

## ОТЗЫВ

официального оппонента Козловского Владимира Ивановича

на диссертационную работу

ГАНИНА Даниила Валентиновича

на тему:

«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛИРУЕМОГО ФОРМИРОВАНИЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ В ОБЪЕМ ПРОЗРАЧНОГО МАТЕРИАЛА»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа Д.В. Ганина посвящена экспериментальному исследованию процессов формирования протяженных микроструктур в объеме прозрачных материалов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Процессы взаимодействия интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с веществом активно исследуются в ведущих научных лабораториях во всем мире. В результате нелинейного взаимодействия излучения фемтосекундных лазеров со средой происходит формирование протяженных микромодификаций разных типов. Основная **новизна** исследования заключается в том, что в работе проведено исследование различных причин удлинения области воздействия, предложены методы управления длиной внутриобъемных микромодификаций, а также исследован особый «циклический» режим обработки.

Фемтосекундные лазеры, а также новые технологии на их основе, позволяют добиться точности, недостижимой традиционными способами обработки, и предоставляют отличные возможности прецизионной обработки прозрачных материалов без теплового воздействия. Поэтому выбранная тема исследований **актуальна и практически значима** для высокоточной обработки материалов и создания на их основе новых функциональных микроустройств и компонентов для науки, техники и медицины.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 149 страниц, 91 рисунок и 3 таблицы. Список цитированной литературы содержит 241 наименование.

**Во введении** раскрывается актуальность диссертационной работы, определены задачи, изложена структура диссертации и приведено ее краткое содержание, а также сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрены основные механизмы поглощения фемтосекундных лазерных импульсов прозрачными материалами. Описаны основные параметры обработки, влияющие на процесс микромодификации материалов. Представлены возможные применения результатов диссертационного исследования.

**Вторая глава** содержит подробное описание экспериментальной установки, использованных лазерных источников, системы измерения длительности импульсов, их фокусировки, а также описаны характеристики образцов и методика экспериментов.

**Третья глава** посвящена исследованию процессов формирования протяженных микромодификаций в объеме прозрачных материалов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Подробно рассмотрены механизмы, приводящие к удлинению области микромодификации, а также их взаимовлияние. Экспериментально реализован новый способ управления длиной микромодификации. Определены зависимости длины формируемых структур от параметров эксперимента.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования особого режима обработки, при котором в объеме перемещаемого материала возникает циклическое смещение линии микромодификации вдоль оптической оси. Представлена модель, объясняющая данный эффект, и определены необходимые условия возникновения этого циклического процесса.

**В пятой главе** рассмотрено влияние сильных сферических aberrаций фокусирующей оптики на процесс формирования микромодификаций. Показано, что в этом случае возникает последовательность линейных микромодификаций вдоль оптической оси.

**В шестой главе** представлены результаты экспериментов по контролируемой внутриобъемной микрообработке прозрачных материалов с учетом особенностей взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с материалами. Продемонстрирована возможность прецизионной резки прозрачных материалов различной толщины с постоянной по глубине шириной реза, перфорирования тонких прозрачных диэлектриков, а также другие возможные применения полученных результатов

**В диссертационной работе получены следующие новые, имеющие практическое значения научные результаты:**

1. При облучении пластины прозрачного материала сфокусированным фемтосекундным лазерным импульсом возникающая линейная микромодификация в объеме пластины формируется за счет двух механизмов: предфокальная часть микромодификации формируется за счет самофокусировки аксиальных лучей, а часть микромодификации

после геометрического фокуса - за счет интерфейсной сферической aberrации периферийных лучей.

2. Внесение оптических задержек в периферийные лучи позволяет контролировать протекание процесса самофокусировки аксиальных лучей, и соответственно, формирование микромодификации в предфокальной зоне.
3. При фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов объективами с числовой апертурой  $NA > 0.5$  влияние самофокусировки на пространственные характеристики области микромодификации незначительно по сравнению с влиянием интерфейсной сферической aberrации. Максимальная длина микромодификации при фокусировке фемтосекундного импульса объективами с  $NA > 0.5$  строго ограничена, и зависит от глубины фокусировки, числовой апертуры объектива, показателя преломления среды.
4. При облучении движущейся пластины фемтосекундными импульсами с перекрытием пятен фокусировки возможно возникновение нежелательного «циклического» режима микрообработки, сопровождающегося периодическим самоиндуцированным смещением области фокальной перетяжки вдоль оси распространения лазерного импульса ближе к фокусирующей системе и возвращением в исходное положение. Установлен факт двукратного увеличения размера микромодификации в «циклическом» режиме по сравнению с одноимпульсным режимом микрообработки. Циклический режим микрообработки объясняется возникновением вокруг области микромодификации оболочки с повышенным показателем преломления.
5. Фокусировка излучения фемтосекундного лазера оптическими системами с большой числовой апертурой и сильными сферическими aberrациями приводит к формированию в обрабатываемом материале по оси распространения излучения последовательности нитевидных микромодификаций за один фемтосекундный лазерный импульс. При увеличении энергии импульса происходит объединение нитевидных микромодификаций, в результате чего за один импульс формируется непрерывная нить с характерным диаметром 2 мкм и аспектным соотношением более 1000.
6. Разработаны методы контролируемой внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов, отличающиеся высокой точностью, качеством, предсказуемостью.

