

На правах рукописи



Корсакова Светлана Владимировна

**Взаимодействие мод световода с внешней поглощающей средой в
сенсорных элементах для волоконной эванесцентной
спектроскопии среднего ИК-диапазона**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов - 2021

Работа выполнена на кафедре компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского"

Научный руководитель:

Романова Елена Анатольевна,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Анашкина Елена Александровна,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ФГБНУ
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской
академии наук»

Паршков Олег Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический универ-
ситет имени Гагарина Ю.А»

Ведущая организация:

ФГБУН Федеральный исследовате-
льский центр «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской акаде-
мии наук»

Защита состоится 17 мая 2021 г. в 14:00 на заседании Диссертационного совета Д 212.243.18 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Х корпус, ауд. 511.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского», и на сайте: <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-18/kandidatskaya-dissertaciya-korsakovoy-svetlany>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент



Генина
Элина Алексеевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Спектроскопия среднего инфракрасного (ИК) диапазона (2 - 50 мкм в длинах волн по классификации IUPAC [1]) является надежным, быстрым и высокоточным оптическим методом определения химического состава различных веществ. Создание волоконно-оптических датчиков для дистанционной ИК-спектроскопии на основе халькогенидных световодов (изготовленных из стекол, содержащих сульфиды, селениды или теллуриды) с их областью прозрачности в диапазоне длин волн от 1 до 20 мкм (в зависимости от состава стекла) [2], позволит перейти на более высокий уровень контроля в режиме реального времени производственных процессов, состояния окружающей среды, повысить эффективность медицинской диагностики, улучшить системы безопасности.

Аналитический метод, назовем его «методом волоконной эванесцентной спектроскопии» (от англ. the fiber-based evanescent-wave spectroscopy) развивался в последние годы в лабораторных условиях [3–6] на основе Фурье-спектрометров с широкополосными источниками теплового излучения. В измерениях предел обнаружения индивидуальных веществ в смеси был высок (более 1%). Использование U-образных аналитических зондов [7-10] позволило несколько повысить чувствительность датчика. При большом объеме экспериментальных исследований, которые продемонстрировали пригодность волоконно-оптических спектроскопических датчиков для химического анализа различных, преимущественно жидких, веществ, не были выявлены факторы, влияющие на чувствительность, не проводилось детальных экспериментальных и теоретических исследований выходных характеристик. Для создания компактных высокочувствительных датчиков необходимо исследовать особенности взаимодействия излучения в световоде с внешней средой в сенсорном элементе (СЭ), функционирование которого основано на спектральном анализе излучения, прошедшего через световод и частично поглотившегося во внешней среде, поскольку часть излучения, распространяющегося в бесструктурном световоде, состоящем только из стеклянной сердцевины, проникает через боковую поверхность и взаимодействует со средой.

Объектом исследования в диссертационной работе являются физические явления при взаимодействии оптического излучения в СЭ на основе многомодового волоконного световода из халькогенидного стекла, имеющего низкие оптические потери в среднем ИК-диапазоне, с внешней поглощающей средой в виде двухкомпонентного жидкого раствора, а также функционирование волоконно-оптического спектроскопического датчика.

Теоретическое рассмотрение поглощения электромагнитных волн в СЭ в рамках волнового подхода, описанное в литературе, основывалось на упрощенном представлении, согласно которому в световоде происходит уменьшение мощности только той части моды световода, которая распространяется во внешней поглощающей среде, являющейся, по сути, оболочкой световода, а в его сердцевине мощность моды остается постоянной [11,12]. Однако, такой подход применим только при условии слабого поглощения внешней среды, что неприемлемо в ИК-спектроскопии жидких сред, так как коэффициенты поглощения излучения на колебательных переходах молекул в жидкости настолько велики, что в области длин волн 3 – 10 мкм могут достигать значений $\sim 10^3 \text{ см}^{-1}$. Кроме того, в СЭ на основе халькогенидного световода велика разница показателей преломления сердцевины (2.4 – 3.4 в зависимости от состава стекла) и внешней поглощающей среды (1.28 – 1.35 для многих жидких сред), поэтому в теории нель-

зя использовать приближение слабонаправляющего световода, в котором показатели преломления сердцевины и оболочки различаются менее чем на 1%.

Распространение электромагнитного излучения через изгиб слабонаправляющего кварцевого световода изучалось ранее в [8,13], причем, особое внимание уделялось определению оптических потерь на изгибе, однако, результаты этих теоретических исследований не применялись для анализа функционирования СЭ в задачах волоконной эванесцентной спектроскопии.

На пути к реализации полностью волоконных спектроскопических датчиков возникают проблемы, связанные с отсутствием волоконных лазеров среднего ИК-диапазона. Поскольку в ближнем ИК-диапазоне халькогенидные стекла имеют большую нормальную дисперсию групповой скорости (ДГС), а нули ДГС стекол различных составов приходятся на область длин волн 5 – 8 мкм, для накачки спектрального суперконтинуума (СК) нужны лазерные источники с излучением на длинах волн более 3 мкм. В настоящее время для того чтобы накачивать СК имеющимися волоконными лазерами на длинах волн менее 2.5 мкм, создают маломодовые или микроструктурированные световоды, дисперсионные свойства которых позволяют компенсировать дисперсию халькогенидного стекла. Однако, такие структуры являются хрупкими, часто имеют большие оптические потери и плохо согласуются с источником накачки. Поэтому представляет интерес исследование дисперсионных свойств мод многомодовых световодов для компенсации дисперсии халькогенидного стекла. Технологии получения многомодовых световодов проще, такие световоды более надежны и могут быть легче интегрированы в волоконно-оптическую систему.

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы выявить особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в сенсорных элементах волоконно-оптических спектроскопических датчиков для улучшения их выходных характеристик в задачах анализа химического состава жидких сред методом волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона.

В соответствии с поставленной целью, решались следующие **задачи**:

1. Для описания взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в СЭ на основе многомодового халькогенидного световода (регулярного и изогнутого) разработать теоретический подход на основе волновой теории волоконных световодов и разработать теоретические модели с учетом сильного поглощения излучения среднего ИК-диапазона в жидкой среде и большой разницы показателей преломления халькогенидного стекла и среды.

2. Применить разработанные теоретические модели для исследования особенностей взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей жидкой средой в СЭ на основе как регулярного, так и изогнутого многомодового халькогенидного световода и для расчета выходных характеристик волоконно-оптического спектроскопического датчика.

3. Выявить особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей жидкой средой в СЭ на основе как регулярного, так и изогнутого многомодового халькогенидного световода, позволяющие улучшить выходные характеристики волоконно-оптического спектроскопического датчика.

4. Провести верификацию разработанных теоретических моделей в лабораторном эксперименте на примере задачи определения концентрации жидких двухкомпонентных растворов методом волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона.

5. Исследовать спектральные зависимости параметра ДГС в среднем ИК-диапазоне для мод многомодовых халькогенидных световодов, используемых в СЭ, и оценить возможность совмещения функций СЭ и генератора СК в одном световоде.

Полученные результаты и их научная новизна:

1. Для описания оптического излучения в СЭ волоконно-оптического спектроскопического датчика применена волновая теория. Излучение в световоде представлено в виде направляемых мод, мощность которых уменьшается при распространении вследствие поглощения во внешней среде. Впервые разработаны теоретические модели и методология исследования взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в СЭ на основе регулярного и изогнутого световода, в которых не делается допущения о малости коэффициента поглощения внешней среды и не используется приближение слабонаправляющего световода.

2. Выявлены особенности взаимодействия мод регулярного и изогнутого световода с внешней поглощающей средой в виде двухкомпонентного жидкого раствора. Впервые рассчитаны продольные коэффициенты затухания мощности для мод с разными радиальными и азимутальными порядками. Для моды с заданными порядками получены зависимости коэффициентов затухания мощности от диаметра световода и длины волны излучения. Показано, что поглощение света во внешней среде приводит к уменьшению доли мощности моды в оболочке (внешней среде) и уменьшению глубины проникновения поля моды в оболочку, а в поперечном сечении сердцевинны световода поток мощности имеет ненулевые радиальные и азимутальные компоненты. Для регулярного бесструктурного световода установлено, что продольный коэффициент затухания мощности моды тем больше, чем больше глубина проникновения поля моды в оболочку. Для световода с тонкой кольцевой оболочкой установлено, что продольные коэффициенты затухания мощности мод оболочки с низкими радиальными порядками превышают коэффициенты затухания мощности мод бесструктурного световода низких порядков и сравнимы по величине с коэффициентами затухания мощности мод высоких порядков. Для изогнутого световода впервые рассчитаны угловые и линейные коэффициенты затухания мощности мод с разными радиальными и азимутальными порядками. Установлено, что линейный коэффициент затухания мощности моды с заданными порядками больше, чем продольный коэффициент мощности затухания такой же моды регулярного световода. Для мод разных порядков впервые получена зависимость углового коэффициента затухания мощности от радиуса изгиба световода.

3. Разработана методика расчета выходных характеристик (диапазон измеряемых значений концентрации раствора, чувствительность и предел обнаружения вещества в растворе) волоконно-оптического спектроскопического датчика. Впервые проведены расчеты поглощательной способности для отдельных мод и суммы мод регулярного световода в СЭ разной длины. Установлено, что при распространении в световоде нескольких мод зависимость поглощательной способности от длины СЭ не является линейной. Впервые получены выходные характеристики СЭ на основе регулярного световода, как бесструктурного, так и с тонкой кольцевой оболочкой, на заданной длине волны в полосе поглощения исследуемого вещества для отдельных мод, а также для суммы мод разных порядков. Установлено, что чувствительность датчика определяется отношением длины СЭ и продольной длины затухания мощности моды. Установлено, что уменьшить предел обнаружения вещества в растворе можно, используя для передачи излучения моды с высокими порядками. В приближении слабой связи между модами впервые рассчитана поглощательная способность для отдельных мод изогну-

того бесструктурного световода и показано, что при заданном радиусе изгиба поглощательная способность прямо пропорциональна угловому коэффициенту затухания мощности моды и числу витков световода.

