

**Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»**

на правах рукописи

Колядин Антон Николаевич

**ПОЛЫЕ РЕВОЛЬВЕРНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С
РАЗДЕЛЬНЫМИ КАПИЛЛЯРАМИ В ОТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ
И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Косолапов Алексей Фёдорович

– кандидат физико-математических наук

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ

Буфетов Игорь Алексеевич

– член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Романова Елена Анатольевна

– доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Леонов Станислав Олегович

– кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и электротметрии СО РАН

Защита состоится 05 апреля 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д.38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н.

Т.Б. Воляк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности

Развитие волоконной оптики неразрывно связано с повышением интенсивности передаваемого по световодам лазерного излучения. Этот рост явным образом ограничивают нелинейные эффекты в используемых для световодов стёклах. Единственной средой с минимально возможной нелинейностью является газ или, что лучше, вакуум. Однако использовать данное преимущество в волоконной оптике стало возможным только с появлением полых микроструктурированных световодов из кварцевого стекла. В таких световодах доля излучения, распространяющаяся по стеклу, составляет менее 0,01%, что не только делает полые световоды новой перспективной средой для передачи излучения высокой интенсивности, но и позволяет передавать излучение даже в тех оптических диапазонах, где само кварцевое стекло обладает высокими (более 10дБ/м) оптическими потерями. С другой стороны, если сердцевину полого световода заполнить газом, то это позволяет реализовывать ВКР-генерацию в газе с эффективностями, недоступными ранее. В задачах, связанных с передачей излучения высокой интенсивности или ультракоротких лазерных импульсов, световоды с полостью сердцевиной (СПС) также обладают рядом преимуществ по сравнению с полностью стеклянными световодами (ПСС). Это определяется тем, что нелинейные эффекты (напр., вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, ВКР, четырехволновое смешение) в СПС проявляются при существенно бóльших интенсивностях лазерного излучения.

На момент начала выполнения данной работы исследователями были уже предложены и реализованы различные типы СПС из кварцевого стекла (предполагается, что на используемых участках их поперечное сечение неизменно по длине): СПС в виде простых капилляров, фотонно-кристаллические световоды (световоды с многослойной периодической микроструктурированной оболочкой), а также так называемые антирезонансные световоды, которым посвящена данная работа. В поперечном сечении антирезонансных световодов полую сердцевину окружает более простая по сравнению с фотонно-кристаллическими световодами оболочка, элементы которой преимущественно состоят из стеклянных перепонки одинаковой толщины.

Свет в световодах данного типа удерживается в полой сердцевине за счёт отражения от двух границ раздела воздух–стекло (к примеру, от стенки капилляров на Рис. 1). Фактически, стенки представляют собой интерферометр Фабри–Перо, который имеет высокую пропускную способность, когда выполняется условие резонанса, возникающее, если в стенке укладывается целое число полуволн. При этом происходит эффективное вытекание света из полой сердцевины световода, а в диапазонах длин волн, удовлетворяющих этому условию, формируются области высоких потерь. В диапазонах длин волн между резонансными значениями свет эффективно отражается от оболочки, и в этих диапазонах формируются полосы пропускания световода. Полые световоды данного типа получили в литературе название «антирезонансные» (*antiresonant reflecting optical waveguides, ARROW*). Фотографии, сделанные при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), двух СПС, работающих по данному принципу и относящихся к так называемым револьверным световодам, представлена на Рис. 1.

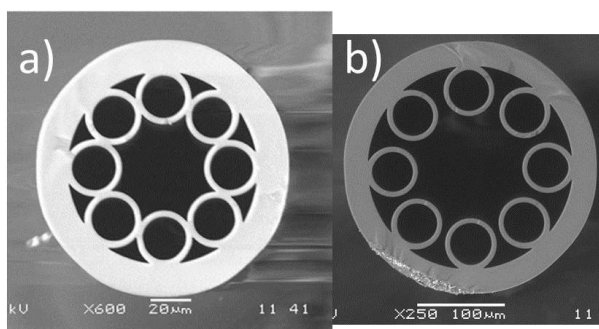


Рис. 1. СЭМ-фотографии торцов полых револьверных световодов (а) с соприкасающимися капиллярами и (б) с несоприкасающимися капиллярами в отражающей оболочке.

Несмотря на ряд преимуществ СПС, оптические потери в них остаются выше, чем в ПСС, что вносит существенные ограничения в их применении. Но в происходящем в настоящее время процессе совершенствования конструкции световодов и технологии их изготовления минимальный уровень потерь в СПС уже приближается к минимальным потерям в стандартных коммуникационных световодах. Отметим, что на сегодняшний день не существует единого мнения о предельно достижимом минимальном уровне оптических потерь в СПС. Именно поэтому усилия ряда

исследователей по всему миру направлены на снижение потерь в таких световодах.

Геометрические параметры структуры световода оказывают существенное влияние на его оптические свойства и, в частности, на потери. К примеру, добавление отрицательной кривизны границы сердцевина–оболочка (как в случае с капиллярами в оболочке) приводит к снижению оптических потерь в световоде более чем на порядок. На момент начала выполнения работы в Научном центре волоконной оптики РАН уже были предложены и реализованы полые световоды, оболочка которых состояла из одного ряда соприкасающихся капилляров (см. Рис. 1(a)), которые впоследствии получили название «револьверные световоды» (РС) из-за внешнего сходства торца световода с барабаном револьвера.

РС являются перспективной средой для задач, связанных с передачей ультракоротких лазерных импульсов. Для понимания временных искажений, происходящих с лазерным импульсом в процессе его распространения по полому световоду, нужно знать его дисперсию (дисперсионный параметр D_2 основной моды полой сердцевины). Однако на момент начала выполнения работы экспериментальные данные о дисперсионных характеристиках подобных световодов в литературе отсутствовали.

