

На правах рукописи



Ганин Даниил Валентинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛИРУЕМОГО
ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР
ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ
В ОБЪЕМ ПРОЗРАЧНОГО МАТЕРИАЛА**

01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2018

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Варгапетов Сергей Каренович

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ЦФП ИОФ РАН

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Минаев Никита Владимирович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела атомно-молекулярной технологии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Козловский Владимир Иванович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией лазеров с катодно-лучевой накачкой Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

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

Защита диссертации состоится «21» мая 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при ИОФ РАН по адресу г. Москва 119991, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.063.03
канд. физ.-мат. наук
тел. +7(499) 503-8147

_____/Т.Б. Воляк/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Использование фемтосекундных лазерных импульсов для обработки прозрачных материалов является простым, гибким, универсальным и недорогим способом трехмерной микро- и нанообработки материалов, который не требует использования сложных фотолитографических процессов. В настоящее время фемтосекундные лазерные системы предоставляют возможность обрабатывать как поверхность материалов (абляция, отжиг, микро- и наноструктурирование), так и объем. Объемные модификации связаны в первую очередь с изменением показателя преломления, а также других параметров среды и формированием микрополостей. Формирование данных видов микромодификаций зависит как от параметров лазерной обработки, так и от свойств обрабатываемого материала. Весомыми преимуществами использования фемтосекундных лазеров в микрообработке является практически полное отсутствие повреждений, связанных с генерацией ударных волн, тепловыми эффектами, формированием расплава в окрестности пятна фокусировки лазерного луча вследствие кратковременности воздействия [1–3]. В последнее время сообщалось о различных явлениях, вызванных взаимодействием фемтосекундных лазерных импульсов с прозрачными материалами, например, о появлении механических напряжений [4,5], зависимости свойств микромодификаций от направления сканирования [6,7], возможности модификации легирующей примеси [8], формировании нанорешёток [9], миграции ионов [10], образовании нанопустот [11], карбонизации [12]. Примером важных применений индуцированных фемтосекундным лазером структур является производство фотонных и жидкостных приборов: волноводов, каплеров, оптоэлектронных систем, жидкостных каналов, био-фотонных устройств, фотонных кристаллов, систем хранения информации и других [13–16]. С тех пор как была продемонстрирована высокая точность

обработки различных биоматериалов с помощью фемтосекундных лазеров, появилась реальная возможность применять эти лазеры в офтальмологии как для коррекции кривизны роговицы [17–20], так и для операций по поводу катаракты [21,22].

Микрообработка с помощью фемтосекундных лазеров имеет несколько неоспоримых преимуществ по сравнению с другими технологиями и методами [14]. Во-первых, это возможность локального воздействия на небольшие (объемом до нескольких кубических микрометров) зоны внутри прозрачных образцов, не затрагивая прилегающие области, в том числе те, по которым распространялось излучение. Полимеры, стекла, кристаллы и биоматериалы имеют очень малое линейное поглощение для излучения ближнего ИК-диапазона, но при жесткой фокусировке луча лазера ультракоротких импульсов в них появляется огромное нелинейное поглощение [23]. Высокое нелинейное поглощение в области фокальной перетяжки объектива ведет к образованию плазменного микроканала, изменению показателя преломления Δn на оси и в окрестности микроканала и, в конечном счете, к оптическому пробое и микроразрушению материала [2,24,25]. При этом повреждения соседних областей минимальны, а зона теплового воздействия практически отсутствует. Вторым преимуществом является независимость процессов поглощения излучения от структуры материала, что дает возможность микрообработки различных прозрачных диэлектриков.

Таким образом, очевидно, что для решения ряда задач в упомянутых ранее применениях необходима точная фокусировка энергии лазерного излучения в микрообласти, лежащие в глубине обрабатываемого объекта. Однако при фемтосекундной микрообработке, форма внутренних микроразрушений (микромодификаций) может сильно отличаться от сферы и иметь вид вытянутых в направлении распространения излучения нитей, что может являться как преимуществом, так и недостатком при фемтосекундной микрообработке прозрачных материалов.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы являлось экспериментальное исследование процессов контролируемого формирования пространственных микроструктур с заданными пространственными характеристиками и разработка технологий (методик) прецизионной микрообработки при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объем некоторых прозрачных материалов.

Задачи диссертационной работы

В целях изучения механизмов контролируемого формирования микромодификаций при жесткой фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов в объем прозрачных диэлектриков были поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Исследование влияния числовой апертуры фокусирующей системы на пространственные характеристики микромодификаций, формируемых единичными фемтосекундными импульсами.
2. Исследование влияния эффекта самофокусировки на пространственные характеристики микромодификаций, создаваемых единичными фемтосекундными импульсами.
3. Определение параметров обработки и ключевых зависимостей, позволяющих контролировать формирование внутриобъемные микромодификации с заданными пространственными характеристиками.
4. Исследование процессов внутриобъемной микрообработки при сканировании прозрачных материалов жесткофокусированными фемтосекундными импульсами с различным перекрытием пятен фокусировки.
5. Проведение сравнительного анализа процессов формирования внутриобъемных микроструктур единичными фемтосекундными импульсами при их фокусировке фокусирующими системами с абберрационной коррекцией и без нее.

