

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Рупасов Алексей Евгеньевич

**Формирование двулучепреломляющих микротреков и запись  
оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках  
ультракороткими лазерными импульсами**

Специальность 1.3.19 –

Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Научный руководитель:**

**Кудряшов Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук

**Официальные оппоненты:**

**Мартынович Евгений Фёдорович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лазерных и лучевых технологий Иркутского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

**Достовалов Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волоконной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.

Защита состоится «16» декабря 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.262.01

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

## **Общая характеристика работы**

Данная работа посвящена исследованию формирования двулучепреломляющих микротреков в прозрачных твёрдых диэлектриках под действием ультракоротких лазерных импульсов (УКИ). В процессе работы изучаются различные физические эффекты взаимодействия лазерного излучения с прозрачными твёрдыми диэлектриками, а также анализируются результаты модификации материалов. Особое внимание уделяется изменению оптических свойств материалов после воздействия лазерного излучения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых методов создания оптических элементов с заданными характеристиками.

## **Актуальность темы исследования**

Двулучепреломляющие микротреки представляют собой области с искусственной анизотропией показателя преломления внутри прозрачного твёрдого диэлектрика, которые возникают под воздействием УКИ. В процессе создания двулучепреломляющих микротреков в диэлектрических материалах путём воздействия УКИ возможно изменение свойств микротреков за счёт варьирования параметров лазерного излучения, таких как длина волны, длительность импульсов и поляризация. Это даёт возможность создавать микрооптические устройства высокой плотности в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков. К таким устройствам относятся: «вечная» оптическая память [1-3], поляризационные элементы [4], волновые фазовые пластинки [5], цветные микрофильтры [6], а также фотонные элементы и устройства [7-10].

Одна из основных задач исследования — понять, как параметры индуцирующего излучения УКИ, отвечающие за различные физические эффекты, влияют на формирование двулучепреломляющих микротреков в прозрачных твёрдых диэлектриках. Это позволит создать новые оптические элементы.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

**Цель работы:** исследовать процессы формирования и основные характеристики двулучепреломления, индуцируемого в объеме прозрачных твердых диэлектриков под действием УКИ, и установить перспективные режимы лазерного изготовления оптических элементов. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать двулучепреломляющие микротреки в объеме плавленого кварца, нанопористого плавленого кварца, фторида кальция и ниобата лития с помощью ультракоротких лазерных импульсов.

2. Установить зависимость величины двулучепреломления, пропускания и светимости фотолюминесценции микротреков от плотности энергии, длительности и частоты следования импульсов, условий фокусировки и длины волны лазерного излучения.

3. Установить основные физические процессы, определяющие соотношения между величинами двулучепреломления, пропускания и светимости фотолюминесценции микротреков.

4. Изготовить оптические элементы на основе двулучепреломляющих микротреков.

## **Научная новизна**

1. Получены двулучепреломляющие микротреки в объеме фторида кальция, нанопористого плавленого кварца при острой фокусировке под действием УКИ (0,3-3,8 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК-диапазона (1030 нм) при различных энергиях в импульсе.

2. Экспериментально установлены зависимости величины двулучепреломления ( $\Delta n = |n_0 - n_e|$ ) микротреков, записанных во фториде

кальция, плавленом кварце, нанопористом плавленом кварце под действием УКИ (0,3-3,8 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК-диапазона (1030 нм) при различных энергиях в импульсе.

3. Установлено, что в плавленом кварце в двулучепреломляющих микротреках светимость фотolumинесценции, связанной с формированием дефекта – немостикового кислородного дырочного центра, пропорциональна величине фазового сдвига до достижения пороговой плотности энергии импульса, связанной с трансформацией структуры микротреков.

4. Предложено и апробировано использование конфокальной фотolumинесцентной сканирующей микроскопии для неразрушающего определения пространственных размеров двулучепреломляющих микротреков в прозрачных твёрдых диэлектриках на основе анализа зависимости интенсивности сигнала фотolumинесценции от координаты.

5. Обнаружено, что при формировании двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце с повышением частоты следования ультракоротких лазерных импульсов в диапазоне от 25 кГц до 2 МГц происходит усиление кумулятивного теплового эффекта, который при достижении пороговой частоты ограничивает процесс формирования микротреков путём локального кумулятивного разрушения материала.

6. В объёме плавленого кварца на основе двулучепреломляющих микротреков реализованы дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лيو, хроматическая полуволновая пластинка и диэлектрическое зеркало.

### **Практическая значимость**

Разработан неразрушающий метод измерения продольного размера сформированных ультракороткими лазерными импульсами

двулучепреломляющих микротреков, который позволяет оценить величину двулучепреломления.

Полученные в данной работе научные результаты могут быть использованы для физического обоснования перспективных режимов записи микрооптических элементов в объеме прозрачных твёрдых диэлектриков под действием ультракоротких лазерных импульсов.

С применением установленных перспективных режимов записи двулучепреломляющих микротреков были созданы оптические элементы, включая диэлектрическое зеркало и брэгговский отражатель. Также были изготовлены полуволновая пластинка, поляризационная дифракционная решётка и дисперсионные поляризационные фильтры.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Предложено и апробировано применение метода конфокальной фотолюминесцентной сканирующей микроскопии для измерения пространственных размеров двулучепреломляющих микротреков, сформированных под действием ультракоротких лазерных импульсов (0,3-3,8 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК-диапазона (1030 нм) в объеме прозрачных твёрдых диэлектриков, неразрушающим способом.

2. Величина фазового сдвига в микротреках, записанных в плавленом кварце сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,45), увеличивается соразмерно светимости полосы фотолюминесценции немостиковых кислородных дырочных центров в диапазоне 500-850 нм до достижения лазерным излучением пороговой плотности энергии  $\approx 15 \pm 1$  Дж/см<sup>2</sup>, связанной с трансформацией структуры микротреков.

3. Величина фазового сдвига в микротреках, записанных в плавленом кварце сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,25), растёт при фиксированной плотности энергии импульса с увеличением частоты следования лазерных импульсов от 25 кГц до 2 МГц до порогового значения ( $\leq 560$  кГц), связанного с локальным кумулятивным тепловым разрушением материала.

4. Величина светимости фотолюминесценции немоستيковых кислородных дырочных центров в микротреках, записанных в плавленом кварце сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,25), уменьшается при превышении порогового значения частоты следования импульсов ( $\geq 560$  кГц), связанного с локальным кумулятивным тепловым разрушением материала.

### **Методология и методы исследования**

Микротреки были записаны с помощью экспериментальной установки на основе волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1030 нм (515 нм вторая гармоника) и длительностью импульсов от 0,3 до 10 пс. Излучение фокусировалось в образцах микрообъективами с различными числовыми апертурами NA в диапазоне 0,25-0,65. Для исследования микротреков применялся поляризационный микроскоп Thorlabs с использованием автоматизированной системы измерения двулучепреломления. Система позволяет измерять фазовый сдвиг до  $180^{\circ}$  и азимут до  $90^{\circ}$ . Визуализация линейных последовательностей двулучепреломляющих микротреков проводилась с помощью атомно-силового и сканирующей электронной микроскопа после разрезания и полировки образцов алмазной пилой. Исследования фотолюминесценции проводились с применением сканирующего конфокального лазерного микроскопа-спектрометра Confotec MR350 (источник — лазер с длиной волны 532 нм).

## **Личный вклад**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Цели работы были определены научным руководителем, доктором физико-математических наук Кудряшовым Сергеем Ивановичем, и достигнуты совместно с автором.

## **Достоверность результатов**

Результаты, представленные в диссертационной работе, подтверждаются воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных с применением надёжных и отработанных методов. Эксперименты были проведены с использованием современного оборудования. Теоретические модели находятся в хорошем согласии с полученными экспериментальными данными.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 147 наименований. Объем диссертации составляет 155 страниц, включая 87 рисунков.