Также при передаче лазерного излучения высокой интенсивности может возникать ряд нежелательных явлений, приводящих к повреждению как торца, так и целых участков волокна. Ещё в 1988 году было обнаружено такое явление, как распространение оптического разряда (ОР) по ПСС. Световоды, после прохождения по ним ОР, становятся непригодны для передачи излучения. Данные явления наблюдались в ПСС при интенсивностях излучения порядка 10^6 Вт/см² и выше. СПС, как уже было отмечено, более перспективны для передачи излучения высокой интенсивности, чем ПСС. В частности, в ряде опубликованных работ по СПС передавалось излучение с интенсивностью порядка 10^{15} Вт/см² без деградации световодов. При этом, несмотря на то что полые световоды активно исследуются уже более 20 лет, отсутствуют работы, в которых бы исследовалось распространение по ним ОР.

Возможность скручивать световоды с определённым радиусом кривизны в волоконных лазерных устройствах обеспечивает компактность таких

устройств, что является их преимуществом в сравнении с аналогами на объемных оптических элементах. Поэтому немаловажным для применения световодов является определение их изгибных потерь. В ряде работ исследовались изгибные потери СПС, но такое явление, возникающее при изгибе, как резонансная связь мод сердцевины с модами оболочки, рассматривалось исключительно теоретически.

Таким образом, актуальность данной работы определяется необходимостью снижения в РС оптических потерь, экспериментального определения их оптических характеристик (потери, изгибные потери, дисперсия) и исследования распространения по ним ОР. Стоит отметить, что поскольку физический механизм распространения света по полым световодам отличается от механизма распространения света в ПСС, то и оптические характеристики и способы их измерения приобретают в полых световодах некоторую специфику.

Исходя из сказанного выше, были определены следующие **цели работы**:

- Модификация структуры полого револьверного световода для снижения оптических потерь в ближнем и среднем ИК-диапазоне.
- Получение световода с модифицированной структурой и исследование его оптических характеристик (потери, изгибные потери, дисперсия).
- Наблюдение и исследование процесса разрушения полых световодов под действием распространяющегося по ним лазерного излучения высокой интенсивности.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Численное моделирование оптических свойств структуры полого световода для различных модификаций его оболочки. Расчет оптических потерь и реальной части эффективного показателя преломления для различных мод сердцевины.

2. Создание лабораторных установок для измерения оптических характеристик полученных световодов.

3. Определение оптических свойств световодов с заданной структурой. Измерение потерь, изгибных потерь и дисперсии.

4. Определение физических параметров ОР в полом РС. Построение физической модели распространения ОР по полым РС.

Научная новизна

1. Впервые предложена и исследована численно и экспериментально новая структура полого револьверного световода.
2. Впервые в данных световодах экспериментально исследованы дисперсионные характеристики.
3. Впервые в полых световодах резонансная связь мод сердцевины с модами оболочки продемонстрирована экспериментально.
4. Впервые в полых световодах исследовано распространение оптического разряда.

Практическая значимость работы

1. Впервые получена возможность передавать по световодам и генерировать в них излучение высокой интенсивности в среднем ИК-диапазоне. Показано, что полые револьверные световоды из кварцевого стекла способны передавать излучение в среднем ИК-диапазоне, несмотря на то, что само кварцевое стекло обладает в этом диапазоне большими (более 10дБ/м) оптическими потерями. Потери в таком световоде при этом минимум на три порядка ниже, чем в кварцевом стекле.
2. Предложенная структура револьверного световода с разделёнными капиллярами в оболочке послужила прототипом для создания световодов с аналогичной структурой во всех ведущих лабораториях мира, исследующих световоды с полый сердцевиной.
3. Низкая дисперсия групповых скоростей полых револьверных световодов позволяет использовать их для передачи ультракоротких лазерных импульсов высокой интенсивности.
4. Результаты проведённого исследования распространения оптического разряда по полым револьверным световодам позволяют создавать «предохранители» в оптических линиях из полых световодов, препятствующие дальнейшему распространению по ним оптического разряда.

Положения, выносимые на защиту

1. Замена отражающей оболочки револьверного световода, состоящей из одного слоя соприкасающихся капилляров, на отражающую

оболочку из одного слоя разделённых капилляров позволяет получить световедущую структуру, которая при прочих равных условиях обладает более низкими оптическими потерями, чем револьверный световод с соприкасающимися капиллярами.

2. Экспериментальные и теоретические значения дисперсионного параметра D_λ в полосах пропускания револьверного световода с разделёнными капиллярами в оболочке и с диаметром сердцевины более 20 мкм лежат в диапазоне от -10 до $+10$ пс/(нм·км).

3. При изгибе револьверного световода реализуется резонансная связь мод сердцевины с модами капилляров, формирующих отражающую оболочку.

4. В световодах с полый сердцевиной возможно инициирование и дальнейшее квазинепрерывное распространение оптического разряда под действием импульсно-периодического лазерного излучения.

Личный вклад диссертанта

Все результаты получены при выполнении исследований в Научном центре волоконной оптики с 2012 года по настоящее время лично автором или совместно с рядом сотрудников центра, а именно:

Вторая глава – идея создания нового типа револьверного световода, все экспериментальные результаты и результаты численного моделирования получены лично автором. **Третья** глава – все экспериментальные результаты, а также численное моделирование дисперсии реального световода (Рис. 34 (b) диссертации) получены лично автором (опубликовано в статьях [2] и [3] из списка публикаций). Следует отметить, что все остальные результаты численного моделирования свойств полых световодов, представленные в работах [2] и [3], получены Алагашевым Г.К. и Прямикомым А.Д. **Четвёртая** глава – все результаты по распространению оптического разряда получены лично автором или при его определяющем участии.

Разработка технологии изготовления и само изготовление всех полых световодов, использованных в данной работе, осуществлены Косолаповым А.Ф.