4. Проведена верификация разработанных теоретических моделей в лабораторном эксперименте по измерению концентрации водного раствора ацетона и двухкомпонентной смеси нефтепродуктов. Установлено согласие результатов измерений пропускания СЭ на основе бесструктурного регулярного световода, погруженного в водный раствор ацетона различной концентрации, и результатов расчета. В эксперименте с СЭ на основе регулярного бесструктурного световода предел обнаружения ацетона в водном растворе составил 1 мол.%. В расчетах показано, что использование мод высоких порядков позволяет на порядок уменьшить предел обнаружения ацетона. Сравнение рассчитанной поглощательной способности для отдельных мод U-образного световода с результатами эксперимента по измерению концентрации двухкомпонентной смеси нефтепродуктов показало, что имеется различие в наклоне калибровочных графиков, полученных в эксперименте и в расчете, поскольку в теоретической модели не учитывается связь между отдельными модами изогнутого световода.

5. Впервые исследована возможность совмещения в одном волоконном устройстве функции СЭ и генератора СК. Рассчитаны спектральные зависимости параметра ДГС для мод различных порядков регулярного халькогенидного световода. Поскольку дисперсия мод световода может компенсировать нормальную дисперсию халькогенидного стекла в ИК-диапазоне, показано, что у мод высоких порядков нули спектральных зависимостей ДГС смещаются в область меньших длин волн.

Теоретическая и практическая значимость работы

Применение волновой теории позволило создать универсальные теоретические модели электромагнитных полей в халькогенидных СЭ различной геометрии, разработать методические основы для разработок таких элементов на основе выявленных особенностей распространения в них оптического излучения. Сравнение результатов расчетов с результатами лабораторных измерений позволило сделать выводы о применимости разработанных теоретических моделей. В работе заложены основы для создания компьютерной системы проектирования волоконно-оптических спектроскопических датчиков. В результате проведенных исследований установлено, что использование высших мод для передачи излучения в волоконном световоде позволяет оптимизировать выходные характеристики и сократить размеры СЭ волоконно-оптического спектроскопического датчика, а также компенсировать нормальную дисперсию халькогенидного стекла в волоконном устройстве для генерации СК при накачке лазерным излучением ближнего ИК-диапазона. Таким образом, показано, что можно создать волоконное устройство, сочетающее в себе функции СЭ и генератора СК среднего ИК-диапазона.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты найдут применение в науке, промышленности, медицине, экологии при создании средств дистанционного контроля, работающих в режиме реального времени.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректностью использованных теоретических моделей для описания электромагнитных полей мод многомодовых халькогенидных световодов, используемых в волоконно-оптических спектроскопических датчиках для исследования химического состава жидких сред, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов и согласованностью экспериментальных результатов с данными, опубликованными в работах других авторов, широкой апробацией результатов работы.

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Использование в теоретических моделях волновой теории и модового представления излучения в волоконном световоде позволяет выявить особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в СЭ и рассчитать выходные характеристики волоконно-оптических спектроскопических датчиков.

2. Поглощение внешней среды приводит к уменьшению доли мощности моды в оболочке (внешней среде) и глубины проникновения поля моды в среду. В поперечном сечении сердцевины световода, находящегося в поглощающей среде, появляются радиальные и азимутальные потоки мощности, благодаря которым форма поперечного профиля моды остается постоянной. Продольные коэффициенты затухания мощности мод регулярного световода растут при увеличении радиальных и азимутальных порядков. Мода с наибольшей глубиной проникновения поля в среду имеет наибольший продольный коэффициент затухания мощности.

3. Угловые и линейные коэффициенты затухания мощности мод изогнутого световода растут при увеличении порядков мод. Линейный коэффициент затухания мощности моды с заданными порядками больше, чем продольный коэффициент затухания мощности такой же моды регулярного световода. У мод низких порядков, сильно локализованных в сердцевине световода, угловой коэффициент затухания мощности мал и слабо зависит от радиуса изгиба. У мод высоких порядков зависимость углового коэффициента затухания мощности от радиуса изгиба световода близка к линейной.

4. Поглощательная способность, рассчитанная для отдельной моды, в СЭ на основе регулярного световода прямо пропорциональна продольному коэффициенту затухания мощности моды и длине СЭ, а в изогнутом - прямо пропорциональна угловому коэффициенту затухания мощности моды и числу витков световода при заданном радиусе изгиба. При распространении в регулярном световоде нескольких мод зависимость поглощательной способности от длины СЭ не является линейной. Высокая чувствительность СЭ на основе регулярного световода может быть получена при условии, что отношение длины СЭ и продольной длины затухания мощности моды составляет от 0.5 до 2 для всех концентраций исследуемого вещества в заданном диапазоне. Чем выше порядки мод, которые используются для передачи оптического излучения в световоде, тем меньше предел обнаружения вещества в растворе.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты были получены автором или лично, или при непосредственном участии. Постановка задач и целей, выработка путей решения проводилась совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., проф. Романовой Е.А. Часть алгоритмов вычислительных программ разрабатывалась совместно с сотрудником ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и СФ ФГБУН «Институт радиотехники и электроники» (ИРЭ) им. В.А. Котельникова РАН к.ф.-м.н. Рожневым А.Г. Экспериментальные результаты были получены совместно с сотрудниками ИХВВ им. Г.Г. Девятовых РАН к.х.н. Котеревой Т.В., к.х.н. Вельмузовым А.П., к.х.н. Сухановым М.В. и д.х.н. Ширяевым В.С.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертационной работе, были доложены и обсуждены на конференциях: XV Конференция и VIII Школа молодых ученых «Высокоочищенные вещества. Получение. Анализ. Применение» (г. Нижний Новгород, 2015), Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике «Saratov Fall Meeting» (SFM) (Саратов, 2015 – 2018), Научно-практическая конференция «Presenting Academic Achievements to the World» (Саратов, 2015 – 2016), XX Международный симпозиум по неоксидным и новым оптическим стеклам «International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses» (ISNOG)

(г. Нижний Новгород, 2016), International Training School on Fiber Lasers and Optical Fiber Technology (ITS) of the COST Action MP1401 (г. Прага (Чешская Республика), 2016), 2nd Annual Conference of the COST Action MP1401 «Advanced fiber laser and coherent source as tool for society, manufacturing and life science» (г. Тель-Авив (Израиль), 2017), 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), (г. Санкт-Петербург, 2017), XVI Всероссийская конференция и IX Школа молодых ученых «Высокоочищенные вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (г. Нижний Новгород, 2018), 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (г. Бухарест (Румыния), 2018), международная конференция SPIE Photonics Europe (г. Страсбург (Франция), 2018), Conference of the COST Action MP1401 «Advanced fiber laser and coherent source as tool for society, manufacturing and lifescience» (г. Варшава (Польша), 2018), 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (г. Анже (Франция), 2019), International Conference on Lasers & Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/EUROPE-EQEC) (г. Мюнхен (Германия), 2019), 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (г. Бари (Италия), 2020).

Результаты работы были представлены на семинарах в Чешском техническом университете (г. Прага (Чешская Республика), 2015), в ИХВВ РАН (г. Нижний Новгород (Россия), 2016, 2019), на кафедральных семинарах в Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского.

Выполнение проектов. Работа выполнялась в рамках проектов РНФ (№ 16-13-10251 и 16-13-10251р). По теме диссертации проводились стажировки в ИХВВ РАН (г. Нижний Новгород, 2015) в рамках программы «УНИВЕРИЯ» при поддержке Саратовского государственного университета, а также в Чешском техническом университете в г. Прага (2015 г.) при поддержке COST Action MP1401.

Публикации. По материалам диссертации были опубликованы 19 печатных работ, в том числе 6 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК Минобрнауки РФ, Scopus и Web of Science, 8 статей в сборниках конференций, индексируемых в ВАК, Scopus и Web of Science, и 5 – в других изданиях. Получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из **148** наименований, и приложения. Общий объем диссертации составляет **177** страниц, объем диссертации без приложения составляет **175** страниц, включая **74** рисунка и **7** таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приводится краткое содержание глав и результаты апробации исследования, формулируются положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приводится описание теоретических моделей и методология исследования особенностей взаимодействия излучения в халькогенидном световоде, регулярном или изогнутом, с внешней поглощающей жидкой средой в СЭ волоконно-оптического спектроскопического датчика, схема которого показана на Рисунке 1. Обсуждаются постановка краевой задачи в рамках спектральной теории диэлектрических волноводов и численные методы ее решения. При этом не делается допущения о мало-

сти коэффициента поглощения внешней среды и не используется приближение слабо-направляющего волновода.

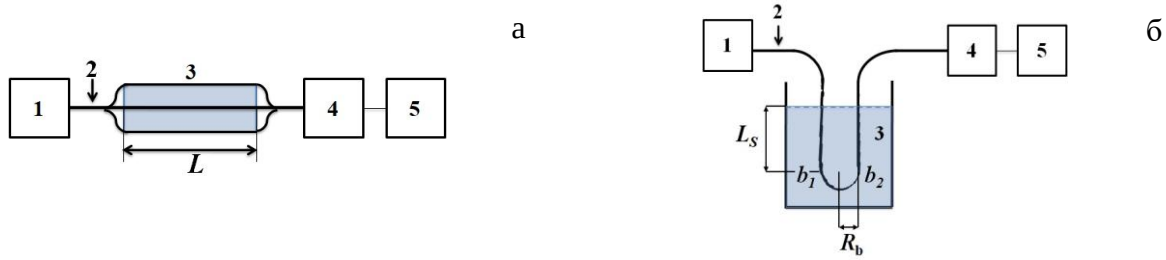


Рисунок 1. Принципиальная схема волоконно-оптического спектроскопического датчика на основе регулярного (а) и U-образного (б) световода. Широкополосное ИК-излучение источника (1) вводится в СЭ, который представляет собой многомодовый халькогенидный световод (2), на некоторой длине L погруженный в исследуемую жидкую среду в кювете (3). Полученный спектр пропускания регистрируется устройством детектирования с анализатором спектра (4) и обрабатывается компьютером (5). L – длина СЭ, L_s – длина регулярного участка световода, R_b – радиус изгиба, b_1, b_2 – точки перехода от регулярного участка световода к изогнутому. Исследуемая жидкость выделена цветом.

Далее в Главе 1 излагаются теоретические основы описания электромагнитных волн в СЭ на основе: 1) регулярного бесструктурного световода; 2) регулярного световода с тонкой кольцевой оболочкой; 3) изогнутого световода.

