

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ганина Даниила Валентиновича «Исследование процессов контролируемого формирования пространственных микроструктур при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объем прозрачного материала», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

В настоящее время, разработано значительное количество лазерных технологий для обработки материалов в науке, промышленности и медицине. На данном этапе развития лазерной техники особое внимание уделяется фемтосекундным лазерам и их применению. Диссертационная работа Ганина Д.В. посвящена исследованию особенностей технологии прецизионной микрообработки прозрачных материалов с помощью фемтосекундных лазеров. Актуальность этой работы обусловлена необходимостью повышения производительности и качества обработки стекол, кристаллов, прозрачных пластиков, а также контролируемого формирования в них волноводов, микроканалов и дифракционных структур с высокой точностью и локализованностью.

Диссертация Ганина Д.В. состоит из Введения, 6 глав и Заключения. Список цитированной литературы включает 234 наименования. Объем диссертации – 149 страниц, в том числе 90 рисунков и 3 таблицы.

**В первой главе** дан обзор актуальной научной литературы, посвященной технологии формирования микроструктур различных типов в объеме прозрачных материалов с использованием фемтосекундного лазера.

**Во второй главе** представлено детальное описание экспериментальной установки для фемтосекундной обработки материалов. Подробно описана система измерения длительности фемтосекундных лазерных импульсов, характеристики фокусирующих систем, лазерные источники и методика экспериментов.

**В третьей главе** даны экспериментальные результаты формирования линейных микромодификаций, вытянутых в направлении распространения излучения, с помощью одиночных фемтосекундных лазерных импульсов. Определены ключевые зависимости длины микромодификаций от энергии фемтосекундных лазерных импульсов, параметров фокусирующей системы и глубины фокусировки излучения. Установлено, что при использовании объектива с  $NA = 0.39$  протяжённая микромодификация формируется одновременно за счет двух механизмов. Показана возможность временного разделения данных механизмов и предложен новый способ управления длиной микромодификации.

**Четвертая глава** посвящена исследованию нежелательного эффекта обработки, возникающего в ходе сканирования некоторых материалов. Определены условия возникновения данного режима при использовании низкочастотного и высокочастотного режимов обработки. Предложена модель описывающая процесс формирования микроструктур в данном режиме.

**В главе пять** представлены результаты сравнительного исследования воздействия фемтосекундных лазерных импульсов, сфокусированных различными типами фокусирующих систем. Показана возможность формирования последовательности нитевидных микромодификаций, расположенных по оси распространения импульса, с помощью одиночных фемтосекундных импульсов. Установлены причины формирования подобных микроструктур.

**Глава шесть** посвящена дополнительной проверке полученных результатов, исследованию особенностей фемтосекундной микрообработки различных прозрачных материалов, а также разработке новых технологий фемтосекундной обработки с учетом результатов проведенного исследования.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

**Научная новизна** диссертации заключается в том, что в работе впервые:

- установлено, что линейная микромодификация в объеме прозрачных материалов формируется одновременно за счет двух механизмов - самофокусировки и сферической аберрации, при этом первая отвечает за удлинение перед геометрическим фокусом оптической системы, а вторая - в направлении распространения импульса за геометрическим фокусом.
- установлено наличие конкуренции между механизмами формирования линейной микромодификации.
- показана и исследована возможность временного разделения механизмов формирования линейной микромодификации, путем внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка.
- показан новый метод управления длиной микромодификации - с помощью внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка.
- обнаружен и исследован режим микромодификации, при котором в процессе сканирования образца при определенных условиях эксперимента возникает нежелательный для некоторых применений, «циклический» режим обработки,

когда область фокусировки лазерного пятна смещается навстречу объективу до предельного значения и возвращается в исходную точку.

- 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 aberrациями.
- продемонстрирована возможность контролируемого создания внутриобъемных микромодификаций с необходимыми пространственными характеристиками в широком диапазоне глубин фокусировки без изменения оптической схемы с помощью ФС лазеров.

Переходя к оценке работы, отмечу, что она является весьма ценным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие современных фемтосекундных лазерных технологий.

**Достоверность** полученных экспериментальных данных обусловлена хорошей повторяемостью и применением современных методик и приборов. Кроме этого, она подтверждается хорошим согласием экспериментальных и расчетных данных, а также согласием с результатами исследований других научных групп.

