Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

На правах рукописи
УДК 628.953.2

Середа Олеся Васильевна

ОДНОМОДОВЫЕ СВЕТОВОДЫ ИЗ КРИСТАЛЛОВ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

01.04.21 Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
к.ф.-м.н. Бутвина Л.Н.

Москва. 2008г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» на кафедре «Волоконная оптика» при Учреждении Российской Академии Наук Научном Центре Волоконной Оптики.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, Бутвина Леонид Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Курков Андрей Семенович;

кандидат физико-математических наук, Алексеев Андрей Геннадьевич

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии Наук Физический Институт им.П.Н.Лебедева

Защита диссертации состоится «25» декабря 2008 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д212.156.01 при Московском физико-техническом институте (Государственном университете), по адресу 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

Отзывы направлять по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (Государственного университета).

Автореферат разослан «25» ноября 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук Батурин А.С

Общая характеристика работы

Актуальность. Оптические волокна из кристаллов галогенидов серебра $AgCl_xBr_{1-x}$ ($0<x<1$) долгое время являются объектом научных исследований, поскольку относительно просто могут быть изготовлены методом экструзии кристаллов галогенидов серебра ввиду их пластичности и способности к деформации при небольшой температуре (200°C). Эти волокна привлекательны для многих применений в оптической диагностике и передачи лазерного излучения, поскольку нетоксичны и имеют окно прозрачности во всем среднем инфракрасном диапазоне (3 – 20 мкм). Расчетные потери материала на пропускание низкие (~1-10дБ/км), однако фактические наблюдаемые потери в кристаллических световодах превышают теоретические на 3 – 4 порядка, что связано с рассеянием излучения в объеме волокна, поэтому кристаллические световоды изготовлялись только многомодовыми с потерями от 0,1 дБ/м (для 10.6 мкм), и их использовали в спектроскопических исследований для передачи излучения на расстояния 1-3 м.

Очень актуальной является проблема создания одномодовых световодов. Такие световоды для среднего инфракрасного диапазона могут использоваться для передачи излучения лазеров (CO_2 и квантово-каскадных), а также для создания нелинейных волоконно-оптических приборов, работающих в этом диапазоне.

Получение одномодовых световодов для среднего инфракрасного диапазона с низкими оптическими потерями затруднено из-за значительного рассеяния на неидеальной границе раздела сред и образования поглощающих коллоидов серебра на границе раздела, а также отсутствия технологии выращивания кристаллов с гарантированной маленькой разницей в составах кристаллов $AgCl_xBr_{1-x}$ (меньше 5 %), которые необходимы для создания сердцевины и оболочки при составлении заготовки одномодового волокна.

Получение одномодовых ступенчатых и микроструктурированных световодов с низкими потерями (менее 2 дБ/м) открывает новые возможности для применения волокна в среднем инфракрасном диапазоне.

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы является поиск путей оптимизации параметров структуры, состава материалов и технологии получения одномодовых ступенчатых и микроструктурированных волокон на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и исследование их физических свойств с целью перспективного использования данных световодов для передачи лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона (3-15 мкм), в частности мощного излучения CO_2 лазера

Для достижения заявленной цели было необходимо:

1 Численно промоделировать характеристики распространения излучения в микростуруктурированном волокне с различными параметрами его структуры. Выявить зависимости теоретических потерь первой и высших мод от параметров структуры волокна.

2 Создать экспериментальную установку и провести измерения характеристик режима распространения излучения CO_2 лазера в одномодовых ступенчатых и микроструктурированных кристаллических волокнах, таких как распределения интенсивности излучения в ближней и дальней зонах, потерь на рассеяние и индуцированных потерь при изгибе волокна.

3 Проанализировать полученные результаты и дать предложения по использованию одномодового волокна из галогенидов серебра для создания оптических устройств, работающих в среднем инфракрасном диапазоне.

Научная новизна. В работе было впервые получено одномодовое ступенчатое волокно для длины волны 10.6 мкм с потерями 1.8 дБ/м, которые значительно ниже полученных ранее [1,2] (15-30 дБ/м). В ходе работы были численно промоделированы параметры распространения

излучения с длиной волны 10.6 мкм (теоретические потери на вытекание, диаметр поля моды и дисперсия) в микроструктурированных волокнах на основе галогенидов серебра при различных параметрах структуры волокна (расстоянии между центрами вставок, диаметре вставок, разнице с составах материала для вставок и основного объема волокна). Моделирование было выполнено с использованием программы MatLab и Femlab 3.1 методом конечных элементов (FEM). Впервые получено одномодовое микроструктурировнное волокно для длины волны 10.6 мкм с потерями 2дБ/м, которые значительно ниже потерь, указанных ранее опубликованных работах [3]. В работе впервые промоделировано, получено и исследовано экспериментально микроструктурированное волокно, одномодовое при длине волны λ = 10,6 мкм с площадью поля моды более 14 000 мкм^2.

