождающееся инъекцией жидкости в каналы внутренней структуры МСВ;
- Фиксация спектра пропускания заполненного образца МСВ;
- Коррекция спектров пропускания пустого и заполненного образцов МСВ с учетом опорного спектра источника, с целью устранения

влияния формы спектра излучения источника и передаточной функции оптических элементов схемы на получаемые в конечном результате спектры пропускания образцов.

В третьем разделе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния изменения показателя преломления среды, заполняющей внутреннюю структуру волновода на спектр пропускания волновода. Произведен теоретический расчет координат локальных максимумов в спектре пропускания микроструктурного волновода для различных значений показателя преломления среды. Теоретические расчеты подтверждаются экспериментом, результатом которого является получение линейных зависимостей (рис. 9) значений длин волн максимумов в спектре пропускания микроструктурного волновода с диаметром полый сердцевины 210 мкм от показателя преломления инжектированной в волновод среды (водного раствора глюкозы).

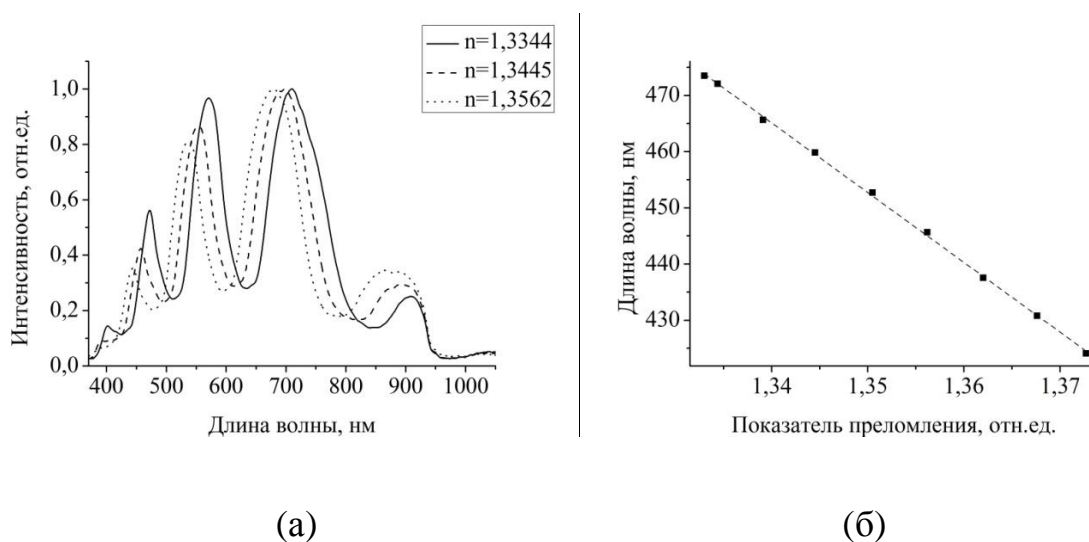


Рис. 9 а – Спектры пропускания идентичных образцов полых МСВ, структура которых заполнена водными растворами глюкозы с различными значениями показателя преломления; б – зависимость длины волны локального максимума в спектре пропускания МСВ от показателя преломления модельной среды.

В четвертом разделе представлены результаты эксперимента по заполнению внутренней структуры микроструктурных волноводов с диаметром полый сердцевины 280 мкм модельными жидкостями (водные растворы рибофлавина), поглощающими оптическое излучение в определенном спектральном диапазоне, с известными значениями коэффициента поглощения. Результат эксперимента – зависимость (рис. 10) интенсивности излучения с длиной волны, соответствующей максимуму поглощения света модельной средой, на выходе из волновода от коэффициента поглощения среды.