Для получения результатов работы были использованы различные **методы исследований**. Геометрические параметры поперечных сколов световодов были определены при помощи сканирующего электронного микроскопа. Для экспериментального определения оптических потерь световода применялся метод «cut-back». Экспериментальные измерения дисперсионного параметра D_λ проводились при помощи интерферометра Маха–Цендера. Оценка температуры оптического разряда получена при помощи пирометрического метода, основанного на измерении отношения спектральных плотностей сигнала на двух длинах волн. Для численного расчёта таких характеристик световодов как оптические потери, дисперсионный параметр D_λ , распределения поля моды сердцевинны использовались расчёты методом конечных элементов в программной среде Comsol multiphysics.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается использованием комплекса современных экспериментальных методов исследования, сравнением экспериментально полученных результатов с результатами численного моделирования, анализом литературных данных, а также результатами последующих исследований других научных групп.

Апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях и научных школах: XI, XII, XIII Международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (г. Саранск, 2012, 2013 и 2014 года соответственно); Научная сессия НИЯУ МИФИ II, III, IV, V, VI, VII, VIII и IX, Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике (г. Москва, 2013-2020 гг соответственно); ICONO/LAT (Moscow, 2013); Advanced Photonics Congress (Barcelona, 2014); Laser Congress (ASSL, LAC, LS&C) (Vienna, 2019); CLEO/Europe-EQEC (Munich, 2019); 8-й Российский семинар по волоконным лазерам (г. Новосибирск, 2018); Всероссийская конференция по волоконной оптике (г. Пермь, 2019), а также на семинарах НЦВО.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 5 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и в трудах российских и зарубежных конференций.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации составляет 122 страницы текста, включая 60 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 203 наименований. В конце каждой главы представлены основные полученные в ней результаты.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, изложена научная новизна и практическая значимость работы. Приведена структура диссертации. **В первой главе** приводится обзор результатов по теме исследования: описана история появления и исследований полых световодов, приводится описание различных типов полых световодов, известных на сегодняшний день, а также описание полых световодов из различных материалов, приведены результаты по минимальным достигнутым на сегодняшний день оптическим потерям, коротко перечисляются различные применения полых световодов и некоторые нерешённые проблемы, описаны физические принципы волноводного механизма в полых револьверных световодах, приведены различные варианты моделирования оптических свойств РС – аналитический и численный.

Во второй главе диссертации предложено усовершенствование конструкции револьверного волоконного световода, а именно предложена оболочка световода, состоящая из несоприкасающихся капилляров. Выполнено численное моделирование свойств такой конструкции, которое показало возможность снижения оптических потерь по сравнению с револьверным световодом с соприкасающимися капиллярами в оболочке (Рис. 2).

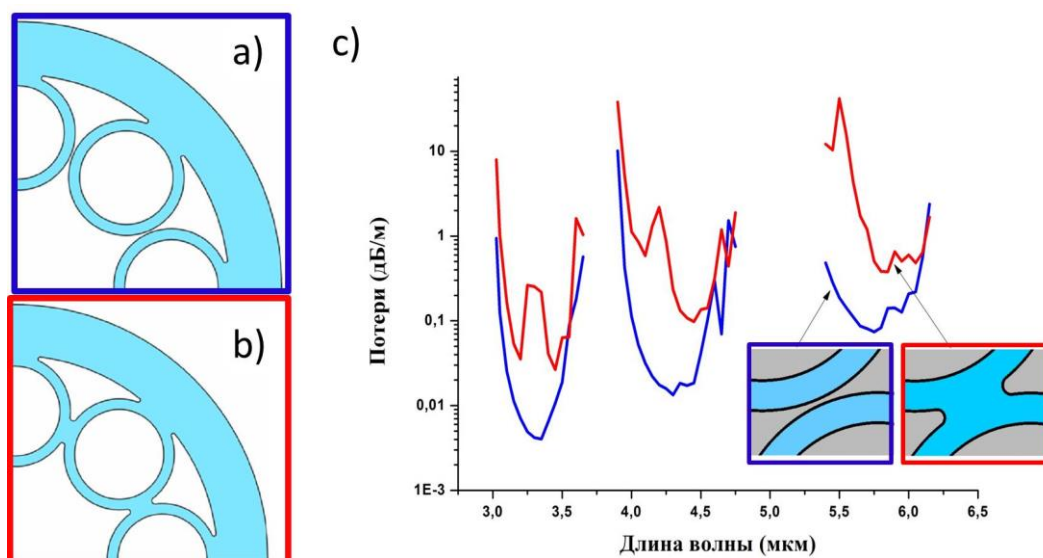


Рис. 2. Изображения поперечного сечения анализируемых (а) РС с несоприкасающимися капиллярами и (б) РС с соприкасающимися капиллярами в оболочке; диаметр сердцевины 100 мкм. (с) Расчётные потери основной моды для световодов с соприкасающимися и несоприкасающимися капиллярами. На вставках показана область между капиллярами оболочки соответствующих световодов [1].

Описан впервые созданный револьверный волоконный световод с поллой сердцевиной с одним слоем несоприкасающихся капилляров в отражающей оболочке (см. Рис. 1 (b)). Приведены экспериментальные данные по распространению электромагнитного излучения световодом такого типа в среднем ИК-диапазоне вплоть до длины волны 8 мкм. Оптические потери в световоде составляли при этом величины по меньшей мере на три порядка ниже, чем оптические потери самого кварцевого стекла (Рис. 3). Приведены данные по измеренным потерям в этом световоде. Потери измерены в широком спектральном диапазоне вплоть до 8 мкм. Расхождение между оптическими потерями, измеренными экспериментально, и потерями, полученными при помощи численного моделирования для основной моды, объясняется тем, что измерения проводились на коротких длинах световода и, следовательно, в многомодовом режиме. Данное утверждение подтверждается измерениями потерь на большей (11 м) длине световода при помощи маломодового лазерного источника (см. Рис. 3, красная звезда).

