

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской академии наук

На правах рукописи

Грудцын Яков Викторович

**Самосокращение фемтосекундных импульсов в тонком кварце в режиме
множественной мелкомасштабной самофокусировки**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

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

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **Михеев Леонид Дмитриевич**

Научный консультант доктор физико-математических наук, профессор **Трофимов Вячеслав Анатольевич**

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук, профессор **Землянов Александр Анатольевич**, заведующий лабораторией нелинейно-оптических взаимодействий Института оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

доктор физико-математических наук, профессор **Чекалин Сергей Васильевич**, заведующий лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов Института спектроскопии РАН, г. Троицк

Ведущая организация Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится "18" марта 2019 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.032.03

доктор физико-математических наук

А.С. Золотько.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Настоящая работа посвящена новому методу сокращения длительности фемтосекундных импульсов. Поиск новых способов сокращения длительности мощных оптических фемтосекундных импульсов является одним из наиболее актуальных направлений в нелинейной оптике. Импульсы с длительностью вплоть до нескольких колебаний световой волны представляют интерес для применений в различных областях фундаментальных и прикладных исследований, включая спектроскопию высокого временного разрешения [1], генерацию терагерцовых импульсов гигаваттного уровня мощности [2] и аттосекундных импульсов в далёком ультрафиолете и мягком рентгене [3]. Однако конечная ширина полосы усиления известных твердотельных сред затрудняет получение импульсов длительностью короче 20-30 фс в системах мультитераваттного и петаваттного уровней мощности из-за сужения спектра при усилении, что делает актуальным поиск нелинейных методов сокращения длительности на выходе таких систем. К настоящему времени известны различные методы сокращения длительности мощных импульсов. Все они основаны на нелинейных механизмах уширения спектра и по способу их реализации могут быть разбиты на две группы. В первую из них входят методы, основанные на посткомпрессии, т.е. на компенсации спектральной фазы, приобретенной при нелинейном уширении спектра, с помощью дополнительных дисперсионных элементов [4, 5]. Во вторую можно включить методы самокомпрессии, которые после взаимодействия приводят к формированию импульса, близкого к спектрально-ограниченному, и, следовательно, в таких методах компенсация фазы не требуется. Среди последних стоит упомянуть работы по сокращению длительности при филаментации в газе [6-8], по сжатию импульсов в солитонном режиме в области аномальной дисперсии [9] и в средах с квадратичной нелинейностью [10], а также самокомпрессия в слаборелятивистской плазме [11, 12]. Методы сокращения импульсов на основе

самокомпрессии гораздо проще в реализации, поскольку не требуют использования дополнительных дисперсионных элементов. В то же время, в отличие от методов с посткомпрессией, существующие методы самокомпрессии в области видимого диапазона и ближнего ИК пока не имеют перспектив масштабирования по энергии (в среднем ИК диапазоне это возможно благодаря существованию материалов с аномальной дисперсией [9]).

В настоящей работе развит новый подход к сокращению длительности фемтосекундных импульсов, который не требует использования какой-либо дисперсионной системы для сжатия импульса во времени после нелинейного взаимодействия. Предлагаемый способ основан на возникновении множественной самофокусировки, в результате чего излучение центральной и задней частей импульса приобретает сильную угловую расходимость, в то время как излучение переднего фронта сохраняет расходимость близкую к начальной и формирует в дальней зоне короткий импульс. Экспериментально наблюдалось сокращение длительности 87 фс спектрально-ограниченного импульса до 19 фс [13]. Подобные явления вырезания центральной части импульса наблюдались при усилении наносекундных импульсов в активной среде из неодимового стекла [14,15], в этих работах указано решающее влияние мелкомасштабной самофокусировки на процесс изменения временной формы импульса. Тем не менее, полное исчезновение заднего фронта не происходило, возможно, из-за доминирующего влияния лавинообразной ионизации для импульсов таких длительностей, что приводило к разрушению материала при дальнейшем повышении мощности.

Обычно множественная самофокусировка рассматривается как нежелательное явление и её возникновение в мощных системах стремятся предупредить [16]. В нашем подходе мы предлагаем использовать её в качестве нелинейного оптического затвора для отсечения заднего фронта. Это позволяет уменьшить требования к качеству лазерного излучения, что позволяет не применять пространственную фильтрацию.

Также в работе была адаптирована численная модель, основанная на нелинейном уравнении Шрёдингера, для расчётов взаимодействия фемтосекундного излучения с кварцем. Эта модель используется для исследований развития неустойчивостей и формирования рассеянного излучения при множественной самофокусировке. Для соответствия численной модели эксперименту были измерены значения сечения четырёхфотонного поглощения и нелинейного коэффициента преломления в кварце.