## **Апробация работы и публикации**

Результаты работы были лично представлены автором на одиннадцати всероссийских и международных конференциях: IV Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2020, Москва; V Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2021, Москва; VI Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2022, Москва; VII Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2023, Москва; Международная конференция «Физика конденсированных состояний -2021», Черноголовка; IX Всероссийская



научная молодежная школа-конференция «Химия, физика, биология: пути интеграции», 2022, Москва; Международная конференция «Fundamentals of Laser Assisted Micro-and Nanotechnologies» (FLAMN - 22), 2022, Санкт-Петербург; XX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, 2022, Самара; XXI Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, 2023, Самара; XIX Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, 2023, Иркутск; XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», 2024, Москва.

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 статьях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также 10 материалах конференций, библиографические данные которых приведены на стр. 23-28.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты его научная новизна и практическая значимость. Представлен краткий обзор истории исследования взаимодействия лазерного излучения с прозрачными твёрдыми диэлектриками, а также рассмотрены перспективные направления и потенциальные области применения модификаций, возникающих в результате воздействия лазерного излучения на объём прозрачных твёрдых диэлектриков.

**В первой главе** подробно рассмотрены процессы, связанные с формированием двулучепреломляющих микротреков под действием УКИ в прозрачных твёрдых диэлектриках. Особое внимание было уделено анализу влияния параметров индуцирующих лазерных импульсов на возникновение

дефектов в таких материалах. Описано влияние условий фокусировки на процесс формирования лазерно-индуцированных дефектов. Рассмотрены основные типы структур с двулучепреломлением, которые образуются в результате воздействия лазерных импульсов внутри прозрачных твёрдых диэлектрических материалов. Охарактеризованы точечные дефекты (центры окраски), возникающие в плавленом кварце под воздействием ультракоротких импульсов. Эти точечные дефекты снижают пропускание двулучепреломляющих микротрекков. Представлены предполагаемые механизмы формирования структур с двулучепреломлением и субволновой подструктурой. Изложены характеристики структур с двулучепреломлением, а также их возможное применение для создания оптических элементов, оптической памяти и фотонных элементов.

В первой части **второй главы** рассказывается о материалах, которые использовались для лазерной записи в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков, приводятся аргументы в пользу выбора этих материалов.

В следующей части работы описаны экспериментальные установки, которые использовались для лазерной записи и анализа полученных двулучепреломляющих микротрекков с помощью поляризметрических систем (рис. 1). В данном случае измерялись значения фазового сдвига  $\varphi$ , которые связаны с оптической разностью хода  $\Gamma$ , следующим соотношением  $\Gamma = \varphi \times \lambda/2\pi$ . Зная оптическую разность хода  $\Gamma$  и длину  $L$ , которые связаны соотношением  $\Delta n = \Gamma/L$ , можно оценить величину двулучепреломления  $\Delta n$ , где  $\Delta n = |n_o - n_e|$ , а  $n_o$  и  $n_e$  показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волны.

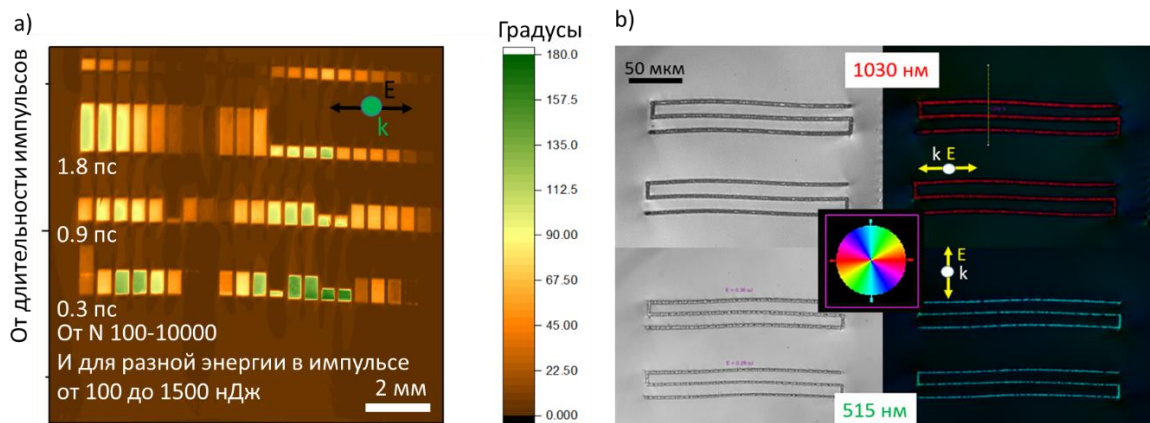


Рис. 1. а) Псевдоцветовая карта значений фазового сдвига в микротреках, записанных в плавленом кварце (на длине волны 633 нм). б) Визуализация направления медленной оси (псевдоцветовая карта) в микротреках записанных во фториде кальция (на длине волны 546 нм).

В работе анализируется распространение УКИ в прозрачных твёрдых диэлектриках, чтобы выявить нелинейные эффекты, например, самофокусировка, которая может проявляться и влиять на процесс лазерной записи двулучепреломляющих микротреков. Определены пороговые значения энергии импульса, при которых начинается асимметричное удлинение люминесцирующего плазменного канала в направлении, противоположном распространению лазерного излучения относительно фокальной области. Эти пороговые величины зависят от длительности и энергии импульсов в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков.

**В третьей главе** были проведены исследования двулучепреломляющих микротреков. Получены двулучепреломляющие микротреки под действием УКИ в различных материалах: фториде кальция, нанопористом плавленом кварце, плавленом кварце и ниобате лития. В результате исследований были получены данные о величинах фазового сдвига двулучепреломляющих микротреков, которые варьируются от 5 до  $180^{\circ}$ . Измерены длины микротреков — это позволило оценить величину наведённой величины двулучепреломления микротреков, которая составляет порядка  $\Delta n \sim 10^{-3}-10^{-4}$ .

Для исследования фотолюминесценции в двулучепреломляющих микротреках использовался конфокальный сканирующий микроскоп. Конфокальная схема позволяет собирать сигнал только из фокуса, что обеспечивает высокое пространственное разрешение при исследовании микротреков (рис. 2а). При сравнении спектров фотолюминесценции исходного плавленого кварца и спектров в области формирования двулучепреломляющих микротреков было обнаружено появление фотолюминесцентного пика в диапазоне 550-850 нм (рис. 2б). Этот пик связан с возникновением кислородного междоузлия, которое образуется при разрыве нестиковых связей кислорода и кремния (NBOHC). Для дальнейшего анализа была выбрана полоса на спектре фотолюминесценции в диапазоне от 600 до 750 нм.

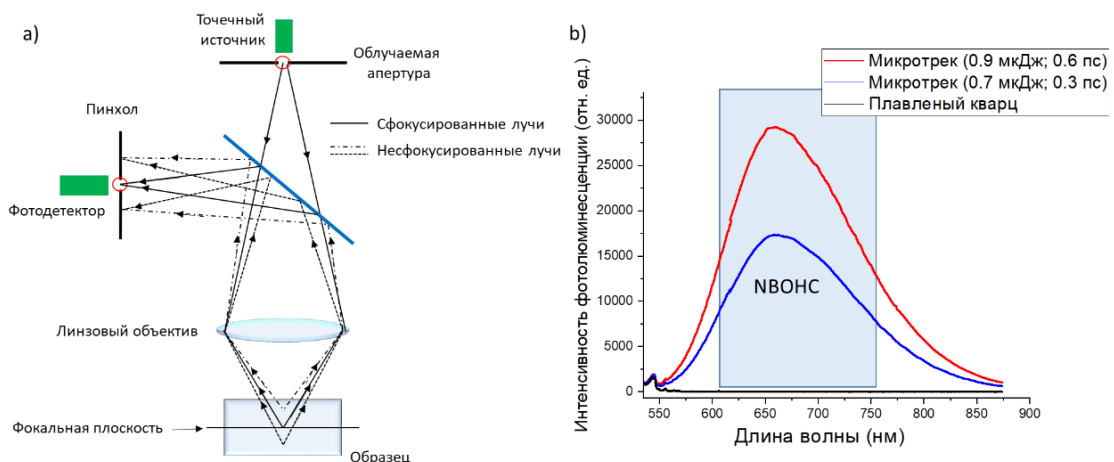


Рис. 2. а) Схема работы конфокального сканирующего микроскопа. б) Спектры фотолюминесценции двулучепреломляющих микротреков ( $\lambda = 1030$  нм,  $100$  кГц,  $\tau = 0,3$  пс,  $NA = 0,45$ ) в плавленом кварце.