Результаты, приведенные в данной работе, можно считать достоверными, так как были получены автором при использовании современного оборудования и актуальных методик экспериментов. Исследования, проведенные в диссертационной работе, вносят весомый вклад в развитие современных методов контролируемой микрообработки прозрачных материалов различных типов. Широкие возможности применения

полученных результатов в науке и технике показывают **практическую ценность** проведенных исследований.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. Следовало бы более детально обсудить рис. 34. Нет четкого описания механизма влияния периферийных лучей на самофокусировку. Не понятно, чем определяется ширина провала на графике, представленном на рис. 34.
2. Интересный факт существенного отличия в геометрических формах микромодификации в плавленном кварце и в поликарбонате, демонстрируемый рис. 35, к сожалению не нашел должного обсуждения в данной работе.
3. Следовало бы более подробно описать, как были получены фотографии на рис. 36 для различных поперечных сечений микромодификации, и как из этих фотографий и кривых на рис. 37 оценивается поперечное распределение области наведенной анизотропии.
4. В работе дано качественное объяснение наблюдаемому сдвигу линии микромодификации к объективу при поперечном перемещении облучаемой пластины относительно оптической оси лазерного пучка. Однако не обсуждается механизм возврата этой линии в исходное положение.

Имеются также небольшие замечания к оформлению диссертации. Например, одним символом  $\omega$  обозначается частота, параметр пространственного разрешения и радиус пятна фокусировки, и наоборот, расстояние от поверхности пластины до геометрического фокуса обозначается разными символами  $D$ ,  $f_d$ ,  $F_d$ . Есть неточность в формуле 3.3. Не точна подпись к рис. 53. Имеются и другие мелкие неточности и грамматические ошибки.

Тем не менее, выявленные недостатки не снижают общего хорошего впечатления о диссертации. В диссертационной работе решена практически важная задача разработки воспроизводимой современной технологии формирования пространственных микроструктур при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объеме прозрачного материала.

Достоверность представленных в диссертационной работе научных результатов подтверждается соответствием ряда из них результатам, полученным в других научных коллективах, включая зарубежные, а также успешным применением этих результатов в технологии резки и микрообработки стекол, кристаллов, полимеров, перфорации тонких диэлектриков

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. В диссертационной работе изложение материала сопровождается хорошим литературным обзором.

Основные результаты работы докладывались на многих российских и международных конференциях, посвященных фотоники и информационной оптике. По теме диссертации имеется 18 научных публикаций, из них 8 статей в ведущих отечественных и международных журналах, 10 статей и тезисов докладов в трудах конференций. Кроме того на ряд результатов выдан патент России.

Исследования процессов контролируемого формирования пространственных микроструктур при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объеме прозрачного материала, включающие в себя ряд оригинальных методических разработок, выполнены лично автором или под его непосредственным руководством. Диссертация Ганина Д.В. представляет собой единолично написанную научную работу, в которой содержится новое решение проблемы в области лазерной физики.

Диссертация представляет собой законченное исследование, удовлетворяет всем требованиям положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор ее автор Даниил Валентинович Ганин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент,

И./о. заведующего лабораторией лазеров с катодно-лучевой накачкой, г.н.с.

ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

доктор физ.-мат. наук, профессор

«6» апреля 2018 года

В.И. Козловский

«Подпись официального оппонента доктора физ.-мат. наук Козловского В.И. заверяю.»

Ученый секретарь

ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

кандидат физ.-мат. наук

« » апреля 2018 года



А.В. Колобов

*С отзывом ознакомлен  
Ганц Даниил Д.В. / 9 апреля 2018 г.*