Цели и задачи

Целью работы являлась разработка метода самосокращения длительности фемтосекундных импульсов, не требующего использования дополнительных дисперсионных элементов с перспективой масштабируемости по энергии, а также исследование режима множественной самофокусировки как основного явления, обеспечивающего сокращение длительности. При этом решались следующие задачи:

- 1 Проведение экспериментов по сокращению длительности фемтосекундных импульсов без использования посткомпрессии на основе дополнительных дисперсионных элементов.
- 2 Экспериментальное и численное исследование режима множественной самофокусировки как основного фактора сокращения длительности.
- 3 Измерение материальных констант, необходимых для корректного моделирования взаимодействия фемтосекундного излучения с кварцем.

Научная новизна

Разработан новый метод самосокращения длительности импульсов, который не требует использования дисперсионных элементов для посткомпрессии. Физические механизмы, которые лежат в основе этого метода, дают основание рассчитывать на его масштабирование по энергии и на возможность получения импульсов с длительностью короче 10 фс. В ходе

исследования явления сокращения длительности впервые была получена величина сечения четырёхфотонного поглощения в кварце.

Практическая ценность

Преимуществами разрабатываемого метода сокращения длительности импульсов являются отсутствие необходимости использовать дополнительные дисперсионные элементы после нелинейного взаимодействия и простота реализации пространственной селекции сокращенного импульса, а также ожидаемая масштабируемость по энергии. Разрабатываемый метод может быть использован в практике для генерации лазерных импульсов в несколько периодов световой волны. Такие лазерные источники могут быть использованы для решения задач в самых разных областях взаимодействия излучения с материалами и плазмой (исследования кинетики быстропротекающих процессов в физике, химии и биологии, генерация гармоник высших порядков, изолированных аттосекундных импульсов, аттосекундная спектроскопия).

Положения, выносимые на защиту

1. Взаимодействие фемтосекундного излучения с образцами из керровских оптических материалов толщиной меньше дисперсионной длины позволяет реализовать самосокращение фемтосекундного импульса, наблюдаемое в дальней зоне распространения пучка за образцом.
2. В основе механизма самосокращения фемтосекундных импульсов лежит формирование множественной мелкомасштабной самофокусировки излучения в центральной части импульса, оставляющей в задней части импульса плазменные каналы. Возникающие при этом оптические неоднородности приводят к резкому возрастанию рефракционных потерь за передним невозмущенным фронтом импульса, на котором за счет фазовой самомодуляции формируется более короткий спектрально-ограниченный импульс, наблюдаемый в дальней зоне.

3. В кварце марки КУ-I на длине волны 473 нм сечение четырёхфотонного поглощения равно $\sigma_4=(1.0\pm 0.5)\times 10^{-115} \text{ см}^8\text{с}^3$

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях: XI International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers (AMPL-2013), International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL2014), XII International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers (AMPL-2015), International Committee on Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL2016), SPIE Photonics Europe 2016, International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2017), International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018).

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 5 научных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и 7 материалах научных конференций. Список трудов приведён на стр. 22-24.

Полученные результаты также были представлены на XV школе молодых учёных “Актуальные проблемы физики” и на семинарах ОКРФ ФИАН в 2016, 2017 и 2018 годах. Работа “Временная самокомпрессия при взаимодействии сходящихся пучков чирпированного излучения с тонким кварцем” авторов Грудцына Я.В. и Корибута А.В. получила диплом за высокий уровень проводимых исследований на Конкурсе молодёжных работ УНК ФИАН 2015 года.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертации результаты получены либо автором, либо при его решающем участии.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы из 91 наименования и 2 дополнений.

Объём диссертации составляет 106 страниц, включая 31 рисунок и 6 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, необходимые для её решения, перечислены полученные в диссертации результаты, показана их новизна, а также научная и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Глава 1 "**Описание численной модели**" посвящена описанию используемой в данной работе численной модели, основанной на нелинейном уравнении Шрёдингера.

В **разделе 1.1** обсуждается расширенное нелинейное уравнение Шрёдингера и уравнение, описывающее генерацию плазмы. Приведён анализ физических явлений (дифракции, материальной дисперсии, дисперсии нелинейного отклика, нелинейного поглощения, плазмообразования). В **разделе 1.2** кратко охарактеризована численная схема, использованная для решения уравнения. В **разделе 1.3** приведён обзор параметров среды, входящих в численную модель для плавленого кварца, известных из литературы. В частности, представлен обзор различных значений нелинейного показателя преломления и сечения четырёхфотонного коэффициента поглощения. Разброс в значениях этих величин, а для четырёхфотонного поглощения ещё и небольшая выборка значений, побудили провести измерения этих величин для материала образца, кварца марки КУ-1.