Зависимость интенсивности интеграла полосы 600-750 нм фотолюминесценции от координаты вдоль микротрека свидетельствует, что с изменением энергии в импульсе происходит перераспределение интенсивности фотолюминесценции точечных дефектов от координаты (рис.

3а). Размеры фотолюминесцирующей области вдоль микротрека по поперечному сечению соотносятся с размерами изображений двулучепреломляющих микротреков и монотонно увеличиваются с ростом энергии в импульсе (рис. 3с). Изображения продольного сечения микротреков получены с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 3б). Это позволяет неразрушающим способом по сигналу фотолюминесценции определить пространственные размеры двулучепреломляющих микротреков. Зависимости сигнала фотолюминесценции от координаты вдоль микротреков были получены и для других материалов для измерения размеров микротреков.

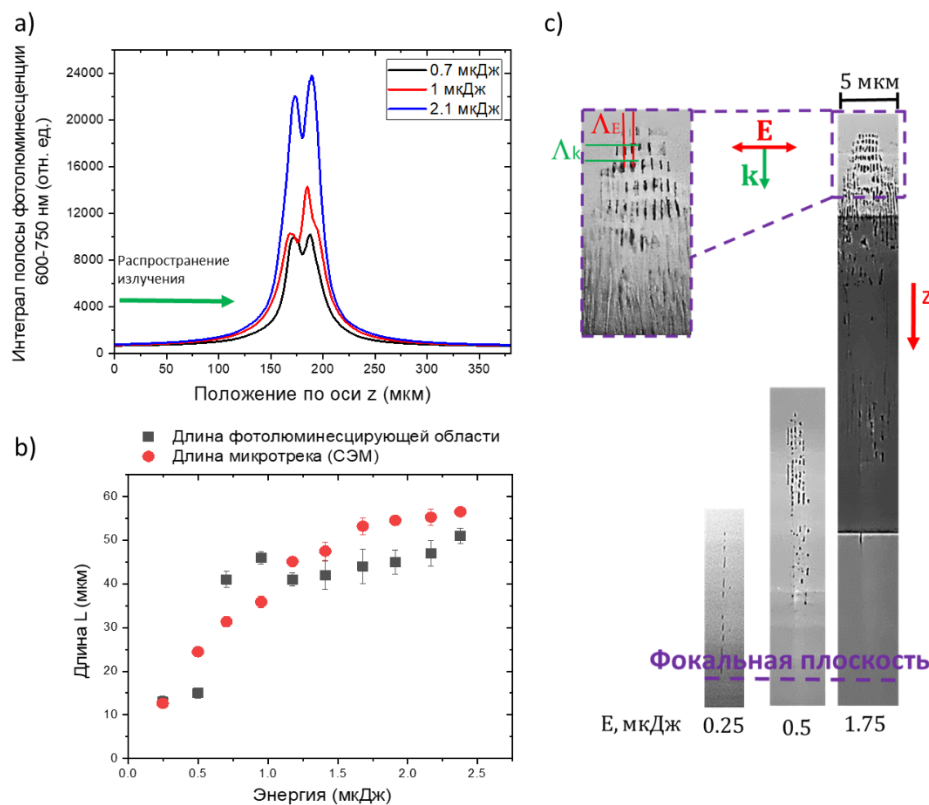


Рис. 3. а) Зависимость интеграла полосы 600-750 нм спектра фотолюминесценции от координаты вдоль микротрека (0,3 пс, 100 кГц, 1030 нм, NA=0,45) в плавленом кварце. б) Изображения двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце, визуализированные с помощью СЭМ. в) Зависимости длин микротреков полученные с помощью СЭМ и фотолюминесценции (по поперечному сечению).

Помимо этого, было проведено сравнение не только размеров двулучепреломляющего микротрека и его фотолюминесцентного образа, но и интегральных значений фазового сдвига и светимости фотолюминесценции NВОНС-центра. В ходе исследования была обнаружена прямая зависимость между оптической разностью хода и светимостью фотолюминесценции  $S = \int_0^L I_{pl}(l)dl$  дефектов NВОНС в двулучепреломляющих микротреках (рис. 4b), которая представляет собой интеграл от спектров на рис. 4а. Эта зависимость сохраняется до достижения пороговой плотности энергии  $\approx 15 \pm 1$  Дж/см<sup>2</sup>, что связано с трансформацией структуры.

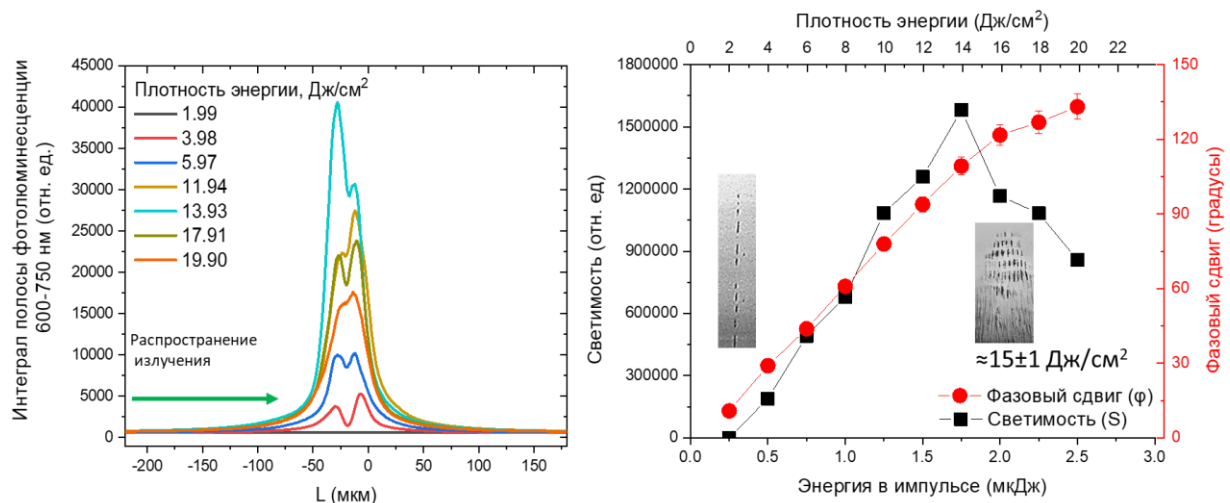


Рис. 4. а) Зависимость интеграла полосы 600-750 нм спектра фотолюминесценции от координаты вдоль микротрека. б) Зависимости светимости (левая шкала) и величины оптической разности хода в микротреках (правая шкала).