Наиболее значимыми результатами работы являются:

- определена количественная зависимость длины разрушений в предфокальной зоне от оптической задержки  $\tau_z$  между аксиальными и периферийными лучами, а также установлен факт блокировки аксиальных лучей периферийными, что приводит к укорочению областей разрушения в предфокальной зоне.
- показано, что внесение оптических задержек в периферийные лучи позволяет контролировать протекание процесса самофокусировки аксиальных лучей, и соответственно, формирование микромодификации в предфокальной зоне.
- установлено, что при облучении некоторых прозрачных материалов 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 в исходное положение.

- экспериментально показано, что использование фокусирующей системы с большой числовой апертурой и сильными сферическими aberrациями приводит к трансформации исходного Гауссова распределения интенсивности в набор дифракционных колец, каждое кольцо из которого фокусируется на своей глубине, в результате этого в обрабатываемом материале по оси распространения излучения от воздействия одного импульса формируется последовательность нитевидных микромодификаций.
- показана возможность формирования в объеме материала за один фемтосекундный лазерный импульс непрерывной нити с диаметром 2 мкм и аспектным соотношением более 1000.

По диссертационной работе Д.В. Ганина имеются следующие замечания:

1. В главе 2 представлена информация о принципе работы используемого измерителя длительности фемтосекундных импульсов, однако объем представленной информации является избыточным и не требует столь подробного описания.
2. В тексте на страницах 61 и 70 протяженные микроструктуры, сформированные фемтосекундными импульсами, обозначаются как «филаменты». В настоящее время термин «ФИЛАМЕНТ» связывают с формированием протяженной динамической пространственно-временной локализацией фемтосекундного излучения в прозрачных средах. Поэтому использование этого термина для образующихся структур нельзя считать удачным.
3. В главе 6 при описании режимов резки полиимидной пленки «Режим II» связывается автором с фотохимическими преобразованиями полиимида в графитосодержащий материал, но данное предположение является не вполне корректным. Известно, что полиимидная пленка успешно карбонизируется в условиях высоких температур без участия лазерного излучения, таким образом «Режим II» по большей части является тепловым, чем фотохимическим.
4. Для получения высокого разрешения микрообработки в современных фемтосекундных технологиях используют иммерсионные фокусирующие объективы с высокими числовыми апертурами. При этом, в работе представлены формулы, описывающие длину эффективной области взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с прозрачными материалами с учетом интерфейсной сферической aberrации, которые не применимы при использовании иммерсионных объективов.

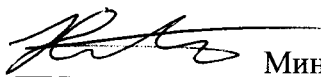
Сделанные замечания являются второстепенными и не сказываются на общей положительной оценке работы. Диссертация Ганина Д.В. является законченным научным исследованием, обладающим значительно научной значимостью и оригинальностью. Работа выполнена на профессиональном уровне.

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 01.04.21 – лазерная физика. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 научных работах, из которых 10 в трудах конференции, 8 в ведущих профильных российских и зарубежных журналах из списка ВАК, а также имеется 1 патент РФ на изобретение.

Диссертационная работа «Исследование процессов контролируемого формирования пространственных микроструктур при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объем прозрачного материала» полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Ганин Даниил Валентинович – заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

**Официальный оппонент**

Старший научный сотрудник отдела  
атомно-молекулярной технологии  
кандидат физико-математических наук



Минаев Никита Владимирович

«Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»

Российской академии наук

119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59

Телефон/факс: 8 (495) 851-03-42

E-mail: [minaevn@gmail.com](mailto:minaevn@gmail.com)

Подпись Минаева Н.В. заверяю

Начальник ОК ФНИЦ «Кристаллография

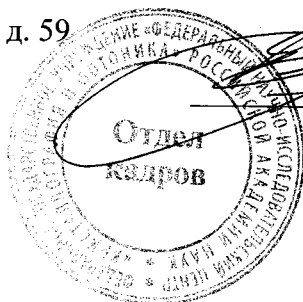
и фотоника» РАН, 119333,

г. Москва, Ленинский пр-т, д. 59

т. 8 (499) 1356511

[evd43@bk.ru](mailto:evd43@bk.ru)

Российской академии наук



/Евдокимова Н.С./

С отводом от замечаний  
Ген. Ганин Д.В.  
4 июля 2018 г.