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.

1 Теоретически и экспериментально показана возможность получения одномодовых ступенчатых и микроструктурированных световодов из кристаллов галогенидов серебра с оптическими потерями менее 2дБ/м для длины волны 10.6 мкм.

2 Теоретически и экспериментально показана возможность получения одномодового микроструктурированного волокна из кристаллов галогенидов серебра с одним кольцом вставок с площадью поля моды более 14 000 мкм^2 для длины волны 10.6 мкм.

3 Установлено, что образование коллоидов серебра во вставках микроструктурированного волокна приводит к значительному возрастанию оптических потерь высших мод, что может привести к фактически одномодовому режиму распространения излучения.

ДОСТОВЕРНОСТЬ. Научные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретическими

решениями и воспроизводимыми экспериментальными данными, полученными в работе, не противоречат известным положениям науки.

Практическая ценность. Накопленный опыт численного моделирования и технологический опыт изготовления одномодового световода для среднего инфракрасного диапазона, в том числе с большой площадью поля моды, широким одномодовым диапазоном или сохранением поляризации, может быть применен при проектировании устройств для спектроскопических и интерференционных измерений в этом диапазоне. Результаты численного моделирования найдут применение при изготовлении микроструктурированных кристаллических волокон в дальнейшем.

Личный вклад автора. Автором лично выполнено численное моделирование микроструктурированных волокон, получены значения теоретических потерь фундаментальных и высших мод, численно исследовано влияние структуры волокна на изменение дисперсии, экспериментально установлено, что лабораторные образцы ступенчатых и микроструктурированных волокон являются одномодовыми при длине волны 10,6 мкм, и измерены их оптические потери.

Апробация работы.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях:

1 «Singlemode step-index and microstructured fibers for the middle infrared» L.N. Butvina; O.V. Sereda; E.M. Dianov; N.V. Lichkova; V. N. Zagorodnev на симпозиуме “Defence and Security 2007”, США, апрель 2007

2 «Single-mode photonic crystal fiber for the middle infrared» L.N. Butvina; O. V. Sereda; E. M. Dianov; N. V. Lichkova; V. N. Zagorodnev на симпозиуме “Defence and Security 2007”, США, апрель 2007

3 «Singlemode crystalline fiber for CO_2 laser power delivery» L.N. Butvina, O. V. Sereda, E. M. Dianov, N. V. Lichkova, V. N. Zagorodnev на международной конференции ICONO\LAT 2007, май 2007

4 «Singlemode photonic crystal fiber for the middle infrared» L.N. Butvina, O. V. Sereda, E. M. Dianov, N. V. Lichkova, V. N. Zagorodnev на международной конференции ICONO\LAT 2007, май 2007 – приглашенный доклад

5 «Инфракрасные кристаллические световоды для диапазона длин волн 3-20 мкм и их применения» Л.Н. Бутвина, О.В. Середа, Е.М. Дианов, Всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь, октябрь 2007

6 "Кристаллические световоды для среднего инфракрасного диапазона" Середа О.В., Бутвина Л.Н., Бутвина А.Л., 50-ая научная конференция МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук", Москва, ноябрь 2007

7 L. Butvina, O. V. Sereda, A. G. Okhrimchuk, A. L. Butvina, E. M. Dianov, N. V. Lichkova, and V. N. Zagorodnev, "Singlemode Crystalline Fibers for the Middle Infrared," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008).

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 3 статьи и 3 доклада, представленных в трудах конференций.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 105 страницах машинописного текста и содержит 72 рисунка. Работа состоит из 4 глав, включая введение, заключения и списка цитированной литературы, включающего 46 библиографических ссылок, 1 приложения.

Содержание работы

Введение

В этом разделе обоснована актуальность данной работы, сформулированы основные цели исследования. Кратко изложено основное содержание материала по главам.

Глава 1 Ступенчатые кристаллические волокна.