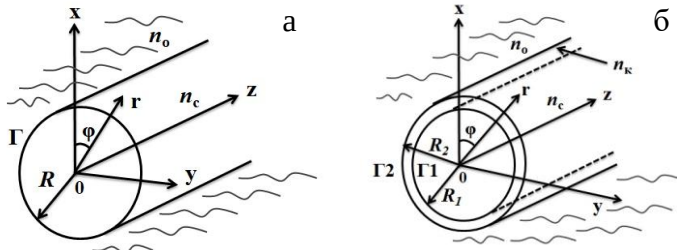


Рисунок 2. Модель СЭ на основе регулярного световода: бесструктурного (а) и с тонкой кольцевой оболочкой (б).

В теоретической модели регулярный световод из стекла рассматривается в виде цилиндра бесконечной длины: с профилем показателя преломления $n(r) = n_c (0 \leq r < R)$ (Рисунок 2а); $n(r) = n_c (0 \leq r < R_1), n(r) = n_k (R_1 < r < R_2)$, (Рисунок 2б). Внешняя поглощающая среда рассматривается как оболочка, неограниченная в поперечном

сечении световода, с показателем преломления $n(r) = n_o (R < r < \infty)$ (Рисунок 2а), $n(r) = n_o (R_2 < r < \infty)$ (Рисунок 2б). Делаются допущения об однородности стекла, однородности и неподвижности внешней поглощающей среды, о том, что жидкость не взаимодействует со стеклом на гладких границах Γ , Γ_1 и Γ_2 .

Согласно спектральной теории диэлектрических волноводов [14], в отсутствие источников гармонические во времени ($\sim \exp(-i\omega t)$) электрическое $\vec{E}$ и магнитное $\vec{H}$ поля в регулярном волноводе с осью z можно представить в виде функций с частично разделяющимися переменными: $\vec{E}(\vec{r}, z) = \vec{e}(\vec{r}) \cdot \exp(i\beta z)$, $\vec{H}(\vec{r}, z) = \vec{h}(\vec{r}) \cdot \exp(i\beta z)$, где $\beta = \beta^r + i \cdot \beta^i$ – продольная постоянная распространения волны, $\vec{r} = (r, \varphi)$ – векторная поперечная координата. В рамках волновой теории поля собственных волн такой структуры удовлетворяют векторным уравнениям Гельмгольца в плоскости поперечного сечения:

$$\left\{ \vec{\nabla}_{\perp}^2 + n^2 \cdot k^2 - \beta^2 \right\} \vec{e} = - \left(\vec{\nabla}_{\perp} + i \cdot \beta \cdot \vec{z} \right) \cdot \vec{e}_{\perp} \cdot \vec{\nabla}_{\perp} \ln n^2 \quad (1.1a)$$

$$\left\{ \vec{\nabla}_{\perp}^2 + n^2 \cdot k^2 - \beta^2 \right\} \vec{h} = \left\{ \left(\vec{\nabla}_{\perp} + i \cdot \beta \cdot \vec{z} \right) \times \vec{h} \right\} \times \vec{\nabla}_{\perp} \ln n^2 \quad (1.1б)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны излучения, $\vec{\nabla}_{\perp}^2$ и $\vec{\nabla}_{\perp}$ – векторные операторы [14], индекс $\perp$ отмечает поперечную компоненту электрического поля и поперечные операторы, определенные в заданной системе координат. Правая часть уравне-

ний (1.1) отлична от нуля только на границах Γ , Γ_1 , Γ_2 . Уравнения (1.1) справедливы для регулярного волновода с произвольным поперечным профилем показателя преломления.

Для бесструктурного световода, подставляя выражения для электрического и магнитного полей в (1.1), вводя продольные составляющие поля, являющиеся непрерывными на границе «сердцевина-оболочка», и накладывая условие непрерывности азимутальных компонент на границе, можно получить в аналитическом виде характеристическое уравнение [14], численное решение которого позволяет определить величину β на заданной длине волны. Для описания поперечного профиля полей мод вводят безразмерные параметры моды: $u = R \cdot (k^2 \cdot n_c^2 - \beta^2)^{1/2}$ в сердцевине и $w = R \cdot (\beta^2 - k^2 \cdot n_o^2)^{1/2}$ в оболочке. Для волновода с поглощением в оболочке и/или сердцевине эти параметры являются комплексными, а собственная волна, имеющая продольную зависимость $\exp(i\beta z)$, является «физическим» решением, если ее поле убывает в направлении распространения, т.е. при выполнении условия $\beta^r \beta^i > 0$. Направляемые моды световода, показанного на Рисунке 2а, удовлетворяют обобщенному условию излучения (условию Рейхарда [15]), то поля $\vec{e}$ и $\vec{h}$ мод убывают на бесконечности в плоскости поперечного сечения световода как $\exp(-w^r \cdot r) / \sqrt{r}$ при $r \rightarrow \infty$, где w^r – действительная часть параметра моды в оболочке. Для обозначения мод используется классификация, принятая в теории цилиндрических диэлектрических волноводов [14].

Для расчета электромагнитных полей в световоде с тонкой кольцевой оболочкой (Рисунок 2б), погруженном в поглощающую жидкость, используется метод точных конечных разностей (ТКР) [16], реализованный в [17] для многослойных световодов с круглым поперечным сечением. Согласование полей производится на двух границах: между сердцевинкой и стеклянной оболочкой и между стеклянной оболочкой и внешней поглощающей средой. Азимутальные компоненты электрического и магнитного полей, выраженные через продольные компоненты, вычисляются в каждом слое и приравниваются на границах между слоями. В результате получаются два однородных линейных уравнения, которые связывают значения продольных компонент полей на границах. Для решения спектральной задачи с обобщенным условием излучения на бесконечности в плоскости поперечного сечения световода определяются значения β , для которых выполняется условие: $\det M(\lambda, \beta) = 0$, где матрица $M(\lambda, \beta)$ коэффициентов полученной системы уравнений соответствует определенному типу мод световода. Данная процедура осуществляется численно, с использованием стандартных методов решения систем линейных уравнений.

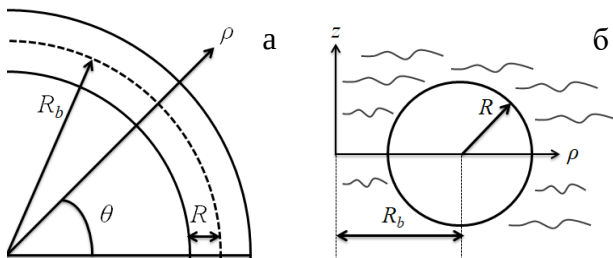


Рисунок 3. Схема в полярной системе координат (а) и поперечное сечение (б) изогнутого бесструктурного световода, погруженного в поглощающую среду.

В изогнутом бесструктурном световоде, в отличие от регулярного, постоянная распространения световой волны меняется по поперечному сечению. В теоретической модели для расчета мод изогнутого световода в плоскости изгиба вводится полярная система координат (ρ, θ) (Рисунок 3а), а электрическое и магнитное поля мод в плоскости поперечного сечения (Рисунок 3б) изогнутого световода записываются в виде: $\vec{E}(\rho, \theta, z) = \vec{e}(\rho, z) \cdot \exp(i \cdot \gamma \cdot \theta)$, $\vec{H}(\rho, \theta, z) = \vec{h}(\rho, z) \cdot \exp(i \cdot \gamma \cdot \theta)$, где $\gamma = \gamma^r + i \cdot \gamma^i$ – угловая постоянная распространения моды, не зависящая от ρ [18]. Мнимая часть угловой

постоянной распространения отлична от нуля из-за радиационных потерь на изгибе световода и в отсутствие поглощения. Если изогнутый световод находится в поглощающей среде, γ^i увеличивается за счет поглощения. Для сравнения с продольной постоянной распространения регулярного световода рассчитывается линейная постоянная распространения $\beta^b = \gamma / r_0 = \text{Re}(\beta^b) + i \cdot \text{Im}(\beta^b)$, где усредненный радиус моды $r_0 = \int \rho \cdot P \cdot dS / \int P \cdot dS$ определяется путем интегрирования по поперечному сечению световода компоненты плотности потока мощности P , перпендикулярной плоскости поперечного сечения. Параметры мод определяются в пакете Wave Optics Module программы COMSOL Multiphysics путем численного решения методом конечных элементов векторного уравнения Гельмгольца с условием Дирихле на границе расчетной сетки в поперечном сечении световода [18]. Для классификации мод изогнутого световода используется классификация мод регулярного световода. Идентификация мод производится визуально по профилю модуля электрического поля в плоскости поперечного сечения изогнутого световода.

Для математического описания поглощения внешней среды в теоретических моделях используется соотношение $n_o^i = \alpha / (2 \cdot k)$ [19] между мнимой частью n_o^i показателя преломления и коэффициентом поглощения α исследуемой жидкости. Если известны молярные концентрации веществ в двухкомпонентном растворе, то коэффициент поглощения раствора рассчитывается по формуле: $\alpha = (\alpha_{mol}^1 \cdot C_M^1 + \alpha_{mol}^2 \cdot C_M^2) \cdot \ln(10)$, где α_{mol}^1 и α_{mol}^2 - молярные коэффициенты поглощения, а C_M^1 и C_M^2 - молярные концентрации первого и второго вещества. В случае сложных органических веществ, при невозможности расчета молярных концентраций, α определяется по измеренному в кювете пропусканию T объемных образцов раствора разной концентрации: $\alpha = -\ln T / \Delta l$, где Δl - толщина кюветы.

Далее излагается **методология исследований**. На первом этапе для каждой моды с заданным радиальным m и азимутальным v порядками рассчитываются параметры, характеризующие взаимодействие данной моды и внешней поглощающей среды с известным коэффициентом поглощения на заданной длине волны. Для мод регулярного световода определяется продольный коэффициент затухания мощности $\eta_{vm} = 2 \cdot \beta_{vm}^i$ и продольная длина затухания мощности $L_{vm} = \eta_{vm}^{-1}$. Поскольку в радиальном направлении в оболочке поле моды асимптотически убывает как $\exp(-w^r \cdot r) / \sqrt{r}$, можно приближенно оценить радиальную длину спада мощности моды во внешней среде $L_{vm}^r = (2 \cdot w_{vm}^r / R)^{-1}$. Для мод изогнутого световода определяются угловой $\xi_{vm} = 2 \cdot \gamma_{vm}^i$ и линейный $\eta_{vm}^b = 2 \cdot \text{Im}(\beta_{vm}^b)$ коэффициенты затухания мощности. Для мод регулярного и изогнутого световода рассчитывается доля мощности моды в оболочке (внешней среде). В поперечном сечении регулярного световода строятся радиальная и азимутальная компоненты плотности потока мощности мод.