В **главе 2** "**Экспериментальная установка**" описан твердотельный лазерный комплекс СТАРТ-480М (**раздел 2.1**). Данная лазерная система способна к генерации излучения до 16 мДж на 960 нм с частотой 10 Гц. После преобразования во вторую гармонику длительность излучения составляет 70 фс. Работы, описанные в диссертации, проведены на длине волны второй гармоники (470-475 нм). В **разделе 2.2** приведены характеристики оборудования (спектрометры, ПЗС камера, пироэлектрический измеритель мощности,

одноимпульсный автокоррелятор), с помощью которого регистрировались различные параметры излучения и рассмотрены физические ограничения на длительность, измеряемую одноимпульсным автокоррелятором.

Глава 3 “Измерение нелинейного коэффициента преломления и четырёхфотонного коэффициента поглощения” посвящена измерению соответствующих величин для плавленого кварца.

В разделе 3.1 представлены результаты измерения нелинейного показателя преломления в кварце с помощью z-сканирования, кратко описаны экспериментальная схема, методика и результаты измерений. Суть методики заключается в измерении доли энергии, проходящей через расположенную в дальней зоне диафрагму при перемещении образца в области перетяжки. По мере приближения к фокусу доля энергии, прошедшей через диафрагму, меняется из-за возникновения поперечной нелинейной фазы, причём максимальный диапазон изменения пропускания пропорционален В-интегралу (фазе) в фокусе согласно $\Delta T \approx 0.286|\Phi| \times (1 - S)^{0.25}$, где S- пропускание апертуры, $\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 IL$ ($I=0.4$ ТВт/см² – интенсивность в максимуме, L=1 мм - толщина образца) [17]. Зависимость пропускания от положения образца, нормированного на уровень пропускания без нелинейного взаимодействия (при слабой интенсивности), приведена на рис 1. Изменение пропускания T=42.5% отвечает нелинейному показателю преломления $n_2=(2.5\pm 0.3)\times 10^{-16}$ см²/Вт.

Также в разделе описаны измерения нелинейного показателя преломления, выполненные с помощью сопоставления уширения спектра центральной части пучка в эксперименте и в численной модели. Эти измерения дали 2.7×10^{-16} см²/Вт, что входит в доверительный интервал измерений с помощью z-сканирования.

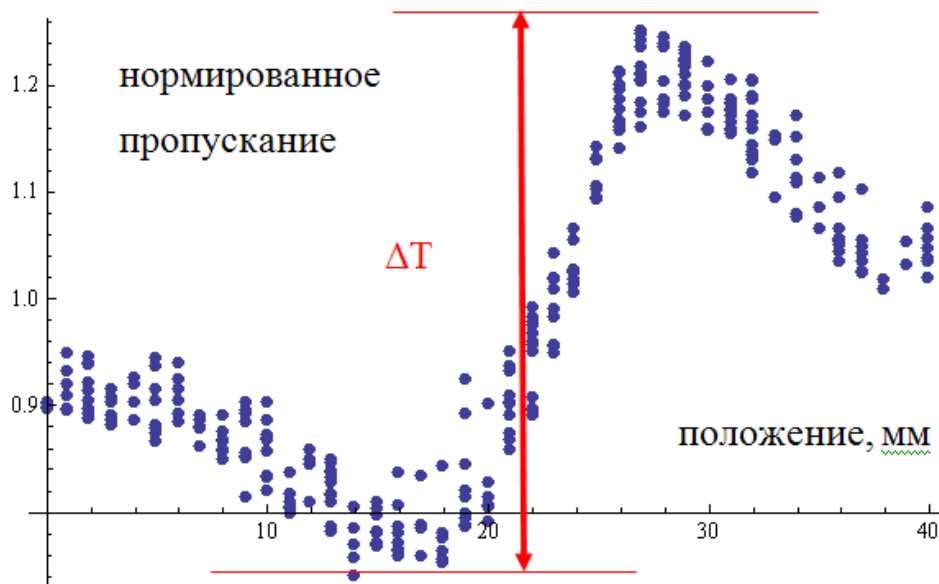


Рис. 1. Пропускание диафрагмы при разных положениях образца.

