

На правах рукописи

Бухарин Михаил Андреевич

**ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ ВОЛНОВОДОВ
В ОПТИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ И КРИСТАЛЛАХ
В ТЕПЛОВОМ КУМУЛЯТИВНОМ РЕЖИМЕ**

01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Центре физического приборостроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Худяков Дмитрий Владимирович

кандидат физико-математических наук, зам. директора по НИР ЦФП ИОФ РАН

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Баграташвили Виктор Николаевич

доктор физико-математических наук, зав. отделом лазерной атомно-молекулярной технологии, Институт Фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Охримчук Андрей Гордеевич

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Международный центр лазерных технологий Российского Химико-Технологического Университета им. Д.И. Менделеева

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Защита диссертации «02» октября 2017 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при ИОФ РАН по адресу г. Москва 119991, ул. Вавилова, 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.063.03

канд. физ.-мат. наук
тел. +7(499) 503-8147



Т.Б. Воляк

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы

Прямая фемтосекундная лазерная запись является широко распространенной и развивающейся технологией формирования волноводов внутри оптических и лазерных материалов. Эта методика обеспечивает надежное и одностадийное производство различных оптических интегральных устройств [1] без дополнительного изготовления масок, в отличие от традиционных фотолитографических методов. Её суть заключается в перманентном изменении показателя преломления (n) под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов (УКИ), вызывающих ряд нелинейных процессов в фокальной области при взаимодействии с прозрачным материалом. До сегодняшнего дня различными научными группами были продемонстрированы волноводы как в оптических стеклах [2,3], так и в кристаллах [4–7]. На основе полученных волноводов созданы такие интегральные оптические схемы, как делители мощности и направленные ответвители [8–10], круговые резонаторы [11,12], лазерные усилители и лазеры [13–16], а также волоконные брэгговские решетки [17–19].

Для того чтобы проектировать, создавать и исследовать свойства указанных выше лазерных элементов необходимо точно знать пространственный профиль индуцированного показателя преломления, а также его зависимость от параметров эксперимента. Подробное экспериментальное исследование эффекта изменения n под действием УКИ актуально из-за сложности численного моделирования ряда нестационарных процессов, протекающих на существенно отличающихся временных масштабах (от фс до нс).

В ряде работ были исследованы зависимости оптических характеристик волноводов от таких экспериментальных параметров, как энергия и частота следования импульсов [20], скорость передвижения образца [21–23] и длительность импульса [24]. Однако данные работы были

посвящены, в основном, волноводам с записанной сердцевинной, и не позволяют использовать полученные результаты для проектирования и записи волноводов с записанной оболочкой с пониженным п/п (с депрессированной оболочкой). Для решения этой задачи необходимо прямое измерение индуцированного п/п и выявление его зависимостей от параметров эксперимента для каждого материала отдельно.

Помимо этого, актуальной задачей в данной области является повышение величины индуцированного п/п и улучшение оптических характеристик волноводов (потери, качество моды излучения и числовая апертура). В настоящее время одним из перспективных способов решения данной проблемы является переход к фемтосекундной записи в тепловом кумулятивном режиме [2,20,25–28]. Однако несмотря на ряд полученных успехов, основные механизмы эффекта изменения п/п все ещё плохо изучены.

Цели и задачи работы

Целями данной работы являются исследование теплового кумулятивного режима фемтосекундной записи на длине волны 1 мкм и разработка на его основе методики создания волноводов и лазерных усилителей с повышенными оптическими характеристиками. Для достижения этих целей были поставлены и решены следующие **задачи**.

- 1) Исследование влияния энергии, частоты следования лазерных импульсов и скорости передвижения образца на величину и пространственный профиль индуцированного п/п, а также на коэффициент поглощения лазерного излучения в нетепловом и тепловом кумулятивном режимах фемтосекундной записи.
- 2) Разработка численной модели распределения и динамики температуры в фокальной области для определения основных процессов перманентного изменения п/п под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

- 3) Разработка фундаментальных основ формирования оптических волноводов с депрессированной оболочкой в тепловом кумулятивном режиме записи.
- 4) Поиск и исследование режимов фемтосекундной записи, при которых возможно расширение рабочего диапазона эффекта изменения п/п по глубинам записи под поверхностью образцов.
- 5) Разработка гибридных схем лазерных усилителей, совмещающих оптическую эффективность волоконной технологии и высокие спектральные и тепловые характеристики твердотельной технологии, на основе результатов фемтосекундной записи в тепловом кумулятивном режиме.

