

УТВЕРЖДАЮ:
Врио директора ИАиЭ СО РАН
«26» февраля 2018 г.
М.П.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

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».

Диссертационная работа Ганина Д.В. посвящена контролируемой внутриобъемной микрообработке прозрачных материалов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Данная тема исследований является актуальной в связи с практической значимостью результатов исследований для контролируемого формирования микромодификаций в объеме прозрачных диэлектриков с заданными пространственными характеристиками. Разработанные методики микрообработки могут быть успешно применены при формировании фотонных и микрожидкостных устройств, а также для прецизионной резки и сверления прозрачных диэлектриков с высоким качеством и производительностью. Исследованные особенности взаимодействия фемтосекундных импульсов с материалом позволят формировать микромодификации заданных размеров и формы в широком диапазоне глубин без изменения оптической системы. Кроме этого, предложенная автором методика удлинения области взаимодействия фемтосекундных импульсов с веществом позволит повысить качество и производительность микрообработки материалов для науки, технологий и медицины.

Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, используемые методы, область применения результатов указывают, что представленная диссертационная работа **соответствует паспорту специальности 01.04.21 – лазерная физика.**

Структура и содержание диссертации. Диссертация Ганина Д.В. состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы. Список литературы содержит 241 наименование. Объем диссертации 149 страниц, в том числе 91 рисунок и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность, сформированы цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и краткое содержание по главам.

В главе 1, являющейся обзором литературы, представлен анализ основных механизмов взаимодействия фемтосекундных импульсов с веществом и параметров, влияющих на процесс микромодификации прозрачных материалов, а также проведен анализ работ, посвященных перспективным применениям контролируемой микрообработки прозрачных материалов фемтосекундными импульсами.

В главе 2 представлено описание экспериментальной установки, источников фемтосекундных лазерных импульсов, системы измерения длительности импульсов и характеристики фокусирующих систем. Детально описана методика экспериментов.

В главе 3 представлены экспериментальные результаты по формированию одиночных нитевидных микромодификаций в объеме поликарбоната при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. Установлены зависимости длины микромодификаций от энергии лазерных импульсов, глубины фокусировки числовой апертуры фокусирующей оптики. Определены основные механизмы формирования нитевидных микромодификаций.

В главе 4 представлены результаты исследования режима обработки, при котором в объеме поликарбоната, при сканировании материала с перекрытием пятен фокусировки, формируются циклически повторяющиеся микромодификации. Определены условия возникновения данного режима и его характерные признаки. Предложена модель формирования повторяющихся микромодификаций.

В главе 5 проведено сравнительное исследование формирования нитевидных микромодификаций в объеме прозрачных материалов при фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов широкоапертурными оптическими системами с коррекцией сферических aberrаций и без коррекции. Показаны условия формирования последовательности нитевидных микромодификаций общей длиной, превышающей 1 мм в объеме прозрачных материалов без использования нелинейных эффектов.

В главе 6 представлены результаты разработки методик контролируемой внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов фемтосекундными импульсами. Показаны способы, позволяющие увеличить продольный размер область взаимодействия лазерных импульсов с веществом. Реализованы методы прецизионной резки и перфорации прозрачных материалов с высоким качеством и производительностью, а также методы контролируемого формирования микромодификаций с заданными размерами в широком диапазоне глубин фокусировки без замены фокусирующей оптики.

В заключении приведены 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 aberrация (ИСА) периферийных лучей фокусируемого пучка.
2. При фокусировке фс импульсов объективами с $NA > 0.5$ влияние самофокусировки на пространственные характеристики области микромодификации незначительно по сравнению с влиянием ИСА. Максимальная длина микромодификации при фокусировке фс 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_z между аксиальными и периферийными лучами, определена количественная зависимость длины разрушений в предфокальной зоне от τ_z , а также установлен факт блокировки аксиальных лучей периферийными, что приводит 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 фс импульсами с перекрытием пятен фокусировки возможно возникновение нежелательного «циклического» режима микрообработки, сопровождающегося периодическим самондуцированным смещением области фокальной перетяжки вдоль оси распространения лазерного импульса ближе к фокусирующей системе и 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 фс импульсов (<100 кГц) - 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 использование фокусирующей системы с большой числовой апертурой и сильными сферическими aberrациями приводит к трансформации исходного Гауссового распределения интенсивности в дифракционный паттерн, каждое кольцо которого фокусируется на своей глубине. в результате этого в обрабатываемом материале по оси распространения излучения от воздействия одного импульса формируется последовательность нитевидных микромодификаций. При увеличении энергии импульса до значений, при которых интенсивность в минимумах дифракционной картины превосходит порог микромодификации в объеме материала за один фс лазерный импульс формируется непрерывная нить с характерным диаметром 2 мкм и аспектным соотношением более 1000.
7. На основе изученных особенностей формирования удлиненных микромодификаций были созданы методики контролируемой внутриобъемной микрообработки прозрачных материалов, отличающиеся высокой точностью, качеством, 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 фс импульсов. Удельная проводимость графитизированных областей составила 1 См/м и 10^4 См/м соответственно.