В процессе формирования двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце с использованием сфокусированных УКИ ближнего инфракрасного диапазона частота следования лазерных импульсов выступает значимым параметром наряду с плотностью энергии импульса. Становится существенным кумулятивный эффект при достижении пороговой частоты следования импульсов. Этот эффект приводит к локальному разрушению

материала, при этом плотность энергия импульса остаётся фиксированной. Оптическая микроскопия позволяет увидеть, что при частоте следования лазерных импульсов 1–2 МГц в материале появляются микронеоднородности. В результате, при скрещенных поляризаторах материал перестаёт проявлять двулучепреломляющие свойства (рис. 5а). В то же время при частоте следования импульсов 560 кГц формируется однородная область, состоящая из микротреков. Это подтверждается визуализацией двулучепреломляющих микротреков в сечении (рис. 5б) с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

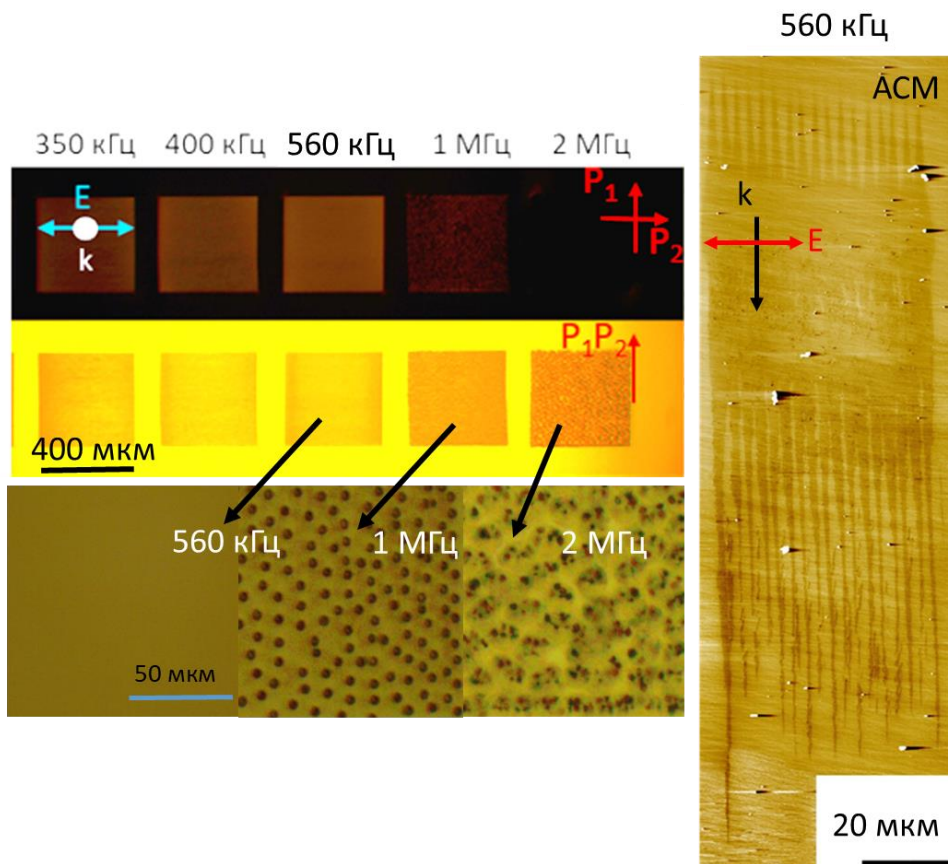


Рис. 5. а) Оптические изображения микрообластей в плавленом кварце ( $NA=0,25$ ;  $0,3$  пс;  $1$  мкДж;  $1030$  нм;  $300$  мкм/с). б) Изображения двулучепреломляющих микротреков в сечении, визуализированные с помощью АСМ.

На рисунке ба видно, что при достижении частоты следования импульсов в 560 кГц происходит уменьшение величины фазового сдвига

двулучепреломляющих микротреков. Это может быть связано с кумулятивным эффектом или эффектом накопления тепла, который ранее изучался при записи волноводов [11,12]. Чтобы оценить время распространения тепла, можно использовать формулу  $\tau_D \approx R^2/\alpha$ , где коэффициент температуропроводности плавленого кварца равен примерно  $\alpha \approx 0,01 \text{ см}^2$ , а радиус фокального пятна  $R = 2 \text{ мкм}$ . В результате получаем, что время распространения тепла составляет около 4 мкс. Если интервал импульса значительно меньше времени распространения тепла, то в режиме многоимпульсного облучения температура фокальной области будет увеличиваться. Таким образом, формирование двулучепреломляющих микротреков ограничивается сверху кумулятивным эффектом теплового разрушения, при этом значительно уменьшается их пропускание (рис. 6б).

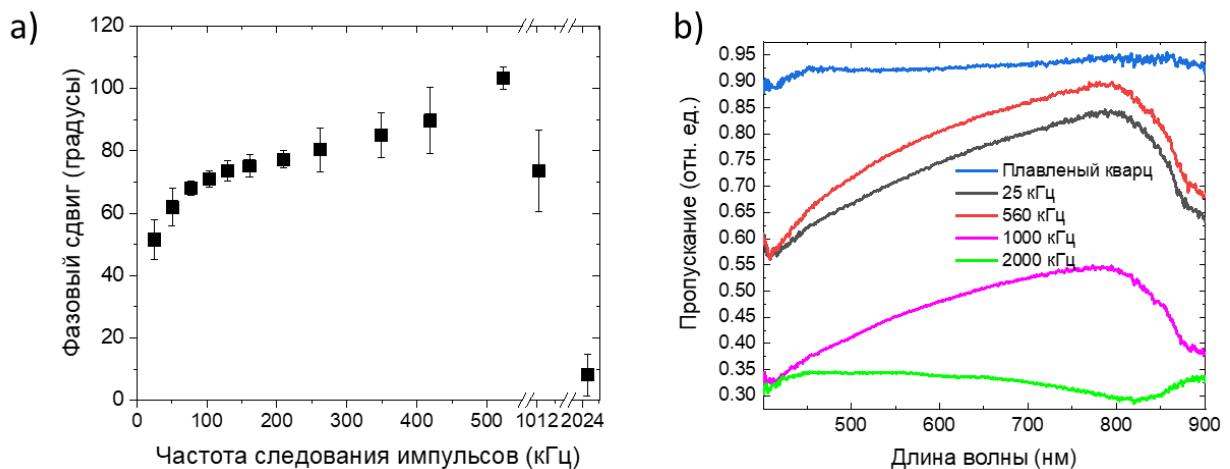


Рис. 6. Параметры двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце ( $NA=0,25$ ;  $0,3 \text{ пс}$ ;  $1 \text{ мкДж}$ ;  $1030 \text{ нм}$ ;  $300 \text{ мкм/с}$ ). а) Зависимость фазового сдвига двулучепреломляющих микротреков от частоты следования лазерных импульсов. б) Спектры пропускания двулучепреломляющих микротреков записанных при различных частотах следования импульсов.

Одновременно, с ростом частоты следования УКИ изменяется светимость фотолюминесценции двулучепреломляющих микротреков в



плавленом кварце. Для того чтобы оценить светимость ( $S$ ) дефектов NBOHC в двулучепреломляющих микротреках, были проведены измерения интенсивности полосы фотолюминесценции в диапазоне 600-750 нм вдоль микротрека. Эти данные были получены путём интегрирования спектров, представленных на рисунке 7а. В результате исследования были определены зависимости светимости дефектов NBOHC от частоты следования импульсов и экспозиции (рис. 7б). Аналогичные зависимости были также получены для фазового сдвига.