Научная новизна

- 1) Впервые экспериментально и численно показано, что переход к тепловому кумулятивному режиму лазерной фемтосекундной записи в кварцевом и Nd:фосфатном стеклах сопровождается сужением рабочего диапазона эффекта изменения п/п по энергии в лазерном импульсе. Границы рабочего диапазона при этом определяются максимальной температурой, достигаемой внутри фокальной области: верхняя граница рабочего диапазона определяется достижением температуры размягчения материала, а нижняя граница определяется достижением характерной для материала температуры, способствующей протеканию процессов, приводящих к перманентному изменению п/п.
- 2) Впервые разработан метод создания оптических волноводов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле. Показано, что несмотря на увеличение п/п в центре фокальной области, на её периферии образуется кольцо с пониженным значением п/п. Для удержания оптического излучения в волноводе, образованном из параллельно записанных треков, расположенных вплотную друг к другу, изменения п/п в периферических областях на уровне $-1.5 \cdot 10^{-3}$ достаточно, что было подтверждено экспериментально.

3) Впервые продемонстрирована лазерная фемтосекундная запись треков без оптического пробоя на существенно различающихся глубинах под поверхностью образца (ширина рабочего диапазона по глубинам >550 мкм) при фиксированной системе фокусировки (без динамической коррекции сферической аберрации). Показано, что необходимая для записи энергия в лазерном импульсе зависит квадратично от величины сдвига по глубине, а ширина рабочего диапазона по энергии в импульсе определяется величиной сферической аберрации.

4) Впервые предложена и исследована гибридная (интегрально-объемная) схема усиления лазерных импульсов, основанная на лазерной фемтосекундной записи волноводов длиной более 30 мм с большим диаметром моды (более 200 мкм) и позволяющая увеличить коэффициент усиления более чем в 2.5 раза за счет увеличения интеграла перекрытия между сигнальным и накачивающим излучением.

5) Впервые экспериментально показана зависимость минимальной глубины фемтосекундной записи треков с индуцированным п/п под поверхностью кристаллов от частоты следования лазерных импульсов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Переход к тепловому кумулятивному режиму лазерной фемтосекундной записи в кварцевом и Nd:фосфатном стеклах начинается при частотах следования импульсов 1 и 0.5 МГц соответственно. Он сопровождается существенным сужением рабочего диапазона эффекта изменения показателя преломления по энергии в лазерном импульсе и его сдвигом в область малых энергий в импульсе. Границы рабочего диапазона при этом определяются максимальной температурой, достигаемой внутри фокальной области: верхняя граница рабочего диапазона определяется достижением температуры размягчения материала (1600°C для кварцевого стекла), а нижняя граница определяется достижением характерной для материала температуры, способствующей протеканию процессов, приводящих к перманентному изменению показателя преломления ($200\text{-}250^{\circ}\text{C}$ для кварцевого стекла).

2) Тепловой кумулятивный режим лазерной фемтосекундной записи позволяет расширить рабочий диапазон глубин записи треків с индуцированным показателем преломления и волноводов на их основе при фиксированной системе фокусировки (без динамической коррекции сферической аберрации). Это обуславливается снижением рабочей энергии в импульсе, необходимой для изменения показателя преломления, и, вследствие этого, предотвращением оптического пробоя материала.

3) Лазерная фемтосекундная запись в тепловом кумулятивном режиме позволяет создать оптические волноводы с большим диаметром моды. Основанные на них гибридные (интегрально-объемные) лазерные усилители, совмещающие распространение накачки в волноводном режиме и свободное распространение сигнального излучения внутри записанной структуры без взаимодействия с её стенками, обладают повышенной эффективностью усиления по сравнению с усилителями с продольной накачкой, но без волновода. Увеличение эффективности усилителя достигается за счет удержания излучения накачки от расходимости и увеличения интеграла перекрытия между накачивающим и сигнальным излучением.

4) Минимальная глубина фемтосекундной записи треків с индуцированным показателем преломления под поверхностью кристаллов зависит от частоты следования лазерных импульсов. Для частот, обеспечивающих тепловой кумулятивный режим фемтосекундной записи, минимальная глубина записи больше, чем для малых частот, обеспечивающих нетепловой режим записи.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе проведенных исследований в данной работе показано, что протяженные структуры с индуцированным показателем преломления под действием ультракоротких лазерных импульсов являются основой для создания волноводов в оптических стеклах и кристаллах. Созданные волноводы могут успешно применяться для создания трехмерных оптических интегральных схем и гибридных (интегрально-объемных) лазерных

усилителей с повышенной эффективностью усиления. Обнаруженные особенности воздействия лазерного излучения в тепловом кумулятивном режиме позволят расширить рабочий диапазон глубин записи волноводов под поверхностью образцов и снизить оптические потери за счет повышения аксиальной симметрии волноводов и величины индуцированного п/п. Помимо этого, предложенная гибридная (интегрально-объемная) схема позволит повысить оптическую эффективность лазерных усилителей.

