

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

**Математическое моделирование эванесцентных волн в волоконных
световодах для спектроскопии среднего ИК диапазона**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

аспиранта 4 курса
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
физического факультета

Корсаковой Светланы Владимировны

Научный руководитель
профессор кафедры компьютерной
физики и метаматериалов,
д.ф.-м.н., профессор

_____ Романова Е.А.

Саратов 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Спектроскопия среднего ИК диапазона - это надежное средство определения химического состава различных сред. Создание дистанционных устройств и систем, функционирующих в этом диапазоне, позволит перейти на более высокий уровень контроля в реальном времени производственных процессов, состояния окружающей среды, повысить эффективность медицинской диагностики, улучшить системы безопасности. Халькогенидные световоды, с их областью прозрачности в диапазоне длин волн 0.5 - 20 мкм, являются наиболее подходящей средой для передачи и преобразования излучения в таких оптических системах. Использование халькогенидного волокна как сенсорного элемента для химического анализа методом эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона основано на том, что излучение в волокне распространяется не только по сердцевине, но частично проникает в оболочку. Оболочкой бесструктурного волокна, состоящего только из стеклянной сердцевины, является внешняя среда. При распространении излучения по такому волокну происходит уменьшение мощности на длинах волн, соответствующих полосам поглощения вещества во внешней среде, которое может быть любым, - газообразным, жидким или твердым.

Метод волоконной эванесцентной спектроскопии использовался в течение двух последних десятилетий в лабораторных условиях в совокупности с Фурье-спектрометрами для определения состава различных веществ [1-6]. Важно отметить, что при достаточно обширных экспериментальных исследованиях, которые продемонстрировали функционирование волоконных эванесцентных датчиков, до последнего времени не проводилось теоретических исследований распространения эванесцентных волн на основе методов электромагнитной теории оптических волноводов [7]. Теоретический подход, который использовался прежде [8 -10], давал, по сути, лишь качественное объяснение, основанное на предположении, что мощность светового пучка уменьшается только в поглощающей оболочке, а в сердцевине остается постоянной. Такое приближение можно использовать для сред со слабым поглощением, что не соответствует условиям сильного поглощения на частотах колебательных переходов молекул в среднем ИК диапазоне. Строгий электродинамический подход является основой проектирования волноводных устройств различной геометрии. Однако, до сих пор этот подход не использовался для проектирования волоконных эванесцентных датчиков. Поэтому не были ясны способы оптимизации выходных характеристик,

повышения чувствительности и уменьшения порога обнаружения таких датчиков.

Принципиальная схема полностью волоконного эванесцентного датчика для дистанционного химического анализа в реальном времени выглядит следующим образом: волоконный источник широкополосного излучения, волоконный сенсорный элемент, контактирующий с исследуемой средой, и схема детектирования с анализатором спектра. Генерация суперконтинуума в халькогенидных световодах позволяет получить широкополосное излучение в диапазоне длин волн 3-14 мкм [11-13], однако, для накачки используется излучение параметрического генератора на длинах волн более 2.5 мкм, что необходимо в связи с большой нормальной дисперсией групповой скорости халькогенидных стекол в ближнем ИК диапазоне. В настоящее время активно ведутся работы по созданию волоконных лазеров среднего ИК диапазона для накачки суперконтинуума в халькогенидных световодах. Создание полностью волоконных источников широкополосного излучения позволит уменьшить размеры спектроскопических волоконно-оптических датчиков, снизить их стоимость и вынести их за пределы лабораторий. Поскольку излучение суперконтинуума, в отличие от теплового излучения, обладает высокой пространственной когерентностью, появляется возможность оптимизации ввода светового пучка в халькогенидный световод и создания сенсорных элементов новых конфигураций для улучшения выходных характеристик датчика.

Для разработок сенсорных элементов полностью волоконных спектроскопических датчиков нужна система компьютерного проектирования, включающая в себя математические модели и методы. В связи с этим цель диссертационного исследования сформулирована следующим образом.