На втором этапе рассчитывается пропускание СЭ для случая, когда на входном торце регулярного световода возбуждается только одна мода (назовем это условием ввода А) с мощностью $P_{vm}(0)$, а на выходном торце мощность $P_{vm}(L)$ этой моды уменьшается из-за поглощения излучения в СЭ длиной L . Тогда пропускание СЭ: $\tau_{vm} = P_{vm}(L) / P_{vm}(0) = \exp(-\eta_{vm} \cdot L)$, поглощательная способность $A = -\eta_{vm} \cdot L / \ln(10)$, чувствительность: $S_{vm} = d\tau_{vm} / dC_{mol}$, где C_{mol} - мольная доля растворенного вещества. Предел обнаружения вещества определяется по зависимости вклада его пропускания

$\Delta\tau_{vm}^a = (\tau_{vm}^w - \tau_{vm}) / \tau_{vm}$ на заданной длине волны от C_{mol} (τ_{vm}^w – пропускание воды, τ_{vm} – полное пропускание раствора) и соответствует уровню $\Delta\tau_{1m}^a$, равному отношению $(C/Ш)^{-1}$ в регистрируемом спектре пропускания.

Далее рассчитывается пропускание СЭ в предположении, что на входном торце регулярного световода возбуждается N мод, и вся мощность излучения равномерно распределена между ними (условие ввода Б). Тогда пропускание:

$$\tau_{vN} = N^{-1} \cdot \sum_{m=1}^N \exp(-\eta_{vm} \cdot L), \quad \text{поглощательная способность: } A_{vN} = -\log(\tau_{vN}), \quad \text{чувствительность: } S_{vN} = d\tau_{vN} / dC_{mol}.$$

Предел обнаружения определяется по зависимости вклада пропускания: $\Delta\tau_{vN}^a = (\tau_{vN}^w - \tau_{vN}) / \tau_{vN}$ растворенного вещества от C_{mol} . Для случая, когда входная мощность равномерно распределена в выборке мод с радиальным порядком от M до N (условие ввода В), выходные характеристики рассчитываются аналогично.

Для СЭ на основе U-образного световода при условии ввода А для каждой моды рассчитывается пропускание $\tau_{vm}^b = \exp(-\xi_{vm} \cdot \theta)$ изогнутого участка световода длиной $L_b = N_b \cdot \pi \cdot R_b$, где $\theta = \pi \cdot N_b$, N_b – число полувитков световода. Поглощательная способность изогнутого участка: $A_{vm}^b = \xi_{vm}^b \cdot \pi \cdot N_b / \ln(10)$. Полная поглощательная способность U-образного световода $A_{vm} = -\log(\tau) = 2 \cdot A_{vm}^s + A_{vm}^b = (2 \cdot \eta_{vm}^s \cdot L_s + \xi_{vm}^b \cdot \pi \cdot N_b) / \ln(10)$.

Результаты Главы 1 используются в Главах 3 и 4 для исследования особенностей взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в СЭ и для исследования дисперсионных характеристик мод халькогенидных световодов в Главе 5.

В Главе 2 излагаются результаты лабораторных измерений спектров пропускания СЭ на основе многомодовых бесструктурных световодов, как прямого, так и U-образного, из стекла состава $\text{Ge}_{26}\text{As}_{17}\text{Se}_{25}\text{Te}_{32}$, проведенных на базе лабораторного Фурье-спектрометра Bruker IFS 113v с тепловым источником излучения (глобар).

В среднем ИК-диапазоне было измерено пропускание СЭ на основе: прямого световода с $R = 150$ мкм, погруженного в водный раствор ацетона (Рисунок 1а), и U-образного световода с $R = 90$ мкм, погруженного в раствор антифризной присадки в дизельном топливе (Рисунок 1б). Излучение источника вводилось соосно во входной торец световода посредством линзы с фокусным расстоянием 5 см. Излучение из выходного торца регистрировалось КРТ-детектором Фурье-спектрометра. Рассчитывалось нормированное пропускание $\tau = T/T_0$ и поглощательная способность $A = -\log(\tau)$, где T и T_0 – пропускание СЭ, измеренное с поглощающей жидкостью и без нее, соответственно. Такая нормировка пропускания позволяет оценить потери энергии излучения из-за поглощения в жидкости и минимизировать вклад оптических потерь на торцах световода. По результатам измерений пропускания прямого световода (Рисунок 4а) были построены калибровочные графики на длине волны $\lambda = 8.18$ мкм в максимуме полосы поглощения ацетона. Предел обнаружения ацетона в водном растворе составил ~ 1 мол.%. По результатам измерений пропускания изогнутого световода (Рисунок 4б) был построен калибровочный график на длине волны $\lambda = 7.83$ мкм в максимуме полосы поглощения присадки. Предел обнаружения присадки в дизельном топливе составил ~ 0.2 об.%.

Калибровочные графики показаны символами на Рисунке 7б и Рисунке 11б.

Для определения значений n_o^i , используемых в расчетах, проводились измерения спектров пропускания объемных образцов исследуемых растворов в кюветах толщиной ~ 11 мкм, которая подбиралась так, чтобы избежать интерференции излучения, а также полного поглощения излучения внутри кюветы. Были получены молярные коэффициенты поглощения чистого ацетона и чистой воды (Рисунок 5а) и коэффициенты поглощения дизельного топлива и присадки (Рисунок 5б). Коэффициент поглощения объемных образцов дизельного топлива с присадкой в зависимости от объемной концентрации присадки на длине волны $\lambda = 7.83$ мкм показан на вставке к Рисунку 5б.

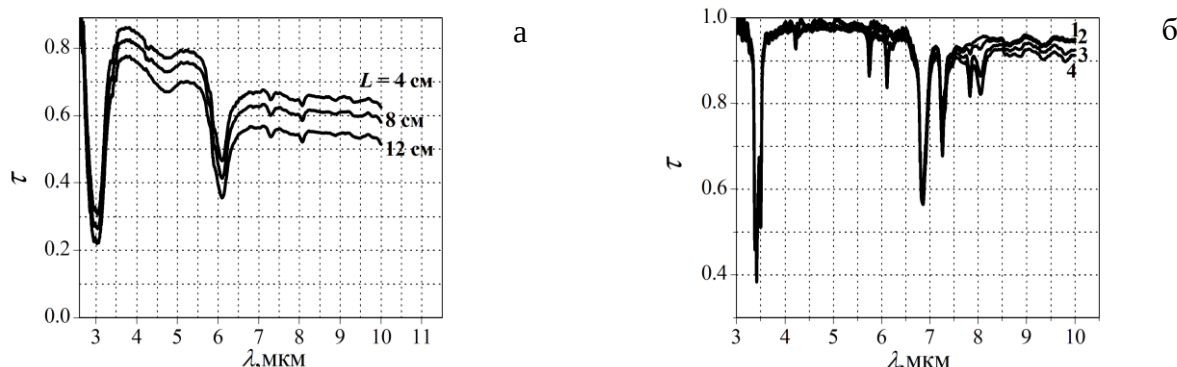


Рисунок 4. Спектральные зависимости нормированного пропускания СЭ на основе: а) регулярного световода, полученные для водного раствора ацетона с $C_{mol} = 1\%$; б) U-образного световода с $R_b = 2$ мм и $L_S = 10$ мм, полученные для раствора присадки в дизельном топливе. C_{vol} (об.%) = 0% (1), 0.2% (2), 0.6% (3), 1% (4); $\lambda = 7.83$ мкм.

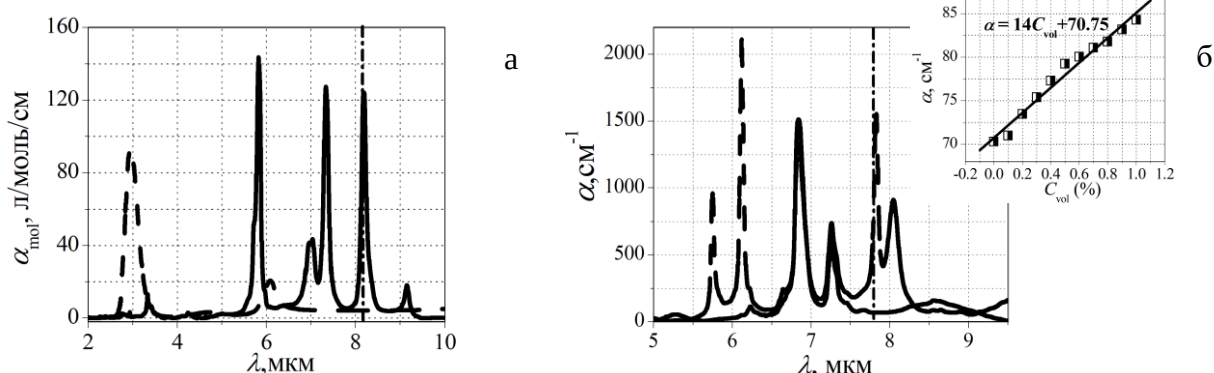


Рисунок 5. Спектральная зависимость: а) молярных коэффициентов поглощения чистого ацетона (сплошная линия) и чистой воды (штриховая линия); б) коэффициентов поглощения дизельного топлива (сплошная линия) и присадки (штриховая линия).

Полученные в Главе 2 результаты измерений используются в Главах 3 и 4 для верификации разработанных в Главе 1 теоретических моделей.

В **Главе 3** теоретические модели, разработанные в Главе 1, применяются для исследования особенностей взаимодействия оптического излучения в СЭ на основе регулярного световода с внешней поглощающей средой (водные растворы ацетона различной концентрации).

Для анализа была выбрана полоса поглощения ацетона с максимумом $\lambda = 8.18$ мкм (отмечена штрихпунктирной линией на Рисунке 5а). Показатель преломления стекла состава $\text{Ge}_{26}\text{As}_{17}\text{Se}_{25}\text{Te}_{32}$ в среднем ИК-диапазоне $n_c \sim 2.8$ [20], а действительная часть показателя преломления водного раствора ацетона любой концентрации принимается равной $n_o^r \sim 1.35$ [21]. Согласно условиям эксперимента, световой пучок в фокальной плоскости длиннофокусной линзы на входном торце световода был слабо расходящимся. В этом случае, как известно [14], в световоде возбуждаются моды с

низкими порядками (HE_{1m} , TE_{0m} и TM_{0m} моды), которые, в основном, и рассматриваются в теоретических моделях.