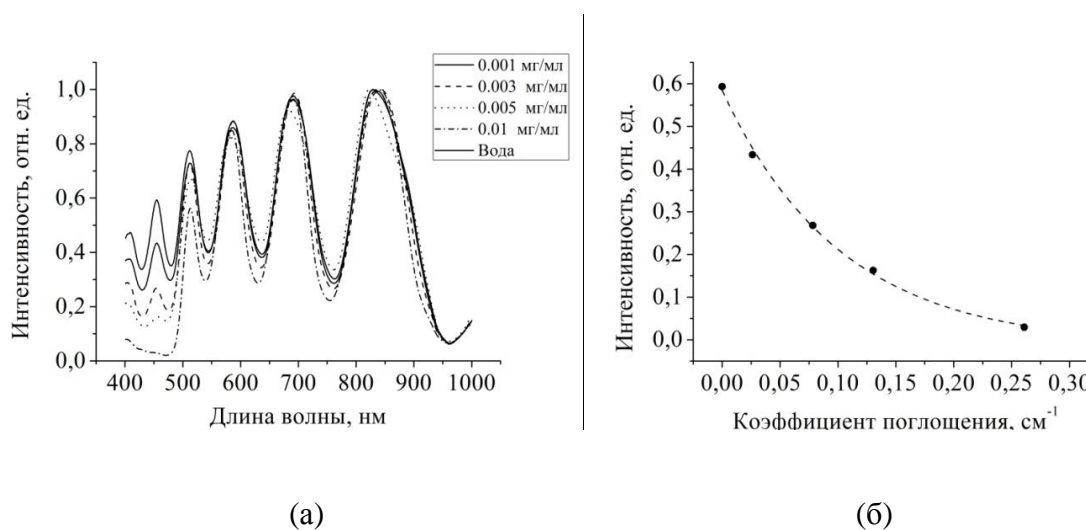


Рис. 10 а – Нормированные спектры пропускания идентичных образцов полых МСВ, заполненных водными растворами рибофлавина различных концентраций, а также чистым растворителем (водой); б – зависимость интенсивности оптического излучения с длиной волны 450 нм на выходе из полого МСВ, заполненного водным раствором рибофлавина, от коэффициента поглощения раствора на длине волны 450 нм. Пунктиром показана экспоненциально затухающая функция, аппроксимирующая измеренные значения.

Пятый раздел посвящен экспериментальному исследованию влияния рассеивающих свойств биологических сред на спектральные характеристики полых микроструктурных волноводов. Модельная среда (препарат Интралипид, разбавленный водой) с известным значением коэффициента рассеяния вводилась в полую сердцевину

микроструктурных волноводов. Регистрировалась интенсивность проходящего по волноводу лазерного излучения (рис. 11 (б)). Аналогичный эксперимент проводился с использованием протяженной кюветы идентичной длины (50 мм). Оценивалась зависимость интенсивности зондирующего излучения, прошедшего через протяженную кювету и микроструктурный волновод, заполненные модельной средой от коэффициента рассеяния среды (рис. 11 (а)).

С ростом коэффициента рассеяния модельной среды, пропускание заполненной кюветы и заполненного микроструктурного волновода уменьшается по экспоненциальному закону, при этом в случае микроструктурного волновода более быстрого затухания интенсивности зондирующего излучения не происходит, волноводный эффект сохраняется.