В разделе 3.2 описаны результаты измерения коэффициента сечения четырёхфотонного поглощения в кварце с помощью z-сканирования и I-сканирования (вариаций по энергии). Отношение начальной энергии к прошедшей через образец измерялось с помощью CCD камеры, которая одновременно регистрировала энергию начального пучка и прошедшего через образец. В разделе также приведена экспериментальная схема, кратко описана методика измерений, детально обоснована аппроксимация импульса гауссовой зависимостью как по времени, так и по радиусу, показана незначительность влияния мелкомасштабной неустойчивости и лавинообразной ионизации на результат. Результаты измерений – кривая пропускания образца в зависимости от интенсивности для схем с разными фокусными расстояниями собирающих зеркал (А-40 см, В – 60 см) и результаты, полученные в схеме с z-сканированием – приведены на рис 2.

После анализа ошибок из результатов экспериментов было выбрано значение $(0.14 \pm 0.07) \text{ ТВт}^{-3} \text{ см}^5$, что соответствует $\sigma_4 = (1.0 \pm 0.5) \times 10^{-115} \text{ см}^8 \text{ сек}^3$.

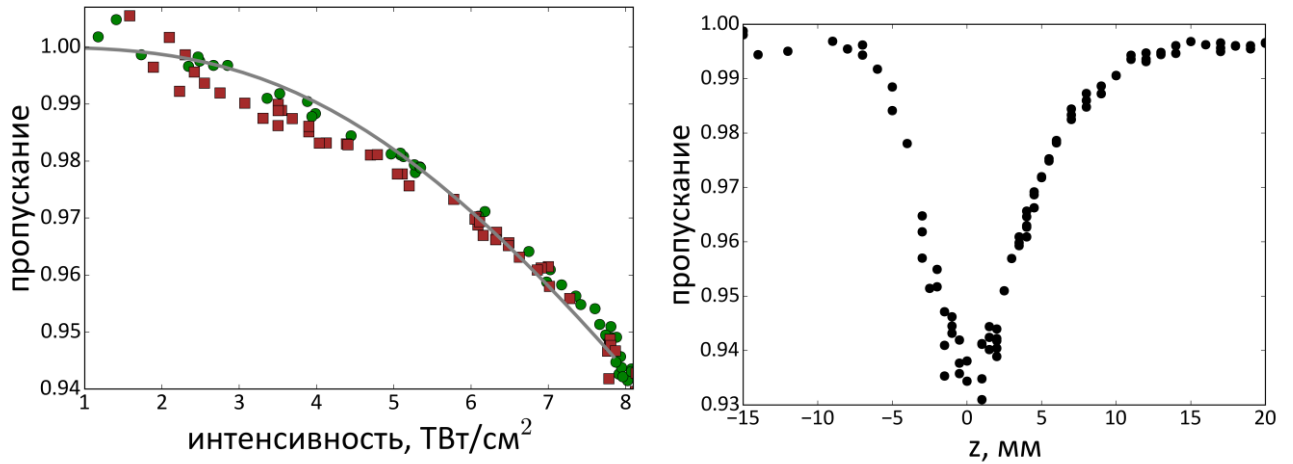


Рис. 2. Нормированное отношение энергии, прошедшей через образец к начальной для случая А (квадраты) и В (кружки) в зависимости от интенсивности в схеме с I-сканированием (слева). Серая кривая - теоретически полученная зависимость для коэффициента поглощения $0.13 \text{ ТВт}^{-3}\text{см}^5$. Справа - нормированная кривая пропускания, полученная методом Z-сканирования, соответствует коэффициенту поглощения $0.15 \text{ ТВт}^{-3}\text{см}^5$.

В главе 4 “Сокращение длительности импульсов” приведены экспериментальные и численные исследования механизма самосокращения.

Раздел 4.1 посвящён результатам экспериментов по сокращению длительности импульса с отрицательным чирпом при взаимодействии с кварцем до длительностей меньших, чем длительность спектрально-ограниченного импульса для начального спектра. Длительность начального отрицательно чирпированного импульса в эксперименте составляла 120 фс (длительность спектрально-ограниченного 70 фс), сокращённого до 27 фс. В разделе описаны схема эксперимента, результаты исследования спектра и автокорреляционной функции центральной части излучения в дальней зоне после взаимодействия с кварцевой пластинкой толщиной 1 мм. В наблюдениях можно выделить два режима взаимодействия: случай условно “низкой” интенсивности (до 3 ТВт/см^2), когда наблюдалось расщепление импульса (излучение в дальней зоне на оси фактически состояло из излучения переднего и заднего фронтов) и случай “высокой” интенсивности, когда происходило формирование одиночного

импульса из излучения переднего фронта. Это сопровождалось смещением спектра в синюю область.