В этой главе изложено современное состояние исследований ступенчатых кристаллических волокон (многомодовых). Приведены характеристики пропускания многомодовых кристаллических волокон излучения в диапазоне 3-20 мкм и показано, что наблюдаемые потери превышают теоретические на несколько порядков, что связано с рассеянием в объеме волокна [4]. В результате анализа фактических механизмов потерь в кристаллических световодах, таких как:

- Рассеяние на микропорах, образующихся в объеме волокна;
- Рассеяние на границе раздела;
- Поглощение на коллоидах серебра;
- Рассеяние на остаточных напряжениях;
- Примесное поглощение;

предложены методы снижения потерь и приведены результаты измерений потерь в многомодовых световодах с улучшенными характеристиками (Рис.1).

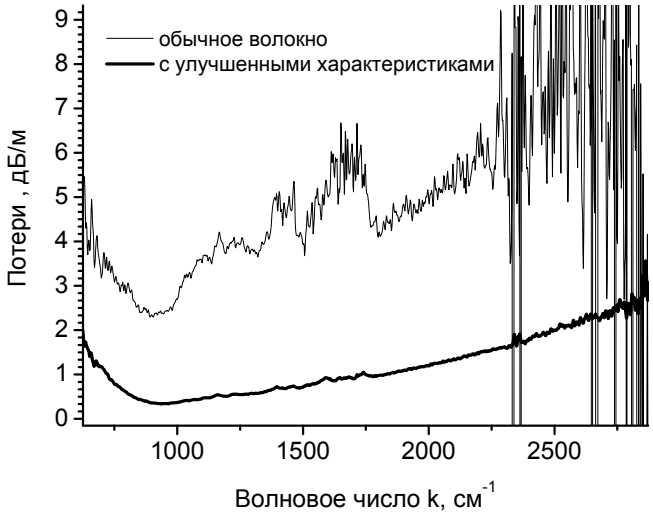

Рис.1 Изменение потерь в оболочечном многомодовом световоде

Краткий анализ работ по одномодовым кристаллическим световодам показывает, что одномодовые ступенчатые и микроструктурированные световоды для длины волны 10.6 мкм, полученные к настоящему времени имеют потери ~15-30 дБ/м.

Глава 2 Одномодовые ступенчатые кристаллические волокна

В этой главе приведены экспериментально измеренные характеристики изготовленных одномодовых ступенчатых световодов. Данные ступенчатые световоды является одномодовым для длины волны 10.6 мкм. Световоды имеют сердцевину диаметром 40 мкм и числовую апертуру 0.2 (разница показателей преломления 0.011), что соответствует 5% разнице в концентрации AgCl в материалах оболочки $AgCl_{0.5}Br_{0.5}$ и сердцевины $AgCl_{0.45}Br_{0.55}$. Измеренные потери составляют 1.8±0.4 дБ/м для длины волны 10.6 мкм.

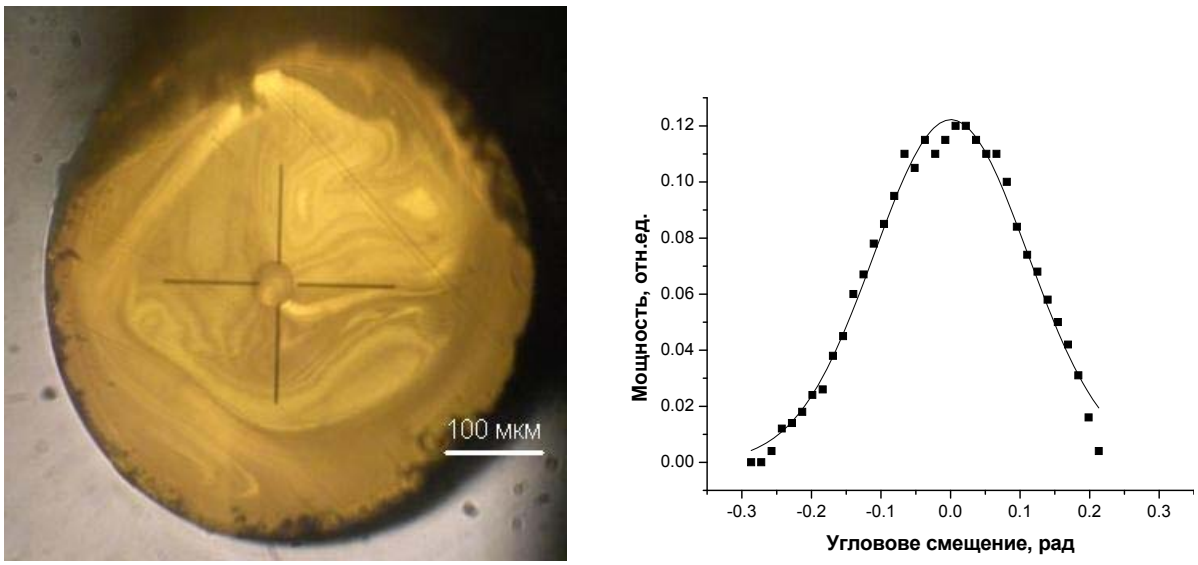

Рис. 2 Фотография торца ступенчатого одномодового волокна и график распределения мощности поля в дальней зоне