В результате численного решения характеристического уравнения для каждой моды световода с $R = 150$ мкм были получены значения параметра w_{vm} , удовлетворяющие обобщенному условию излучения на бесконечности в плоскости поперечного сечения световода. Значения w_{vm}^r уменьшаются с ростом m , поэтому моды более высоких порядков имеют большую глубину проникновения поля моды, определяемую величиной L_{vm}^r , во внешнюю среду. Поглощение внешней среды приводит к увеличению w_{vm}^r , что означает уменьшение L_{vm}^r . Параметр w_{vm}^r всегда меньше у мод TM_{0m} , чем у мод TE_{0m} и HE_{1m} , как с учетом, так и без учета поглощения внешней среды. У мод заданного типа доля мощности в оболочке растет при увеличении порядков моды, однако, при $m < 80$ у мод TM_{0m} меньше, а при $m > 80$ больше, чем у мод HE_{1m} и TE_{0m} , как с учетом, так и без учета поглощения. Поскольку значения β_{vm}^i растут при увеличении порядков моды и всегда больше у мод TM_{0m} , можно заключить, что наибольший продольный коэффициент затухания мощности имеет мода с наименьшим w_{vm}^r . Как показано на Рисунке 6а на примере HE_{vm} мод, η_{vm} растут не только при увеличении v и/или m , но и при уменьшении R . Соответственно уменьшается продольная длина затухания (вставка). При распространении в световоде нескольких мод зависимость A_{1N} от L не является линейной (сплошные линии на Рисунке 6б), что подтверждается результатами измерений (символы). Для каждой отдельной моды, в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, эта зависимость является линейной (штриховая линия).

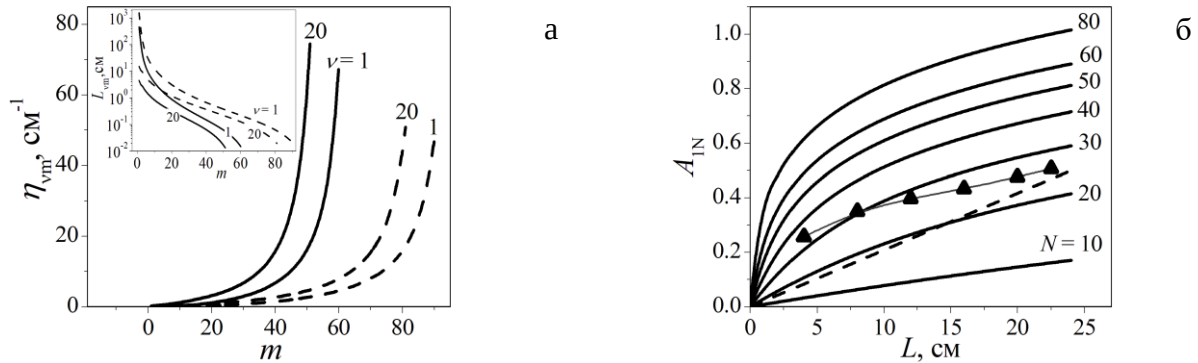


Рисунок 6. а) Продольный коэффициент затухания мощности моды HE_{vm} световода, погруженного в чистый ацетон ($n_o^i = 0.25$), вставка: продольная длина затухания мощности моды (в логарифмическом масштабе), $R = 100$ мкм (сплошные линии), 150 мкм (штриховые линии); б) поглощательная способность в зависимости от длины СЭ, рассчитанная для суммы N мод HE_{1m} (сплошные линии) и для моды с $m = 10$ (штриховая линия). Результаты измерений показаны треугольниками, $C_{mol} = 20\%$. $\lambda = 8.18$ мкм

Выходные характеристики СЭ на основе регулярного световода вначале рассчитываются по условию ввода А. На Рисунке 7а большее пропускание соответствует модам с меньшим m , имеющим меньший продольный коэффициент затухания мощности. В зависимости $\tau_{1m}(\log(C_{mol}))$ можно выделить две области, разделенные значением $C_{mol} \sim 1\%$, где эта зависимость близка к линейной. В области I для мод с $m < 10$ $\tau_{1m} \sim 1$ и практически не зависит от C_{mol} . При увеличении m крутизна кривых в области I несколько возрастает. Линейные участки в области II имеют большую крутизну, чем в области I, причем, интервал C_{mol} , соответствующий линейному участку зависимости, смещается в область меньших C_{mol} с ростом m и при увеличении L .

Для верификации разработанной теоретической модели строятся зависимости $A_{1N}(C_{mol})$ для суммы N мод HE_{1m} , рассчитанные по условию ввода Б (Рисунок 7б). Ка-

либровочный график, полученный в результате измерений (символы) хорошо согласуется с расчетными кривыми для мод с $m = 30$. Поэтому можно сделать вывод, что число мод HE_{1m} , возбуждавшихся на торце волокна в лабораторном эксперименте, было менее 30 – 40, что согласуется с условиями эксперимента, когда в торец волокна вводился слаборасходящийся пучок теплового излучения. Однако, с учетом того, что распределение мощности излучения между модами на входном торце не является равномерным, в расчетах вклад мод высоких порядков, имеющих меньшие амплитуды, несколько завышен.

Чувствительность, полученная для мод HE_{1m} при условии ввода А (Рисунок 7в) в области концентраций $C_{mol} < 1\%$ выше у мод с большими m . Для моды с $m = 10$ увеличение L приводит к увеличению S_{1m} , а для моды с $m = 30$, – наоборот, к уменьшению S_{1m} . Для моды с $m = 20$ видно, что при $C_{mol} < 5\%$ S_{1m} больше, а при $C_{mol} > 5\%$ – меньше в СЭ большей длины. Такие особенности объясняются тем, что продольная длина затухания у моды $HE_{1,10}$ во всем диапазоне концентраций больше, а у моды $HE_{1,30}$ – меньше L .

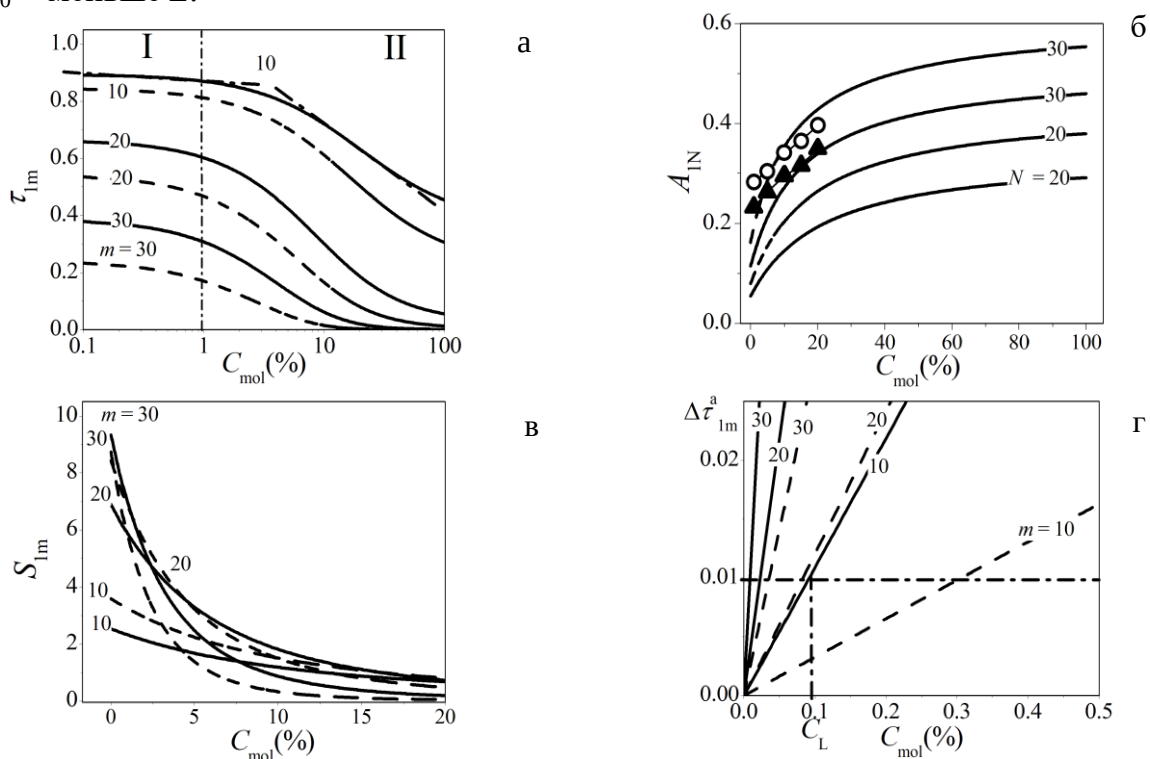


Рисунок 7. Выходные характеристики волоконно-оптического спектроскопического датчика:

а) пропускание в зависимости от концентрации (C_{mol} в логарифмическом масштабе);

б) поглощательная способность; в) чувствительность; г) предел обнаружения ацетона в воде.

$L = 8$ см (сплошная линия), 12 см (штриховая линия). Символами обозначены результаты измерений при $L = 8$ см (треугольники) и 12 см (кружки). $\lambda = 8.18$ мкм.

В случае моды $HE_{1,20}$ длина затухания при малых C_{mol} превышает L , а при больших C_{mol} становится меньше L . Так, при $L=8$ см, отношение $L/L_{1,20} = 0.45, 1.53, 2.56$ для $C_{mol} = 1, 20, 100\%$, соответственно. При малых концентрациях наибольшая чувствительность СЭ получена для моды $HE_{1,30}$ с $L_{1,30} = 7.3$ см при $C_{mol} = 1\%$, когда $L/L_{1,30} = 1.09$.

Предел обнаружения ацетона определяется наклоном построенных на Рисунок 7г зависимостей $\Delta\tau_{1m}^a(C_{mol})$. Для значения $\Delta\tau_{1m}^a = 0.01$ (отмечено штрихпунктирной линией) для мод с $m > 20$ можно получить предел обнаружения $C_L < 0.1\%$.

Далее в Главе 3 для световода с тонкой кольцевой оболочкой (Рисунок 2б), погруженного в чистый ацетон, численно решается сформулированная в Главе 1 спек-

тральная задача, и определяются значения постоянных распространения мод $\beta = n_{\text{eff}} \cdot k$, которые соответствуют минимумам кривых на Рисунке 8а. Для полученных решений используется классификация мод регулярного световода с бесконечной оболочкой. Распределения S_z компоненты вектора Умова-Пойтинга в плоскости поперечного сечения световода показаны на Рисунке 8б для некоторых мод оболочки HE_{1m} .