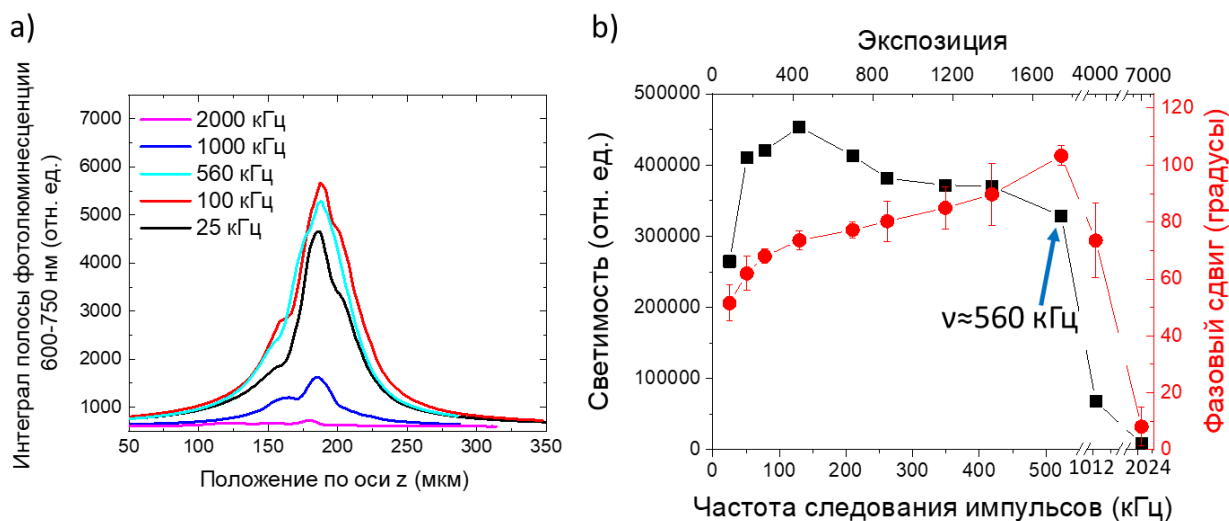


Рис. 7. а) Интенсивность полосы фотолюминесценции (600-750 нм) – интеграл, вдоль двулучепреломляющих микротреков. б) Зависимость светимости микротреков от частоты следования импульсов и экспозиции (левая шкала); зависимость фазового сдвига микротреков от частоты следования импульсов и экспозиции (правая шкала).

В процессе исследования было установлено, что при формировании двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце увеличение частоты следования УКИ от 25 кГц до 2 МГц приводит к пропорциональному увеличению фазового сдвига и светимости дефектов (NBOHC). Эта тенденция сохраняется до тех пор, пока не будет превышено пороговое значение частоты следования импульсов ( $\geq 560$  кГц). Так, при достижении частоты следования 1

МГц наблюдается значительное снижение светимости фотолюминесценции точечных дефектов NBOHC. Это связано с локальным кумулятивным тепловым разрушением материала.

Помимо исследования параметров формируемых микротреков, был предложен возможный механизм формирования продольной подструктуры  $\Lambda_k$  двулучепреломляющего микротрека. Когда лазерные импульсы отражаются вблизи фокальной области от объёмной околокритической плазмы, перед плазмой вдоль оптической оси образуется стоячая электромагнитная волна. Эта волна фиксируется в материале в виде массивов плоскостей с ориентацией штрихов локальной модификации материала и его показателя преломления вдоль волнового вектора. Анализ и моделирование подтверждают фотонное происхождение продольных подструктур  $\lambda/(2n_k)$ , которые проявляются в виде мгновенных электромагнитных и соответствующих им ионизационных стоячих волн в предфокальной области из-за интерференции падающей и отражённой плазмой частей лазерного импульса (рис. 8). При этом учитывается отрицательный вклад в показатель преломления от электронно-дырочной плазмы в предфокальной области интерференции, где  $n_k$  — показатель преломления вдоль волнового вектора.

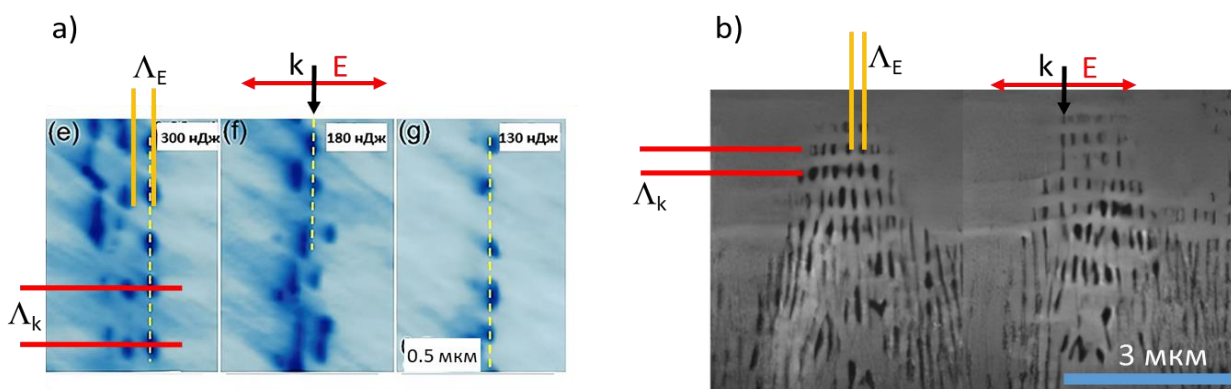


Рис. 8. а) АСМ-изображения сечений микротреков в ниобате лития, записанных при различных энергиях импульса. б) СЭМ- изображения сечений микротреков в плавленом кварце.

Кроме того, предложен возможный механизм формирования поперечной субволновой подструктуры  $\Lambda_E$  двулучепреломляющего микротрека  $\lambda/(2n_E^2)$ . Когда образуется стоячая волна, формируется продольный массив листов плазмы. В этих листах тем же самым лазерным импульсом могут возбуждаться плазмон-поляритоны. Это приводит к модификации материала на наномасштабах, где  $n_E$  — показатель преломления вдоль вектора напряжённости электрического поля.

Обнаружено, что независимо от материала направление формирования субволновой подструктуры двулучепреломляющего микротрека, а, следовательно – и направление медленной оси – определяется направлением индуцирующего поля электрической напряжённости.

Эти и другие исследования, дополненные моделированием электродинамики, позволяют лучше разобраться в микроскопических процессах, которые лежат в основе формирования объёмных двулучепреломляющих микротреков в прозрачных твёрдых диэлектриках под воздействием УКИ.

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментов по созданию оптических элементов на основе двулучепреломляющих микротреков с использованием установленных режимов записи в объёме плавленого кварца. Эти элементы формируются с учётом фазового сдвига и азимута двулучепреломляющих микротреков.

Приведены оптические изображения структуры (рис. 9), сформированной в плавленом кварце, размером 5 на 5 мм. В скрещенных и параллельных поляризаторах структура окрашивается в цвета двулучепреломления. Это многослойная фазовая структура. Цвета двулучепреломления достигаются за счёт варьирования числа слоёв. Слои аддитивно суммируются, параметры при записи слоёв были одинаковые.