Глава 3 Микроструктурированные волокна из галогенидов серебра

В этой главе приведен краткий обзор состояния исследований микроструктурированных световодов из кварцевого стекла, в том числе существующие методы численной оценки характеристик микроструктурированных волокон и возможности дизайна структуры оболочки для получения заданных свойств (увеличенной площади поля моды, бесконечно одномодового режима, повышения нелинейности, двулучепреломления и заданного значения дисперсии).

Микроструктурированное волокно на основе кварцевого стекла содержит воздушные капилляры, которые вносят периодическое изменение показателя преломления. Для кристаллических волокон, получаемых методом экструзии, внедрение воздушных отверстий проблематично, поэтому для модуляции показателя преломления использовались вставки из твердых растворов галогенидов серебра другого состава и с другим показателем преломления. Поскольку показатель преломления кристаллов галогенидов серебра может изменяться в диапазоне 1.98-2.16 для различных составов, то отношение показателей преломления матрицы волокна и вставок в микроструктурированном волокне составляет максимум 1.1 в отличие от отношения показателей

преломления кварц-воздух 1.45. В связи с этим невозможно использовать результаты моделирования микроструктурированного кварцевого волокна с воздушными полостями, приведенными в теоретических работах, а также эмпирические зависимости, полученные в работах других авторов, например метод для моделирования структуры на основе расчета V_{PCF}, приведенного в [5]. Был проведен расчет модового состава микроструктурированных волокон с одним и с двумя кольцами вставок. Все расчеты модового состава для микроструктурированного волокна были выполнены с помощью коммерческого программного обеспечения Femlab 3.1, интегрированного с MatLab. При моделировании FemLab использовался метод конечных элементов (FEM). Анализ мод проводился в плоскости x-y поперчного сечения волокна в приближении гибридных LM волн. Были получены потери на вытекание для фундаментальной и второй моды для различных характеристик структуры микроструктурированных волокон на основе галогенидов серебра (расстояния между вставками Λ, диаметра вставок D, разницы в составах материалов сердцевины и оболочки Δc). Результаты моделирования частично приведены на Рис.3 и Рис.4.

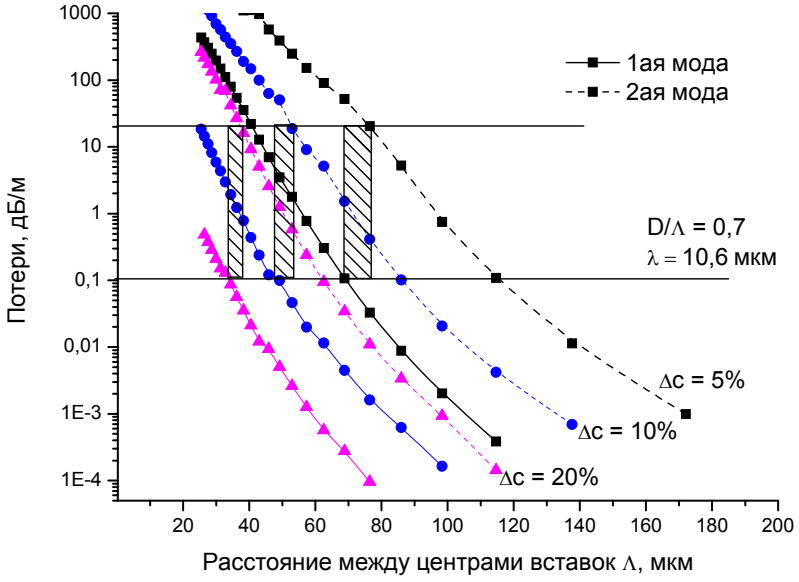

Рис.3 Зависимость потерь на вытекание для мод волокна с двумя кольцами вставок от расстояния между центрами вставок для D/Λ = 0,7