6. Разработка высокоэффективных методик внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов фемтосекундными лазерными импульсами.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружено удлинение области микромодификации в направлении распространения лазерного импульса при увеличении числовой апертуры фокусирующей системы, что связано с продольной интерфейсной сферической aberrацией, возникающей на границе раздела воздух–образец.

2. Впервые установлено, что линейная микромодификация в объеме прозрачных материалов формируется одновременно за счет двух механизмов: самофокусировки и сферической aberrации, при этом первая отвечает за удлинение перед геометрическим фокусом оптической системы, а вторая – в направлении распространения импульса за геометрическим фокусом.

3. Экспериментально установлено наличие конкуренции между механизмами формирования линейной микромодификации.

4. Впервые показана и исследована возможность временного разделения механизмов формирования линейной микромодификации путем внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка.

5. Впервые показан новый метод управления длиной микромодификации с помощью внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка.

6. Впервые обнаружен и исследован режим фемтосекундной микрообработки, при котором в процессе облучения некоторых прозрачных материалов фемтосекундными импульсами с перекрытием пятен фокусировки возможно возникновение нежелательного «циклического» режима, сопровождающегося периодическим самоиндуцированным смещением области фокальной перетяжки вдоль оси распространения лазерного импульса по направлению к фокусирующей системе до определенного значения и обратно в исходное положение.

7. Впервые обнаружена и исследована возможность формирования за один фемтосекундный импульс последовательности нитевидных микроразрушений, разделенных областями с измененным показателем преломления, при его фокусировке сферической линзой с большой числовой апертурой и сильными сферическими аберрациями.
8. Продемонстрирована возможность создания пространственных графитизированных структур в поликарбонате под действием жесткофокусированных фемтосекундных лазерных импульсов.
9. Продемонстрирована возможность контролируемого создания с помощью фемтосекундных лазеров внутриобъемных микромодификаций с необходимыми пространственными характеристиками в широком диапазоне глубин фокусировки без изменения оптической схемы.
10. Реализованы методики прецизионной резки прозрачных материалов с учетом особенностей формирования микроструктур с помощью фемтосекундных импульсов.
11. Успешно продемонстрированы возможности однопроходной и многопроходной фемтосекундной лазерной резки прозрачных материалов различной толщины с постоянной шириной реза.

Положения, выносимые на защиту

1. Максимальное удлинение области микромодификации (в направлении распространения излучения), вызванное продольной интерфейсной сферической аберрацией, определяется текущей глубиной фокусировки, значением числовой апертуры фокусирующей системы и показателем преломления среды. При этом зависимости максимального удлинения области микромодификации от энергии фемтосекундного лазерного импульса не наблюдается.
2. Фазовая модуляция пространственного профиля интенсивности фемтосекундного лазерного импульса позволяет увеличить длину внутриобъемных микромодификаций.

3. Режим формирования периодических внутриобъемных микроструктур при сканировании материалов фемтосекундными импульсами с перекрытием реализуется благодаря наличию области с измененным показателем преломления в окрестности области необратимой микромодификации в случаях частоты следования импульсов до нескольких сотен килогерц и благодаря эффекту теплового накопления при частотах следования импульсов выше 1 МГц.

4. Фокусировка фемтосекундных импульсов с помощью сферических линз с высокими числовыми апертурами приводит к формированию дискретной последовательности линейных микромодификаций, расположенных по оси распространения излучения, за счет трансформации гауссового распределения интенсивности в дифракционную картину френелевского типа.

5. Формирование линейной микромодификации с аспектным соотношением более 1000 при диаметре не более 2 мкм за один фемтосекундный импульс возможно без использования эффекта самофокусировки.

Практическая значимость работы

Полученные результаты и установленные закономерности могут быть использованы для решения следующих задач.

1. Лазерная контролируемая внутриобъемная обработка прозрачных материалов фемтосекундными импульсами большой интенсивности.
2. Высокоскоростная прецизионная резка и перфорация прозрачных диэлектриков и некоторых полупроводников различной толщины.
3. Высокоскоростное прецизионное прототипирование с улучшенным пространственным разрешением за счет многофотонной полимеризации.
4. Лазерная коррекция зрения и операции по поводу катаракты.
5. Формирование протяженных люминесцирующих каналов с контролируемой длиной в полупроводниках и диэлектриках под действием жесткофокусированных фемтосекундных лазерных импульсов.

Достоверность

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается повторяемостью, хорошим соответствием расчетных и экспериментальных результатов, а также реализацией на их основе рабочих технологий микрообработки прозрачных диэлектриков.

Личный вклад

Результаты, представленные в данной работе, получены соискателем лично либо при его непосредственном участии. Автор непосредственно участвовал в создании и разработке большинства используемых в работе оптических схем и экспериментальных установок, проведении экспериментов, определении направления исследований, проводил необходимые теоретические расчеты, обработку и анализ экспериментальных данных, интерпретацию результатов, участвовал в написании статей, выступал на конференциях и семинарах с полученными научными результатами.