В результате расчетов установлено, что продольные коэффициенты затухания мощности мод оболочки растут при уменьшении ее толщины $\Delta R = R_2 - R_1$ (Рисунок 9а). При заданной ΔR с ростом $\Delta n = n_k - n_c$ увеличивается число мод оболочки, причем, моды с большими m имеют большие η_{1m} (Рисунок 9б), но значения η_{1m} отдельной моды практически не зависят от Δn в диапазоне $0.1 < \Delta n < 0.4$. Варьируя ΔR и Δn , можно подбирать моды с большими продольными коэффициентами затухания мощности.

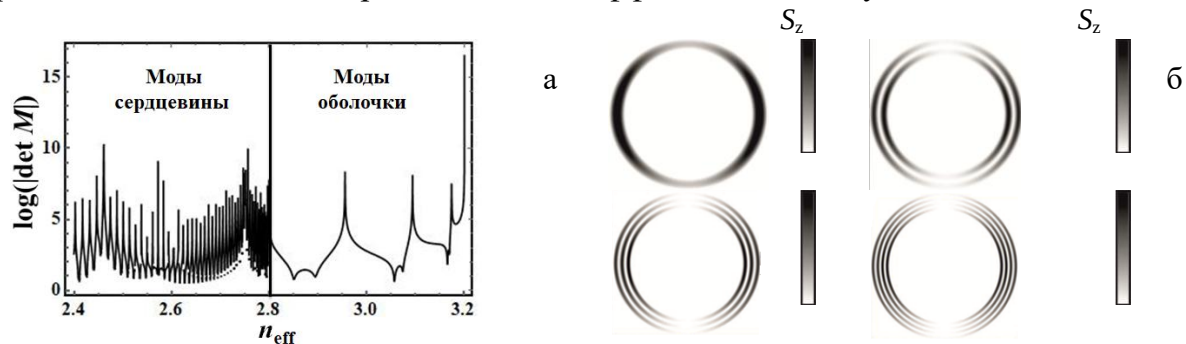


Рисунок 8. а) Значения $\log(|\det M|)$ в зависимости от n_{eff} , $\Delta R = 10$ мкм; б) Распределение S_z компоненты вектора Умова-Пойтинга в поперечном сечении световода, рассчитанное для мод оболочки HE_{1m} с $m = 1, 2, 3, 4$. $R_1 = 150$ мкм, $\Delta R = 50$ мкм. $n_c = 2.8$, $\Delta n = 0.4$. $\lambda = 8.18$ мкм.

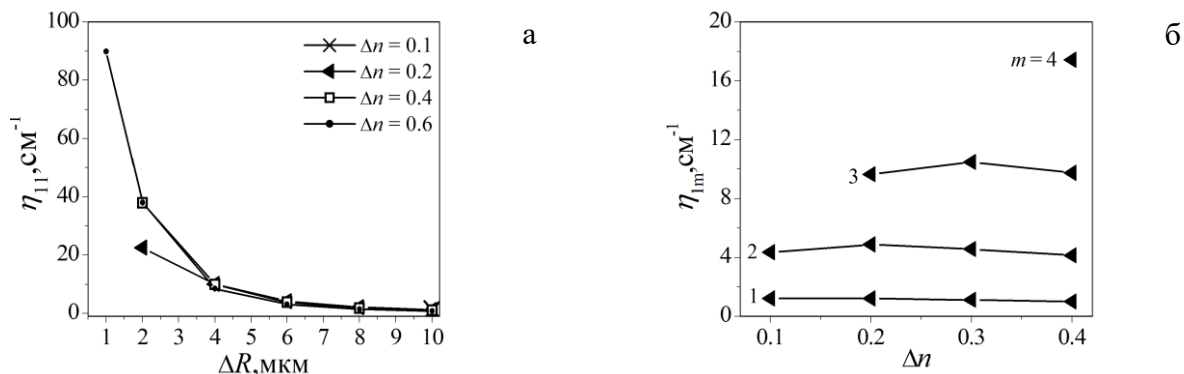


Рисунок 9. Продольный коэффициент затухания мощности: а) моды оболочки HE_{11} в зависимости от толщины оболочки при разных значениях Δn ; б) мод оболочки HE_{1m} в зависимости от Δn . $\lambda = 8.18$ мкм.

В Главе 3 выявлены особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей жидкой средой в СЭ на основе регулярного халькогенидного световода, как бесструктурного, так и имеющего тонкую стеклянную оболочку, в теоретических моделях, изложенных в Главе 1. Продольные коэффициенты затухания мощности мод регулярного световода растут при увеличении радиальных и азимутальных порядков моды. Поглощение внешней среды приводит к увеличению параметра моды в оболочке, что означает уменьшение глубины проникновения поля моды в среду. Мода с наименьшим значением действительной части параметра в оболочке имеет наибольший продольный коэффициент затухания мощности.

При распространении в световоде нескольких мод зависимость поглощательной способности от длины СЭ не является линейной, поскольку разные моды имеют разные длины затухания. При анализе выходных характеристик выявлено, что наибольшая чувствительность СЭ на основе регулярного световода может быть получена при

условии, что отношение длины СЭ и продольной длины затухания мощности моды составляет от 0.5 до 2. Уменьшить предел обнаружения вещества в растворе можно, используя для передачи излучения моды с высокими порядками.

Таким образом, для получения высокочувствительного волоконно-оптического датчика необходимо согласовать длину СЭ и продольную длину затухания мощности моды или группы мод, передающих излучение по световоду. Для селективного возбуждения мод заданных порядков в волоконном световоде используются как внешние фазовые или амплитудные модуляторы [22–23], так и внутренние преобразователи светового пучка, находящиеся внутри световода или на его торце: фотоиндуцированные длиннопериодные решетки [24], микроизгибные решетки [25]. Для неселективного возбуждения нескольких высших мод также используются внешние оптические системы [26,27] позволяющие варьировать размер светового пучка на торце многомодового световода и наклон пучка относительно оси световода.

Создание микроразмерной кольцевой оболочки на конечной длине бесструктурного халькогенидного световода (например, методом осаждения из газовой фазы) позволит увеличить коэффициенты затухания мощности мод оболочки и уменьшить длину высокочувствительного СЭ до нескольких миллиметров.

В **Главе 4** теоретическая модель, разработанная в Главе 1, применяется для исследования особенностей взаимодействия оптического излучения в изогнутом халькогенидном световоде с внешней поглощающей средой (раствор дизельного топлива с антифризной присадкой). Для анализа была выбрана полоса поглощения присадки с $\lambda = 7.83$ мкм (отмечена штрихпунктирной линией Рисунке 5б). Действительная часть показателя преломления раствора дизельного топлива с присадкой любой концентрации принимается равной $n_o' = 1.46$ [28].

Расчет параметров мод изогнутого бесструктурного световода проводился в программе COMSOL Multiphysics, и определялись параметры мод согласно методике, изложенной в Главе 1.

Каждая мода регулярного световода является дважды вырожденной по поляризации, а на изгибе разделяется на две моды с ортогональной поляризацией. Электрическое поле одной моды колеблется в плоскости изгиба ($\parallel$ мода), другой - перпендикулярно плоскости изгиба ($\perp$ мода). Для идентификации мод изогнутого световода проводился визуальный анализ изменения профиля модуля напряженности $|\vec{E}|$ электрического поля в поперечном сечении световода. На Рисунке 10а показаны профили $|\vec{E}|$ в поперечном сечении регулярного световода ($R_b = \infty$) и в сечении изогнутого световода ($R_b = 2$ мм) для мод HE_{1m} . На изгибе световода поле моды смещается в направлении от центра изгиба (вправо на Рисунке 10а, т.к. центр изгиба расположен слева, как показано на Рисунке 3б). У мод с $m > 1$ радиальный порядок моды изогнутого световода остается таким же, как и у моды регулярного световода, а азимутальный порядок нарушается. Визуальная идентификация мод становится сложнее с уменьшением R_b . Характер изменения распределения максимумов и минимумов $|\vec{E}|$ зависит от m . У моды с $m = 5$ профиль сильно изменен уже при $R_b = 30$ мм. При $R_b = 2$ мм радиальный порядок моды сохранен, а число вариаций по азимутальному углу возросло. У моды с $m = 30$ азимутальная зависимость меньше нарушается при $R_b = 2$ мм по сравнению с модой

HE₁₅. Распределение максимумов и минимумов $|\vec{E}|$ имеет такой же вид, как показано на Рисунке 10а, и при больших R_b .

В результате расчетов для HE_{1m} мод установлено, что действительная часть γ_{1m}^r растет линейно с R_b . У мод низких порядков с разными m при заданном R_b величина γ_{1m}^r отличается незначительно. Мнимая часть γ_{1m}^i у мод с $m < 5$ мала и почти не меняется с изменением R_b (Рисунок 10б). Для мод с $m = 10$ зависимость γ_{1m}^i от R_b близка к линейной (значения γ_{1m}^r для мод с $m = 10$ не показаны для световода с $R_b < 10$ мм из-за трудности визуальной идентификации мод). Как показали расчеты, у $\parallel$ мод величина γ_{1m}^i больше, чем у $+$ мод.