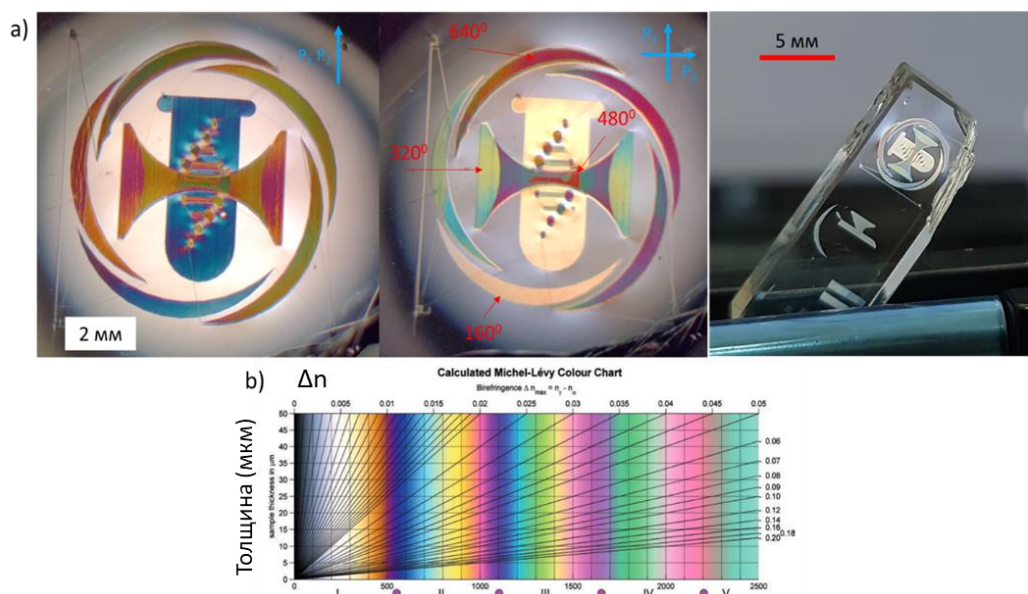


Рис. 9. а) Оптические снимки, полученные с использованием скрещенных и параллельных поляризаторов (рисунок в цветах двулучепреломления). б) Шкала цветов двулучепреломления, которая показывает зависимость цвета от толщины образца и величины двулучепреломления [13].

В частности, в объёме плавленного кварца были созданы дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лيو (рис. 10), которые работают в диапазоне от 500 до 1000 нм. Регулируя количество слоёв и параметры лазерной записи, можно создавать фильтры для определённого спектрального диапазона (рис. 11).

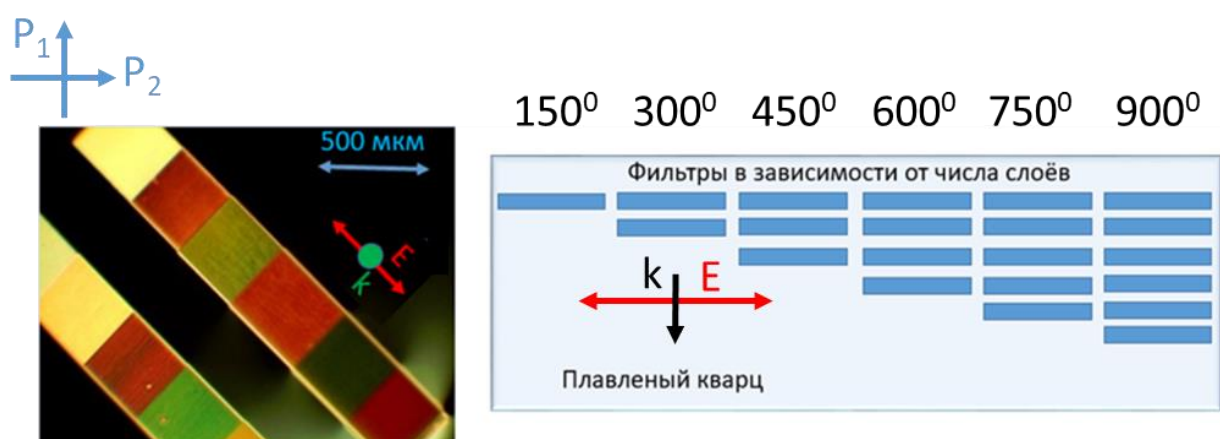


Рис. 10. Изображение фильтров в скрещенных поляризаторах. Два набора фильтров, записанных в объёме плавленного кварца, 250 кГц (сверху) и 500 кГц (снизу), (515 нм, 0,3 пс, 1,5 мкДж, скорость сканирования 0,5 мм/с, NA=0,25). Длина/ширина областей – 3x0,5 мм. На рисунке справа показана геометрия записи фильтров, вид с торца.

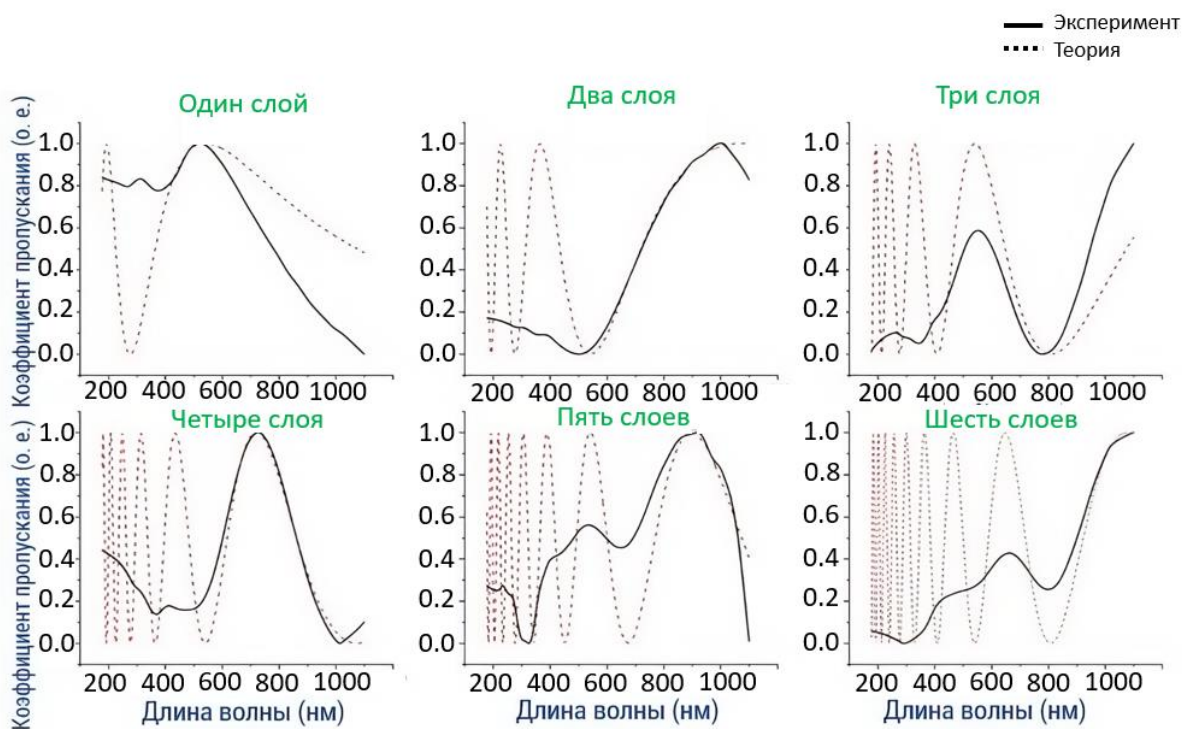


Рис. 11. Расчетные (пунктир) и экспериментальные (сплошная) спектры пропускания в зависимости от длины волны  $T(\lambda, i)$  для поляризационно-интерференционных фильтров с различным количеством слоев.

Также показана возможность записи хроматической полуволновой пластинки с помощью УКИ в объёме плавленного кварца для длины волны 633 нм (рис. 12). Продемонстрирована возможность создания полуволновой пластинки как в один слой, так и с использованием многослойной записи.

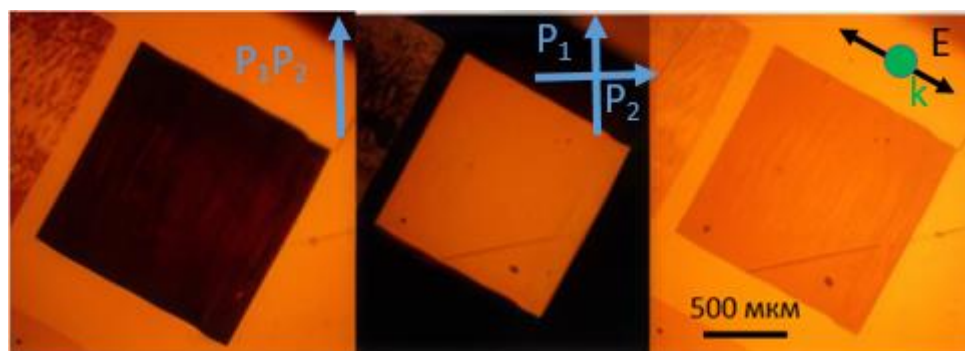


Рис. 12. Оптические снимки полуволновой пластинки: а) параллельные поляризаторы; б) скрещенные поляризаторы; в) без поляризаторов.