Достоверность и методы исследования

Для изменения показателя преломления оптических материалов использовался серийно выпускаемый фемтосекундный осциллятор HighQ FemtoTRAIN 1040-3, характеристики лазерных импульсов которого регулярно проверялись на приборах с актуальной калибровкой. Состав и чистота обрабатываемых материалов подтверждается паспортами образцов, составленных производителями. Величина индуцированного показателя преломления измерялась экспериментально на основе методики количественной фазовой микроскопии. Численный анализ лазерно-записываемых волноводов производился в математическом пакете Lumerical MODE Solutions на основе конечно-разностного метода аппроксимации волновых уравнений и экспериментально полученных профилей индуцированного показателя преломления. Достоверность и надежность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается воспроизводимостью параметров записываемых структур, а также соответствием экспериментальных и численно полученных результатов.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке теоретических подходов, численном моделировании, анализе экспериментальных данных и обсуждении полученных результатов. Автором

создана установка для изучения перманентного изменения п/п оптических стекол и кристаллов под действием ультракоротких лазерных импульсов. Экспериментальные исследования профиля п/п записываемых структур и оптических характеристик волноводов на их основе выполнены автором лично или с его непосредственным участием. Непосредственно автором были выдвинуты гипотезы о возможности повышения величины индуцированного п/п и расширения рабочего диапазона по глубинам записи при переходе в тепловой кумулятивный режим воздействия, а также предложена схема гибридного (интегрально-объемного) лазерного усилителя. Помимо этого, автором проведено численное моделирование температуры в фокальной области и распределения излучения в создаваемых волноводах.

Апробация работы

Основные результаты проведенных в работе исследований докладывались автором лично на следующих конференциях: 57 научная конференция МФТИ (24-29 ноября 2014, Долгопрудный, Россия); научная сессия НИЯУ МИФИ (18-19 февраля 2015, Москва, Россия); IV международная конференция по фотонике и информационной оптике (28-30 января 2015, Москва, Россия); Конференция-конкурс молодых физиков ФИАН (2 марта 2015, Москва, Россия); SPIE Optics+Optoelectronics 2015 (April 13–16 2015, Prague, Czech Republic); 3rd International Conference on Quantum Technologies (July 13-17 2015, Moscow, Russia); Шестая международная конференция "Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов" (26-28 мая 2015, Москва, Россия); 58 научная конференция МФТИ (23–28 ноября 2015, Долгопрудный, Россия); V международная конференция по фотонике и информационной оптике (3-5 февраля 2016, Москва, Россия); II международная конференция "Плазменные, лазерные исследования и технологии" (25-27 января 2016, Москва, Россия); SPIE Photonics Europe (April 4-7 2016, Brussels, Belgium); International symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies FLAMN-2016 (June

27 – July 1 2016, St. Petersburg, Russia); 1st international symposium Advanced photonic materials 2016 (27 June-01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia); 59 научная конференция МФТИ "Проблемы современной физики" (21–26 ноября 2016, Долгопрудный, Россия); VI международная конференция по фотонике и информационной оптике (1-3 февраля 2017, Москва, Россия).

Результаты, представленные в диссертационной работе, также докладывались автором на научных семинарах ИОФ РАН, Центра физического приборостроения ИОФ РАН и МФТИ. Также они отмечались наградами на конкурсах научных работ: SPIE Best student paper reward (2016, SPIE Photonics Europe), SPIE Student travel grant (2015, SPIE Optics+Optoelectronics), Диплом за первое место на конференции-конкурсе молодых физиков (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2 марта 2015), диплом за 1 место (57 конференция МФТИ, 2014), сертификат суперфиналиста конкурса Intellect2All в категории «Новые материалы и гетероструктуры для микро- и нанoeлектроники» (Благотворительный фонд АФК «Система», 2015), диплом финалиста конкурса «Инновационная радиоэлектроника» (Министерство промышленности и торговли РФ, 2016), включение патента №2014152282 в базу данных «Перспективные изобретения» (ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», 2016). Работа диссертанта была поддержана Фондом Содействия Развитию Малых Форм Предприятий в Научно-технической Сфере (программа «УМНИК», № 4806ГУ1/2014 и №9398ГУ2/2015).

Публикации

По результатам диссертации опубликована 21 работа, из которых 11 в трудах конференций, 9 в журналах из списка ВАК (выделены нижним подчеркиванием), а также получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Список литературы содержит 205 наименований. Объём диссертации 147 страниц, в том числе 90 рисунков и 7 таблиц.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована цель и задачи работы, показана научная новизна и значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и кратко рассматривается содержание диссертационной работы.

В **главе 1**, являющейся обзором литературы, представлен анализ основных процессов, приводящих к перманентному изменению показателя преломления оптических стекол и кристаллов, а также проведен критический анализ работ, посвященных методам формирования лазерно-записанных волноводов, их классификации и описанию применений.

В **главе 2** представлены описания экспериментальных установок для фемтосекундной записи волноводов и измерения их оптических характеристик. Помимо этого, в данной главе рассматривается численное моделирование температуры в фокальной области при записи структур и методы расчета мод излучения, поддерживаемых записанными волноводами.