Целью данной работы является развитие методов математического моделирования характеристик световых полей в волоконных световодах с использованием электродинамического подхода применительно к задачам химического анализа жидких сред методом эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

Основными задачами данной работы являются:

1. Разработать методические основы в рамках электродинамического подхода для решения задач волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона, заключающегося в использовании численных методов для описания эванесцентных волн в бесструктурном световоде, погруженном в поглощающую среду.

2. В рамках электродинамического подхода разработать математические модели распространения эванесцентных мод в волоконных

световодах и структурах на их основе для создания сенсорных элементов спектроскопических волоконно-оптических датчиков среднего ИК-диапазона.

3. Провести экспериментальную верификацию разработанных математических моделей применительно к решению задач определения химического состава модельных жидких сред методом эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона на основе халькогенидных световодов.

Объектом исследования являются математические модели сенсорных элементов волоконно-оптических спектроскопических датчиков среднего ИК-диапазона длин волн.

Предмет исследования:

- коэффициенты затухания эванесцентных мод;
- выходные характеристики сенсорных элементов на основе регулярного световода и световода с изгибом;
- характеристики сенсорных элементов на основе световода с тонкой стеклянной оболочкой;
- дисперсионные свойства эванесцентных мод многомодовых халькогенидных световодов.

Методология и методы исследования. В работе использовались следующие математические методы: метод численного решения характеристического уравнения для нахождения коэффициентов затухания мод и выходных характеристик сенсорного элемента на основе регулярного многомодового халькогенидного световода, а также исследования дисперсионных свойств высших мод, метод конечных элементов для расчета характеристик сенсорного элемента на основе световода с изгибом, а также метод конечных разностей для расчета характеристик сенсорного элемента с тонкой кольцевой оболочкой [14]. Расчеты выполнялись в программах Wolfram Mathematica и COMSOL Multiphysics.

Достоверность подтверждается корректностью использованных математических моделей для описания распространения эванесцентных волн в многомодовых халькогенидных световодах, используемых в качестве сенсорных элементов спектроскопического волоконно-оптического датчика для исследования химического состава жидких сред, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, полученных в диссертационной работе, а также их согласованностью с экспериментально апробированными данными, опубликованными в работах других авторов. Экспериментальные данные получены на современном оборудовании (FTIR IFS 113v спектрометр, МСТ-детектор, охлаждаемый жидким азотом).

Научная новизна работы:

1. Впервые в задачах волоконной эванесцентной спектроскопии для описания световых полей применен электродинамический подход и созданы математические модели, основанные на модовом представлении излучения, распространяющегося в световоде.

2. В результате применения разработанного теоретического подхода установлено, что коэффициенты затухания растут с увеличением азимутального и радиального порядков эванесцентных мод. Предлагается использовать высшие моды многомодового халькогенидного световода для улучшения выходных характеристик спектроскопического волоконно-оптического датчика.

3. Установлено, что при распространении нескольких эванесцентных мод в многомодовом световоде, зависимость логарифма пропускания от длины сенсорного элемента не является линейной.

4. В рамках математической модели световода с изгибом установлено, что в некоторых областях поперечного сечения продольный поток мощности эванесцентных мод распространяется в одном направлении, а в других областях, - в противоположном.

5. В результате компьютерного моделирования установлено, что для каждой эванесцентной моды изгиба световода существует радиус, при котором угловой коэффициент затухания является максимальным, причем этот радиус уменьшается при увеличении порядка моды.

6. В результате компьютерного моделирования установлено, что коэффициенты затухания эванесцентных мод оболочки, показатель преломления которой больше, чем показатель преломления сердцевины, растут при уменьшении её толщины. Поэтому для оптимизации сенсорного элемента предлагается использовать световод с наноразмерной кольцевой оболочкой.