**В заключении** представлены ключевые результаты диссертационной работы.

1. На основе метода сканирующей конфокальной фотолюминесцентной микроспектроскопии предложен способ измерения пространственных размеров двулучепреломляющих микротреков, сформированных под действием УКИ (0,3-3,8 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК-диапазона (1030 нм) в объеме прозрачных твердых диэлектриков. Длина области (10-60 мкм), люминесцирующей при возбуждении лазером на длине волны 532 нм, количественно соотносится с размерами изображений двулучепреломляющих микротреков, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии.

2. Под действием сфокусированных УКИ ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,45) в объеме плавленого кварца формируются двулучепреломляющие микротреки, содержащие немостиковые кислородные дырочные центры с полосой фотолюминесценции в диапазоне 500-850 нм при возбуждении лазером на длине волны 532 нм. Сопоставление величин фазового сдвига и светимости (диапазон – 600-750 нм) показывает, что величина фазового сдвига увеличивается соразмерно светимости до достижения пороговой плотности энергии  $\approx 15 \pm 1$  Дж/см<sup>2</sup> для двулучепреломляющих микротреков. Количественно охарактеризована величина двулучепреломления в микротреках  $\Delta n \approx 10^{-3}$ .

3. С ростом частоты следования сфокусированных УКИ ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,25) от 25 кГц до 2 МГц с фиксированной энергией импульса 1 мкДж при формировании двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце усиливается кумулятивный тепловой эффект, приводящий к локальному разрушению материала.

4. С ростом частоты следования сфокусированных УКИ ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,25) лазерных импульсов от 25 кГц до 2

МГц с фиксированной плотностью энергии величина светимости немостиковых кислородных дырочных центров в двулучепреломляющих микротреках, формируемых в объёме плавленного кварца, при возбуждении лазером на длине волны 532 нм уменьшается, а при частоте следования импульсов 1 МГц и более светимость точечных дефектов резко уменьшается вследствие кумулятивного теплового эффекта, приводящего к локальному разрушению материала.

5. С использованием установленных перспективных режимов записи двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленного кварца сфокусированными ( $NA=0,25$ ) УКИ с длиной волны 515 нм и длительностью импульса 0,3 пс впервые изготовлены оптические элементы: хроматическая полуволновая пластинка, дисперсионные поляризационные фильтры (ДПФ) Шольца и Лио, поляризационная дифракционная решётка, диэлектрическое зеркало и брэгговский отражатель.

### **Публикации автора по теме диссертации**

A1. Объемное микроstructuring силикатного стекла фемтосекундным лазерным излучением / **А. Е. Рупасов**, П. А. Данилов, М. П. Смаев, М. С. Ковалев, А. С. Золотько, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, № 7. – С. 918-922. – DOI 10.21883/OS.2020.07.49564.48-20.

A2. Генерация массива двулучепреломляющих нанорешеток в объеме флюорита под действием ультракоротких лазерных импульсов варьируемой длительности / С. И. Кудряшов, П. А. Данилов, М. П. Смаев, **А. Е. Рупасов**, А. С. Золотько, А. А. Ионин, Р. А. Заколдаев // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113, № 7-8(4). – С. 495-500. – DOI 10.31857/S1234567821080012.

A3. Формирование и оптические свойства нанорешеток на поверхности

фторида кальция, генерируемых при фемтосекундном лазерном воздействии / **А. Е. Рупасов**, П. А. Данилов, А. А. Ионин, Н. А. Смирнов, С. И. Кудряшов, А. А. Руденко, А. Н. Путилин, Р. А. Заколдаев // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 8. – С. 1074-1078. – DOI 10.21883/OS.2021.08.51204.1998-21.

A4. Birefringent microstructures in bulk fluorite produced by ultrafast pulsewidth-dependent laser inscription / S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, **А. Е. Рупасов**, M. P. Smayev, A. N. Kirichenko, N. A. Smirnov, A. A. Ionin, A. S. Zolot'ko, R. A. Zakoldaev // Applied Surface Science. – 2021. – Vol. 568. – P. 150877. – DOI 10.1016/j.apsusc.2021.150877.

A5. Формирование нанорешеток на поверхности нанопористого стекла под действием фемтосекундных лазерных импульсов видимого диапазона / П. А. Данилов, С. И. Кудряшов, **А. Е. Рупасов**, Н. А. Смирнов, Е. А. Олейничук, А. С. Ривнюк, Р. А. Заколдаев // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113, № 9-10(5). – С. 650-654. – DOI 10.31857/S1234567821100037.

A6. Самоорганизующиеся субволновые периодические решетки на поверхности кварцевого стекла / С. А. Бибичева, **А. Е. Рупасов**, П. А. Данилов, А. А. Ионин, Н. А. Смирнов, С. И. Кудряшов, С. Н. Шельгина, Р. А. Заколдаев // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130, № 4. – С. 555-558. – DOI 10.21883/OS.2022.04.52272.58-21.

A7. Direct laser writing regimes for bulk inscription of polarization-based spectral microfilters and fabrication of microfluidic bio/chemosensor in bulk fused silica / S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, **А. Е. Рупасов**, M. P. Smayev, N. A. Smirnov, V. V. Kesaev, A. N. Putilin, M. S. Kovalev, R. A. Zakoldaev, S. A. Gonchukov // Laser Physics Letters. – 2022. – Vol. 19, No. 6. – P. 065602. – DOI 10.1088/1612-202X/ac6806.

A8. Hierarchical Multi-Scale Coupled Periodical Photonic and Plasmonic Nanopatterns Inscribed by Femtosecond Laser Pulses in Lithium Niobate / S. Kudryashov, **А. Рупасов**, M. Kosobokov, A. Akhmatkhanov, G. Krasin, P. Danilov, B. Lisjikh, A. Abramov, E. Greshnyakov, E. Kuzmin, M. Kovalev, V. Shur



// *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 23. – P. 4303. – DOI 10.3390/nano12234303.

A9. Nanohydrodynamic Local Compaction and Nanoplasmonic Form-Birefringence Inscription by Ultrashort Laser Pulses in Nanoporous Fused Silica / S. Kudryashov, **A. Rupasov**, R. Zakoldaev, M. Smayev, A. Kuchmizhak, A. Zolot'ko, M. Kosobokov, A. Akhmatkhanov, V. Shur // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 20. – P. 3613. – DOI 10.3390/nano12203613.

A10. Multi-Parametric Birefringence Control in Ultrashort-Pulse Laser-Inscribed Nanolattices in Fluorite / S. Kudryashov, **A. Rupasov**, M. Smayev, P. Danilov, E. Kuzmin, I. Mushkarina, A. Gorevoy, A. Bogatskaya, A. Zolot'ko // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 1133. – DOI 10.3390/nano13061133.

A11. Прямая фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих структур с высоким пропусканием в плавленом кварце / Н. И. Буслеев, **А. Е. Рупасов**, В. В. Кесаев, Н. А. Смирнов, С. И. Кудряшов, Р. А. Заколдаев // *Оптика и спектроскопия*. – 2023. – Т. 131, № 2. – С. 170-173. – DOI 10.21883/OS.2023.02.54999.3-23.