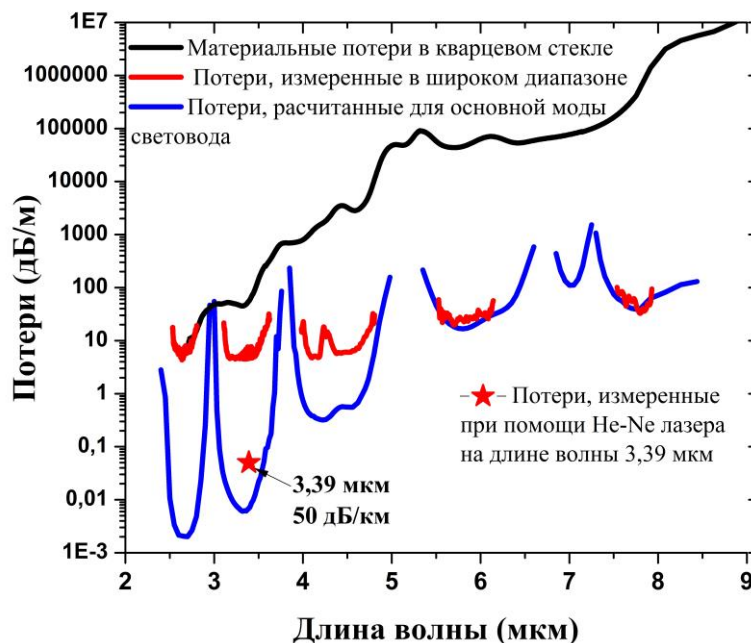


Рис. 3. Потери в световоде, измеренные в широком спектральном диапазоне (красная линия); потери, измеренные с помощью He-Ne лазера на длине волны 3,39 мкм (красная звезда); материальные потери в кварцевом стекле (синяя линия); рассчитанные потери для основной моды (зелёная линия) [1].

Также приведены данные по изменению модового состава по длине световода (Рис. 4). Представлены результаты измерений потерь с использованием маломодового He-Ne лазера с длиной волны 3,39 мкм. Потери были измерены методом “cut-back” при длине световода от 11 до 1 м. Зависимость интенсивности излучения на выходе световода от его длины показана на Рис. 4. Распределения интенсивности в ближнем поле на выходе световода при различной его длине показаны на вставках Рис. 4. Существуют два различных участка световода, которые хорошо видны на Рис. 4. Первый участок световода 0–2 м: в этом диапазоне осуществляется многомодовый режим распространения света со сравнительно быстрым уменьшением сигнала, которое может быть описано экспонентой со сравнительно большим показателем. Второй участок световода 3 м и более: сигнал уменьшается медленнее, но и в этом диапазоне сигнал уменьшается экспоненциально, что соответствует более низкому уровню потерь. По зависимости уменьшения мощности лазера вдоль световода (см. Рис. 4), можно сделать вывод, что модовая структура световода стабилизируется на длине более 3 м, и в световоде осуществляется режим распространения света, близкий к одномодовому. Часть зависимости сигнала от 3 до 11 м

аппроксимирована экспоненциальной функцией. Значение оптических потерь, оцененных по этой функции на длине волны 3,39 мкм, составило 50 ± 8 дБ/км (см. Рис. 3 (красная звезда)). Этот результат существенно ниже, чем полученный при возбуждении тепловым источником излучения, и значительно ближе к расчетному значению потерь основной моды.

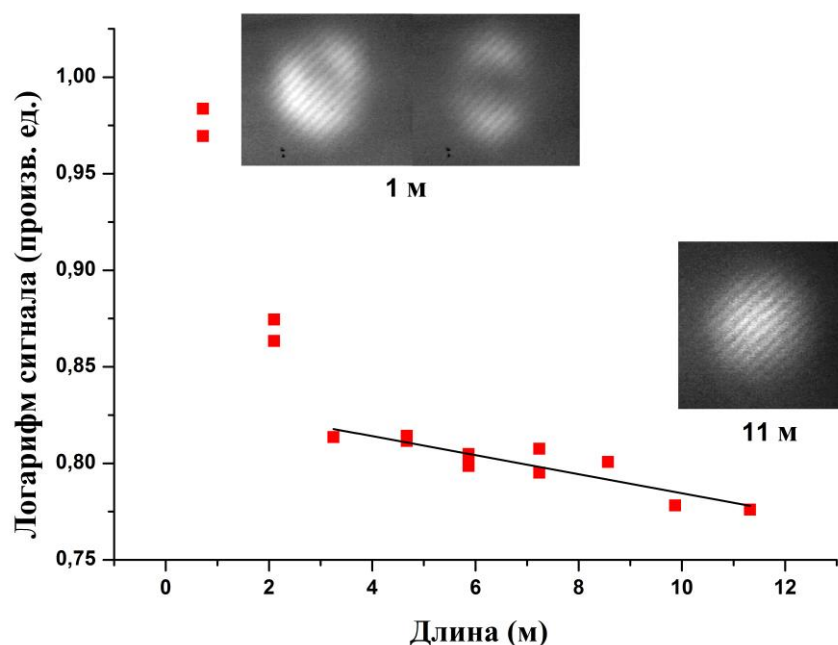


Рис. 4. Зависимость логарифма интенсивности излучения He-Ne лазера (3,39 мкм) на выходе световода от длины световода. Прямая линия – аппроксимация экспоненциальной зависимости. На вставках показано распределение интенсивности излучения в ближнем поле на выходе световода длиной 1 и 11 м [1].

Полученные данные демонстрируют особенности, которые надо учитывать при измерении потерь в полых световодах (по сравнению с измерениями в одномодовых ПСС).

В третьей главе приведены результаты экспериментов по определению дисперсионного параметра D_λ револьверных световодов, а также по определению их изгибных потерь. В частности, впервые экспериментально продемонстрирована резонансная связь мод сердцевины с модами оболочки.

