

На правах рукописи

Бобков Константин Константинович

**ОДНОМОДОВЫЕ ИТТЕРБИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ
ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ
С ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ
И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ДОЛГОВРЕМЕННУЮ
НАДЕЖНОСТЬ**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Научном центре волоконной оптики РАН

Научный руководитель:

Лихачёв Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией специальных волоконных световодов

Официальные оппоненты:

Ильичёв Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт общей физики Российской академии наук, заведующий лабораторией нелинейной оптики примесных центров

Ковалёв Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории нелинейных оптических явлений

Ведущая организация: Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 4 февраля 2018 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при ИОФ РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <http://www.gpi.ru>

Автореферат разослан декабря 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук

Т.Б. Воляк



тел. 8(499) 503-8147

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Импульсные волоконные лазеры с высокой пиковой мощностью в промышленных применениях приходят на смену громоздким и технически сложным твердотельным системам благодаря высокому качеству выходного излучения, высокой надежности, эффективности, компактности и дешевизне. Потенциально наиболее широким применением таких лазеров является микрообработка материалов. Высокая интенсивность излучения позволяет испарять материал в месте фокусировки, при этом за счет малой длительности импульсов не происходит нагрев прилегающих областей материала. В результате становится возможным использование импульсных волоконных лазеров для обработки материалов с низкой термической прочностью (различные пластики, полупроводниковые структуры) и для целей микрохирургии (офтальмологические операции). Наиболее перспективными для промышленных применений представляются волоконные лазеры на основе световодов, легированных оксидом иттербия. В настоящий момент в лабораторных условиях была продемонстрирована система на основе иттербиевого микроструктурированного световода, генерирующая фемтосекундные импульсы с пиковой мощностью 3.8 ГВт [1], а при когерентном сложении импульсов от подобных систем удалось достигнуть уровня пиковой мощности в 22 ГВт [2].

Однако на практике применение импульсных волоконных лазеров пока ограничено, и широко используются лишь системы с небольшой пиковой мощностью, которая на порядки меньше достигнутых рекордных значений. Основная причина заключается в том, что предельная пиковая мощность в волоконных импульсных лазерах достигается за счет ухудшения большинства остальных параметров: средней мощности, компактности и надежности. Корень проблемы лежит именно в самой конструкции волоконного световода, в

котором излучение локализовано в сердцевине относительно малого диаметра (как правило, порядка единиц-десятков микрометров) и распространяется на достаточно протяженном участке длины (единицы метров), что приводит к низким порогам нежелательных нелинейных эффектов. Специальные конструкции волоконных световодов с повышенным порогом нелинейных эффектов, используемые в настоящее время, также имеют целый ряд недостатков: высокая чувствительность к изгибам, необходимость использования объемных оптических элементов для ввода излучения сигнала и накачки. Так, приведенные выше рекордные значения пиковой мощности были получены в системе, основанной на микроструктурированном световоде с длиной 1.4 м и диаметром сердцевины 108 мкм, который было необходимо использовать абсолютно прямым и который было невозможно состыковывать со стандартными волоконными компонентами с помощью сварки.

Особо необходимо отметить проблемы кратковременной и долговременной стабильности мощных импульсных волоконных систем на основе иттербиевых световодов. Как правило, такие системы строятся по принципу МОРА (master oscillator power amplifier), которая включает задающий генератор (master oscillator) и усилитель мощности (power amplifier). Типичная МОРА-система имеет несколько каскадов усиления: несколько маломощных предусилительных, между которыми находится акустооптический модулятор для уменьшения частоты повторения импульсов (для увеличения энергии импульсов при фиксированной средней мощности) и один мощный каскад на основе световода с большим полем моды (БПМ) с повышенным порогом нелинейных эффектов. Именно в финальном мощном каскаде усиления происходят негативные процессы, влияющие на кратковременную и долговременную стабильность и надежность волоконных систем. Так, хорошо известно, что иттербиевые волоконные световоды подвержены эффекту фотопотемнения, проявляющемуся в постепенном уменьшении выходной мощности системы в течение ее работы вследствие образования центров

окраски в сердцевине активного световода под воздействием ИК-излучения накачки. К началу работы над данной диссертационной работой механизм образования дефектов, связанных с эффектом фотопотемнения, не был установлен и являлся предметом дискуссий. Кроме того, сравнительно недавно был обнаружен новый эффект, приводящий к ухудшению качества выходного излучения мощных иттербиевых лазеров — модовая нестабильность. Данный эффект заключается в быстром (с периодом на уровне единиц миллисекунд) изменении пространственной формы выходной моды при превышении некоей пороговой мощности накачки (как правило, порядка сотен Вт – единиц кВт). Данный эффект проявляется практически мгновенно после превышения порога по выходной мощности, является обратимым и в последние годы был детально изучен зарубежными исследователями.

Долгое время считалось, что при средней мощности существенно ниже порога модовой нестабильности (менее нескольких сотен ватт) проблем с качеством выходного пучка возникать не может. В то же время экспериментальные данные о долговременной (в течение сотен и тысяч часов) стабильности выходных характеристик таких иттербиевых волоконных лазеров вплоть до начала работы над диссертацией в литературе отсутствовали.