В разделе 4.2 приведены численные расчёты взаимодействия отрицательно chirпированного импульса с образцом плавленного кварца для малой интенсивности. Модель хорошо описывает наблюдаемые явления (совпадает профиль спектра, см. рис. 3, возникает расщепление импульса). Кроме того, результаты расчётов также дают в дальней зоне кольцеобразный поперечный профиль, как и в эксперименте.

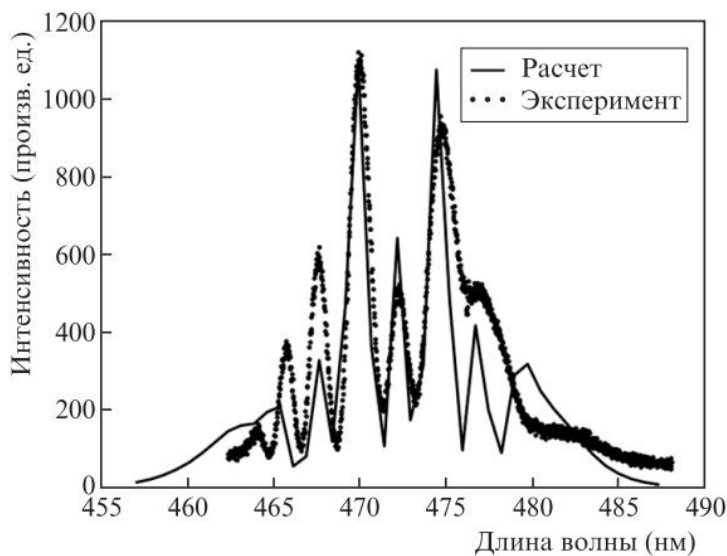


Рис. 3. Сравнение спектров в дальней зоне. Штриховка – экспериментальные данные, сплошная – расчёт для интенсивности 3 ТВт/см^2 .

Раздел 4.3 посвящён экспериментальным результатам и их обсуждению по взаимодействию спектрально-ограниченного излучения с пластинкой кварца КУ толщиной 1 мм.

В подразделе 4.3.1 описана схема экспериментального исследования. Начальный импульс спектрально-ограниченный, длительность составляла 87 фс. Пучок проходил через 1 мм пластинку из плавленного кварца, интенсивность изменялась в диапазоне $(0.8-3) \text{ ТВт/см}^2$, диаметр пучка составлял 0.63 мм. Установленная сразу за образцом диафрагма селектировала центральную часть пучка для выделения области с примерно одинаковой интенсивностью. Для этой

части излучения измерялись спектр и автокорреляционная функция при разной интенсивности взаимодействия, кроме того, в отдельной схеме с помощью переноса изображения измерялся профиль пучка на выходе из образца, также измерялся профиль излучения, прошедшего через диафрагму.

В подразделе 4.3.2 приведены экспериментальные результаты. При интенсивности 3 ТВт/см^2 излучение, прошедшее через диафрагму, делилось на центральное ядро и область рассеянного излучения с углом расходимости 0.1 рад (рис. 4).