7. Выявленные в математической модели особенности высших мод многомодовых световодов указывают на то, что можно создавать гибридные волоконные устройства, объединяющие функции нелинейного преобразователя частоты и сенсорного элемента. Использование высших мод многомодового халькогенидного световода для получения широкополосного когерентного излучения и химического анализа различных веществ позволяет оптимизировать метод волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

Применение электродинамического подхода в задачах волоконной эванесцентной спектроскопии позволило создать универсальные математические модели волоконно-оптических сенсорных элементов

различной геометрии, разработать методические основы для разработок таких элементов на основе выявленных закономерностей распространения в них эванесцентных мод. Таким образом, заложены основы для создания системы проектирования спектроскопических волоконно-оптических датчиков. Установлено, что использование высших эванесцентных мод для передачи излучения в световоде позволяет оптимизировать выходные характеристики и размеры сенсорного элемента спектроскопического волоконно-оптического датчика, а также компенсировать нормальную дисперсию групповой скорости халькогенидного стекла в ИК диапазоне для генерации суперконтинуума с накачкой в ближнем ИК.

Проведены лабораторные испытания сенсорных элементов на основе многомодового халькогенидного световода, погруженного в модельную жидкость. Полученные теоретические и экспериментальные результаты будут использованы для разработок, создания и внедрения в производство волоконно-оптических датчиков для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование электродинамического подхода в задачах волоконной эванесцентной спектроскопии, заключающегося в представлении световых полей в световоде в виде эванесцентных мод, позволяет разработать математические модели для расчета характеристик эванесцентных мод в волоконном световоде, погруженном в поглощающую среду, и получить выходные характеристики сенсорного элемента (диапазон измеряемых значений, чувствительность, предел обнаружения) спектроскопического волоконно-оптического датчика.

2. Разработаны алгоритмы и программы для ЭВМ, позволяющие моделировать характеристики эванесцентных мод и выходные характеристики сенсорного элемента на основе многомодового световода различной геометрии (регулярный, изогнутый).

3. Использование математической модели на основе численного решения характеристического уравнения для мод многомодового халькогенидного световода позволило установить, что коэффициенты затухания больше у эванесцентных мод с высокими радиальными и азимутальными порядками. Использование высших мод для передачи излучения в сенсорном элементе на основе регулярного световода позволяет увеличить чувствительность датчика и уменьшить предел обнаружения исследуемого вещества.

4. Компьютерное моделирование методом конечных элементов позволило установить, что угловые коэффициенты затухания эванесцентных

мод изогнутого многомодового халькогенидного световода растут при увеличении радиальных и азимутальных порядков мод и зависят от радиуса изгиба, а линейные коэффициенты затухания эванесцентных мод изогнутого световода уменьшаются при увеличении радиуса изгиба.

5. Компьютерное моделирование методом конечных разностей эванесцентных мод регулярного многомодового халькогенидного световода с кольцевой стеклянной оболочкой, показатель преломления которой больше, чем показатель преломления сердцевины, позволило установить, что коэффициенты затухания мод оболочки увеличиваются при уменьшении толщины оболочки.

6. Использование математической модели на основе численного решения характеристического уравнения для мод многомодового халькогенидного световода показало, что использование высших мод световода позволяет компенсировать нормальную дисперсию халькогенидного стекла в ближнем ИК диапазоне.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, пяти глав, и заключения. Первая глава работы посвящена теоретическому описанию электродинамического подхода, впервые примененного для задач эванесцентной спектроскопии, задаются параметры математических моделей, описываются физические и оптические свойства регулярного световода и световода с изгибом, а также модельных поглощающих жидкостей. Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям по измерению пропускания сенсорных элементов, погруженных в водный раствор ацетона и раствор дизельного топлива с присадкой. В третьей главе представлено описание полученных в результате компьютерного моделирования характеристик сенсорного элемента на основе регулярного бесструктурного световода. В четвертой главе рассматриваются свойства эванесцентных мод в математической модели световода с изгибом. Пятая глава посвящена способам оптимизации сенсорного элемента волоконно-оптического спектроскопического датчика. Полный объем работы составляет 120 страниц, включая 55 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 58 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведения исследований по теме диссертационной работы предложено использовать строгий электродинамический подход на основе теории волоконных световодов для математического моделирования сенсорных элементов спектроскопического