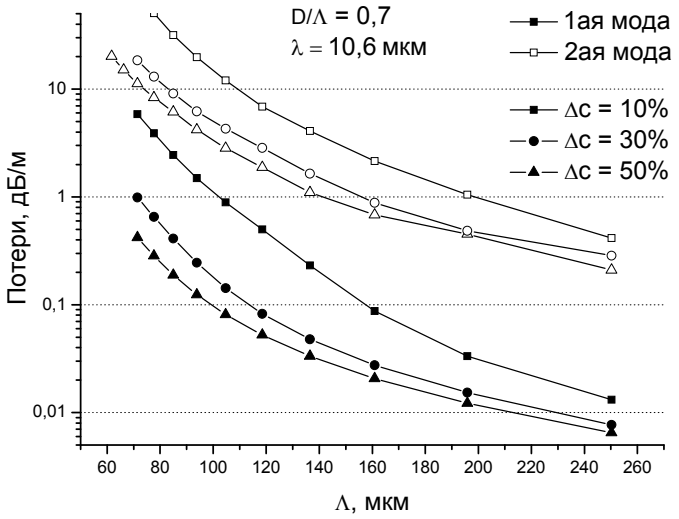

Рис.4 Зависимость потерь на вытекание для мод волокна с одним кольцом вставок от расстояния между центрами вставок для D/ Λ = 0,7

Все расчеты проводились для длины волны 10,6 мкм, но результаты моделирования могут быть масштабированы для других длин волн путем пересчета параметров Λ, D, показателя преломления матрицы волокна n_{matrix} и показателя преломления вставок $n_{ins,}$ таким образом, чтобы сохранялись отношения λ/Λ, D/Λ и n_{matrix}/n_{ins}.

Потери на изгиб рассчитывались по приближенной формуле [6]:

$$\alpha(r) := \frac{8.686}{8\cdot\sqrt{6\cdot\pi}}\cdot\frac{1}{n_{core}}\cdot\frac{\Lambda 1}{A_{eff}}\cdot\frac{\lambda}{\Lambda 1}\cdot F\left[\frac{1}{6\cdot\pi^2}\cdot\frac{1}{(n_{core})^2}\cdot\frac{r}{\Lambda 1}\cdot\left(\frac{\lambda}{\Lambda 1}\right)^2\cdot V^3\right],$$

где

$$F(x) := x^{-0.5}\cdot e^{-x}.$$

Формула является применимой только для фундаментальной моды, и дает заниженные значения потерь на изгибе, как показано в [6], но подходит для оценки свойств структуры волокна.

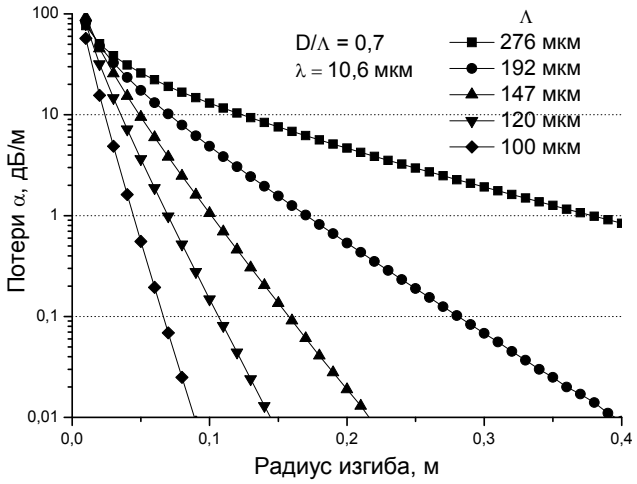

Рис.5 Зависимость потерь при изгибе при разных Λ

Параметры структуры экспериментальных образцов одномодового микрострутктурированного волокна выбирались таким образом, чтобы расчетные потери фундаментальной моды на вытекание составляли менее 0.1-0.5 дБ/м, а потери на вытекание второй моды превышали 20 дБ/м, так как с экспериментальной точки зрения можно считать, что мода не распространяется в волокне, если ее расчетные потери превышают 20 дБ/м, тогда распространение высших мод не наблюдается экспериментально при длине волокна более 1м.

В разделе 3.4 приведены результаты экспериментального измерения характеристик микроструктурированных волокон на основе галогенидов серебра с двумя кольцами вставок. Были получены образцы волокна с параметрами D/Λ=0,7, Λ = 60 мкм и 30% и 5% разницей в концентрации AgCl в материалах вставок и матрицы. Измерения характера распределения мощности излучения в дальней и ближней зонах показывает, что волокна являются фактически одномодовыми для длины волны 10,6 мкм. Оптические потери в образцах составили 2 дБ/м.