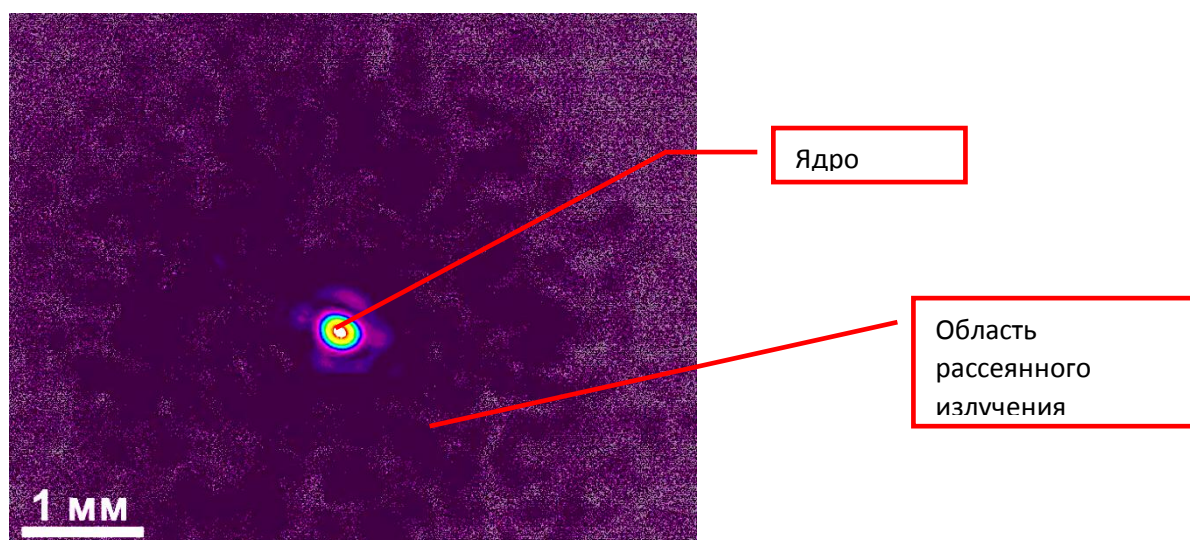


Рис. 4. Излучение на выходе из диафрагмы диаметром 100 мкм на расстоянии 5 см при интенсивности 3 ТВт/см^2 .

На рисунке 5 представлены спектры излучения в ядре и изображения пучка целиком на выходе из образца. Видно, при интенсивности выше 1.2 ТВт/см^2 (В-интеграл 4.8) наблюдается асимметричное уширение спектра в длинноволновую область, при 3 ТВт/см^2 коротковолновая область исчезала.