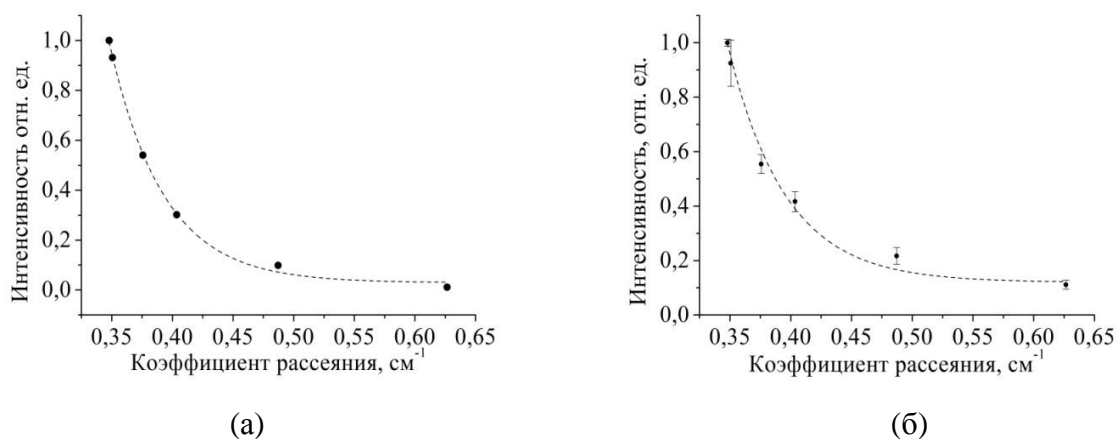


Рис. 11 а – Зависимость интенсивности излучения проходящего через протяженную кювету длиной 50 мм, заполненную модельной средой (раствор Интралипида), от коэффициента рассеяния среды; б – зависимость интенсивности излучения проходящего через полый МСВ, заполненный модельной средой (раствор Интралипида), от коэффициента рассеяния среды. Измеренные значения аппроксимированы экспоненциально затухающей функцией.

В шестом разделе рассматриваются приложения для полого микроструктурного волновода в качестве кюветы-датчика для определения концентрации глюкозы в жидкости. Представлены результаты

эксперимента по регистрации оптического отклика на изменение концентрации глюкозы в водном растворе, заполняющем полую сердцевину микроструктурного волновода. Для индикации глюкозы использовался специальный буферно-ферментный раствор, применяемый в клинической практике для определения концентрации глюкозы в крови или плазме крови человека. При смешивании жидкой пробы, содержащей глюкозу и реагента, содержащаяся в пробе глюкоза окисляется присутствующей в реагенте глюкозооксидазой до глюконовой кислоты и эквимолярного количества перекиси водорода. Пероксид разлагается до воды и кислорода ферментом пероксидазой. Высвобожденный кислород окисляет пропорциональное количество хромогена, концентрация которого может быть определена по измеренным значениям оптической плотности смеси на выбранной длине волны из диапазона 400 – 600 нм. На рис. 12 (а) показаны спектры пропускания идентичных образцов полых микроструктурных волноводов, заполненных смесью водного раствора глюкозы и буферно-ферментного раствора-индикатора.