волоконно-оптического датчика для исследования состава жидких сред в среднем ИК диапазоне длин волн. В рамках этого подхода были разработаны математические модели для расчета характеристик эванесцентных мод в волоконном световоде, находящемся во внешней поглощающей среде, и получены выходные характеристики (диапазон измеряемых значений, чувствительность, предел обнаружения) сенсорного элемента спектроскопического волоконно-оптического датчика. В рамках разработанных моделей проведены расчеты коэффициентов затухания эванесцентных мод в бесструктурных многомодовых световодах различной геометрии (регулярный, изогнутый).

В результате использования математической модели на основе численного решения характеристического уравнения для мод многомодового халькогенидного световода установлено, что использование высших мод для передачи излучения в сенсорном элементе позволяет увеличить чувствительность датчика и уменьшить предел обнаружения вещества в растворе.

В результате компьютерного моделирования методом конечных элементов, установлено, что угловые коэффициенты затухания эванесцентных мод изогнутого многомодового халькогенидного световода растут при увеличении радиальных и азимутальных порядков мод и зависят от радиуса изгиба. Линейные коэффициенты затухания эванесцентных мод изогнутого световода уменьшаются при увеличении радиуса изгиба.

Кроме того, в диссертационной работе были рассмотрены способы оптимизации сенсорного элемента путем использования световода с тонкой кольцевой оболочкой для оптимизации выходных характеристик сенсорного элемента спектроскопического волоконно-оптического датчика.

Следует отметить, что созданные математические модели являются универсальными для любого вида источника излучения, как когерентного, так и некогерентного. Разработанные методы могут быть легко адаптированы к использованию в различных задачах эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

Среди всех полученных в диссертационной работе значимых для теории и практики результатов следует отметить выявленные в результате математического моделирования особенности световых полей эванесцентных мод многомодового халькогенидного световода. Следует отметить и предложенный метод создания волоконного устройства, совмещающего в себе функции сенсорного элемента и генератора суперконтинуума.

Сформулированные защищаемые положения и результаты, равно как и пункты научной новизны и теоретической и практической значимости работы в

полной мере соответствуют научным специальностям 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и 01.04.21 «Лазерная физика». Их детальное рассмотрение позволяет предложить перечисленные ниже основные направления их развития.

В части специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- для системы компьютерного проектирования волоконно-оптических спектроскопических датчиков, в разработанные математические модели необходимо включить моделирование условий возбуждения высших мод многомодового световода при вводе излучения в торец или через боковую поверхность световода

- результаты, полученные для математической модели световода с тонкой кольцевой оболочкой, можно развить для задачи моделирования эванесцентных волн в световоде с многослойной наноразмерной оболочкой.

В части специальности «Лазерная физика»:

- создание математической модели генерации суперконтинуума в высших модах многомодового халькогенидного световода

- развитие метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона для источника излучения с высокой пространственной когерентностью в целях оптимизации выходных характеристик спектроскопического волоконно-оптического датчика.

- переход от исследований к опытно-конструкторским разработкам к созданию спектроскопического волоконно-оптического датчика.

Апробация работы.