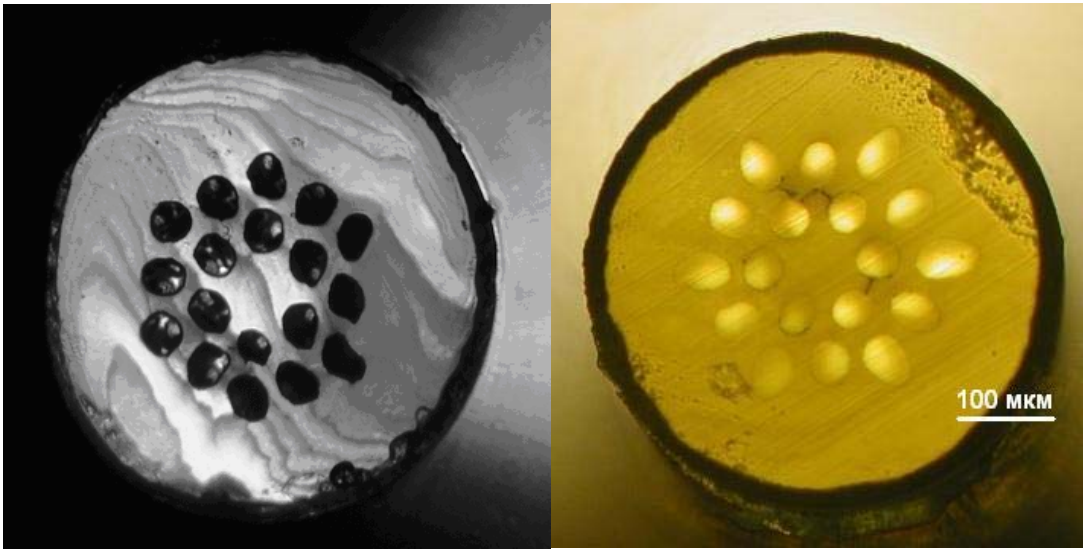

Рис. 6 Фотографии торцов полученных микроструктурированных волокон из кристаллов $AgCl_{0.2}Br_{0.8}$-$AgCl_{0.5}Br_{0.5}$ (слева) и $AgCl_{0.5}Br_{0.5}$-$AgCl_{0.55}Br_{0.45}$ (справа)

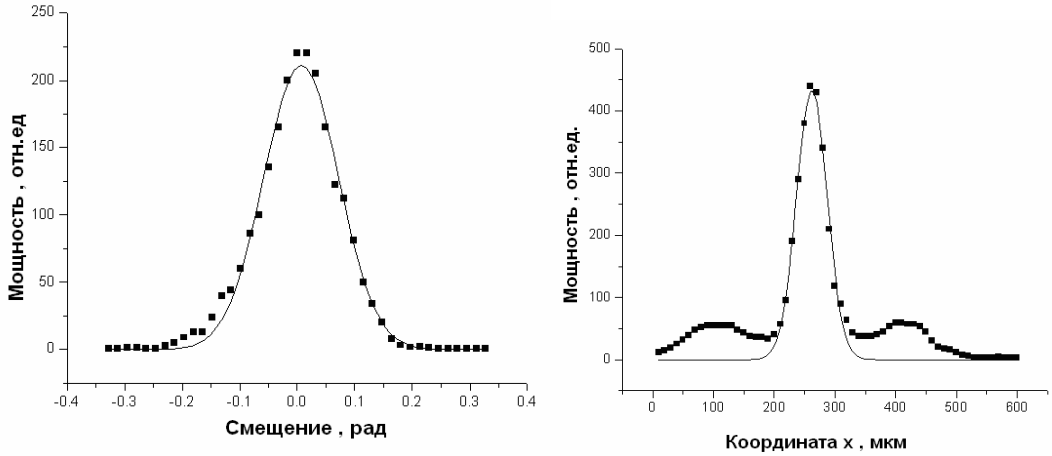

Рис.7 Результаты измерения распределения интенсивности излучения на выходе микроструктурированного волокна в дальней (слева) и ближней (справа) зоне:

■ измеренное значение мощности,

—— аппроксимация Гауссовой кривой

Как видно из графика на Рис.3, волокно с 30% разницей в концентрации AgCl в материалах вставок и матрицы не обладало оптимальной структурой, обеспечивающей высокие потери на вытекание для высших мод, однако демонстрировало одномодовый режим распространения излучения. Это объясняется образованием большого

количества коллоидов серебра во вставках при экструзии волокна, которые со временем диффундировали в сердцевину и вызвали дополнительные потери высших мод, более высокие, чем потери фундаментальной моды.