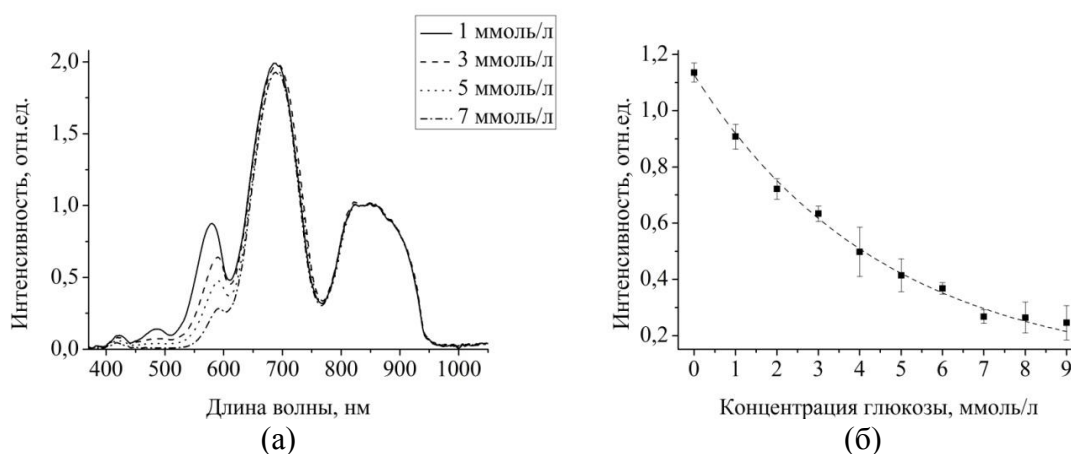


Рис. 12 а - Спектры пропускания образцов полых МСВ с диаметром поллой сердцевины 266 мкм, заполненных смесью глюкозного индикатора и водного раствора глюкозы. Соответствующие концентрации глюкозы в растворе указаны на врезке. Спектры нормированы на значение интенсивности в максимуме на 850 нм, лежащим за пределами полосы поглощения окрашенного индикатора; б - Зависимость интенсивности оптического излучения с длиной волны 575 нм на выходе МСВ от концентрации глюкозы в инъектированной смеси.

На рис. 12 (б) показаны зависимости интенсивности оптического излучения с длиной волны 575 нм на выходе волновода от концентрации глюкозы в пробе. Таким образом, получен отклик на изменение концентрации глюкозы в пробе, при этом возможно определение концентрации глюкозы на уровне ниже одного миллимоля на литр. В клинической практике нет необходимости в измерении столь низких концентраций, т.к. концентрация глюкозы в крови здорового человека составляет в среднем 4 – 7 ммоль/л, однако, высокая чувствительность к изменению концентрации глюкозы в среде позволяет значительно сократить объем пробы, требуемый для получения отклика сенсора на присутствие глюкозы. Большая длина взаимодействия зондирующего излучения с анализируемой средой в микроструктурном волноводе и конструктивные особенности волновода, обеспечивающие малый расход пробы, позволяют сократить требуемый объем исследуемого материала в несколько раз по сравнению со стандартным фотометрическим методом определения глюкозы в биологических жидкостях человека.

В шестом разделе главы также представлены результаты эксперимента по фотометрическому определению положительной/отрицательной реакции агглютинации эритроцитов с применением полого микроструктурного волновода в качестве микрокюветы-реактора, где эритроциты человека взаимодействуют со специфичной агглютинирующей сывороткой.

Метод регистрации агглютинации эритроцитов основан на получении оптического отклика на изменение коэффициента рассеяния биопробы, представляющей собой взвесь эритроцитов в физрастворе, смешанную с агглютинирующей сывороткой, при положительной реакции агглютинации. Основной мотив для разработки данной методики – перспектива создания систем для автоматизации процесса определения группы крови человека.



Принцип метода заключается в следующем. При агглютинации эритроцитов в крови образуются эритроцитарные комплексы, содержащие от нескольких единиц до нескольких десятков красных кровяных клеток, следствием этого является снижение количества эритроцитов, находящихся во взвешенном состоянии в растворе, что в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента рассеяния анализируемой среды. Вследствие уменьшения коэффициента рассеяния среды происходит рост интенсивности зондирующего оптического излучения, проходящего через образец полого микроструктурного волновода, полая сердцевина которого заполнена анализируемой пробой.

В эксперименте смесь, состоящая из разбавленной физиологическим раствором крови и агглютинирующей сыворотки, вводилась в полую сердцевину микроструктурного волновода с диаметром полый сердцевинны 270 мкм. В образец волновода вводилось излучение от широкополосного источника, регистрировалась интенсивность излучения на выходе в диапазоне длин волн 400 – 1000 нм. Разбавление цельной крови до гематокрита 0,4% физиологическим раствором производилось для того, чтобы получить значения сигнала на приемнике, достаточные для проведения дальнейшей обработки.

Для исследования применялось два модельных раствора. Первый раствор изготавливался путем добавления агглютинирующей сыворотки группы А в пробирку с цельной кровью группы В (положительная реакция агглютинации) и разбавления смеси физиологическим раствором до гематокрита 0,4%. Второй раствор изготавливался по тому же алгоритму, но с использованием агглютинирующей сыворотки группы В (отрицательная реакция агглютинации). На рис. 13 изображены усредненные спектры пропускания идентичных образцов микроструктурных волноводов длиной 50 мм, полые сердцевинны которых заполнены приготовленными смесями.