Апробация работы

Вошедшие в диссертационную работу положения и результаты были опубликованы в 18 статьях, из них 8 в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и входящих в WOS и/или Scopus, 10 в трудах конференций, а также в 1 патенте на изобретение. Полученные результаты были представлены автором на следующих международных и всероссийских научных конференциях: IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике (8-30 Января 2015 г., Москва, Россия); The 4th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM 2015) (31 августа - 4 сентября 2015 г., Будва, Черногория); 19-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука» (1 октября -10 декабря 2015 г., Москва); V Международная конференция по фотонике и информационной оптике (3-5 февраля 2016 года, Москва, Россия); Международная конференция «Оптика лазеров 2016» (27 июня - 1 июля 2016 г., Санкт-Петербург, Россия); II

Всероссийский научный форум «Наука будущего - наука молодых» (20-23 сентября 2016 г., Казань, Россия); VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике (1-3 февраля 2017 года, Москва, Россия); VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (17-21 апреля 2017 года, Москва, Россия); Всероссийская летняя школа программы Фулбрайта «Нанотехнологии и наноматериалы» (07-22 июня 2017 года, Казань, Россия); VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (24-26 января 2018 года, Москва, Россия).

Результаты, полученные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на научных семинарах Центра физического приборостроения ИОФ РАН. Также они неоднократно отмечались наградами на конкурсах научных работ. Работа поддержана грантом Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «УМНИК», именной стипендией Президента Российской Федерации (2014-2016 гг.), стипендией Правительства Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (2016-2017 гг.).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Список литературы содержит 241 наименование. Объем диссертации 149 страниц, в том числе 91 рисунок и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, формируются цель и задачи работы, показана научная новизна, практическая значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения, список работ, опубликованных автором по теме диссертации, и кратко представлено содержание диссертации.

В главе 1 представлен обзор актуальной литературы по теме исследования, описаны основные механизмы взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с прозрачными материалами,

рассмотрены параметры, влияющие на процессы внутриобъемной микромодификации прозрачных диэлектриков. Описаны основные типы возможных микромодификаций и показаны их возможные применения.

В главе 2 представлено подробное описание экспериментальной установки по микрообработке прозрачных диэлектриков фемтосекундными лазерными импульсами. Приведены основные характеристики и принцип работы использованных в работе лазерных источников, системы измерения длительности фемтосекундных лазерных импульсов и фокусирующих систем.

В главе 3 представлены экспериментальные результаты формирования внутриобъемных микромодификаций при помощи единичных фемтосекундных импульсов (рис. 1). Экспериментально определены технологически важные зависимости длины нитевидных структур, возникающих при фокусировании излучения единичного фемтосекундного импульса в объем образца из поликарбоната от энергии $E_{\text{и}}$, глубины фокусировки f_d , NA объектива (рис. 2). Определены основные механизмы формирования протяженной линейной микромодификации.

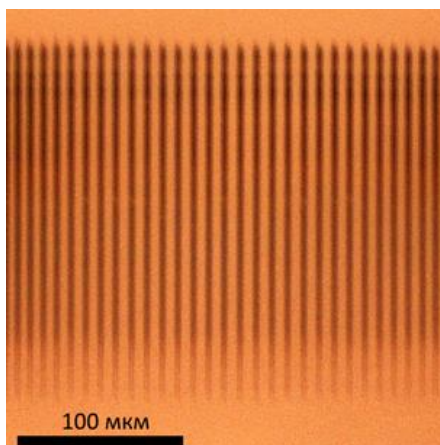


Рис. 1. Фотографии линейных микроструктур, полученных при обработке поликарбоната единичными фемтосекундными импульсами.

Установлено, что можно создать разрушение в объеме образца одновременно – в областях перед геометрическим фокусом и после него и отдельно – только перед геометрическим фокусом или только за ним без смены фокусирующей оптики. Во всех случаях в формировании области

разрушения в объеме образца перед геометрическим фокусом определяющей является самофокусировка приосевых лучей, за геометрическим фокусом – возникающая при прохождении границы (интерфейса) воздух–образец интерфейсная сферическая aberrация (ИСА) периферийных лучей фокусируемого пучка. В экспериментах с прозрачными экранами и диафрагмами, позволяющими осуществлять оптические задержки τ_3 между аксиальными и периферийными лучами, определена количественная зависимость длины микромодификаций в предфокальной зоне от τ_3 , а также установлен факт блокировки аксиальных лучей периферийными, что приводит к укорочению областей разрушения в предфокальной зоне. Показан способ временного разделения механизмов формирования удлиненной микромодификации (самофокусировка и интерфейсная сферическая aberrация) с помощью внесения оптических задержек в аксиальные и периферийные лучи фокусируемого пучка, и реализован новый способ управления длиной микромодификации (рис. 3).