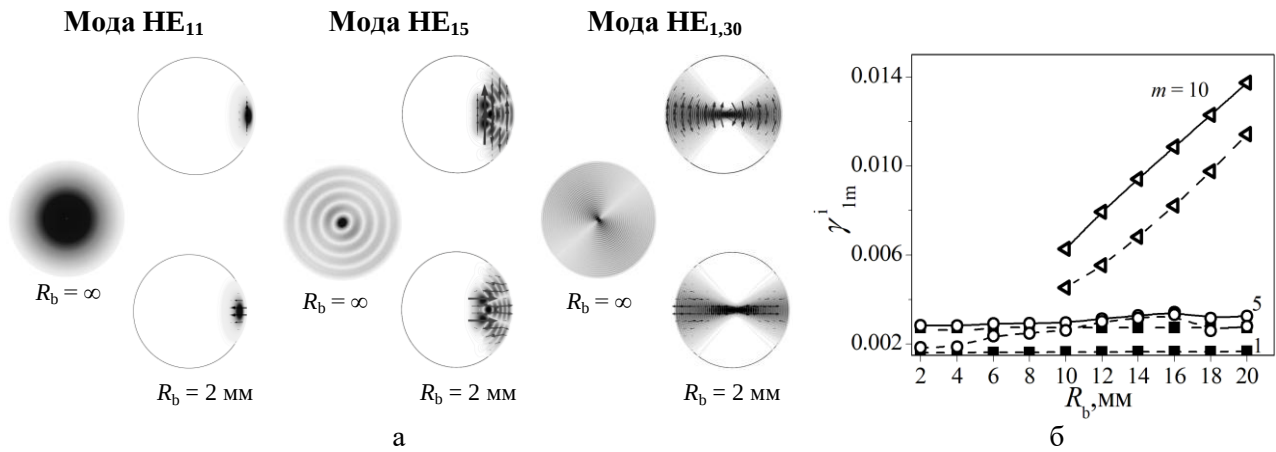


Рисунок 10. а) Профили модуля напряженности $|\vec{E}|$ электрического поля $\parallel$ и $+$ мод HE_{1m} с $m = 1, 5, 30$ в поперечном сечении регулярного и изогнутого световода, $R = 90$ мкм. Стрелками показано направление колебаний электрического поля в поперечном сечении изогнутого световода; б) Мнимая часть угловой постоянной распространения (в логарифмическом масштабе) $\parallel$ мод HE_{1m} (сплошная линия) и $+$ мод HE_{1m} (штриховая линия) световода в зависимости от радиуса изгиба световода с $R = 90$ мкм. $\lambda = 7.83$ мкм. $C_{vol} = 1\%$.

Сравнение значений β_{vm}^s и β_{vm}^b для мод, соответственно, регулярного и изогнутого световодов показало, что для заданной моды $\text{Im}(\beta_{vm}^s)$ всегда меньше $\text{Im}(\beta_{vm}^b)$. С возрастанием m уменьшается $\text{Re}(\beta_{vm}^b)$, а $\text{Im}(\beta_{vm}^b)$ увеличивается, как и у мод регулярного световода. В отсутствие внешнего поглощения, при $\text{Im}(\beta_{vm}^b) = 0$, потери в световоде составляют величины порядка $10^{-16} - 10^{-12}$ мм⁻¹ при $R_b = 2$ мм. Можно сделать вывод, что в халькогенидном световоде, имеющем большой показатель преломления, радиационные потери на изгибе малы, и величина $\text{Im}(\beta_{vm}^b)$ определяется именно поглощением излучения во внешней среде. Значения $\text{Im}(\beta_{vm}^b)$, полученные для $\parallel$ мод, превышают значения, полученные для $+$ мод.

При расчете пропускания СЭ на основе U-образного световода, схема которого показана на Рисунке 16, необходимо учесть, что спектральная задача для мод изогнутого световода не является самосопряженной, и в строгой формулировке задачи Коши необходимо учесть связь мод разных порядков. Учет связи между ними является сложной вычислительной задачей, поэтому для моделирования распространения излучения в таком световоде модовое представление не является эффективным. Однако, для понимания влияния изгиба на характеристики отдельных мод в СЭ рассмотрено

распространение отдельных мод в изогнутом световоде в приближении слабой связи между ними.

Установлено, что для мод с $m < 6$, A_{1m}^b зависит от R_b незначительно. Для мод с большим m , A_{1m}^b растет при увеличении R_b (Рисунок 11а), что объясняется возрастанием γ_{1m}^i . Для сравнения с результатами измерений, представленными в Главе 2, получена зависимость поглощательной способности A_{1m} от концентрации присадки в дизельном топливе для отдельных мод HE_{1m} изогнутого световода с $R_b = 2$ мм (Рисунок 11б, треугольники). Длина изогнутого участка $L_b \approx 6.28$ мм, суммарная длина регулярного участка $L_s = 20$ мм. Измеренная зависимость $A_{1m}(C_{vol})$ показана кружками на Рисунке 11б и является более крутой, чем рассчитанная.

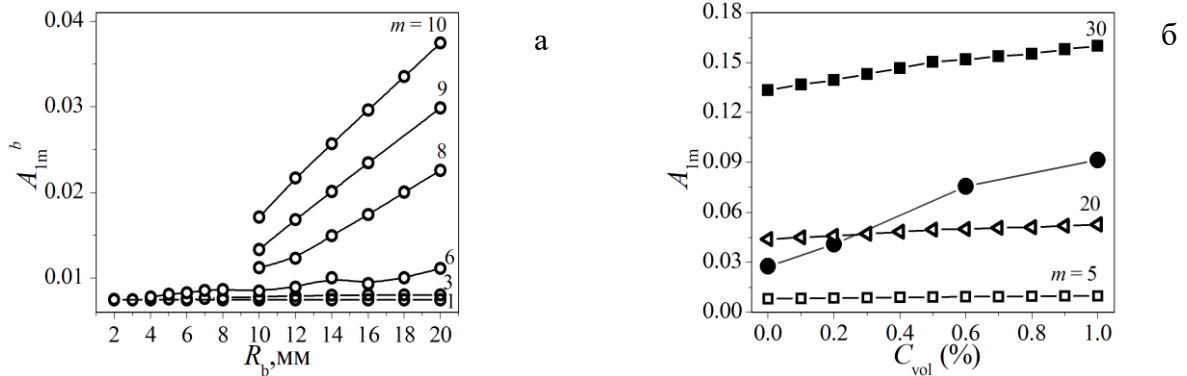


Рисунок 11. Поглощательная способность: а) рассчитанная для $\parallel$ мод HE_{1m} изогнутого световода в зависимости от R_b . $N_b = 1$. $C_{vol} = 1\%$; б) СЭ на основе U-образного бесструктурного световода в зависимости от концентрации присадки в дизельном топливе, полученная в эксперименте (кружки), рассчитанная для $\parallel$ мод HE_{1m} с $m = 5$ (пустые квадраты), 20 (пустые треугольники) и 30 (закрашенные квадраты), $R_b = 2$ мм. $N_b = 1$. $\lambda = 7.83$ мкм, $R = 90$ мкм.

При расчете A_{1m}^b отдельных $\parallel$ мод HE_{1m} с различными m при разном числе полувитков N_b изогнутого световода с $R_b = 2$ мм, установлено, что A_{1m}^b значительно возрастает для моды с $m = 30$ при увеличении N_b , а $A_{1,30}$, рассчитанная при $N_b = 1$, имеет почти такие же значения, что и у моды с $m = 20$ при $N_b = 3$.

В Главе 4 в теоретической модели, разработанной в Главе 1, выявлены особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой в изогнутом бесструктурном световоде, погруженном в жидкую среду в виде двухкомпонентной смеси нефтепродуктов. Линейный коэффициент затухания мощности моды изогнутого световода больше по величине, чем продольный коэффициент затухания мощности такой же моды регулярного световода. Угловые и линейные коэффициенты затухания мощности мод изогнутого световода больше у мод более высоких порядков. У моды с заданными порядками, электрическое поле которой колеблется в плоскости изгиба, угловые и линейные коэффициенты затухания мощности больше, чем у моды, электрическое поле которой колеблется перпендикулярно плоскости изгиба. У мод высоких порядков зависимость углового коэффициента затухания мощности от радиуса изгиба световода близка к линейной. У мод низких порядков, сильно локализованных в сердцевине световода, угловой коэффициент затухания мощности мал и слабо зависит от радиуса изгиба. Поглощательная способность, рассчитанная для отдельной моды, в СЭ на основе изогнутого световода прямо пропорциональна угловому коэффициенту затухания мощности моды и числу витков световода при заданном радиусе изгиба. Сравнение рассчитанной поглощательной способности для отдельных мод U-

образного световода с результатами эксперимента по измерению концентрации двух-компонентной смеси нефтепродуктов показало, что имеется различие в наклоне калибровочных графиков, полученных в эксперименте и в расчете, поскольку в теоретической модели не учитывается связь между отдельными модами изогнутого световода.

В Главе 5 теоретическая модель, разработанная в Главе 1, применяется для исследования спектральных зависимостей ДГС высших мод регулярных халькогенидных световодов с бесконечной оболочкой (как воздушной, так и стеклянной), а также исследуется возможность совмещения функции генератора СК и СЭ в одном волоконном устройстве. В результате численного решения характеристического уравнения для мод световода получены спектральные зависимости параметра ДГС $D = -(2 \cdot \pi \cdot c \cdot \beta_2) / \lambda^2$, где $\beta_2 = d^2 \beta / d\omega^2$ (Рисунок 12а). Установлено, что при фиксированном ν с увеличением m происходит смещение нуля ДГС в область более коротких длин волн, как и с увеличением ν при фиксированном m .

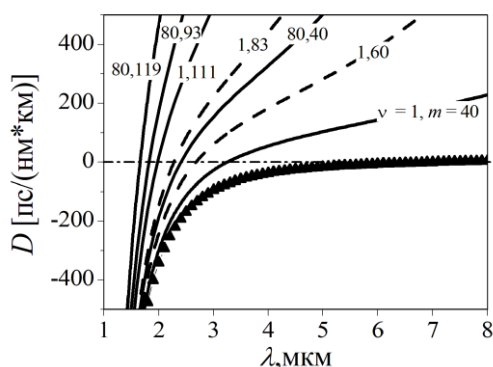


Рисунок 12. Спектральная зависимость параметра D , рассчитанная для $HE_{\nu m}$ мод многомодового световода с сердцевиной из стекла состава As_2Se_3 в воздухе (сплошные линии) и с оболочкой из стекла состава As_2S_3 (штриховые линии), $R = 150$ мкм. Треугольниками на графике показана спектральная зависимость $D = -\lambda/c \cdot (d^2n/d\lambda^2)$ для стекла состава As_2Se_3 .

В Главе 5 показано, что использование для передачи оптического излучения высших мод позволяет компенсировать нормальную дисперсию халькогенидного стекла в ИК-диапазоне. Таким образом, свойства высших мод халькогенидных световодов позволяют совмещать функции СЭ и генератора СК в одном световоде. Поскольку эффективность нелинейного преобразования частоты излучения значительно повышается вблизи нуля дисперсии групповой скорости, для накачки могут быть использованы импульсные лазерные источники ближнего ИК-диапазона.