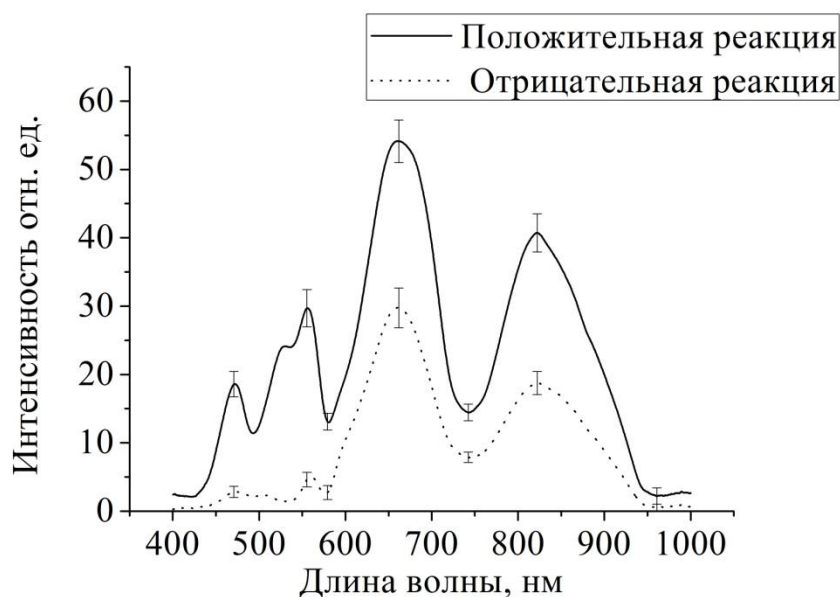


Рис. 13 Усредненные по пяти измерениям спектры пропускания микроструктурных волноводов, заполненных смесью цельной крови группы В с агглютинирующими сыворотками группы А (положительная реакция агглютинации) и В (отрицательная реакция агглютинации).

Максимальная интенсивность излучения на выходе из образца (значение интенсивности, соответствующее длине волны 662 нм на рис. 13) в случае положительной реакции агглютинации достигает значения 55 отн. ед., в случае отрицательной реакции – 29 отн. ед. В данном эксперименте отношение значений интенсивности излучения для разных реакций  $I_+/I_-$  равно 1,9. Таким образом, получен оптический отклик на реакцию агглютинации эритроцитов крови человека.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

### Основные результаты работы

- Разработаны конструкции, технологии и изготовлены полые микроструктурные волноводы с различной топологией внутренней

структуры (10 конструкций с дифференцируемой структурой оболочки и типо-размерным набором);

- Проведено исследование оптических свойств МСВ из различных типо-размерных линеек. Определен спектральный состав распространяющегося по волноводам оптического излучения, пространственные характеристики лазерного излучения на выходе, измерена величина оптических потерь;

- Показано, что МСВ с полый сердцевинной круглой формы и толщиной резонансного слоя 1 – 3 мкм обладает спектром пропускания, схожим со спектром отражения эталона Фабри-Перо, в котором присутствует несколько четко выраженных узких пиков интенсивности. На примере микроструктурных волноводов с различными толщинами резонансного слоя диэлектрика в структурной оболочке показано, что количество пиков в заданном спектральном и ширина пиков зависит от толщины резонансного слоя диэлектрика, а также от показателя преломления материала, из которого изготовлен волновод.

- Получены линейные зависимости координат локальных максимумов в спектре пропускания МСВ от показателя преломления среды, заполняющей его внутреннюю структуру (спектральный отклик на изменение показателя преломления). Показано, что полые микроструктурные волноводы могут применяться в качестве датчиков показателя преломления сред.

- Исследовано влияние изменения коэффициента поглощения среды в определенном спектральном диапазоне, заполняющей полую сердцевину МСВ на спектральный состав излучения, проходящего по волноводу.