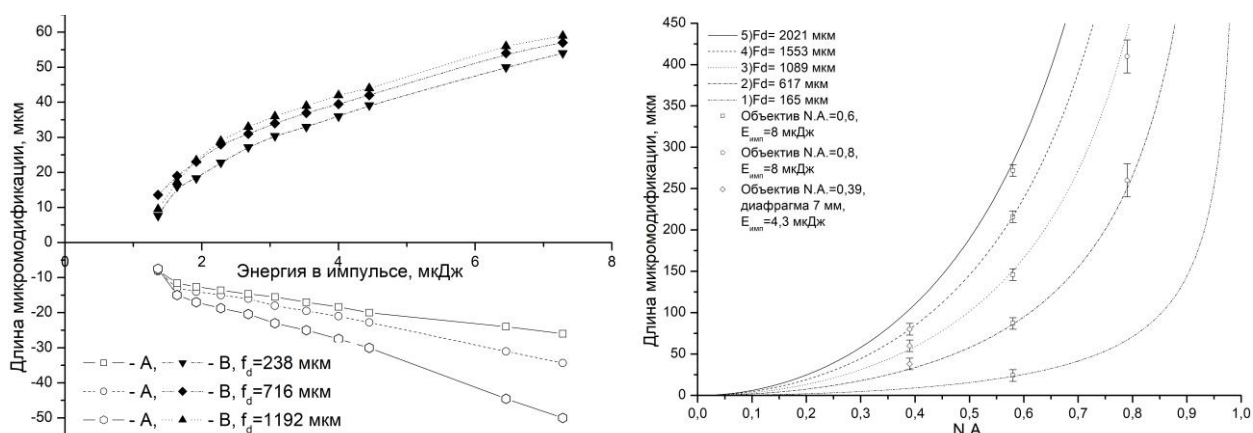


Рис. 2. **Слева:** зависимость длины микромодификации перед геометрическим фокусом (А) и после (В) в образце из поликарбоната от энергии фемтосекундных лазерных импульсов при различных глубинах фокусировки (f_d); **справа:** зависимость длины энергии от числовой апертуры объектива при различных глубинах фокусировки (f_d).

Проведенные исследования позволяют предсказуемо и контролируемо формировать внутриобъемные микромодификации с заданными пространственными характеристиками в широком диапазоне глубин без смены фокусирующей оптики.

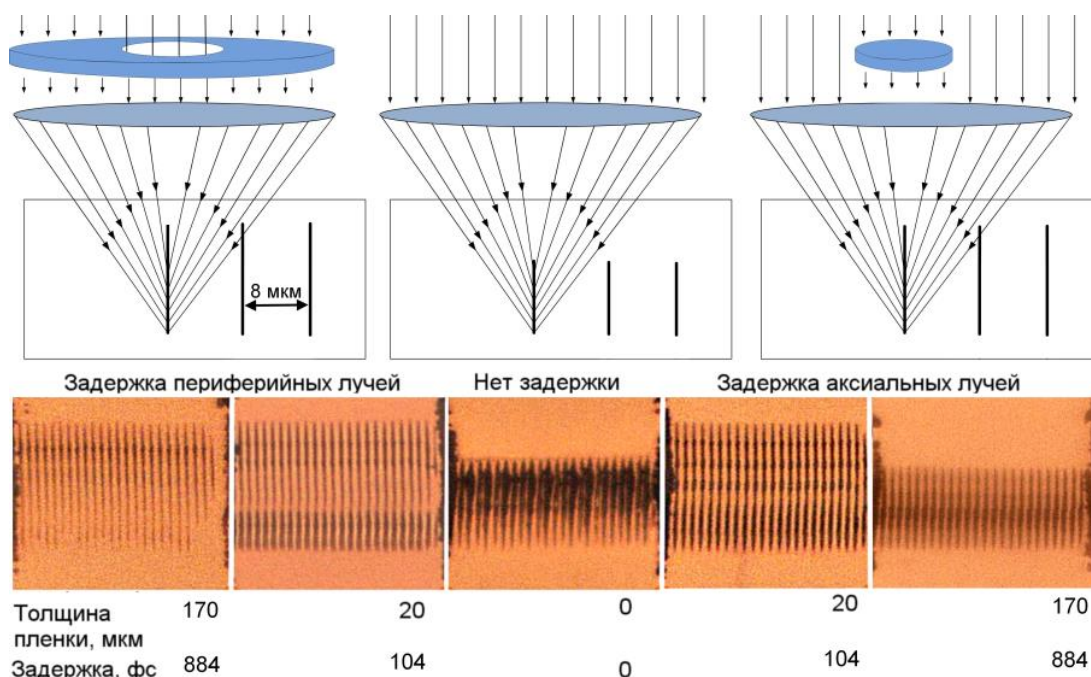


Рис. 3. Микрофотографии разрушений, созданных с помощью единичных фемтосекундных импульсов в поликарбонате при различных оптических задержках приосевых и периферийных лучей фокусируемого пучка.

В главе 4 представлены результаты исследования процессов формирования внутриобъемных микромодификаций при сканировании прозрачных материалов с перекрытием пятен фокусировки. Были исследованы условия возникновения и определены характерные признаки режима обработки, при котором в процессе сканирования образца область разрушения смещается также и по направлению к объективу при каждом следующем импульсе и, достигнув предельного значения, возвращается на исходную линию геометрического фокуса, формируя в объеме периодическую структуру (рис. 4). Основным условием возникновения описанного режима при низкой частоте следования фемтосекундных импульсов является «попадание» пятна фокусировки излучения последующего импульса в микрообласть необратимых изменений материала, произведенных предыдущим импульсом. Предполагается, что основными причинами смещения области разрушения при облучении следующими импульсами и возникновения такого режима являются изменение показателя преломления и уменьшение порога разрушения вследствие изменения плотности $\Delta\rho$ и структуры материала в микрообласти, примыкающей к

стенке полости, созданной предыдущим импульсом. При использовании высокочастотного лазерного источника причиной, ответственной за возникновение данного режима, является процесс накопления тепла в фокальной зоне. Установлено, что характеристики циклических процессов в режимах с низкой (до 1 кГц) и высокой частотой следования импульсов (≈ 2 МГц) в основном схожи.