Актуальность темы диссертации определялась необходимостью создания новых типов волоконных усилителей с высокой пиковой мощностью, свободных от вышеописанных проблем. Не менее актуальным являлось выявление природы механизмов процесса фотопотемнения и исследование долговременной стабильности характеристик выходного излучения в импульсных лазерах сравнительно невысокой средней мощности. Такие исследования были необходимы для разработки конструкции активных иттербиевых световодов с повышенным порогом нелинейных эффектов, обладающих высокой долговременной надежностью, которые можно было бы использовать в мощных импульсных волоконных системах для целей промышленности, медицины и научных исследований.

Основной целью диссертационной работы являлось создание одномодового иттербиевого волоконного импульсного лазера с предельно высокой пиковой мощностью, отличающегося кратковременной и долговременной надежностью и стабильностью выходных характеристик. В рамках поставленной цели необходимо было провести следующие исследования:

- Определение физической природы механизма, ответственного за появление эффекта фотопотемнения.

- Исследование долговременной стабильности параметров выходного излучения импульсных волоконных лазеров с высокой пиковой мощностью.

- Разработка конструкции иттербиевого волоконного световода с повышенным порогом нелинейных эффектов, стойкостью к эффекту фотопотемнения, обладающего долговременной надежностью выходных характеристик.

- Реализация импульсных систем с предельно высоким уровнем пиковой мощности на основе разработанных иттербиевых световодов с повышенным порогом нелинейных эффектов.

Научная новизна диссертационной работы

В ходе сравнительных исследований спектров поглощения и люминесценции кристалла Yb:YAG и легированных иттербием кварцевых стёкол различного состава было показано, что процесс фотопотемнения связан с переходом комплекса, состоящего из иона трёхвалентного иттербия и окружающих его атомов кислорода, в состояние с переносом заряда, что приводит к образованию кислородно-дырочного центра окраски и двухвалентного иона иттербия. Образование двухвалентных ионов иттербия было впервые подтверждено в ходе экспериментального наблюдения характерных полос люминесценции и поглощения этих ионов в оптически облученных образцах иттербиевых световодов.

Впервые экспериментально зафиксировано ухудшение качества выходной моды в импульсных волоконных лазерах с высокой пиковой мощностью, но относительно небольшой средней мощностью. Установлено, что данный эффект проявляется в усилителях на основе маломодовых иттербиевых световодов с большой площадью поля моды. Причиной данного эффекта является появление в сердцевине активного световода в процессе работы усилителя длиннопериодной решетки, вызывающей перекачку мощности из фундаментальной моды в первую высшую моду. Предложены возможные механизмы наведения данной длиннопериодной решетки.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование работы усилителя импульсов на основе иттербиевых световодов-конусов. Обнаружен новый режим усиления импульсов, характерной особенностью которого является увеличение порога нелинейных эффектов с увеличением длины конусного световода. Показано, что максимального порога нелинейных эффектов можно добиться в относительно длинном конусном световоде при использовании встречной накачки на длине волны 976 нм и сигнала на 1064 нм. Данный набор параметров позволяет реализовать уникальный режим усиления сигнала, при котором излучение проходит тонкую часть конусного световода практически без усиления, а резкий рост сигнала происходит лишь в толстой части световода. В результате удается достигнуть рекордного для полностью волоконных систем уровня пиковой мощности при диффракционно-ограниченном качестве выходного излучения.

Практическая значимость диссертационной работы

В процессе работы созданы образцы анизотропных иттербиевых одномодовых световодов-конусов с большой площадью поля моды и высоким порогом нелинейных эффектов. Соблюдение условий адиабатического расширения фундаментальной моды и использование

фосфороалюмосиликатной матрицы позволило добиться стойкости этих световодов к эффектам фотопотемнения и ухудшения качества выходной моды.

С использованием разработанного иттербиевого световода-конуса создан усилитель чирпированных импульсов длительностью 28 пс с рекордной для волоконных систем пиковой мощностью 760 кВт непосредственно из световода и 22 МВт после сжатия усиленных импульсов до длительности 315 фс на дифракционных решетках. Усилитель обладает дифракционно-ограниченным качеством выходного излучения и не подвержен эффектам модовой деградации и фотопотемнению.

Надежность и достоверность

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается надёжной статистикой экспериментов, использованием современного оборудования и применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных, публикациями материалов работ в ведущих физических научных журналах и докладами на международных конференциях.

Результаты работы, выносимые на защиту

- Процесс фотопотемнения кварцевых световодов, легированных оксидом иттербия, обусловлен возбуждением состояния с переносом заряда в комплексе, состоящем из иона трёхвалентного иттербия и окружающих его атомов кислорода. Возбуждение данного состояния приводит к захвату ионом иттербия электрона у ближайшего атома кислорода, в результате чего образуется двухвалентный ион иттербия и кислородно-дырочный центр окраски.

- Эффект модовой деградации при долговременной работе усилителя импульсов с высокой пиковой мощностью связан с наведением длиннопериодной решетки показателя преломления в сердцевине активного световода. Данная решетка возникает за счет периодического изменения по

длине световода концентрации наведенных дефектов сетки стекла (в том числе вызванных фотопотемнением). Неравномерное наведение этих дефектов обусловлено модуляцией интенсивности оптического излучения по длине световода вследствие интерференции фундаментальной и первой высшей моды.