Проведено экспериментальное измерение дисперсионного параметра D_λ (1) в реальном револьверном световоде с несоприкасающимися капиллярами в оболочке (Рис. 5 (а)):

$$D_\lambda = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \right) \quad (1)$$

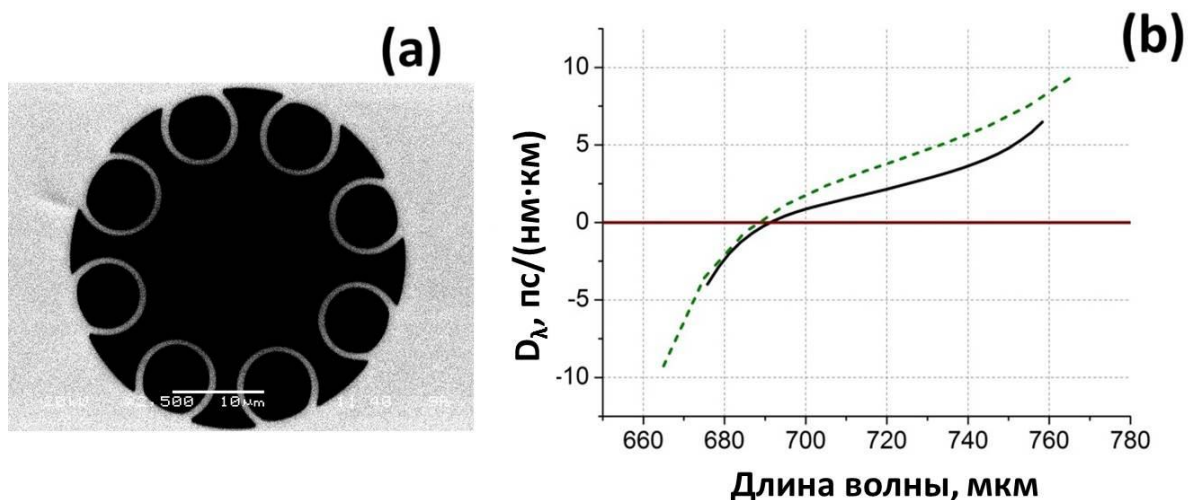


Рис. 5. (а) СЭМ-фотография торца световода, использованного в эксперименте; (б) измеренный (сплошная чёрная линия) и рассчитанный (пунктирная зелёная линия) спектры дисперсионного параметра D_λ револьверного световода [2].

Рассчитанная и измеренная зависимости дисперсионного параметра D_λ представлены на Рис. 5 (b) (пунктирная зеленая и сплошная черная линии, соответственно). И расчетные, и экспериментальные данные показывают, что в каждой зоне прозрачности РС есть точка с нулевым значением D_λ . Величины параметра D_λ РС малы и значительно меньше параметров D_λ фотонно-кристаллических световодов. Следует отметить, что, как видно на Рис. 5 (b), расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии. Небольшие отклонения, по нашему мнению, вызваны различием в геометрии между моделью, используемой для расчётов, и реальным световодом.

Приведены данные экспериментального исследования зависимости оптических потерь РС от радиуса изгиба и впервые продемонстрировано последовательное возбуждение мод капилляров при изгибе. Эффект наблюдался в полном световоде, поперечное сечение которого представлено на Рис. 6 (b).

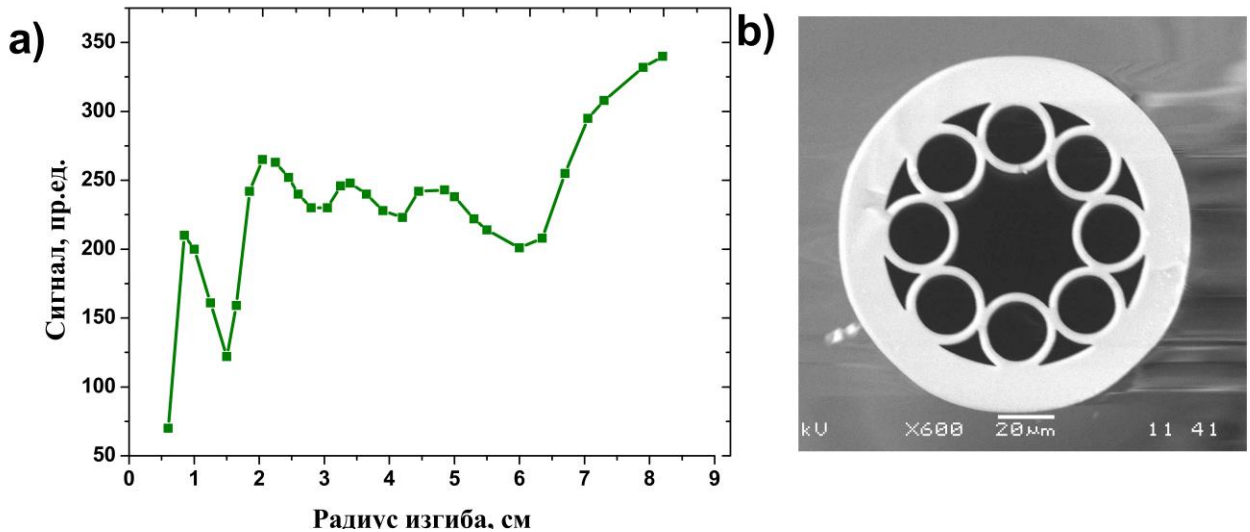


Рис. 6. (а) Зависимость интенсивности пропускаемого излучения от радиуса изгиба РС на длине волны 1,06 мкм; (б) СЭМ-фотография торца световода, использованного в эксперименте [3].