- Пятно фокусировки наряду со смещением в направлении $V_{ск}$ также перемещается по направлению к объективу, затем делает скачок в исходное состояние и далее следует очередной «цикл». То есть этот процесс можно охарактеризовать как некий автоколебательный режим.
- Количество импульсов в одном цикле, создающих разрушение, уменьшается с ростом скорости сканирования.
- Угол наклона внутренних полостей к направлению сканирования (α) изменяется, уменьшаясь по мере роста $V_{ск}$.

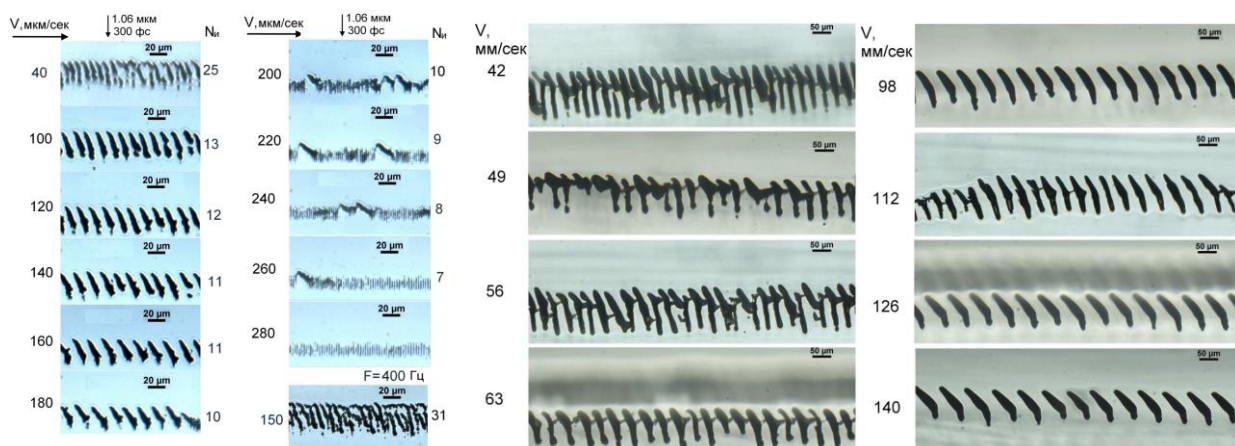


Рис. 4. Микрофотографии объемных разрушений образца из поликарбоната фемтосекундными импульсами при различных скоростях сканирования и частотах следования импульсов: **низкочастотный** (слева) и **высокочастотный** (справа) режимы.

В главе 5 представлены экспериментальные результаты сравнения микроструктур, формирующихся при фокусировке единичных фемтосекундных импульсов широкоапертурными фокусирующими системами с абберационной коррекцией и без нее. Экспериментально продемонстрирована возможность создания последовательности линейных микроструктур (рис. 5), а также высокоаспектной линейной

микромодификации (рис. 6) на оси распространения излучения за счет трансформации гауссова распределения интенсивности в дифракционную картину френелевского типа при фокусировке единичных фемтосекундных импульсов.

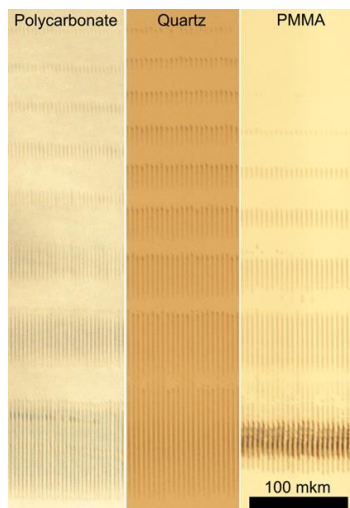


Рис. 5. Фотографии объемных модификаций, созданных единичными фемтосекундными импульсами в объеме образцов из различных материалов при их фокусировке сферической линзой.

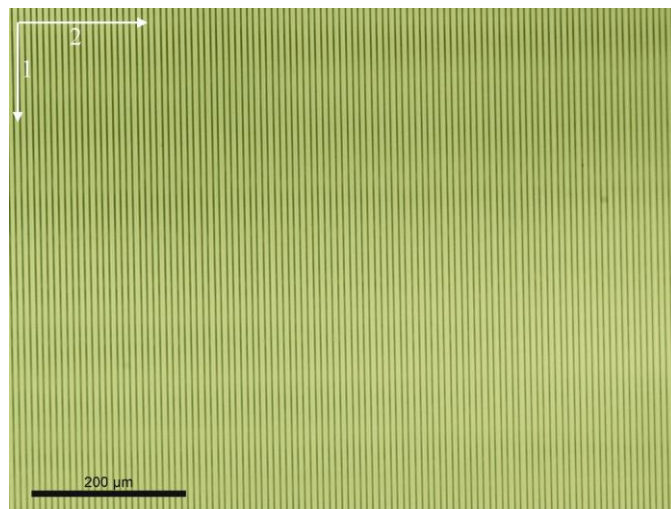


Рис. 6. Фотография микроструктур в поликарбонате. Энергия импульса 150 мкДж: (1) направление распространения импульсов, (2) направление сканирования. Скорость сканирования 800 мкм/с, $f=100$ Гц, $f_d = 3$ мм, сферическая линза NA = 0.58.