- При использовании активного конусного световода возможна реализация нового режима усиления, обеспечивающего предельно высокий порог нелинейных эффектов (суб-МВт уровня при усилении пикосекундных импульсов). Характерной особенностью данного режима усиления является увеличение порога нелинейных эффектов при увеличении длины конусного световода. Максимальный порог нелинейных эффектов реализуется в конусных световодах с высоким суммарным поглощением накачки из оболочки (на уровне 50 дБ) при использовании встречной накачки на длине волны 976 нм и сигнала на длине волны в области 1064 нм. В этом случае в тонкой части конусного световода излучение сигнала распространяется практически без усиления, а резкий рост его мощности происходит в толстой части световода, в которой площадь поля фундаментальной моды достигает максимального значения.

- Эффект модовой деградации в усилителях с высокой пиковой мощностью (на уровне МВт) может быть подавлен на протяжении как минимум 250 ч за счет использования в качестве усилительной среды иттербиевого конусного световода с сердцевиной на основе фосфоалюмосиликатной стеклянной матрицы (стойкой к эффекту фотопотемнения) и плавным («адиабатическим») изменением диаметра сердцевины по длине световода (приводящим к низкому (не более 1%) уровню возбуждения высших мод).

Апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, доложены на конференциях: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies ICONO/LAT (Россия, г. Москва, 2013 год), 17th International

Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (Польша, г. Вроцлав, 2014 год), Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE) Photonics West (США, г. Сан-Франциско, 2015 и 2017 года), Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference CLEO/Europe-EQEC (Германия, г. Мюнхен, 2015 и 2017 года), Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО (Россия, г. Пермь, 2013, 2015 и 2017 года), Specialty Optical Fibers SOF (Канада, г. Ванкувер, 2016 год, Швейцария, г. Цюрих, 2018 год), Laser Optics (Россия, г. Санкт-Петербург, 2016 год), а также на семинарах и конкурсах молодых ученых в НЦВО РАН. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах, из которых 5 – в рецензируемых журналах из списка ВАК, и 13 тезисов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 133 наименования.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом шестилетней работы автора в Научном центре волоконной оптики РАН и представляет собой обобщение работ автора, выполненных совместно с сотрудниками НЦВО РАН (Москва, Россия), ИХВВ РАН (Н.-Новгород, Россия), ИПФ РАН (Н.-Новгород, Россия) и Xlim (Лимож, Франция). Коллективный характер экспериментальных и теоретических работ обусловил публикацию полученных результатов в соавторстве с коллегами. Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данной работы, определены её цели и защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации и публикации.

В первой главе представлен обзор литературы. Рассмотрены основные свойства ионов трёхвалентного иттербия в кварцевом стекле с различными модифицирующими добавками. Описаны механизмы потерь, снижающие эффективность работы иттербиевых волоконных лазеров и усилителей. Отмечены основные негативные факторы, а именно, нелинейные эффекты, ограничивающие максимально достижимый уровень выходной мощности волоконных систем. Рассмотрены существующие конструкции световодов с большой площадью поля моды, характеризующиеся повышенным порогом нелинейных эффектов, и приведены рекордные на сегодняшний день значения пиковой мощности, полученные с использованием таких световодов. Описаны негативные эффекты, снижающие долговременную и кратковременную стабильность излучения мощных иттербиевых волоконных систем.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию процесса фотопотемнения в иттербиевых волоконных световодах с различной матрицей стекла сердцевины. Работы, результаты которой представлены в данной главе, были выполнены под непосредственным руководством А.А. Рыбалтовского.

В главе проведен анализ существующих моделей данного процесса, объясняющих механизм образования кислородно-дырочных центров окраски под действием излучения с энергией 1.27 эВ (976 нм). Представлены доказательства в пользу модели возбуждения состояния с переносом заряда (charge-transfer state, CTS) в комплексе из иона трёхвалентного иттербия и близкорасположенных атомов кислорода (Рис. 1а), в результате чего происходит образование кислородно-дырочного центра окраски и двухвалентного иона иттербия. Данные доказательства были получены в ходе

сравнительных исследований алюмосиликатного (АС) стекла, легированного оксидом иттербия, и его близкого аналога — кристалла Yb:YAG, в котором процесс переноса заряда был всесторонне изучен в начале двухтысячных годов. В ходе исследований было обнаружено, что возбуждение в образцах АС световодов полос, связанных с состоянием с переносом заряда, наблюдаются полосы люминесценции, которые могут быть однозначно определены как полосы люминесценции из состояния с переносом заряда (Рис. 1б). В образцах АС световодов, облученных излучением с энергией 1.27 и 6.5 эВ, обнаружены полосы поглощения, характерные для двухвалентных ионов иттербия (Рис. 2а). В спектрах люминесценции тех же образцов наблюдались полосы, характерные для двухвалентных ионов иттербия (Рис. 2б). Также в главе объясняется природа повышенной стойкости световодов на основе фосфоросиликатного и фосфоалюмосиликатного стекла к эффекту фотопотемнения.