Результаты, представленные в диссертационной работе, были доложены и обсуждены на международных и российских конференциях:

XV Конференция и VIII Школа молодых ученых «Высококачественные вещества. Получение. Анализ. Применение» (г. Нижний Новгород, 2015);

Saratov Fall Meeting International School for Junior Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophotonics (SFM) (Саратов, 2015, 2016, 2017, 2018);

International Conference for young scientists «Presenting Academic Achievements to the world» (г. Саратов, 2015, 2016);

20th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses (ISNOG) (Нижний Новгород, 2016);

International Training School on Fiber Lasers and Optical Fiber Technology (ITS), (г. Прага (Чешская Республика), 2016);

Ежегодная конференция европейской Акции COST Action MP1401 (г. Тель-Авив (Израиль), 2017, г. Варшава (Польша), 2018);

38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), (г. Санкт-Петербург, 2017);

XVI Всероссийская конференция и IX Школа молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девятовых «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (г. Нижний Новгород, 2018).

Публикации. По теме работы были опубликованы 13 печатных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и зарегистрированных в изданиях базы Scopus и Web of Science – 8 , и 5 – в сборниках научных трудов и материалах конференций. Получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и зарегистрированных в базах Scopus и Web of Science

1. Корсакова С.В. Использование высших мод халькогенидных световодов для оптимизации метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона / Корсакова С.В., Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С. // Письма в журнал технической физики. – 2019. – Вып.10. – Т.45 - С. 17 – 21.

2. Корсакова С.В. Исследование характеристик сенсорных элементов для волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона / Корсакова С.В., Романова Е.А., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С.// Оптика и спектроскопия. – 2018. - Вып.3. – Т. 125. – С.402 – 410.

3. Korsakova S. Peculiarities of the mid-infrared evanescent wave spectroscopy based on multimode chalcogenide fibers/Journal of Non-Crystalline Solids // S.Korsakova, E. Romanova, A.Velmuzhov, T.Kotereva, M.Sukhanov, V. Shiryayev. – 2017. – V. 475. - P. 38-43.

4. Korsakova S. Multimode chalcogenide fibers for evanescent wave sensing in the mid-IR/ E. Romanova, S.Korsakova, M.Komanec, T.Nemecek, A.Velmuzhov, M.Sukhanov, V. Shiryayev // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2017. - V.23. - № 2. - P.1 - 7.

5. Korsakova S.V. Evanescent wave sensors for mid-IR spectroscopy/ Romanova E.A. // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE 3. Saratov Fall Meeting 2015 - Third International Symposium on Optics and Biophotonics and Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS). – 2016 – V. 9917. – P. 99173G-1 - 99173G-8.

6. Korsakova S. Propagation of Evanescent Waves in Multimode Chalcogenide Fiber Immersed in an Aqueous Acetone Solution: Theory and Experiment/ S.Korsakova, E.Romanova, A.Velmuzhov, T.Kotereva, M.Sukhanov, V.S.Shiryayev // Saratov Fall Meeting 2016, Conf. Proc.Saratov (Russia). - 2017. - V.10337. - P.103370O-1 - 103370O-6.

7. Korsakova S.V. Chalcogenide sensing elements for the mid-IR analysis of liquids: Design on the base of electromagnetic theory of optical fiber / S.V.Korsakova, E. A.Romanova,A.G. Rozhnev, A.P.Velmuzhov, T.V.Kotereva, M.V.Sukhanov, V. S.Shiryayev // Proceedings of SPIE Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V – 2018. – V.10681. - P.106810N1 - 106810N9;

8. Korsakova S. Novel Approach for Design of Fiber-Based Evanescent Wave Sensors for the Mid-Infrared Spectroscopy / Romanova E., Korsakova S., Rozhnev A., Velmuzhov A., Shiryaev, V. // 20th International Conference on Transparent Optical Networks. – 2018. – V. 2018 - №8473730.

В прочих изданиях

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

10. Korsakova S. Evanescent Wave Analysis of a Multimode Chalcogenide Fiber Embedded into an Aqueous Acetone Solution/ S.Korsakova, E.Romanova, M.Komanec, T.Nemecsek, V.Shiryaev, A.Velmuzhov// Представляем научные достижения миру. Естественные науки: сборник трудов научной конференции – Саратов. - 2017. – С.101-106.