В главе 6 представлены экспериментальные результаты создания методики контролируемой внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов с учетом особенностей взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с материалами. Использование методики удлинения области фокусировки лазерного излучения за счет продольной интерфейсной сферической aberrации дополнительно расширяет возможности фемтосекундной лазерной резки и перфорации прозрачных материалов. Возможность резки диэлектриков различной толщины при постоянной ширине реза является хорошей альтернативой существующим технологиям лазерной резки. Показаны результаты прецизионной резки прозрачных материалов различной толщины с постоянной по глубине шириной реза (рис. 7), одноимпульсного перфорирования тонких прозрачных диэлектриков (рис. 8, 9), а также другие возможные применения полученных результатов

(рис. 10, 11). Прецизионная контролируемая внутриобъемная микрообработка материалов без теплового воздействия с помощью фемтосекундных лазеров может быть успешно применена в различных областях техники и медицины.



Рис. 7. Микрофотографии реза. $E_{и} = 10$ мкДж, $NA = 0.545$, $V_{ск} = 800$ мкм/сек, $f = 200$ Гц, оптическое стекло ВК7, толщина 1,03 мм.

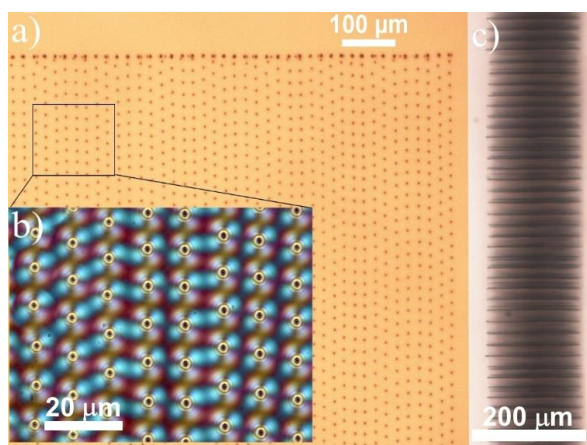


Рис. 10. Микрофотографии созданных фемтосекундным лазером структур в прозрачных диэлектриках: а) матрица разрушений, фотография в естественном свете, б) фотография фрагмента матрицы в скрещенных поляризаторах, в) вид матрицы сбоку.

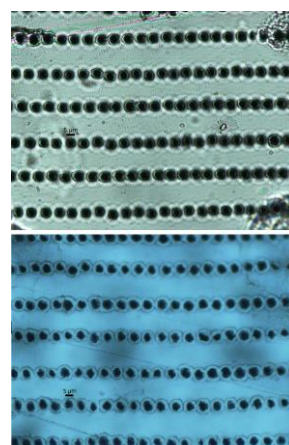


Рис. 9. Фотографии цилиндрических отверстий в полипропиленовой пленке. Каждый фемтосекундный импульс формирует одно отверстие. Поверхности входа и выхода лазерного луча сверху и снизу соответственно.

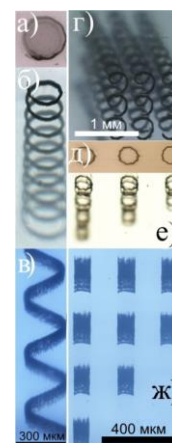


Рис. 11. Фотографии внутриобъемных модификаций в поликарбонате: а-г) графитизированные спирали; д-ж) графитизированные цилиндры.

В заключении работы сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Экспериментально показано наличие двух механизмов, формирующих линейную микромодификацию в объеме прозрачных диэлектриков перед геометрическим фокусом и за ним. В формировании области разрушения в объеме образца перед геометрическим фокусом определяющей является самофокусировка приосевых лучей, за геометрическим фокусом – возникающая при прохождении границы (интерфейса) воздух–образец интерфейсная сферическая абберация (ИСА) периферийных лучей фокусируемого пучка.
2. При фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов объективами с $NA > 0.5$ влияние самофокусировки на пространственные характеристики области микромодификации незначительно по сравнению с влиянием ИСА. Максимальная длина микромодификации при фокусировке фемтосекундного импульса объективами с $NA > 0.5$ строго ограничена и зависит от текущей глубины фокусировки, числовой апертуры фокусирующей системы, показателя преломления среды, а также энергии лазерного импульса.
3. В экспериментах с прозрачными экранами и диафрагмами, позволяющими осуществлять оптические задержки τ_3 между аксиальными и периферийными лучами, определена количественная зависимость длины разрушений в предфокальной зоне от τ_3 , а также установлено, что результирующее воздействие периферийных лучей на материал может приводить к блокировке воздействия аксиальных лучей и, как следствие, к укорочению областей разрушения в предфокальной зоне. Таким образом, внесение оптических задержек в периферийные лучи позволяет контролировать протекание процесса самофокусировки аксиальных лучей и, соответственно, формирование микромодификации в предфокальной зоне.
4. Установлено, что при облучении некоторых прозрачных материалов фемтосекундными импульсами с перекрытием пятен фокусировки возможно возникновение нежелательного «циклического» режима микрообработки, при котором область фокальной перетяжки периодически

самоиндуцированно смещается по направлению к объективу до определенного значения и затем возвращается в исходное положение. Экспериментально установлен факт двукратного увеличения размера микромодификации в «циклическом» режиме по сравнению с одноимпульсным режимом микрообработки.