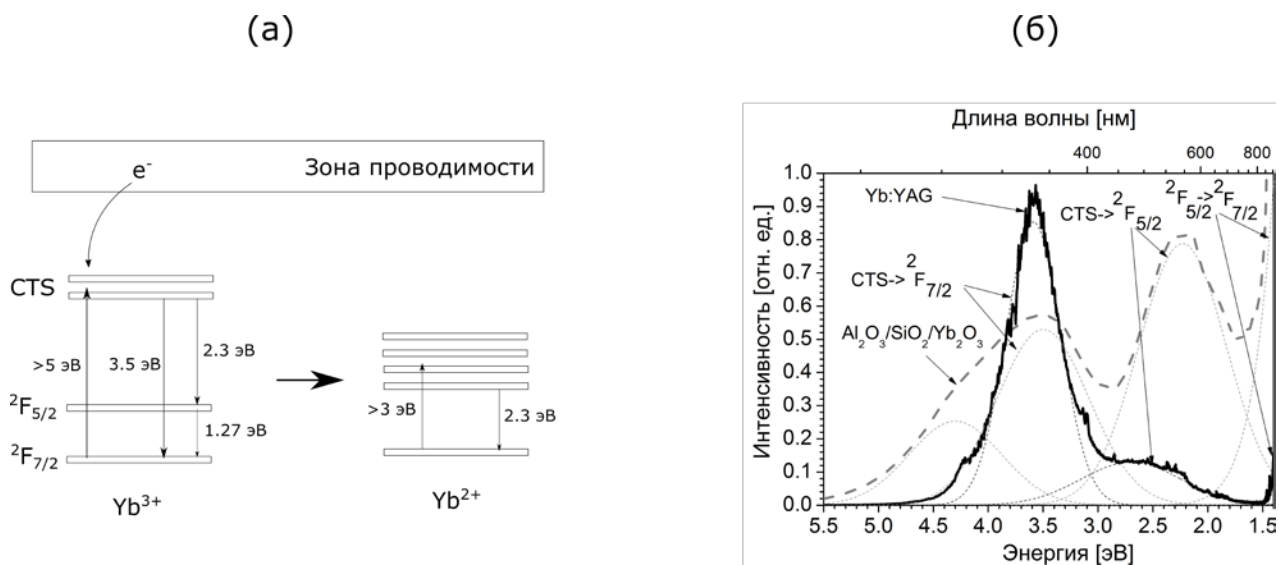


Рисунок 1. (а) Процесс захвата ионом Yb^{3+} электрона из зоны проводимости, образованной атомами кислорода, с последующим восстановлением до двухвалентного состояния; (б) наблюдение полос люминесценции из состояния с переносом заряда при облучении образцов излучением с энергией кванта 6.5 эВ.

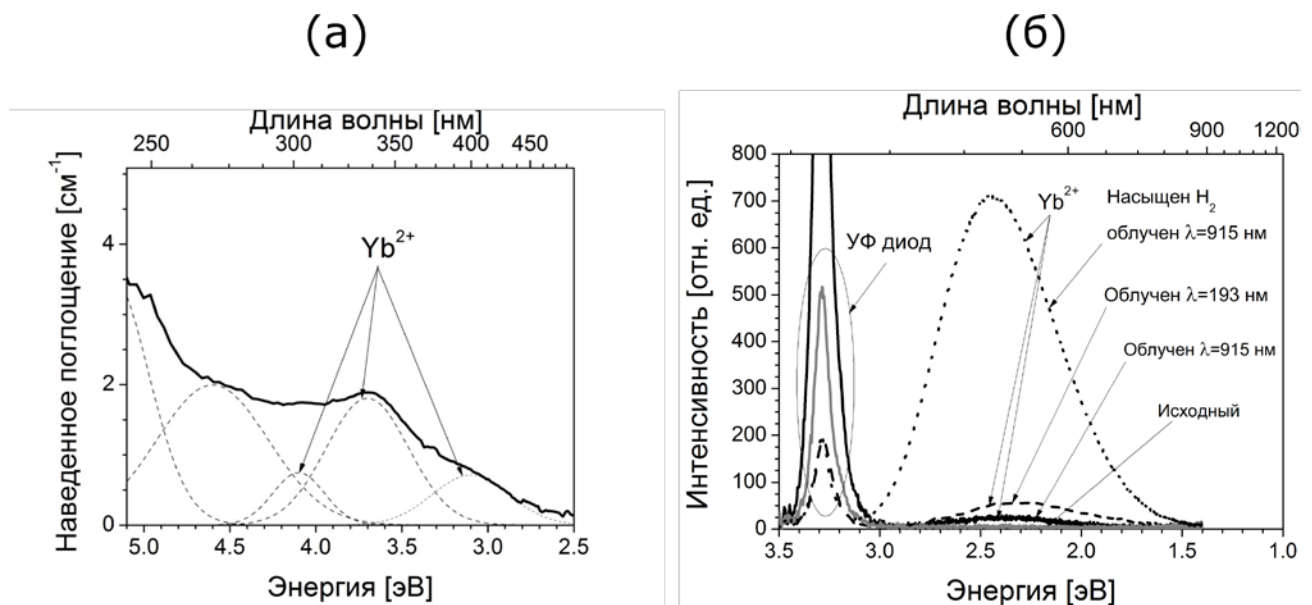


Рисунок 2. (а) Полосы поглощения ионов Yb^{2+} , наблюдаемые после фотопотемнения образца алюмосиликатного иттербиевого световода; (б) полоса люминесценции ионов Yb^{2+} в образцах алюмосиликатных световодов до и после фотопотемнения при различных условиях.