11. Korsakova S. Evanescent Wave Analysis of a Multimode Chalcogenide Fiber Embedded into a Crude Oil/ S.Korsakova, E.A. Romanova, V.S. Shiryaev, A.A. Pushkin, A.Velmuzhov// Тезисы докладов 20th International Symposium of Non-Oxide and New Optical Glasses (ISNOG). Нижний Новгород. - 2016. - С.136.

12. Корсакова С.В. Халькогенидные сенсорные элементы с различным профилем показателя преломления для эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона/ Корсакова С.В., Романова Е.А., Рожнёв А.Г., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С.//Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение. Сборник XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девярых. - 2018. - С.167.

13. Корсакова С.В. Дисперсионные свойства эванесцентных мод халькогенидных световодов/ Корсакова С.В., Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С.//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.

Свидетельства о регистрации интеллектуальной деятельности

1. Программный комплекс для расчета эванесцентных мод халькогенидного световода с тонкой кольцевой оболочкой (EWRingCladding): свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ / С.В.Корсакова, А.Г. Рожнёв, 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

Список литературы

1. Jonas E.R., Braiman M.S. Efficient Source-to-Fiber Coupling Method Using a Diamond Rod: Theory and Application to Multimode Evanescent-Wave IR Absorption Spectroscopy // Applied Spectroscopy. – 1993. – V.47 - №11. – P.1751 – 1759;
2. Katz M., Katzir A., Schnitzer I., et.al. Quantitative evaluation of chalcogenide glass fiber evanescent wave spectroscopy // Applied Optics. – 1994. – V.33. – I.25. – P.5888 – 5894;
3. Messica A., Greenstein A., Katzir A. Theory of fiber-optic, evanescent-wave spectroscopy and sensors // Journal of Applied Optics. - 1996. - V.35. №13. P.2274-2284;
4. Xu Y., Cottenden A., Barrie Jones N. A theoretical evaluation of fibre-optic evanescent wave absorption in spectroscopy and sensors // Journal of Optics and Lasers in Engineering. - 2006. - V.44. - P.93-101;
5. Heo J., Monica Rodrigues M., Saggese S.J., Sigel G.H. // J. of Appl. Opt. 1991. V.30. № 6. P.3944 – 3951.
6. Sanghera J. S., Kung F. H., Pureza P. C., Nguyen V. Q., Miklos R. E., Aggarwal I. D. // J. of Appl. Opt. 1994. V.33. №27. P. 6315 – 6322.
7. Sanghera J.S., Kung F.H., Busse L.E., Pureza P.C., Aggarwal I.D. // J. Am. Ceram. Soc. 1995. V. 78. №8. P. 2198 – 2202.
8. 7.Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987
9. Edited by Wang R. Amorphous Chalcogenides, Advances and Applications - Pan Stanford Publishing, 2013;
10. Kumar P. S., Vallabhan C. P. G., Nampoori V. P. N., et.al. A fibre optic evanescent wave sensor used for the detection of trace nitrites in water // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics - 2002. - V.4. - P.247–250;
11. Thomas L. S., George N. A., Kumar P. S., et.al. Chemical sensing with microbent optical fiber // Optics Letters. - 2001. - V.26. - P.1541-1543
12. Petersen C.R., Moller U., et.al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre. // Nature Photonics. - 2014. - V.8. - P.830-834;
13. Zhao Z., Wang X., et.al. 1.5–14 μm mid infrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber // Optics Letters. – 2016. – V.41 – I.22. – P.5222 – 5225;
14. Ou H., Dai S., P. Zhang, et.al. Z. Liu, X. Wang, F. Chen, H. Xu, B. Luo, Y. Huang, and R. Wang, Opt. Lett. 41, 3201 (2016).
15. Рожнев А.Г. Устойчивый метод расчета слоистых диэлектрических и металлодиэлектрических структур с круглым поперечным сечением // Письма в ЖТФ. - 2009. - Т. 35. - В.6. - С.63-71.