В **главе 3** представлены экспериментальные результаты фемтосекундной записи уединенных треков с индуцированным показателем преломления: их пространственный профиль и диаграмма рабочего диапазона эффекта по энергии и частоте следования импульсов (Рис. 1а). Проанализировано влияние перехода в тепловой кумулятивный режим на рабочий диапазон эффекта по энергии в импульсе, эллиптичность треков (Рис. 2) и коэффициент поглощения лазерного излучения. Для анализа перехода в тепловой кумулятивный режим был введен качественный параметр

$$\alpha = w_0/l_t \quad (1)$$

где w_0 – радиус перетяжки лазерного луча по уровню интенсивности $1/e^2$, $l_t = \sqrt{D/f_{PRR}}$, D – коэффициент температуропроводности, f_{PRR} – частота следования лазерных импульсов. Параметр α отражает, насколько радиус фокального пятна больше характерной длины распространения тепловой волны за время между двумя последовательными лазерными импульсами. Также в этой главе приводятся результаты численного моделирования температуры в фокальной области (см. Рис. 1б).

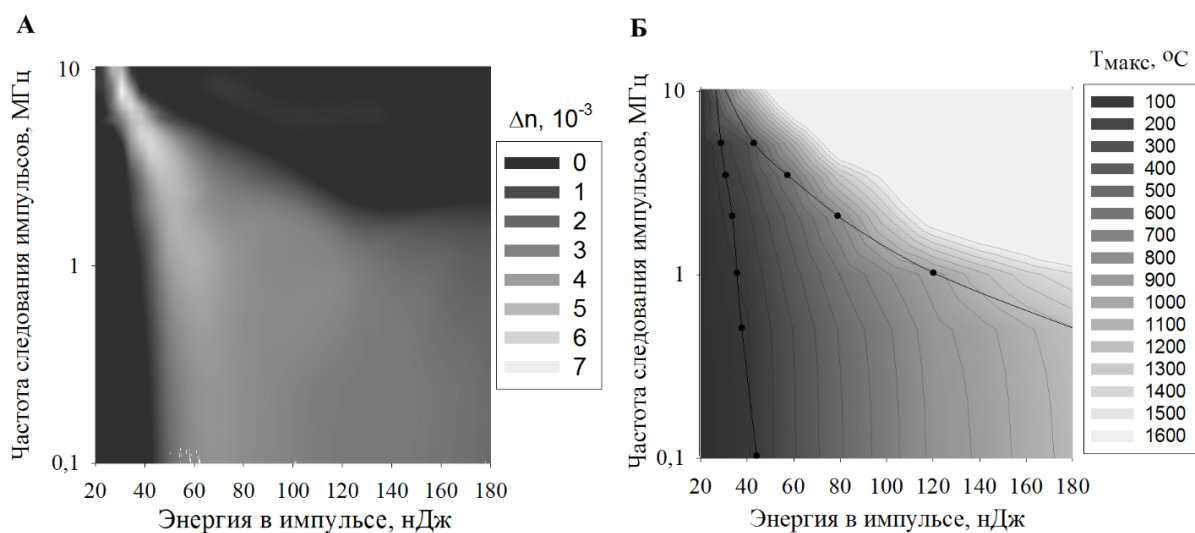


Рис. 1. (А) Диаграмма величины индуцированного п/п для кварцевого стекла. Скорость сканирования 10 мкм/с. (Б) Численное моделирование температуры в центре фокального пятна с наложенными на нее границами рабочего диапазона по коэффициенту поглощения (черные линии).

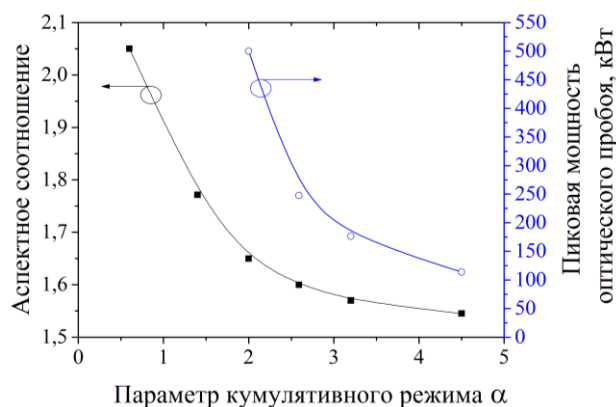


Рис. 2. Снижение необходимой пиковой мощности и аспектного соотношения при переходе в тепловой кумулятивный режим.

В главе 4 представлены экспериментальные результаты записи оптических волноводов с депрессированной оболочкой в кристалле ниобата лития и фосфатном стекле, легированном ионами неодима (Рис. 3), а также впервые предложена и реализована методика фемтосекундной записи волноводов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле (Рис. 4).