В разделе 3.5 приведены результаты измерения характеристик микроструктурированных волокон на основе галогенидов серебра с одним кольцом вставок (leakage channel fiber [7]). Были получены образцы волокна с параметрами $D/\Lambda=0{,}65$, $\Lambda = 127$ мкм и 25% разницей в концентрации AgCl в материалах вставок и матрицы (Рис. 8). Измерения характера распределения мощности излучения в дальней (Рис.9) и ближней зонах показывает, что волокна являются фактически одномодовыми для длины волны 10,6 мкм. Оптические потери в образцах составили 8 дБ/м, что вызвано наличием множества микроизгибов, появившихся в процессе измерения. Также приведены экспериментально измеренные потери при изгибе волокна.

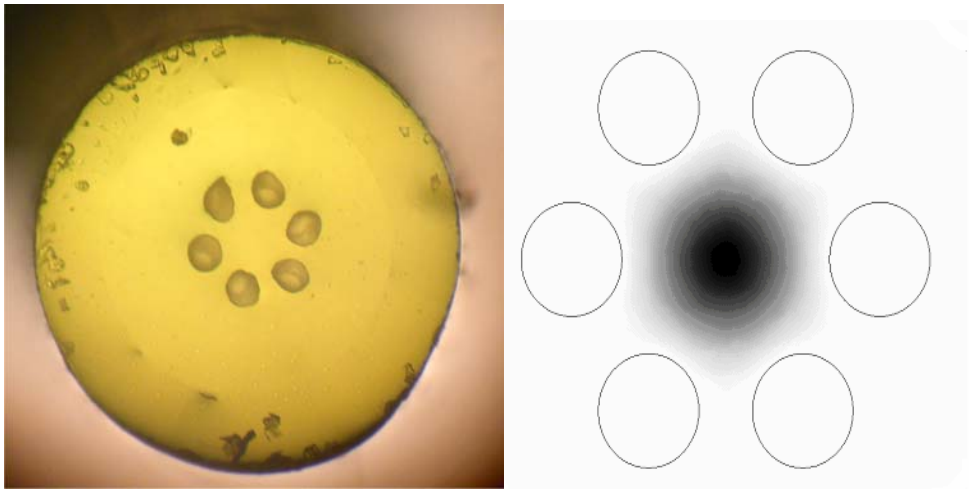

Рис. 8 Фотография торца и рассчитанное распределение мощности в сердцевине микроструктурированного волокна с одним кольцом вставок (состав $AgCl_{0.25}Br_{0.75}$-$AgCl_{0.5}Br_{0.5}$)

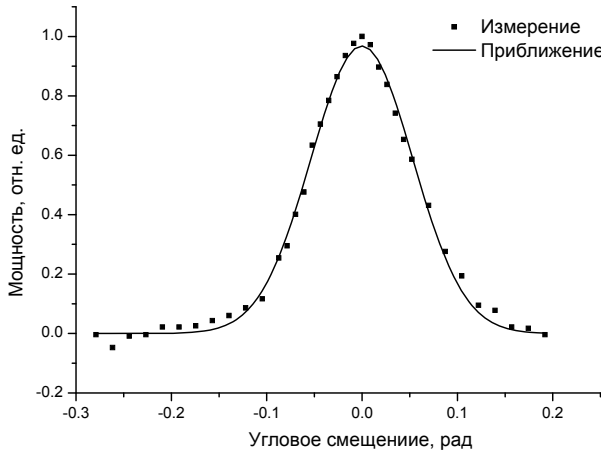

Рис.9 Результаты измерения распределения интенсивности излучения в дальней зоне на выходе микроструктурированного волокна с одним кольцом вставок

В конце Главы 3 приведен анализ применений одномодового волокна (ступенчатого и микроструктурированного).

Основные результаты и выводы

В результате выполнения работы:

1 Впервые были получены одномодовые ступенчатые световоды из галогенидов серебра ($AgCl_{0.5}$ $Br_{0.5}$ – сердцевина, $AgCl_{0.55}$ $Br_{0.45}$ - оболочка) с диаметром сердцевины 40 мкм и числовой апертурой 0,2 с потерями менее 2дБ/м для длины волны 10,6 мкм.

2 Впервые получено микроструктурированное волокно из кристаллов твердых растворов галогенидов серебра $AgCl_{0.5}$ $Br_{0.5}$ с двумя кольцами вставок с пониженным показателем преломления из $AgCl_{0.55}$ $Br_{0.45}$, расположенных в гексагональном порядке, которое является одномодовым с потерями 2 дБ/м на 10,6 мкм. Впервые получено и экспериментально исследовано микроструктурированное волокно из кристаллов твердых растворов галогенидов серебра $AgCl_{0.25}$ $Br_{0.75}$ с одним кольцом вставок с пониженным показателем преломления $AgCl_{0.5}$ $Br_{0.5}$,

расположенных в гексагональном порядке, которое является одномодовым с площадью поля моды более 14 000 мкм^2 (диаметр сердцевины 170 мкм) при длине волны λ = 10,6 мкм.