Как видно на Рис. 6, зависимость прошедшего сигнала от диаметра изгиба РС носит немонотонный характер (зависимость получена при использовании в качестве источника излучения одномодового неодимового лазера на длине волны 1,06 мкм). На графике Рис. 6 (а) наблюдается ряд минимумов и максимумов. Данный эффект вызван резонансной связью мод сердцевинны с модами капилляров при совпадении их постоянных распространения. Также данная связь обнаружена экспериментально при наблюдении излучения в ближнем поле при помощи ПЗС-камеры. При этом полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами расчётов (Рис.7).

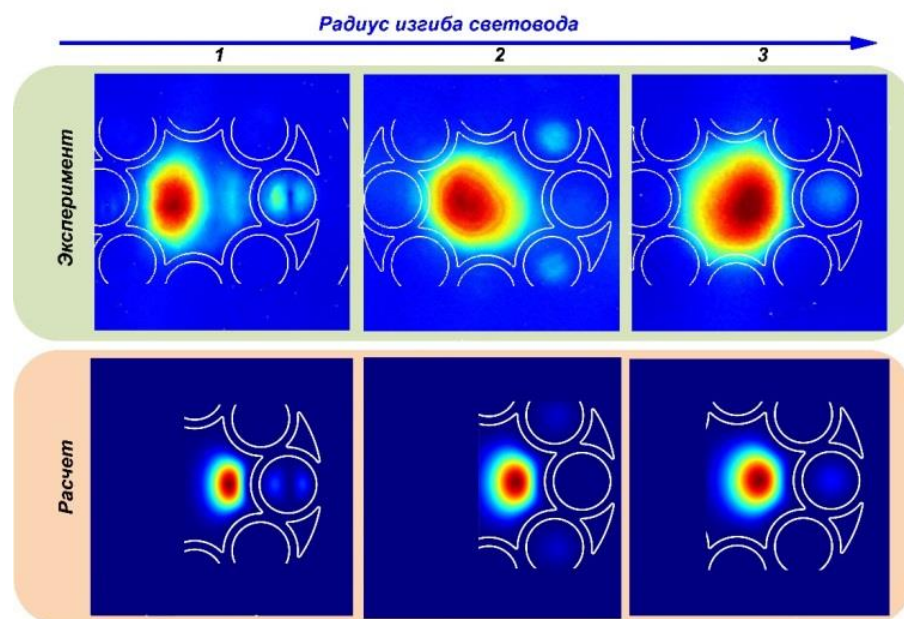


Рис.7. Измеренные экспериментально (вверху) и рассчитанные численно (внизу) распределения интенсивности излучения в ближнем поле на выходе изогнутого РС, соответствующие первым трём резонансным связям основной моды полой сердцевины с модами капилляров оболочки. Расчётное распределение поля для радиусов изгиба 1,6, 3,6 и 5,6 см представлены на кадрах 1, 2 и 3, соответственно. Длина волны излучения 1,06 мкм. Ось изгиба находится слева. Масштаб: ширина каждого кадра 93 мкм; на каждом кадре указано положение основных элементов конструкции РС [3].

На Рис. 7 показаны распределения в ближнем поле моды воздушной сердцевины, полученные экспериментально и рассчитанные численно. Эти распределения в ближнем поле соответствуют первым трем резонансам, возникающим при изгибе. Мода HE_{11} возбуждается в капилляре, лежащем в плоскости изгиба при радиусе изгиба около 6 см (на Рис.7: вверху – распределение излучения, измеренное экспериментально, внизу – результат численного моделирования).

В четвёртой главе приведены результаты исследования процесса разрушения полого волоконного световода, изготовленного из кварцевого стекла, с сердцевиной, заполненной лабораторным воздухом при атмосферном давлении, под действием импульсно-периодического лазерного излучения высокой интенсивности после инициирования оптического разряда в полой сердцевины. Продемонстрированы временные характеристики свечения плазмы оптического разряда (ОР).

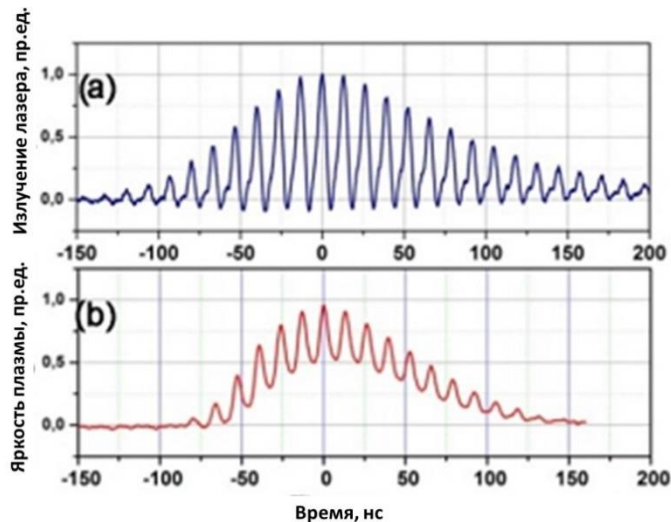


Рис. 8. (а) Осциллограмма пакета импульсов Nd:YAG лазера. Пакет состоит 100-нс импульсов, следующих с периодом 13 нс. Длительность 100-нс импульсов здесь завышена из-за частотных ограничений приёмника. (б) Осциллограмма видимого излучения плазмы ОР, распространяющегося под действием лазерного излучения. Лазерное излучение отфильтровано [4].

Сравнение осциллограмм лазерного излучения и собственного свечения плазмы в видимом диапазоне на Рис. 8 (а) и (б) показывает, что плазма ОР в интервалах между 100-пс импульсами (ПИ) не гаснет, а количество лазерных ПИ, поддерживающих распространение ОР, существенно меньше количества импульсов в наносекундной последовательности пикосекундных импульсов (НППИ). ОР поддерживается только ПИ с достаточно высокой амплитудой. ПИ проявляют себя как пики свечения плазмы ОР, но форма временной зависимости излучения ОР (см. Рис. 8 (б)) также имеет непрерывную (в наносекундном масштабе времени) составляющую. Следовательно, постоянная времени релаксации плазмы ОР превышает 13 нс (интервал времени между ПИ). Однако между НППИ свечение плазмы не наблюдается. Каждая новая НППИ инициирует плазму ОР в сердцевине световода. Сравнение осциллограмм показывает, что инициирование ОР происходит, когда интенсивность лазерного излучения составляет примерно 20% от максимальной.