Третья глава диссертации посвящена процессу деградации моды в мощных иттербиевых импульсных усилителях на основе маломодовых световодов с большой площадью поля моды. Приведены экспериментальные доказательства существования нового негативного эффекта, приводящего к плавному ухудшению качества выходного излучения (искажению пространственного распределения интенсивности) (Рис. 3). Показано, что данный эффект стабилен (необратим) при нормальных условиях и может наблюдаться в деградировавших световодах вне схемы усилителя, то есть без излучения накачки. Предположен и обоснован механизм деградации моды – наведение в результате процесса фотопотемнения длиннопериодной решётки показателя преломления (ДРПП) (спектр поглощения которой был экспериментально зарегистрирован) (Рис. 4), на которой происходит перекачка излучения из фундаментальной моды LP_{01} в первую высшую моду LP_{11} . Решётка наводится в результате возникающей между модами интерференции. Для подтверждения связи эффекта деградации моды с процессом фотопотемнения были проведены эксперименты по фотообесцвечиванию

наведённых центров окраски, в ходе которых было обнаружено практически полное восстановление свойств световода (восстановление фундаментальной моды, уменьшение потерь, связанных с ДРПП, см. Рис. 4). Кроме того, было обнаружено присутствие необратимой ДРПП, которая, по нашему мнению, наводится в результате прямого модифицирования структуры стекла мощными пикосекундными импульсами. Также в главе приводятся экспериментальные результаты по наблюдению эффекта модовой деградации другими научными коллективами, полученными в процессе работы над диссертацией.

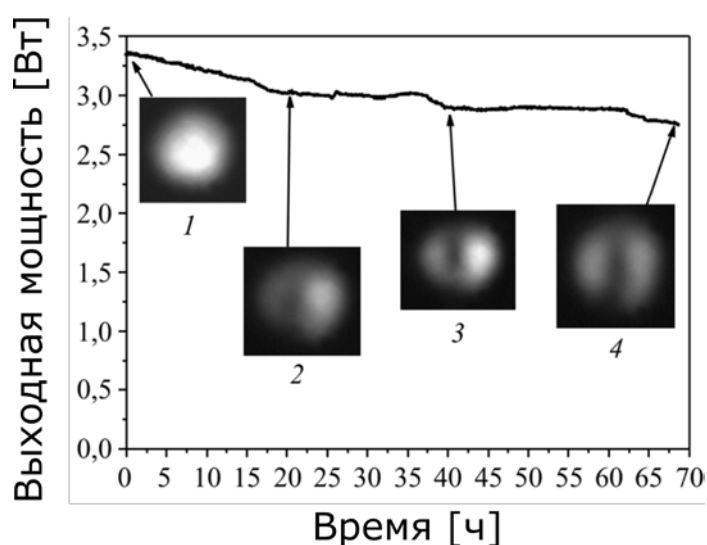


Рисунок 3. Временная зависимость средней выходной мощности и пространственного распределения интенсивности выходного излучения иттербиевого усилителя.

Четвертая глава посвящена усилителю чирпированных импульсов на основе иттербиевого световода-конуса с дифракционно-ограниченным качеством выходного излучения и рекордно высоким уровнем пиковой мощности.

В главе приводятся литературные данные об успехах других научных коллективов в области создания иттербиевых световодов-конусов на момент начала работы над данной диссертационной работой, описываются проблемы, не позволившие достигнуть мегаваттного уровня пиковой мощности в данных световодах. Представлены результаты проведенных нами работ по

оптимизации конструкции световодов-конусов (состава стекла, геометрических характеристик), см. Рис. 5.

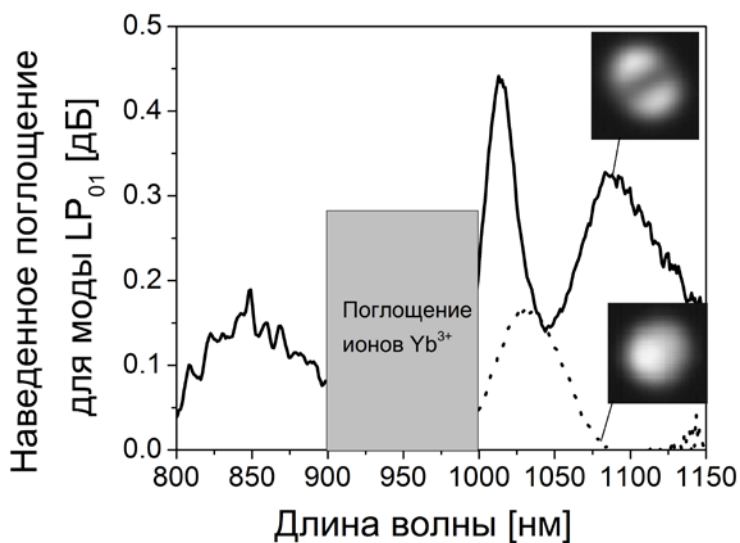


Рисунок 4. Спектр наведенной длиннопериодной решетки показателя преломления до фотообесцвечивания излучением с длиной волны 533 нм (сплошная кривая) и после (пунктирная кривая) в отрезке световода длиной 50 мм.