Научная новизна и значимости 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 aberrации, а также экспериментально установлено наличие конкуренции между механизмами формирования линейной микромодификации; впервые показана и исследована возможность временного разделения механизмов формирования

линейной микромодификации, путем внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка; впервые показан новый метод управления длиной микромодификации - с помощью внесения оптических задержек в различные части фокусируемого лазерного пучка, впервые 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; 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; продемонстрирована возможность контролируемого создания внутриобъемных микромодификаций с необходимыми пространственными характеристиками в широком диапазоне глубин фокусировки без изменения оптической схемы с помощью ФС лазеров; успешно продемонстрированы возможности однопроходной и многопроходной фемтосекундной лазерной резки прозрачных материалов различной толщины с постоянной шириной реза.

Достоверность полученных результатов обеспечивается повторяемостью, хорошим соответствием расчетных и экспериментальных результатов, а также реализацией на их основе рабочих методик и технологий микрообработки материалов.

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе Ганина Д.В., опубликованы в 18 научных работах, в том числе 7 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК, а также 1 патенте на изобретение. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях. Диссертационная работа заслушана, обсуждалась и была одобрена на заседании научного семинара учебно-научного центра «Квантовая оптика» ИАиЭ СО РАН 18.01.2018.

При этом был высказан ряд **замечаний**:

- 1) В работе рассматривается влияние сферической аберрации линз на область модификации, однако не приводятся объяснения, почему другие аберрации при этом не учитываются, например, хроматическая аберрация, а также условия, при которых другие аберрации будут также вносить заметный вклад в область модификации.

- 2) В работе в параграфе 6.2.1 приводится утверждение, что «Использование жидкой среды позволяет устранить последствия таких эффектов как самофокусировка и самоканалирование». Однако стоит пояснить данное утверждение, поскольку и в жидкой среде возможна самофокусировка, которая наблюдалась в одной из первых работ по этой теме именно в жидкостной среде [Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р. Письма ЖЭТФ, 2, 1965 г].
- 3) В параграфе 4.3 представлены результаты по формированию микрокапилляра в режиме высокочастотного воздействия (120 нДж, 500 кГц и 0.6 мм/с). При этом как видно из рис. 51, размер полости равен примерно 5 мкм. В то же время на рис. 49 представлен график зависимости высоты полости от расстояния между пятнами фокусировки для (150 нДж, 2 МГц, 42 мм/с-140 мм/с) из которого следует, что размер полости увеличивается с уменьшением расстояния между импульсами (т.е. с уменьшением скорости сканирования) и лежит в пределах 100 мкм. В первом случае расстояние между импульсами уменьшается, т.к. скорость на несколько порядков меньше, что должно было привести к увеличению размера. Как автор работы может объяснить данное несоответствие.

Указанные замечания не снижают ценности работы и значимости полученных результатов, а также не снижают ее общую высокую оценку. Диссертация Д.В. Ганина «Исследование процессов контролируемого формирования пространственных микроструктур при фокусировке излучения фемтосекундных лазеров в объем прозрачного материала» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, изложенным в положении «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Отзыв составлен научным сотрудником лаборатории «Волоконной оптики» к.ф.-м.н. Достоваловым Александром Владимировичем после ознакомления с диссертацией и авторефератом, а также на основании доклада Ганина Д.В. на заседании научного семинара учебно-научного центра «Квантовая оптика» ИАиЭ СО РАН 18.01.2018.

Отзыв составил

научный сотрудник лаборатории волоконной оптики

Подпись <i>Достовалова А.В.</i> сотрудника ИАиЭ СО РАН заверяю <i>[подпись]</i> Зав. отделом кадров Кудрявцева Н.В. «16» <i>02</i> 2018 г.



[подпись] А.В. Достовалов

*С отзывом ознакомлен
26 марта 2018 г.
Ран (Ранкин Д.В.)*