3 Были численно промоделированы характеристики распространения излучения в микростуруктурированных волокнах на основе галогенидов серебра с различными параметрами структуры и определены зависимости теоретических потерь первой и высших мод от параметров структуры волокна (расстояния между вставками Λ, диаметра вставок D, разницы в составах материалов сердцевины и оболочки Δc).

4 Создана экспериментальная установка для измерения характеристик режима распространения излучения CO_2 лазера одномодовых кристаллических волокнах, в том числе распределения интенсивности излучения в ближней и дальней зонах, измерения потерь и индуцированных потерь при изгибе микроструктурированного волокна.

5 Установлено, что кристаллические микроструктурированные волокна более применимы для передачи лазерной мощности в среднем инфракрасном диапазоне, чем ступенчатые.

Список работ:

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1 «Одномодовые кристаллические волоконные световоды для длины волны λ = 10.6 мкм» Л.Н. Бутвина, О.В. Середа, Е.М. Дианов, Н.В. Личкова, В.Н. Загороднев, В.Р. Сороченко, Квантовая Электроника, 37, 383 (2007)

2 «Одномодовый микроструктурированный световод для среднего инфракрасного диапазона» Л.Н. Бутвина, О.В. Середа,

Е.М. Дианов, Н.В. Личкова, В.Н. Загороднев Квантовая Электроника, 37, 385 (2007)

3 "Single-mode microstructured optical fiber for the middle infrared" L. N. Butvina, O. V. Sereda, E. M. Dianov, N. V. Lichkova, and V. N. Zagorodnev, Opt. Lett. 32, 334-336 (2007)

4 «Singlemode step-index and microstructured fibers for the middle infrared» L. N. Butvina; O. V. Sereda; E.M. Dianov; N.V. Lichkova; V.N. Zagorodnev SPIE Proceedings Vol. 6542 “Infrared Technology and Applications XXXIII”ed.by B.F. Andresen; G.F. Fulop; P.R. Norton, 2007

5 “Single-mode photonic crystal fiber for the middle infrared“ L.N. Butvina; O.V. Sereda; E.M. Dianov; N.l V. Lichkova; V.N. Zagorodnev SPIE Proceedings Vol. 6572 “Enabling Photonics Technologies for Defense, Security, and Aerospace Applications III”ed. by M.J. Hayduk; A.R. Pirich; P. J. Delfyett, Jr.; E. J. Donkor; J. P. Barrios; R. J. Bussjager; M. L. Fanto; R.L. Kaminski; G. Li; H.Mohseni; E.W. Taylor, 2007

6 "Singlemode Crystalline Fibers for the Middle Infrared", L.N. Butvina, O.V. Sereda, A.G. Okhrimchuk, A.L. Butvina, E.M. Dianov, N.V. Lichkova, and V. N. Zagorodnev, in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2008).

Список литературы

1 S. Shalem, A. Tsun, E. Rave, A. Millo, L. Nagli, A. Katzir, “Silver halide single-mode fibers for the middle infrared”, Applied Phys. Lett. 87, 091103, 2005

2 O. Wallner, V. G. Artjuschenko, and R. Flatscher, "Development of silver-halide single-mode fibers for modal filtering in the mid-

infrared," in New Frontiers for Stellar Interferometry, W. A. Traub, ed., Proc. SPIE 5491, 636-646, 2004

3 E. Rave, P. Ephrat, M. Goldberg, E. Kedmi, A. Katzir , “Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared” , Appl. Opt., 43, 2236-2241 (2004)

4 Бутвина Л.Н, Войцеховский В.В, Дианов Е.М, Прохоров А.М. Механизм объемного рассеяния в поликристаллических материалах и световодах среднего ИК-диапазона. Препринт ИОФ АН №63, 1987.

5 M. D. Nielsen, N. A. Mortensen. «Photonic crystal fiber design based on the V–parameter»Opt. Express , Vol. 11, No. 21, 2762, 2003

6 M. D. Nielsen, N. A. Mortensen and al. “Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers”, Opt. Express, Vol. 12, No. 8, 1775 (2004)

7 L. Dong, X. Peng, and J. Li, “Leakage channel optical fibers with large effective area,” J. Opt. Soc. Am. B 24, 1689-1697 (2006).