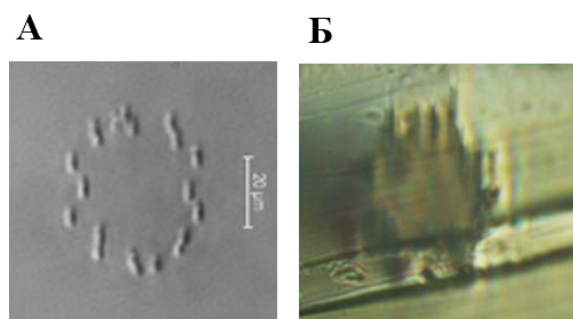


Рис. 3. Микрофотографии торцов волноводов различного диаметра, полученных в Nd:фосфатном стекле (А) и кристалле ниобата лития (Б).

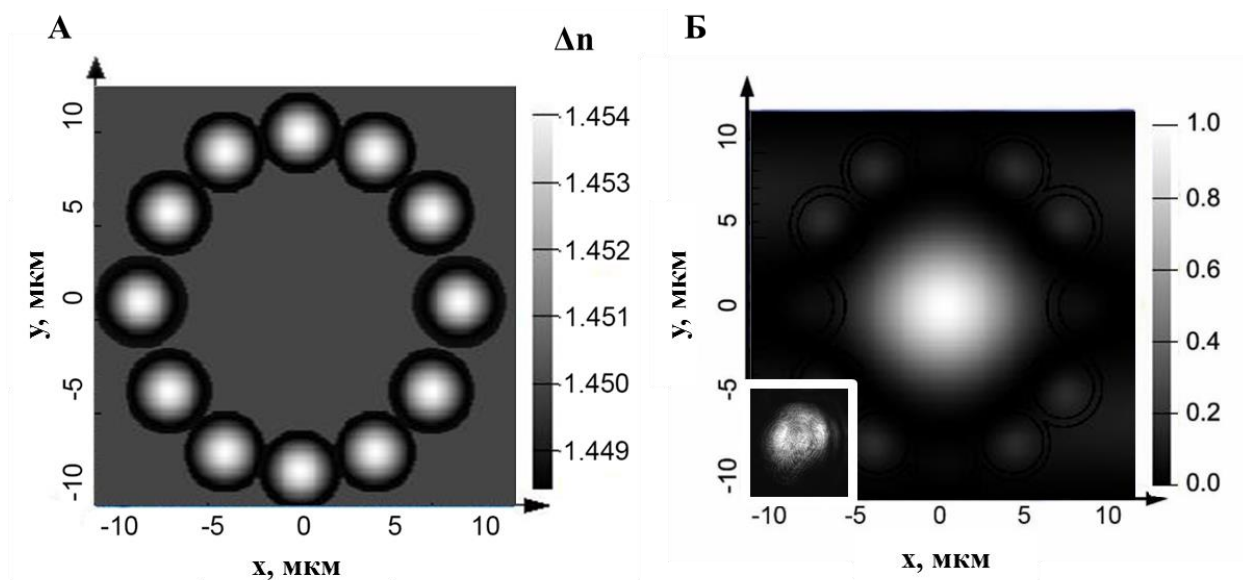


Рис. 4. (А) моделирование профиля показателя преломления в волноводе с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле. (Б) Численное моделирование модового распределения на длине волны 1040 нм и экспериментально полученная микрофотография моды (на врезке).

В главе 5 впервые предложена и реализована методика расширения рабочего диапазона эффекта по глубинам записи под поверхностью образцов, основанная на фемтосекундной записи в тепловом кумулятивном режиме. Используя разработанную методику создан оптический волновод с большим

диаметром моды (200 мкм), и на его основе предложена и реализована новая, гибридная (интегрально-объемная) схема лазерного усилителя с повышенной оптической эффективностью (Рис. 5).