5. Предложено объяснение возникновения циклических режимов микрообработки: при низких частотах следования фемтосекундных импульсов (<100 кГц) это происходит за счет формирования вокруг области разрушения оболочки с повышенным показателем преломления и области остаточных напряжений, а при высоких частотах следования (>100 кГц) благодаря эффекту теплового накопления.

6. Экспериментально показано, что фокусировка излучения фемтосекундного лазера оптическими системами с большой числовой апертурой и сильными сферическими aberrациями приводит к формированию в обрабатываемом материале за один фемтосекундный лазерный импульс последовательности нитевидных микромодификаций, расположенных по оси распространения излучения. При увеличении энергии импульса происходит объединение нитевидных микромодификаций, в результате чего за один фемтосекундных лазерный импульс формируется непрерывная нить с характерным диаметром 2 мкм и аспектным соотношением более 1000 . Причиной формирования структур подобных конфигураций является трансформация исходного гауссова распределения интенсивности лазерного пучка в набор дифракционных колец, при этом каждое кольцо фокусируется на своей глубине.

7. На основе изученных особенностей формирования удлиненных микромодификаций продемонстрированы методы контролируемой внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов, отличающиеся высокой точностью, качеством и предсказуемостью. Данные методики были успешно применены для резки и микрообработки стекол, кристаллов, полимеров, перфорации тонких диэлектриков.

8. Экспериментально показана возможность прямой контролируемой записи графитизированных электропроводящих микроструктур с заданными пространственными характеристиками в объеме поликарбоната и на поверхности полиимида с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Удельная проводимость графитизированных областей составила 1 См/м и 10^4 См/м соответственно.

Список публикаций по теме диссертации

1. Ганин Д. В., Лапшин К.Э., Обидин А. З., Вартапетов С. К. Особенности прямого формирования графитоподобных микроструктур внутри образцов поликарбоната одиночными фемтосекундными лазерными импульсами // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 11. – С. 1029.
2. Вартапетов С. К., Ганин Д. В., Лапшин К.Э., Обидин А. З. Формирование циклических внутриобъемных структур в прозрачных диэлектриках с помощью фемтосекундного лазера // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 8. – С. 725.
3. Ganin, D. V., Obidin, A. Z., Lapshin, K. E., Vartapetov, S. K. Femtosecond laser fabrication of periodical structures in bulk of transparent dielectrics // Physics Procedia. – 2015. – Т. 73. – С. 67-73.
4. 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. – IOP Publishing, 2016. – Т. 737. – №. 1. – С. 012015.
5. Ganin D. V., Lapshin, K. E., Obidin, A. Z., Vartapetov, S. K. Femtosecond laser fabrication of linear graphitized microstructures in a bulk of polycarbonate samples // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 737. – №. 1. – С. 012023.
6. Ganin, D. V., Obidin, A. Z., Lapshin, K. E., Vartapetov, S. K. Managing of spatial characteristics of internal modifications by means of optical delay in cases of femtosecond micromachining of materials // Laser Optics (LO), 2016 International Conference. – IEEE, 2016. – С. R5-8-R5-8.
7. Ganin D. V, Lapshin, K. E., Obidin, A. Z., Vartapetov, S. K. Single-pulse perforation of thin transparent dielectrics by femtosecond lasers // Applied Physics A. – 2017. – Т. 123. – №. 5. – С. 378.
8. Ganin D. V., Lapshin, K. E., Obidin, A. Z., Vartapetov, S. K. High-precision cutting of polyimide film using femtosecond laser for the application in flexible electronics // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 945. – №. 1. – С. 012019

9. Вартапетов С. К., Обидин А. З., Ганин Д. В. Способ и устройство формирования прецизионных отверстий в оптически прозрачной пленке сверхкоротким импульсом лазерного излучения. Патент РФ №2551043. 2015
10. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Формирование циклических внутриобъемных структур в прозрачных диэлектриках с помощью фемтосекундного лазера // IV международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2015. – С. 276-277.
11. Ganin, D. V., Obidin, A. Z., Lapshin, K. E., Vartapetov, S. K., The effects of diffraction and spherical aberration at the femtosecond laser fabrication extended microstructure by different focusing systems // The 4th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM 2015), Book of Abstract. – 2015. – С. 48.
12. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Метод высокоэффективной прецизионной резки биоразлагаемых коронарных стентов и прозрачных материалов фемтосекундными лазерами // 19 Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2015. – Ч.2. – С.64-65.
13. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Метод высокоэффективной прецизионной резки биоразлагаемых коронарных стентов и прозрачных материалов фемтосекундными лазерами // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2016. – С. 243-244.
14. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Формирование линейных графитизированных микроструктур в объеме поликарбоната с помощью ультракоротких импульсов // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2016. – С. 321-322.
15. 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 // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2016. – С. 107-108.
16. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Разработка методов высокоэффективной прецизионной резки биоразлагаемых коронарных стентов и прозрачных материалов фемтосекундными лазерами // II Всероссийский научный форум «Наука будущего - наука молодых», Сборник тезисов участников форума «Наука будущего — наука молодых» — Казань, 2016. — Том 1, С. 403-405.
17. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Одноимпульсное перфорирование тонких прозрачных диэлектриков с помощью фемтосекундных

лазеров // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2017. – С. 500-501.

18. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Обидин А. З., Лапшин К.Э., Прецизионная резка полиимидной пленки (КАРТОН) с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, для применения в области гибкой электроники // VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Тезисы докладов. Часть 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2017.– 188-189 с.

19. Ганин Д. В., Вартапетов С. К., Лапшин К.Э., Методы удлинения области взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с прозрачными материалами для прецизионной высокоскоростной обработки материалов // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2018. – С. 466-467.

Список литературы

1. Liu X., Du D., Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 33, № 10. P. 1706–1716.
2. Stuart B.C., Feit M.D., Herman S., Rubenchik A.M., Shore B.W., Perry M.D. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53, № 4. P. 1749–1761.
3. Perry M.D., Stuart B.C., Banks P.S., Feit M.D., Yanovsky V., Rubenchik a. M. Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85, № 9. P. 6803.
4. Poumellec B., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Femtosecond laser irradiation stress induced in pure silica // Opt. Express. 2003. Vol. 11, № 9. P. 1070–1079.
5. Poumellec B., Lancry M., Poulin J.-C., Ani-Joseph S. Non reciprocal writing and chirality in femtosecond laser irradiated silica. // Opt. Express. 2008. Vol. 16, № 22. P. 18354–18361.
6. Kazansky P.G., Yang W., Bricchi E., Bovatsek J., Arai A. “Quill” writing with ultrashort light pulses in transparent optical materials // Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007, CLEO 2007. 2007.
7. Yang W., Kazansky P.G., Svirko Y.P. Non-reciprocal ultrafast laser writing // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2, № 2. P. 99–104.
8. Qiu J., Miura K., Hirao K. Femtosecond laser-induced microfeatures in glasses and their applications // J. Non. Cryst. Solids. 2008. Vol. 354, № 12–13. P. 1100–1111.
9. Shimotsuma Y., Kazansky P.G., Qiu J., Hirao K. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91, № 24. P. 247405 (4 pages).
10. Kanehira S., Miura K., Hirao K. Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93, № 2.

11. White Y. V, Li X., Sikorski Z., Davis L.M., Hofmeister W. Single-pulse ultrafast-laser machining of high aspect nano-holes at the surface of SiO₂. // *Opt. Express*. 2008. Vol. 16, № 19. P. 14411–14420.
12. Morita N., Shimotsuma Y., Nishi M., Sakakura M., Miura K., Hirao K. Direct micro-carbonization inside polymer using focused femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105, № 20.
13. Itoh K., Watanabe W., Nolte S., Schaffer C.B. Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials // *MRS Bull.* 2006. Vol. 31, № 8. P. 620–625.
14. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nat. Photonics*. 2008. Vol. 2, № 4. P. 219–225.
15. Zhang J., Gecevičius M., Beresna M., Kazansky P.G. 5D Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass // *CLEO Sci.* 2013. Vol. 1. P. CTh5D.9.
16. Kazansky P.G., Zhang J., Gecevičius M., Beresna M. Recent advances in ultrafast laser nanostructuring: S-waveplate and eternal data storage // *Cleo 2014*. 2014. P. AM3L.3.
17. Juhasz T., Loesel F.H., Kurtz R.M., Horvath C., Bille J.F., Mourou G. Corneal refractive surgery with femtosecond lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 1999. Vol. 5, № 4. P. 902–910.
18. Vartapetov S.K., Khudyakov D. V, Lapshin K.E., Obidin A.Z., Shcherbakov I.A. Femtosecond lasers for microsurgery of cornea // *Quantum Electron.* 2012. Vol. 42, № 3. P. 262.
19. Atezhev V. V, Barchunov B. V, Vartapetov S.K., Zav'yalov A.S., Lapshin K.E., Movshev V.G., Shcherbakov I.A. Laser technologies in ophthalmic surgery // *Laser Phys. IOP Publishing*, 2016. Vol. 26, № 8. P. 84010.
20. Reinstein D.Z., Carp G.I., Archer T.J., Gobbe M. Outcomes of Small Incision Lenticule Extraction (SMILE) in Low Myopia. // *J. Refract. Surg.* 2014. Vol. 30, № 12. P. 812–818.
21. Lawless M., Bala C. Femtosecond Laser-assisted Cataract Surgery // *US Ophthalmic Rev.* 2014. Vol. 7, № 2. P. 82.
22. Grewal D.S., Schultz T., Basti S., Dick H.B. Femtosecond laser-assisted cataract surgery-current status and future directions // *Survey of Ophthalmology*. 2016. Vol. 61, № 2. P. 103–131.
23. Ashcom J.B., Gattass R.R., Schaffer C.B., Mazur E. Numerical aperture dependence of damage and supercontinuum generation from femtosecond laser pulses in bulk fused silica // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2006. Vol. 23, № 11. P. 2317.
24. Schaffer C.B., Brodeur A., Garci'a J.F., Mazur E. Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy // *Opt. Lett.* 2001. Vol. 26, № 2. P. 93–95.
25. Burakov I.M., Bulgakova N.M., Stoian R., Mermillod-Blondin A., Audouard E., Rosenfeld A., Husakou A., Hertel I. V. Spatial distribution of refractive index variations induced in bulk fused silica by single ultrashort and short laser pulses // *J. Appl. Phys.* 2007. Vol. 101, № 4.