Определён средний период оставленных после прохождения ОР последовательных разрушений, по которому определено расстояние, проходимое ОР за 13 нс (один период пс импульсов) и за 830 мкс (один период следования пакета нс импульсов). Определены средние (за 1 с и за 13

нс импульса) скорости распространения ОР (1 м/с и 13 км/с соответственно). Также впервые продемонстрирован факт зависимости средней (за 1 с) скорости от вещества, окружающего стеклянную оболочку световода (Рис. 9).

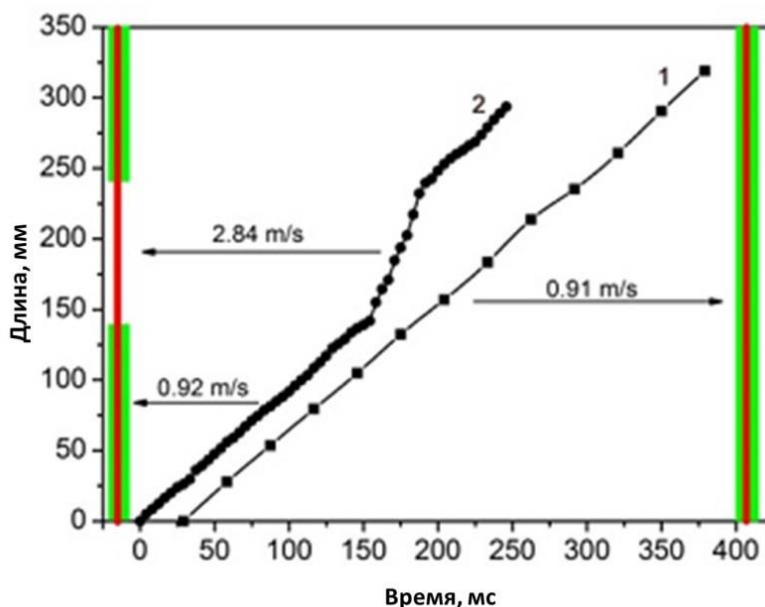


Рис. 9. Зависимость пройденного расстояния от времени для ОР, распространяющегося по РС покрытому полимером (1) и по РС, с которого полимер был частично снят (2). Справа и слева схематично изображены световоды полностью покрытый полимером и частично зачищенный, соответственно. Над стрелками подписаны измеренные скорости V_{AV} для разных участков световода. В обоих экспериментах мощность лазерного излучения на выходе световода $P_{AV} = 2$ Вт. (См. [4]).

Средняя скорость распространения ОР была измерена в соответствии с видеоданными камеры. Оказалось, что средняя скорость V_{AV} ОР в наших экспериментах существенно зависит от того, был ли РС покрыт полимером или нет. Если РС был полностью покрыт полимерным покрытием, то зависимость пути ОР от времени соответствовала движению с приблизительно постоянной средней скоростью (см. Рис. 9, линия 1), и в этом случае $V_{AV} = 0,91$ м/с. Однако если полимерное покрытие было частично удалено, наружная стеклянная поверхность световода непосредственно граничила с воздухом, то ОР распространялся по этому зачищенному сегменту РС со значительно большей V_{AV} . Зависимость пути ОР от времени $L(t)$ имела в этом случае форму ломаной линии (см. Рис. 9,

линия 2). Различные участки этой линии соответствуют разным скоростям ОР: $V_{AV} = 0,91$ м/с для областей с полимерным покрытием и $V_{AV} = 2,84$ м/с для областей без покрытия.

В результате проведённых исследований предложена физическая модель распространения ОР: в момент инициации ОР лазерное излучение, попадающее на металлическую пластину, прислонённую к выходному торцу световода, создаёт на её поверхности плазму. Плазма, расширяясь, попадает в том числе в сердцевину полого световода где, поддерживаемая лазерным излучением, инициирует распространение ОР в полой сердцевине световода. Во время ПИ детонационная волна, поддерживаемая лазером, движется в газе вдоль полой сердцевины волокна. После окончания ПИ, светодетонационная волна становится обычной затухающей ударной волной и продолжает двигаться вдоль волокна, но когда приходит следующий ПИ, ее амплитуда еще достаточно высока, чтобы на ее фронте возникла новая светодетонационная волна, поддерживаемая лазерным импульсом. В конце НППИ плазма ОР больше не поддерживается лазерным излучением и гаснет. Под действием следующей НППИ образование плазмы ОР происходит следующим образом:

а) Инициирование нового ОР происходит в области с разрушенными капиллярами, ближайшей к лазеру. Это происходит, когда ОР распространяется через РС, покрытый материалом с удельным акустическим сопротивлением, сопоставимым с кварцевым стеклом. Инициация ОР в этом случае не наблюдается приблизительно в 10% НППИ. Это означает, что не все НППИ способствуют движению ОР.

б) Инициирование нового ОР происходит на малых (~ 10 нм) частицах SiO_2 , движущихся по полой сердцевине вместе с потоком воздуха под действием ударной волны. Это происходит, когда РС окружен материалом с удельным акустическим сопротивлением, намного меньшим, чем кварцевое стекло (в наших экспериментах это был воздух). Это приводит к тому, что положение повторного инициирования ОР смещено в направлении лазера на ~ 1 мм по сравнению со случаем (а). Кроме того, процесс повторной инициации ОР в областях с разрушенными капиллярами новой НППИ, как в случае (а), описанном выше, всё ещё возможен. Всё это приводит к увеличению наблюдаемой средней скорости распространения ОР.