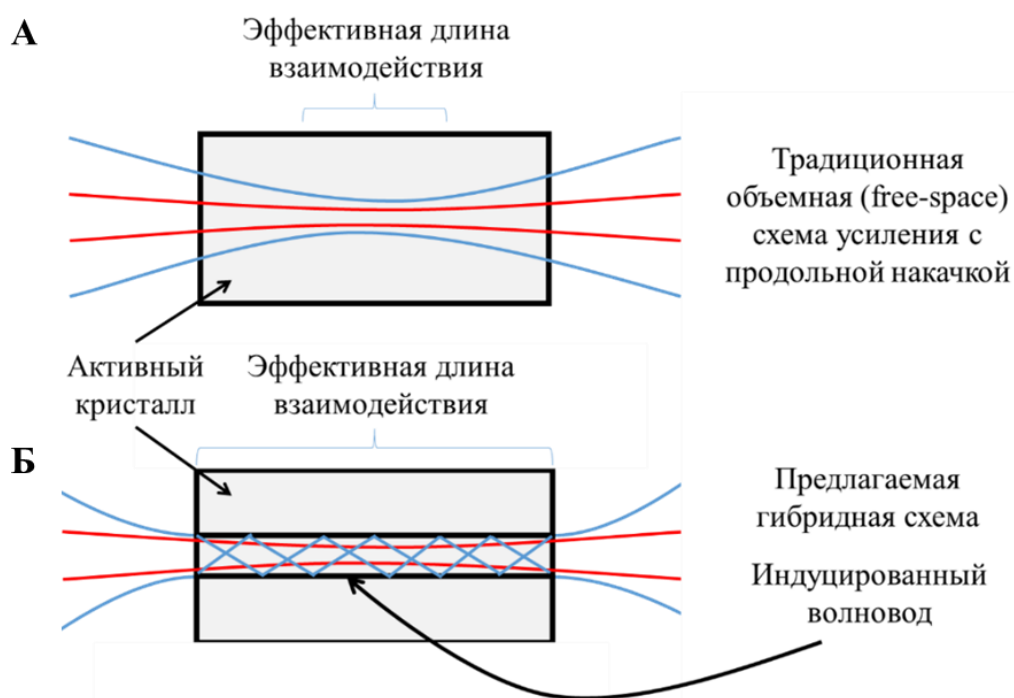


Рис. 5. Традиционная схема лазерного усилителя с продольной накачкой (А) и схема работы гибридного (интегрально-объемного) усилителя с лазерно-записанным волноводом для излучения накачки (Б).

В главе 6 обсуждаются ограничения использования теплового кумулятивного режима и результаты фемтосекундной записи на малых глубинах (менее 15 мкм) под поверхность кристалла ниобата лития.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1) На основе экспериментальных данных показано, что переход в тепловой кумулятивный режим воздействия начинается в кварцевом стекле и Nd:фосфатном стекле при частотах следования импульсов 1 и 0.5 МГц соответственно. На основании экспериментальных данных и численного моделирования распределения и динамики температуры внутри фокальной

области было установлено, что переход к тепловому кумулятивному режиму лазерной фемтосекундной записи сопровождается сужением рабочего диапазона эффекта изменения п/п по энергии в лазерном импульсе. Границы рабочего диапазона эффекта при этом определяются максимальной температурой, достигаемой внутри фокальной области: верхняя граница рабочего диапазона эффекта определяется достижением температуры размягчения материала, а нижняя граница определяется достижением характерной для материала температуры, способствующей протеканию процессов, приводящих к перманентному изменению показателя преломления.

2) Разработана численная модель распределения и динамики температуры в фокальной области, учитывающая эллиптичность области воздействия лазерного излучения на материал и зависимость коэффициента температуропроводности от локальной температуры. На основе сравнительного анализа показано, что верхняя граница рабочего диапазона эффекта изменения п/п, находящаяся вблизи зоны оптического пробоя материала, определяется достижением температуры размягчения (1600°C для кварцевого стекла), в то время как положение нижней границы рабочего диапазона определяется существенным нагревом фокальной области до температуры примерно 200-250°C, способствующей более быстрому и эффективному протеканию процессов, приводящих к изменению п/п.

3) Впервые разработан метод создания оптических волноводов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле. Показано, что несмотря на увеличение п/п в центре фокальной области, на её периферии образуется кольцо с пониженным значением п/п. Экспериментально было показано, что для удержания оптического излучения в волноводе, образованном из параллельно записанных треков, расположенных вплотную друг к другу, изменения п/п в периферических областях на уровне $-1.5 \cdot 10^{-3}$ достаточно.

4) На примере Nd:фосфатного стекла впервые продемонстрирована фемтосекундная запись треков без оптического пробоя на существенно

различающихся глубинах под поверхностью образца (ширина рабочего диапазона эффекта изменения п/п по глубинам записи >550 мкм) при фиксированной системе фокусировки (без динамической коррекции сферической аберрации). Показано, что необходимая для записи энергия в лазерном импульсе зависит квадратично от величины сдвига по глубине, а ширина рабочего диапазона по энергии в импульсе определяется величиной сферической аберрации на заданной глубине и различается для направления сдвигов по глубине к поверхности образца и от нее.

5) Впервые предложена и исследована гибридная (интегрально-объемная) схема усиления лазерных импульсов, основанная на фемтосекундной записи волноводов длиной более 30 мм с большим диаметром моды (более 200 мкм) и позволяющая увеличить коэффициент усиления более чем в 2.5 раза (и более чем в 3.6 раз дифференциальный коэффициент усиления по мощности накачки) за счет увеличения интеграла перекрытия между сигнальным и накачивающим излучением. Предложенная схема сочетает в себе свободное распространение сигнального излучения с малой расходимостью и распространение излучения накачки в волноводном режиме.

6) На примере ниобата лития впервые экспериментально показана зависимость минимальной глубины фемтосекундной записи треков с индуцированным п/п под поверхностью кристаллов от частоты следования лазерных импульсов и экспериментально произведена запись треков на малой глубине залегания (2-15 мкм) под поверхностью кристалла.