A12. Запись двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленого кварца / **А. Е. Рупасов**, И. В. Гриценко, Н. И. Буслеев, Г. К. Красин, Ю. С. Гулина, А. В. Богацкая, С. И. Кудряшов // *Оптика и спектроскопия*. – 2024. – Т. 132, № 1. – С. 83-87. – DOI 10.61011/OS.2024.01.57555.12-24

A13. Взаимосвязь параметров двулучепреломления и иерархической пространственной структуры микротреков, записанных в объёме плавленого кварца ультракороткими лазерными импульсами / Ю. С. Гулина, **А. Е. Рупасов**, Г. К. Красин, Н. И. Буслеев, И. В. Гриценко, А. В. Богацкая, С. И. Кудряшов // *Письма в ЖЭТФ*. – 2024. Т. 119, № 9. – С. 638-644. – DOI: 10.31857/S1234567824090027

**Публикации в материалах российских и международных научных конференций:**

C1. Rupasov, A. E. Femtosecond-laser microstructuring in transparent materials / A. E. Rupasov, P. A. Danilov and S. I. Kudryashov // Сборник тезисов IV Международной конференции по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2020, Москва, 28 сентября по 2 октября 2020 г. – Москва, Россия 2020г. – С 188.

C2. Generation of birefringent nanogratings in the bulk of transparent dielectrics under the action of ultrashort laser pulses of variable duration/ А. Е. Рупасов, П. А. Данилов, С. И. Кудряшов // Физика конденсированных состояний: Тезисы II Международной конференции ФКС-2021, посвященной 90-летию со дня рождения академика Ю. А. Осипьяна (1931-2008), Черноголовка, 31 мая – 04 2021 года. – Черноголовка: Институт физики твердого тела РАН, 2021. – Р. 230-231. – DOI 10.26201/ISSP.2020/FKS-2.091.

C3. Direct femtosecond laser recording in the volume of transparent dielectrics / A. E. Rupasov, P. A. Danilov, S. I. Kudryashov // Сборник тезисов V Международной конференции по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2021, Москва, 4 – 8 октября 2021 г. – Москва, Россия 2021г. – С 114.

C4. Лазерная генерация периодических наноструктур в объеме и на поверхности диэлектриков / А. Е. Рупасов, П. А. Данилов, Н. А. Смирнов, С. И. Кудряшов, Р. А. Заколдаев // Химия, физика, биология: пути интеграции: Сборник тезисов докладов IX Всероссийской научной молодежной школы-конференции, Москва, 20–22 апреля 2022 года. – Москва: Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 2022. – С. 144.

C5. Laser induced of periodic nanostructures in the bulk and on the surface of

dielectrics / A. E. Rupasov, P. A. Danilov, N. A. Smirnov, S. I. Kudryashov, R. A. Zakoldaev // Сборник тезисов Международной конференции «Fundamentals of Laser Assisted Micro-and Nanotechnologies» (FLAMN - 22), г. Санкт-Петербург, 27 – 30 июня 2022 г. – Санкт-Петербург, Россия 2022 г. – С 146.

C6. Laser generation of periodic nanostructures in the bulk and on the surface of dielectrics / A. E. Rupasov, P. A. Danilov, N. A. Smirnov, S. I. Kudryashov, R. A. Zakoldaev // Сборник тезисов VI Международной конференции по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2022, Москва, 3 – 7 октября 2022 г. – Москва, Россия 2022г. – С 152.

C7. Фемтосекундная Лазерная 3Д-фабрикация интегральных оптических устройств в объёме прозрачных диэлектриков / А. Е. Рупасов, С. И. Кудряшов, В. В. Кесаев, Р. А. Заколдаев // XX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, посвященный 100-летию со дня рождения Н.Г. Басова: Сборник трудов конференции, Самара, 08–12 ноября 2022 года. – Москва: Издательство "Тривант", 2022. – С. 157-164.

C8. Рупасов, А. Е. Прямая лазерная запись в объеме прозрачных диэлектриков / А. Е. Рупасов, С. И. Кудряшов, А. В. Богацкая // Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, 03–07 июля 2023 года. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2023. – С. 170.

C9. Rupasov, A. E. Direct laser writing in the volume of transparent dielectrics / A. E. Rupasov, P. A. Danilov and S. I. Kudryashov // Сборник тезисов VII Международной конференции по сверхбыстрым оптическим явлениям – UltrafastLight-2023, Москва, 2 по 4 октября 2023 г. – Москва, Россия 2023г. – С 139.

C10. Рупасов, А.Е. Формирование иерархических двулучепреломляющих микротроек и запись фазовых оптических элементов

в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами / А.Е. Рупасов, С.И. Кудряшов, А.В. Богацкая // XXI Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 300-летию РАН, Самара, 14-18 ноября 2023 г. – Москва: Издательство "Тривант", 2023. – С. 127-128.

### **Список цитируемой литературы**

1. 100-Layer Error-Free 5D Optical Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass / H. Wang, Y. Lei, L. Wang [et al.]. // *Laser & Photonics Reviews*. – 2022. – Vol. 16, No. 4. – P. 2100563. – DOI 10.1002/lpor.202100563.

2. 3D Imprinting of Voxel-Level Structural Colors in Lithium Niobate Crystal / Z. Wang, B. Zhang, Z. Wang [et al.] // *Advanced Materials*. – 2023. – Vol. 35, No. 47. – P. 2303256. – DOI 10.1002/adma.202303256.

3. Multi-Dimensional Shingled Optical Recording by Nanostructuring in Glass / J. Gao, X. Zhao, Z. Yan [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2023. – P. 2306870. – DOI 10.1002/adfm.202306870.

4. Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass / Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P. G. Kazansky [et al.]. // *Advanced Materials*. – 2010. – Vol. 22, No. 36. – P. 4039-4043. – DOI 10.1002/adma.201000921.

5. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass / M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, T. Gertus. // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 98, No. 20. – P. 201101. – DOI 10.1063/1.3590716.

6. Direct laser writing regimes for bulk inscription of polarization-based spectral microfilters and fabrication of microfluidic bio/chemosensor in bulk fused silica / S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, A. E. Rupasov [et al.]. // *Laser Physics Letters*. – 2022. – Vol. 19, No. 6. – P. 065602. – DOI 10.1088/1612-202x/ac6806.

7. Embedded anisotropic microreflectors by femtosecond-laser nanomachining / J. D. Mills, P. G. Kazansky, E. Bricchi, J. J. Baumberg. // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 81, No. 2. – P. 196-198. – DOI 10.1063/1.1492004.

8. Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining / F. Flamini, L. Magrini, A. S. Rab [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – Vol. 4, No. 11. – P. 354-354. – DOI 10.1038/lsa.2015.127.

9. Femtosecond laser microstructuring: an enabling tool for optofluidic lab-on-chips / R. Osellame, H. Hoekstra, G. Cerullo, M. Pollnau // Laser & Photonics Reviews. – 2011. – Vol. 5, No. 3. – P. 442-463. – DOI 10.1002/lpor.201000031.

10. Stoian R. Ultrafast Laser Volume Nanostructuring of Transparent Materials: From Nanophotonics to Nanomechanics / R. Stoian, C. D'amico, Y. Bellouard, G. Cheng //Ultrafast Laser Nanostructuring: The Pursuit of Extreme Scales. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – P. 1053-1084.

11. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate / S. M. Eaton, H. Zhang, P. R. Herman [et al.] // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, No. 12. – P. 4708-4716. – DOI 10.1364/opex.13.004708.

12. Gattass, R. R. Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates / R. R. Gattass, L. R. Cerami, E. Mazur. // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, No. 12. – P. 5279-5284. – DOI 10.1364/oe.14.005279.

13. Sørensen B. E. A revised Michel-Lévy interference colour chart based on first-principles calculations / B. E. Sørensen // European Journal of Mineralogy. – 2013. – Vol. 25, No. 1. – P. 5-10. – DOI 10.1127/0935-1221/2013/0025-2252.