Заключение

1. Предложена усовершенствованная структура оболочки РС. В данной структуре отсутствуют места соприкосновения между капиллярами оболочки. Преимущества данной структуры продемонстрированы теоретически и экспериментально. В полученном световоде измерены потери в широком спектральном диапазоне (2,5–8 мкм).

2. Впервые экспериментально подтверждено низкое значение дисперсионного параметра D_λ в полосах пропускания РС, что позволяет использовать их для передачи ультракоротких лазерных импульсов высокой интенсивности.

3. Резонансная связь мод сердцевины с модами оболочки, возникающая в РС при изгибе, впервые продемонстрирована экспериментально. Также экспериментально продемонстрировано искажение спектра пропускания РС при изгибе. Данные экспериментов хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

4. Впервые исследовано распространение ОР в полых волоконных световодах под действием импульсно-периодического лазерного излучения. Предложена физическая модель распространения ОР в РС.

Список работ по теме диссертации

Список публикаций в журналах из перечня ВАК по теме диссертации:

1. Kolyadin A. N., Kosolapov A. F., Pryamikov A. D., Biriukov A. S., Plotnichenko V. G., Dianov E. M., "Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region," *Opt. Express* 21(8), 9514–9519 (2013).
2. Kolyadin A. N., Alagashev G. K., Pryamikov A. D., Mouradian L., Zeytunyan A., Toneyan H., Kosolapov A. F., Bufetov I. A., "Negative curvature hollow-core fibers: dispersion properties and femtosecond pulse delivery," *Phys. Procedia* 73, 59–66 (2015).
3. Alagashev G. K., Pryamikov A. D., Kosolapov A. F., Kolyadin A. N., Lukovkin A. Y., Biriukov A. S., "Impact of geometrical parameters on the optical properties of negative curvature hollow-core fibers," *Laser Phys.* 25(5), 055101 (11pp) (2015).
4. Bufetov I. A., Kolyadin A. N., Kosolapov A. F., Efremov V. P., Fortov V. E., "Catastrophic damage in hollow core optical fibers under high power laser radiation," *Opt. Express* 27(13), 18296–18311 (2019).
5. Kolyadin A. N., Kosolapov A. F., Bufetov I. A., "Optical discharge propagation along hollow-core optical fibres," *Quantum Electron.* 48(12), 1138–1142 (2018).

Доклады на конференциях

- 1) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Прямиков, А.Д., Бирюков А.С., «Полые микроструктурированные световоды с отрицательной кривизной поверхности сердцевины для среднего ИК диапазона» XI Всероссийская с международным участием конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», г. Саранск, Тезисы, с.139 (2012)
- 2) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., «Полые микроструктурированные световоды с отрицательной кривизной поверхности сердцевины для среднего ИК диапазона» Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013, II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. Тезисы, с.61(2013)
- 3) Pryamikov A. D., Kosolapov A. F., Kolyadin A. N., Biriukov A. S., Plotnichenko V. G. and Dianov, E. M. «Unique properties of the negative curvature hollow core fibers» (invited), in ICONO/LAT 2013, Moscow, Russia, LW14, (2013)
- 4) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Алагашев Г.К., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Плотниченко В.Г. «передача излучения в полых микроструктурированных световодах при экстремально высоких материальных потерях», XII международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», г. Саранск, Тезисы, с.64 (2013)
- 6) Колядин А.Н., Алагашев Г.К., Луковкин А.Ю., Косолапов А.Ф., Прямиков А.Д., Бирюков А.С. «Влияние изгиба на характеристики полых микроструктурированных световодов с отрицательной кривизной границы сердцевина» Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014, III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. Тезисы, с.71(2014)
- 7) Kosolapov A. F., Pryamikov A. D., Alagashiev G. K., Kolyadin A. N., Biriukov A. S., Dianov E. M. “Negative Curvature Hollow-Core Fibers (NCHCFs) for Mid-IR Applications” (invited), in Advanced Photonics Congress, Barcelona, Spain, SoTu2B.3. (2014)
- 8) Колядин А.Н., Алагашев Г.К., Луковкин А.Ю., Косолапов А.Ф., Прямиков А.Д., Бирюков А.С. «Резонансное увеличение изгибных потерь в полых микроструктурированных световодах с отрицательной кривизной поверхности оболочки», XIII международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», г. Саранск, Тезисы, с.70 (2014)
- 9) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Алагашев Г.К., Буфетов И.А. «Дисперсия в полых микроструктурированных световодах с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка» Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, IV Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. Тезисы, с.78(2015)

- 10) Колядин А.Н., Мурадян Л., Зейтунян А., Тонян Г., Косолапов А.Ф., Прямикова А.Д., «Дисперсия и распространение фемтосекундного лазерного импульса в полой световоде с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка», XIV международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», г. Саранск, Тезисы, с.67 (2015)
- 11) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А. «Распространение оптического разряда по полым револьверным световодам под действием лазерного излучения» Научная сессия НИЯУ МИФИ-2019, VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. Тезисы, с.191(2019)
- 12) Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Yatsenko Yu.P., Bufetov I.A. "Temperature of the optical discharge in hollow-core optical fibers at near threshold intensities of laser radiation", Applied Photonics, v. 6, #3-4, 171-183 (2019).
- 13) Bufetov I.A., Kolyadin A.N., Yatsenko Y.P., Kosolapov A.F. "Fiber fuse effect in hollow-core and solid core optical fibers: comparison" Advanced Solid State Lasers. in Proceedings Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C) Part of Laser Congress. Сер. "Laser Congress", paper JW2A.28 (2019)
- 14) Bufetov I.A., Kolyadin A.N., Kosolapov A.F. "Fiber fuse effect in hollow core optical fibers" 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2019. 8873127, (2019)
- 15) Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А. «Температура плазмы оптического разряда в полых волоконных световодах при пороговых условиях» Научная сессия НИЯУ МИФИ-2020, IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. Тезисы, с.69(2020)