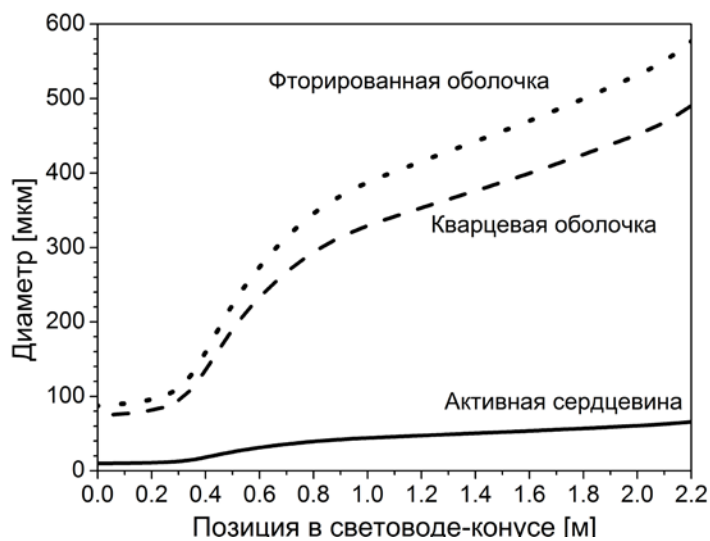


Рисунок 5. Изменение диаметров сердцевины/первой оболочки/второй оболочки по длине разработанного световода-конуса.

Проведено математическое моделирование усилителя импульсов на основе реализованного световода-конуса с целью определения параметров системы (длины световода-конуса, длины волны сигнала и накачки и т.п.) для получения наибольшего порога вынужденного комбинационного рассеяния

(ВКР), которое является основным ограничением для достижения мегаваттного уровня пиковой мощности на выходе из световода. В результате моделирования было обнаружено, что порог ВКР в световодах-конусах растёт прямо пропорционально длине световода (Рис. 6а). Таким образом, был разработан новый режим усиления, реализуемый за счёт использования световода-конуса относительной большой длины (2 м) с короткой тонкой частью и большим уровнем поглощения излучения накачки из оболочки (50 дБ), заключающийся в том, что усиливаемый сигнал проходит тонкую часть световода-конуса практически без изменения мощности, а значительное усиления происходит в толстой части световода, в которой площадь поля фундаментальной моды составляет $\sim 1000 \text{ мкм}^2$. Данный режим реализуется при длине волны сигнала 1064 нм и длине волны накачки 976 нм (Рис. 6б): при усилении сигнала мощностью 10 мВт порог ВКР составляет $\approx 300 \text{ кВт}$. При работе на длине волны сигнала 1030 нм порог ВКР в несколько раз ниже, что связано с усилением первой стоксовой компоненты ВКР ионами иттербия. В ходе экспериментов результаты расчетов были подтверждены: исследования показали, что при усилении импульсов с центральной длиной волны 1064 нм, длительностью 8 пс и средней мощностью 10 мВт порог ВКР составляет $\approx 400 \text{ кВт}$ при доле усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) $\approx 1 \%$. Уменьшение мощности входного сигнала до 1 мВт позволило поднять порог ВКР до 760 кВт при доле УСЛ $\approx 7 \%$.

На основе разработанного световода-конуса длиной 2 м с диаметрами сердцевины/первой оболочки на выходе 62/450 мкм был реализован усилитель чирпированных импульсов (УЧИ) длительностью 28 пс. Варьирование частоты следования импульсов и их средней мощности позволило достигнуть уровня пиковой мощности 350 кВт непосредственно на выходе световода-конуса и 22 МВт после сжатия импульсов с помощью двух дифракционных решеток до длительности 315 фс.