- Определен диапазон значений коэффициента рассеяния анализируемой среды, в пределах которого можно регистрировать сигнал на выходе из заполненного средой МСВ длиной 50 мм.

- Полые микроструктурные волноводы впервые применялись в качестве протяженных фотометрических кювет. Получен оптический отклик на изменение концентрации глюкозы на физиологическом уровне.
- Полый микроструктурный волновод применен впервые в качестве микрокюветы-реактора для фотометрического определения положительной/отрицательной реакции агглютинации эритроцитов при определении группы крови человека.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

1. Малинин А.В., Ю.С. Скибина, Н.А. Михайлова, И.Ю. Силохин, М.В. Чайников. Биологический сенсор на базе фотонно-кристаллического световода с поллой сердцевиной // Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 8, стр. 33-38.
2. Malinin A.V., A. A. Zanishevskaja, Yu. S. Skibina, I. Yu. Silokhin, V. V. Tuchin, V. A. Dubrovskiy, A. A. Dolmashkin. Determination of blood types using a chirped photonic crystal fiber // Proceedings of SPIE Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics VIII, Vol. 7898, 78981A (2011). DOI: 10.1117/12.879794
3. Малинин А.В., Ю.С.Скибина, В.В.Тучин, М.В.Чайников, В.И.Белоглазов, И.Ю.Силохин, А.А.Занишевская, В.А.Дубровский, А.А.Долмашкин. Применение фотонно-кристаллических волноводов с поллой сердцевиной в качестве биологических сенсоров // Квантовая электроника, 2011, 41 (4), стр. 302–307.
4. Valery V. Tuchin, Julia S. Skibina, Malinin A.V.. Photonic crystal fibers in biophotonics // Proc. SPIE, Optical Sensors and Biophotonics III, 83110N (2011); doi:10.1117/12.902647
5. Malinin A.V., A.A. Zanishevskaja, V. V. Tuchin, Yu. S. Skibina, I. Yu. Silokhin. Oxidase method for glucose determination using long-period

- grating waveguide // Proceedings of SPIE Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics IX, Vol. 8222, 82221B (2012), DOI: 10.1117/12.914547
6. Malinin A.V., A. A. Zanishevskaja, V. V. Tuchin, Yu. S. Skibina, I. Y. Silokhin. Photonic crystal fibers for food quality analysis // Proceedings of SPIE Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care III, Vol. 8427, 842746 (2012), DOI: 10.1117/12.924096
  7. Занишевская А. А., Малинин А.В., Скибина Ю. С., Тучин В. В., Чайников М. В., Белоглазов В. И., Силохин И. Ю., Ермакова А. М. Анализ фруктовых соков при помощи фотонно-кристаллических волноводов с поллой сердцевиной // Известия Саратовского университета. Новая серия. 2012. Т. 12. Сер. Физика, вып. 2, стр. 58-64.
  8. Malinin A.V., A. A. Zanishevskaja, V. V. Tuchin, Yu. S. Skibina, I. Yu. Silokhin. Photonic crystal waveguide biosensor // Journal of Innovative Optical Health Sciences, Vol. 6, No. 2 (2013) 1350008, DOI: 10.1142/S1793545813500089
  9. Осьмаков М.И., Ермакова А.М., Скибина Ю.С., Белоглазова Е.В., Карпова Е.П., Чайников М.В., Малинин А.В., Силохин И.Ю. Фотонно-кристаллический волновод для селективного пропускания оптического излучения // Заявка на патент № 2013101342/20001698
  10. А.А.Занишевская, Малинин А.В., Ю.С. Скибина, В.В. Тучин, М.В. Чайников, В.И. Белоглазов, И.Ю. Силохин, А.М.Ермакова. Определение концентрации глюкозы в биологических жидкостях при помощи фотонно-кристаллических волноводов // Оптика и спектроскопия, 2013, том 115, №2, с.266-271