IV. Список публикаций автора по теме диссертационной работы

- 1) Bukharin M.A., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Heat accumulation regime of femtosecond laser writing in fused silica and Nd: phosphate glass // Applied Physics A. 2015. V. 119. №. 1. P. 397-403.
- 2) Bukharin M., Khudakov D., Vartapetov S. Investigation of refractive index profile induced with femtosecond pulses into neodymium doped phosphate glass for the purposes of hybrid waveguiding structures formation // Physics Procedia. 2015. V. 71. P. 272-276.
- 3) Бухарин М.А., Худяков Д.В., Патент на изобретение “Способ формирования оболочки волноводной структуры в прозрачном объемном материале и оболочка волноводной структуры” (RU 2578747)
- 4) Bukharin M.A., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Femtosecond writing of depressed cladding waveguides in strongly cumulative regime // Proc. of SPIE. 2015. V. 9516. P. 95161A-1.
- 5) Бухарин М.А., Худяков Д.В. Особенности структурных изменений в кварцевом стекле под действием фемтосекундного лазерного излучения в тепловом кумулятивном режиме // Известия РАН, серия физическая. 2016. Т. 80. №. 10. С. 1396–1401.
- 6) Bukharin M.A., Skryabin N.N., Ganin D.V., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Techniques of surface optical breakdown prevention for low-depths femtosecond waveguides writing //Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737. №. 1. P. 012015.
- 7) Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Writing of 3D optical integrated circuits with ultrashort laser pulses in the presence of strong spherical aberration //Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 747. №. 1. P. 012054.
- 8) Bukharin M.A., Lyashedko A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Improved optical efficiency of bulk laser amplifiers with femtosecond written waveguides // Proc. of SPIE. 2016. V. 98930G. P. 98930G-7.
- 9) Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Femtosecond writing of near-surface waveguides in lithium niobate for low-loss

electro-optical modulators of broadband emission // Proc. of SPIE. 2016. V. 989102. P. 989102-7.

10) Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Dependence of femtosecond writing parameters in waveguide formation process within significantly broad depths range // Optical and Quantum Electronics. 2017. V. 49. №. 1. P. 43.

11) Бухарин М.А., Худяков Д.В. Лазерная фемтосекундная модификация показателя преломления стекол и создание оптически индуцированных волноводов для ближнего инфракрасного диапазона спектра. // Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, Всероссийской научной конференции с 14 международным участием "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики". 2014. Т. Проблемы современной физики. С. 66-68.

12) Бухарин М.А., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Исследование профиля показателя преломления, индуцированного фемтосекундными импульсами в фосфатном стекле с неодимом, для целей создания гибридных световедущих структур // Научная сессия МИФИ - 2015, Сборник аннотаций докладов. 2015. Т.2. С. 183.

13) Бухарин М.А., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Прямая фемтосекундная запись световодов с депрессированной оболочкой в фосфатном стекле с неодимом // IV международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. 2015. С. 82.

14) Бухарин М.А., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Уменьшение аспектного соотношения структур при фемтосекундной записи в кумулятивном режиме // Физическое образование в вузах. 2015. Т. 21. № 1С. С. 16С-17С.

15) Бухарин М.А., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Фемтосекундная запись световода с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле // Физическое образование в вузах. 2015. Т. 21. № 1С. С. 47С-48С.

16) Бухарин М.А., Худяков Д.В. Особенности структурных изменений в кварцевом стекле под действием фемтосекундного лазерного излучения в

тепловом кумулятивном режиме // Тезисы докладов Шестой международной конференции "Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов". 2015. С. 75-76.

17) Бухарин М.А., Скрябин Н.Н., Худяков Д.В. Поточечная фемтосекундная запись оптических интегральных схем с облегченной интеграцией в волоконные лазерные системы // Тезисы 58-й научной конференции МФТИ. 2015. Электронный сборник. URL: http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/173.pdf.

18) Бухарин М.А., Скрябин Н.Н., Ганин Д.В., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Прямая фемтосекундная запись световодов на малых глубинах залегания под поверхностью кристаллов // Сборник научных трудов V Международной конференции по фотонике и информационной оптике. 2016. С. 107-108.

19) Бухарин М.А., Скрябин Н.Н., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Запись трехмерных оптических интегральных схем при помощи ультракоротких лазерных импульсов в присутствии сильных сферических aberrаций // Сборник трудов II международной конференции "Плазменные, лазерные исследования и технологии". 2016. С.65-66.

20) Бухарин М.А., Скрябин Н.Н., Худяков Д.В. Тепловые эффекты при фемтосекундной записи оптических волноводов // Тезисы 59-й научной конференции МФТИ. 2016. Электронный сборник. URL: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/1711.pdf.