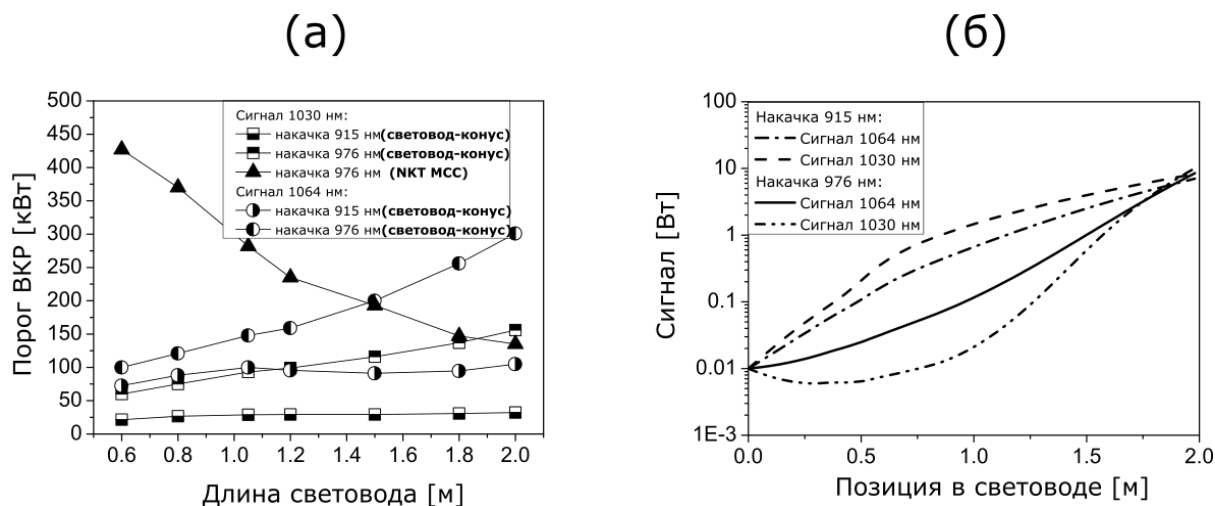


Рисунок 6. Результаты математического моделирования усилителя с разными длинами волн сигнала (1030 и 1064 нм) и накачки (915 и 976 нм): а) зависимость порога ВКР от длины световода-конуса и микроструктурированного световода; б) изменение мощности усиливаемого сигнала по длине световода-конуса.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально доказано, что процесс фотопотемнения иттербиевых световодов на основе стёкол различного состава (алюмосиликатного, фосфоросиликатного, фосфороалюмосиликатного) связан с возбуждением состояния с переносом заряда в комплексе из иона трёхвалентного иттербия и окружающих его атомов кислорода, приводящем к образованию пары дефектов «кислородно-дырочный центр – двухвалентный ион Yb». Восстановление части ионов иттербия до двухвалентного состояния в результате процесса фотопотемнения обнаружено в ходе экспериментального наблюдения характерных полос люминесценции и поглощения этих ионов.
2. Экспериментально зафиксировано постепенное ухудшение качества моды на выходе импульсных волоконных лазеров с высокой пиковой и относительной небольшой средней мощностью на основе иттербиевых световодов с большой площадью поля моды. Установлено, что причиной эффекта постепенного необратимого ухудшения качества выходной моды является перекачка мощности из фундаментальной моды в первую

высшую моду вследствие появления в сердцевине иттербиевого световода длиннопериодной решетки показателя преломления. Физическим механизмом появления решетки является интерференция фундаментальной моды и первой высшей моды, имеющей относительно небольшую мощность. Периодическая модуляция интенсивности оптического излучения по длине световода приводит к неравномерному наведению дефектов сетки стекла (в том числе связанных с эффектом фотопотемнения) и соответствующей модуляцией показателя преломления.

3. Проведено теоретическое исследование режима работы усилителя импульсов на основе конусного иттербиевого световода. Обнаружен новый режим усиления, особенностью которого является увеличение порога нелинейных эффектов при увеличении длины активного конусного световода. Показано, что наибольший порог нелинейных эффектов будет наблюдаться при использовании сигнала в области 1064 нм и встречной накачки на длине волны 976 нм. Необходимым условием реализации данного режима является высокое суммарное поглощение излучения накачки из оболочки конусного световода (около 50 дБ для слабого сигнала), которое обеспечивает слабое усиление сигнала в начальной, тонкой части конусного световода и быстрый рост сигнала в той части световода, в которой диаметр поля фундаментальной моды достигает максимальных значений.
4. Созданы образцы иттербиевых одномодовых анизотропных конусных световодов с большой площадью поля моды (1000 мкм^2) и высоким уровнем поглощения накачки из оболочки (24 дБ/м на длине волны 976 нм). Экспериментально подтверждено существование теоретически предсказанного режима усиления, обеспечивающего высокий порог нелинейных эффектов при использовании относительно длинного конусного световода (2 м). Применение такого конусного световода в

усилителе чирпированных импульсов позволило усилить 28-пс импульсы до рекордно высокой (для полностью волоконных лазерных схем) пиковой мощности 350 кВт, а затем их сжать, используя две дифракционные решетки, до длительности 315 фс, что соответствует пиковой мощности 22 МВт.

5. Исследования долговременной надежности усилителя импульсов длительностью 8 пс с высокой пиковой мощностью (1.2 МВт) на основе разработанного иттербиевого конусного световода, показали, что эффект модовой деградации может быть подавлен на протяжении как минимум 250 ч непрерывной работы вследствие крайне низкой доли мощности высших мод (менее 0.1%), распространяющихся в таком конусном световоде.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki, F. Jansen, S. Hadrich, H. Carstens, C. Jauregui, J. Limpert, A. Tunnermann, Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power, *Opt. Express*, 19(1), 255-260 (2011).
2. A. Klenke, S. Hadrich, T. Eidam, J. Rothhardt, M. Kienel, S. Demmler, T. Gottschall, J. Limpert, A. Tunnermann, 22 GW peak-power fiber chirped-pulse-amplification system, *Opt. Letters*, 34(24), 6875-6878 (2014).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Рыбалтовский А.А., Умников А.А., **Бобков К.К.**, Липатов Д.С., Романов А.Н., Лихачев М.Е., Сулимов В.Б., Гурьянов А.Н., Бубнов М. М., Дианов Е.М., Роль кислородно-дырочных центров окраски в механизме фотопотемнения фосфоросиликатных световодов, легированных оксидом иттербия, *Квантовая электроника*, 43(11), 1037-1042 (2013).
2. Rybaltovsky A.A., Umnikov A.A., Lipatov D.S., Kamenskikh I.A., **Bobkov K.K.**, Likhachev M.E., Bubnov M.M., Mikhailin V.V., Guryanov A.N., Dianov E.M., Mechanisms of photoinduced absorption in

phosphosilicate ytterbium-doped optical fibers, ICONO/LAT, paper LWI2 (2013).

3. **Бобков К.К.**, Рыбалтовский А.А., Умников А.А., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е., Бубнов М.Н., Дианов Е.М., Возбуждение состояния с переносом заряда как основной механизм фотопотемнения алюмосиликатных световодов, легированных оксидом иттербия, Фотон-экспресс, 6(110), 283-284 (2013).