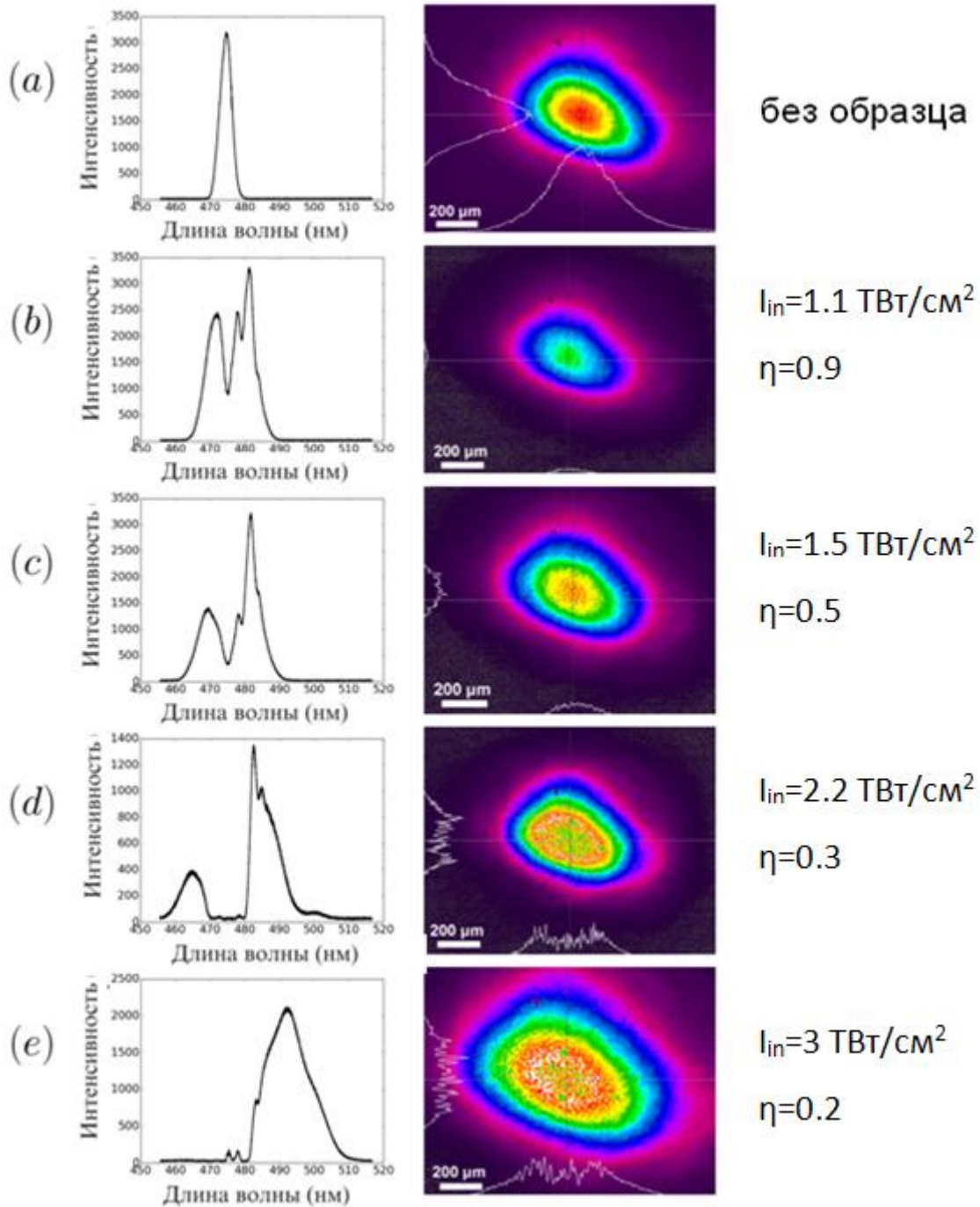


Рис. 5. Спектры излучения, прошедшего через диафрагму, изображения пучка сразу на выходе из образца, а также параметр η (отношение энергии в ядре к энергии, которая проходит в таких же условиях через 100 мкм диафрагму без образца) без образца (a) и с образцом при разной интенсивности (b-e).

При 3 ТВТ/см^2 длительность излучения в ядре составила 19 фс (рис. 6).

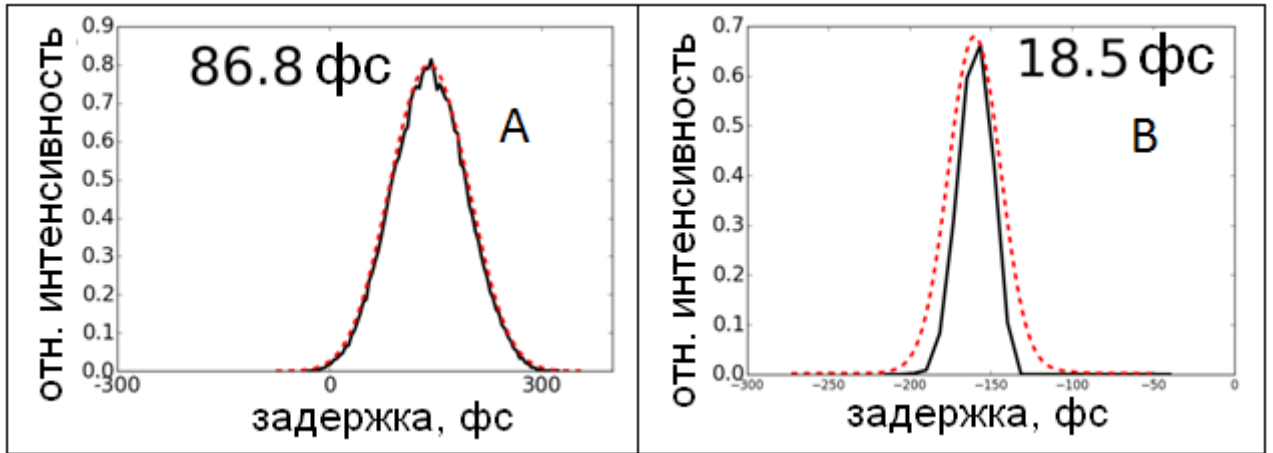


Рис. 6. Автокорреляционные функции (АФ): А) для начального импульса; В) для излучения ядра, прошедшего через диафрагму при интенсивности 3 ТВт/см^2 . Сплошная – измеренные АФ, штриховка - АФ, полученные обратным Фурье-преобразованием спектров этих импульсов. 87 фс и 19 фс – длительности, полученные из измеренных АФ в предположении гауссовой формы импульса. Небольшое несовпадение АФ на рис. В объясняется близостью к пределу временного разрешения измерений автокоррелятора.

Также была произведена оценка изменения M^2 пучка – параметр M^2 сокращённого излучения увеличился на 30% относительно M^2 начального пучка.

Подраздел 4.3.3 посвящён обсуждению экспериментальных результатов и формирования мелкомасштабной неустойчивости и сокращения длительности. Показано, что наблюдаемые явления объясняются ростом мелкомасштабной неустойчивости в задней и центральной частях импульса в рамках теории Беспалова-Таланова. Задний фронт импульса дополнительно испытывает рефракцию на образовавшейся плазме. Это приводит к практически полному подавлению излучения в центральной и задней частях импульса в приосевой области распространения пучка. На переднем фронте фазовая самомодуляция обогащает и сдвигает спектр в красную область. Основные источники рассеянного излучения – горячие точки – сосредоточены в центральной области с диаметром $\sim 0.1 \text{ мм}$ (диаметр всего пучка $\sim 0.5 \text{ мм}$)

В подразделе также экспериментально оценён уровень начальных шумов с помощью измерения распределения интенсивности в фокальной плоскости профилометром. Эти эксперименты указывают на образец как основной источник мелкомасштабных шумов, отношение энергии в рассеянном излучении к общей для начального пучка составило 0.07%. Наблюдался резкий рост энергии рассеянного излучения при значении В-интеграла выше 4.1, что сходится с началом несимметричного уширения спектра ядра (рис. 5). Резкий рост рассеянного излучения при возникновении мелкомасштабной неустойчивости наблюдался в работах [18,19].