21) Бухарин М.А., Скрябин Н.Н., Худяков Д.В., Вартапетов С.К. Анализ тепловых процессов перманентного изменения показателя преломления под действием фемтосекундного излучения в кумулятивном режиме // Сборник научных трудов VI международной конференции по фотонике и информационной оптике. С. 118-119.

V. Список цитируемой литературы

1. Osellame R., Cerullo G., Ramponi R. Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials. Springer Science & Business Media, 2012. V. 123.
2. Osellame R. et al. Waveguide lasers in the C-band fabricated by laser inscription with a compact femtosecond oscillator // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006. V. 12, № 2. P. 277–285.
3. Chan J.W. et al. Waveguide Fabrication In Fused Silica Using Tightly Focused Femtosecond Laser Pulses // Proc. SPIE. 2002. V. 4640. P. 129–136.
4. Burghoff J. et al. Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89, № 8. P. 14–17.
5. Nejadmalayeri A.H. et al. Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses // Opt. Lett. 2005. V. 30, № 9. P. 964.
6. Apostolopoulos V. et al. Femtosecond-irradiation-induced refractive-index changes and channel waveguiding in bulk Ti³⁺:Sapphire // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85, № 7. P. 1122–1124.
7. Osellame R. et al. Femtosecond laser writing of waveguides in periodically poled lithium niobate preserving the nonlinear coefficient // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90, № 24.
8. Pospiech M. et al. Double waveguide couplers produced by simultaneous femtosecond writing. // Opt. Express. 2009. V. 17, № 5. P. 3555–3563.
9. Riesen N. et al. Femtosecond direct-written integrated mode couplers // Opt Express. 2014. V. 22, № 24. P. 29855–29861.
10. Tran T.X., Nguyen X.N. Sharp switching in optical couplers with variable coupling coefficient // J. Light. Technol. 2014. V. 32, № 8. P. 1565–1569.
11. Nolte S. et al. Femtosecond waveguide writing: A new avenue to three-

- dimensional integrated optics // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2003. V. 77, № 1. P. 109–111.
12. Kowalewicz A.M. et al. Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator. // *Opt. Lett.* 2005. V. 30, № 9. P. 1060–1062.
13. Taccheo S. et al. Er:Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses // *Opt. Lett.* 2004. V. 29, № 22. P. 2626–2628.
14. Obraztsov P.A. et al. Multi-gigahertz repetition rate ultrafast waveguide lasers mode-locked with graphene saturable absorbers // *Laser Phys.* 2016. V. 26, № 8. P. 84008.
15. Okhrimchuk A.G. et al. Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG:Nd³⁺ crystal by femtosecond laser writing. // *Opt. Lett.* 2005. V. 30, № 17. P. 2248–2250.
16. Ams M. et al. Monolithic 100 mW Yb waveguide laser fabricated using the femtosecond-laser direct-write technique. // *Opt. Lett.* 2009. V. 34, № 3. P. 247–249.
17. McMillen B. et al. Ultrafast laser fabrication of Bragg waveguides in chalcogenide glass. // *Opt. Lett.* 2014. V. 39, № 12. P. 3579–3582.
18. Zhou K. et al. Line-by-line fiber bragg grating made by femtosecond laser // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2010. V. 22, № 16. P. 1190–1192.
19. Dekker P. et al. Annealing dynamics of waveguide Bragg gratings: evidence of femtosecond laser induced colour centres. // *Opt. Express.* 2010. V. 18, № 4. P. 3274–3283.
20. Eaton S. et al. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate. // *Opt. Express.* 2005. V. 13, № 12. P. 4708–4716.
21. Gross S. et al. Ultrafast Laser Inscription in Soft Glasses: A Comparative Study of Athermal and Thermal Processing Regimes for Guided Wave Optics // *Int. J. Appl. Glas. Sci.* 2012. V. 3, № 4. P. 332–348.
22. Meany T. et al. Towards low-loss lightwave circuits for non-classical optics at 800 and 1,550 nm // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2014. V. 114, № 1. P. 113–118.

23. Eaton S.M. et al. Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides: article // *Opt. Express*. 2008. V. 16, № 13. P. 9443–9458.
24. Hnatovsky C. et al. Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87, № 1. P. 2005–2007.
25. Schaffer C.B., García J.F., Mazur E. Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2003. V. 76, № 3. P. 351–354.
26. Dubov M. et al. Low-loss waveguides in borosilicate glass fabricated by high-repetition-rate femtosecond chirp-pulsed oscillator // *Proceedings of the Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference. CLEO Europe-EQEC*. 2009. P. 1.
27. Allsop T. et al. Inscription and characterization of waveguides written into borosilicate glass by a high-repetition-rate femtosecond laser at 800 nm: article // *Appl. Opt.* 2010. V. 49, № 10. P. 1938–1950.
28. Graf R. et al. Pearl-chain waveguides written at megahertz repetition rate // *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 2007. V. 87, № 1. P. 21–27.