4. I.A. Kamenskikh, A.A. Rybaltovsky, **К.К. Bobkov**, M.M. Bubnov, A.A. Umnikov, D. Ustinov, Luminescent properties of Yb-doped phospho- and aluminosilicate glasses in the region of the charge-transfer absorption, ICL, paper P-108 (2014).

5. **Бобков К.К.**, Рыбалтовский А.А., Вельмискин В.В., Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Дианов Е.М., Умников А.А., Гурьянов А.Н., Вечканов Н.Н., Шестакова И.А., Возбуждение состояния с переносом заряда как основной механизм фотопотемнения алюмосиликатных световодов, легированных оксидом иттербия, Квантовая электроника, 44(12), 1129-1135 (2014).

6. Rybaltovsky A.A., **Bobkov К.К.**, Velmiskin V.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Shestakova I.A., The Yb-doped aluminosilicate fibers photodarkening mechanism based on the charge-transfer state excitation, Proc. SPIE, 896116 (2014).

7. **Бобков К.К.**, Бубнов М.М., Алешкина С.С., Лихачев М.Е., Постепенная деградация основной моды в иттербиевых импульсных волоконных лазерах, Прикладная фотоника, 2(3), 287-298 (2015).

8. **К. Bobkov**, M. Bubnov, S. Aleshkina, and Mikhail E. Likhachev, Long-Term Mode Shape Degradation in Yb-doped Pulsed Fiber Lasers, Specialty Optical Fibers 2016, paper SoW2H.5.

9. **Bobkov K.K.**, Bubnov M.M., Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Long-term mode shape degradation in large mode area Yb-doped pulsed fiber amplifiers, *Laser Physics Letters*, 14(1), (2017).
10. **K.K. Bobkov**, M.M. Bubnov, S.S. Aleshkina, M.E. Likhachev, Long-term mode shape degradation in ytterbium-doped pulsed fiber lasers, *Laser Optics*, 2016 International Conference, paper ThR2-17.
11. **K. Bobkov**, M. Bubnov, S. Aleshkina, M. Likhachev, The first experimental observation of long-term mode degradation in high peak power Yb-doped amplifiers, *Proc. SPIE*, 100830T (2017).
12. **Бобков К.К.**, Левченко А.Е., Алешкина С.С., Семенов С.Л., Денисов А.Н., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Лаптев А.Ю., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е., Легированный оксидом иттербия световод-конус с высоким порогом нелинейных эффектов, *Фотон-экспресс*, 6(126), 125-126 (2015).
13. Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., **Бобков К.К.**, Лихачев М.Е., Левченко А. Е., Алешкина С.С., Семенов С.Л., Денисов А.Н., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Лаптев А.Ю., Гурьянов А.Н., Андрианов А.В., Муравьев С.В., Ким А.В., Волоконный усилитель на основе активного иттербиевого световода-конуса для получения ультракоротких оптических импульсов с мегаваттным уровнем пиковой мощности, *Квантовая электроника*, 45(5), 443-450 (2015).
14. **Bobkov K.K.**, Levchenko A.E., Aleshkina S.S., Semenov S.L., Denisov A.N., Bubnov M.M., Likhachev M.E., Koptev M.Yu., Anashkina E.A., Muravyev S.V., Andrianov A.V., Kim A.V., Lipatov D.S., Laptev A.Yu., Guryanov A.N., Monolithic sub-MW peak power tapered Ytterbium-doped fiber amplifier, *Proc. SPIE*, 93440S (2015).
15. **K. Bobkov**, A Levchenko, S. Aleshkina, S. Semenov, A. Denisov, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Laptev, A. Guryanov, and M. Likhachev, Low

bend-sensitive all-glass highly Yb-doped tapered fiber for high-peak-power amplification systems, ECOC/EQEC, paper CJ_3_1 (2015).

16. **K. Bobkov**, A. Levchenko, S. Aleshkina, S. Semenov, A. Denisov, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Laptev, A. Guryanov, M. Likhachev, 1.5 MW peak power diffraction limited monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier, CLEO/Europe-EQEC, paper CJ-P.6 (2017).

17. **K. Bobkov**, M. Koptev, A. Levchenko, S. Aleshkina, S. Semenov, A. Denisov, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Laptev, A. Guryanov, E. Anashkina, S. Muravyev, A. Andrianov, A. Kim, M. Likhachev, MW peak power diffraction limited monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier, Proc. of SPIE, 1008309 (2017).

18. **K. Bobkov**, A. Andrianov, M. Koptev, S. Muravyev, A. Levchenko, V. Velmiskin, S. Aleshkina, S. Semjonov, D. Lipatov, A. Guryanov, A. Kim, and M. Likhachev, Sub-MW peak power diffraction-limited chirped pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier, Optics Express, 25(22), 26958-26972 (2017).

19. **K.K. Bobkov**, A.V. Andrianov, M.Yu. Koptev, S.V. Muravyev, A.E. Levchenko, V.V. Velmiskin, S.S. Aleshkina, M.M. Bubnov, S.L. Semjonov, D.S. Lipatov, A.N. Guryanov, A.V. Kim, and M.E. Likhachev, MW Peak Power Diffraction-limited Chirped-pulse Yb-doped Tapered Fiber Amplifier, Specialty Optical Fibers, paper SoM4H.1 (2018).