В **Заключении** обобщены результаты исследований. Разработанные теоретические модели позволяют выявить особенности взаимодействия оптического излучения с внешней поглощающей средой и могут быть адаптированы к использованию в различных задачах эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона. Методика расчета выходных характеристик СЭ является основой для создания системы проектирования волоконно-оптических спектроскопических датчиков. Среди значимых для теории и практики результатов, полученных в диссертационной работе, можно выделить выявленные зависимости коэффициента затухания мощности излучения вдоль оси световода от пространственных и энергетических параметров мод различных порядков, зависимость чувствительности датчика от отношения длины СЭ и характерных длин затухания мощности мод. Для получения высокочувствительного и компактного датчика надо передавать излучение в СЭ посредством мод с высокими порядками. Дисперсионные свойства мод с высокими порядками могут быть использованы для нелинейного преобразования спектра сверхкороткого лазерного импульса в многомодовом халькогенидном световоде при накачке в ближнем ИК. Перспективные разработки устройства, совмещающего в себе функции СЭ и генератора СК в среднем ИК-диапазоне, имеют большой практический интерес.

Дальнейшее развитие полученных результатов позволит перейти от исследований к опытно-конструкторским разработкам и созданию волоконно-оптических спектроскопических датчиков, востребованных в различных областях для дистанционного контроля научных, технических, биологических и природных процессов в режиме реального времени.

Список литературы:

- 1.Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. – М.: Мир, 2003. – 683 с.
- 2.G.E. Snopatin, et.al.//Inorganic Materials. - 2009. - Vol.45, no.13. - Pp. 1439-1460.
- 3.Heo J. et.al. // Applied Optics. – 1991. – Vol.30, no.27. – Pp.3944 – 3951.
- 4.Sanghera J.S. et.al. // Journal of American Ceramic Society. – 1995. – Vol. 78, no.8. – Pp.2198-2202.
- 5.Sanghera J. S. et.al. // Applied Optics. – 1994. – Vol.33, no.27. – Pp. 6315 – 6322.
- 6.Katz M. et.al. // Applied Optics. – 1994. – Vol.33, no.25. – Pp.5888 – 5894.
- 7.Houizot P., et.al. // Sensors. – 2014. – Vol.14, no.10 – Pp.17905 – 17914.
- 8.Gupta B. D., et.al. // Optical and Quantum Electronics. – 1996. – Vol.28. - Pp. 1629-1639.
- 9.Lucas P., et.al. // Applied Spectroscopy. – 2005. – Vol. 59, no.1 - Pp.1-9.
- 10.Riley M. R., et.al. // Biotechnology and Bioengineering. – 2006. – Vol. 95, no.4. – Pp.599-612.
- 11.Mignani A. G. et.al. // Applied Spectroscopy – 1998 – Vol. 52, no.4 – Pp.546 – 551.
- 12.Kumar P. S. et.al.//Journal of Optics A:Pure and Applied Optics –2002.–Vol.4, no.3 – Pp.247–250.
- 13.Schermer R.T. // Optics Express. – 2007. – Vol.15, no.24. – Pp. 5674-1570.
- 14.Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов.– М.:Радио и связь. – 1987.– 656 с.
- 15.Reichardt H. // Abh. Mathem. Seminar Univ. Hamburg. – 1960. – Vol. 24. – Pp. 41-53.
- 16.Голант Е.И. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, В. 24. - С.81-87.
- 17.Рожнев А.Г. // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, В.6. – С.63-71.
- 18.Romanova E.A., Korsakova S.V., et.al.//Optics Express. – 2020. – Vol. 28, I. 4. – P.5267-5272.
- 19.Ландсберг Г.С. Оптика. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 656 с.
- 20.Savage J. A., et.al. // Infrared Physics. – 1980. – Vol.20, no.5 – Pp. 313 – 320.
- 21.Rheims J., et.al. // Measurement Science and Technology. – 1997. – Vol.8 – Pp.601-605.
- 22.Krug A., Kellner R. // Journal of Molecular Structure. – 1993. – Vol.294. – Pp.211-214.
- 23.Demas J., et.al. // Photonics Research – 2019. – Vol. 7, no.1. – Pp. 1-7.
- 24.S. Ramachandran // Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23, no.11. – Pp.3426-3443.
- 25.Savin S., et.al. // Optics Letters. – 2000. – Vol. 25, no.10. - Pp. 710–712.
- 26.Efimov A., Tailor A.J. // Optics Express. – 2003. – Vol. 11, no.8. – Pp.910-918
- 27.Wright L. G., et.al. // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, no.3. – Pp.3492-3506.
- 28.Рыбак Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. - М.: ГосТехИздат, 1962. – 888 с.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах из списка рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science

1. Romanova E., **Korsakova S.**, Komanec M., Nemecek T., Velmuzhov A., Sukhanov M., Shiryayev V. Multimode chalcogenide fibers for evanescent wave sensing in the mid-IR // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2017. - Vol.23. – I. 2. – P.1 – 7.
2. **Korsakova S.**, Romanova E., Velmuzhov A., Kotereva T., Sukhanov M., Shiryayev V. Peculiarities of the mid-infrared evanescent wave spectroscopy based on multimode chalcogenide fibers // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2017. – Vol. 475. – P. 38-43.
3. **Корсакова С.В.**, Романова Е.А., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С. Исследование характеристик сенсорных элементов для волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 125. – В.3. – С.402 – 410.

4. **Корсакова С.В.,** Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С. Использование высших мод халькогенидных световодов для оптимизации метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона // *Письма в журнал технической физики.* – 2019. – В.10. – С. 17 – 21.

5. Romanova E.A., **Korsakova S.V.,** Rozhnev A.G., Velmuzhov A.P., Kotereva T.V., Sukhanov M.V., Shiryayev V.S. Chalcogenide fiber loop probe for the mid-IR spectroscopy of oil products // *Optics Express.* – 2020. – Vol. 28. – I. 4. – P.5267-5272.

6. **Корсакова С.В.,** Романова Е.А. Особенности математического моделирования световых полей в сенсорном элементе для волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона. // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика.* – 2020. – В.1. – С.55-63

Статьи, опубликованные в сборниках конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science

1. **Korsakova S.V.,** Romanova E.A. Evanescent wave sensors for mid-IR spectroscopy // *Saratov Fall Meeting 2015: Third International Symposium on Optics and Biophotonics and Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS). Proceedings of SPIE. Progress in Biomedical Optics and Imaging. Conf. Proc. Saratov (Russia)* – 2016 – Vol. 9917. – P. 99173G-1 - 99173G-8.

2. **Korsakova S.V.,** Romanova E.A, Velmuzhov A.P, Kotereva T.V., Sukhanov M.V., Shiryayev V.S. Propagation of evanescent waves in multimode chalcogenide fiber immersed in an aqueous acetone solution: theory and experiment // *Proc. SPIE 10337, Saratov Fall Meeting 2016: Laser Physics and Photonics XVII and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data III. Conf. Proc. Saratov (Russia)* – 2017. – Vol.10337. – P.103370O-1 – 103370O-6.

3. **Korsakova S.V.,** Romanova E.A., Rozhnev A.G., Velmuzhov A.P., Kotereva T.V., Sukhanov M.V., Shiryayev V. S. Chalcogenide sensing elements for the mid-IR analysis of liquids: design on the base of electromagnetic theory of optical fiber // *SPIE Photonics Europe. Conf. Proc. Strasbourg (France). Proceedings of SPIE. Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V* – 2018. – Vol.106810N.

4. Romanova E.A., **Korsakova S.V.,** Rozhnev A.G., Velmuzhov A.P., Shiryayev V.S. Novel approach for design of fiber-based evanescent wave sensors for the mid-infrared spectroscopy // *20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Conf. Proc. Bucharest (Romania).* – 2018.

5. Romanova E., **Korsakova S.,** Zhivotkov D., Rozhnev A., Shiryayev V. Evanescent waves in glassy chalcogenide structures for remote spectroscopic sensing of environment // *21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Conf. Proc. Angers (France).* - 2019.

6. **Korsakova S.V.,** Vinogradova E.A., Romanova E.A., Rozhnev A.G. Electromagnetic approach in design of the fiber-based evanescent wave sensors for the mid-infrared spectroscopy // *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). Conf. Proc. Munich (Germany).* – 2019.

7. Romanova E., **Korsakova S.,** A. Rozhnev, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, T. Kotereva, V. Shiryayev. All-fiber evanescent wave sensors for the mid-infrared spectroscopy of liquids // *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). Conf. Proc. Munich (Germany).* – 2019.

8. Romanova E., **Korsakova S.**, Shiryayev V. Multimode chalcogenide fibre based platform for the mid-IR evanescent wave spectroscopy of liquids // *22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Conf. Proc. Bari (Italy).* – 2020

Статьи, опубликованные в других изданиях

1. **Корсакова С.В.**, Романова Е.А. Чувствительные элементы спектроскопических датчиков на основе халькогенидного стекла // *Тезисы докладов XV Конференции и VIII Школы молодых ученых «Высокочистые вещества. Получение. Анализ. Применение».* Нижний Новгород. – 2015. – С. 160.

2. **Korsakova S.**, Romanova E., Komanec M., Nemecek T., Shiryayev V., Velmuzhov A. Evanescent wave analysis of a multimode chalcogenide fiber embedded into an aqueous acetone solution // *Представляем научные достижения миру. Естественные науки: сборник трудов научной конференции.* Саратов. – 2017. – С.101-106.

3. **Korsakova S.V.**, Romanova E.A., Shiryayev V.S., Pushkin A.A., Velmuzhov A.P. Evanescent wave analysis of a multimode chalcogenide fiber embedded into a crude oil // *Тезисы докладов 20th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses (ISNOG).* Нижний Новгород. – 2016. – С.136.

4. **Корсакова С.В.**, Романова Е.А., Рожнев А.Г., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С. Халькогенидные сенсорные элементы с различным профилем показателя преломления для эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона // *Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение. Сборник XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девярых.* Нижний Новгород. – 2018. – С.170.

5. **Корсакова С.В.**, Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С. Дисперсионные свойства эванесцентных мод халькогенидных световодов // *Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2018: Материалы Международного симпозиума и Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2018* / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов: Изд - во «Новый ветер», – 2018. – С.100 – 104.

Свидетельства о регистрации интеллектуальной деятельности

1. Программный комплекс для расчета эванесцентных мод халькогенидного световода с тонкой кольцевой оболочкой (EW RingCladding): свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ / **С.В.Корсакова**, А.Г. Рожнев, Е.А. Романова. № 2019613342; дата регистрации 13.03.2019

2. Программный комплекс для расчета выходных характеристик волоконно-оптического датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона (EWUnclad): свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ / **С.В.Корсакова**, Е.А. Романова. №2019612395; дата регистрации 19.03.2019.