В подразделе показано, что дисперсия в материале не оказала существенного влияния на нелинейное взаимодействие, так как дисперсионная длина для 20 фс импульса $\frac{T_{1/2}^2}{4 \ln 2 GDD} = 2 \text{ мм}$, что превосходит толщину образца (дисперсия групповых скоростей $GDD=75 \text{ фс}^2/\text{мм}$ [20] для кварца на 480 нм). Для более короткой длительности роль дисперсии возрастает, и имеет смысл использовать материалы с большим нелинейным показателем преломления и меньшей дисперсией групповых скоростей. В качестве таких материалов в тексте диссертации предложены CaF_2 и для ближнего ИК LiCl .

В подразделе также показано, что если начальный импульс является спектрально-ограниченным, то импульс, формируемый на переднем фронте в результате нелинейного взаимодействия будет также спектрально-ограниченным. Полученная величина смещения спектра в красную область $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_0} \sim 0.05$ при максимальной экспериментально реализованной интенсивности $3 \text{ ТВт}/\text{см}^2$ близка к экспериментально полученному значению ~ 0.04 .

В разделе 4.4 приведены результаты эволюции одиночного возмущения [13]. С их помощью объяснена спектрально-угловая зависимость рассеянного излучения (синяя область спектра распространяется под большим углом, рис. 7). Объяснение структуры конического излучения одиночных филаментов, и, в

частности, расходимости синего крыла спектра, можно найти в работах [21,22]. Результаты численных расчётов для случая множественной филаментации, когда процесс захватывает весь пучок, а длина образца довольно значительна для того, чтобы появлялись циклы рефокусировки, описаны в [23].

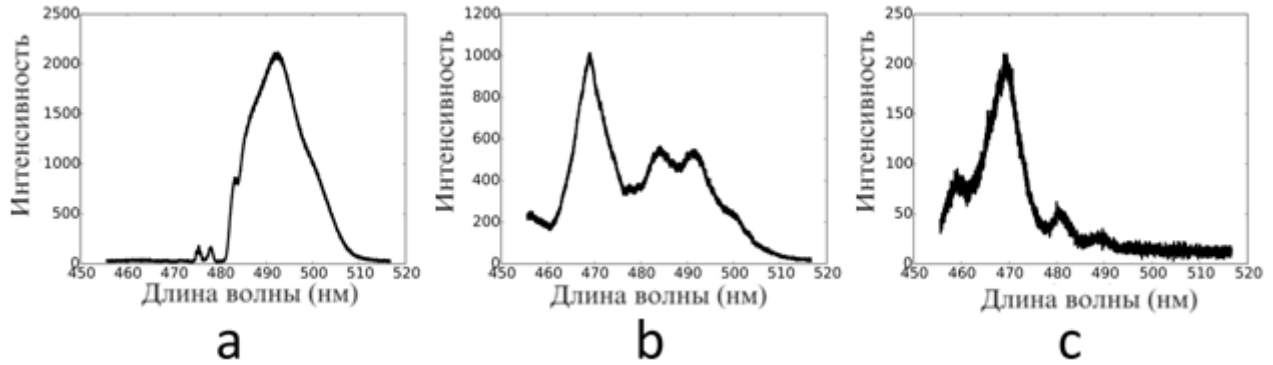


Рис. 7. Спектры: а) ядра, б) всего рассеянного излучения без ядра, с) рассеянного излучения под углом распространения 0.1 рад.

Расчёты проводились для следующих условий: интенсивность взаимодействия 3 ТВт/см^2 , ширина пучка 500 мкм, ширина возмущения 7.5 мкм, начальная амплитуда возмущения составляет 0.1 %. В расчётах мы положили разность фаз между основной волной и возмущением равной нулю, так как согласно экспериментальным данным, основным источником шумов является образец. Как сам пучок, так и возмущение моделировались гауссовой зависимостью.

Численное моделирование показало, что распространение возмущения создаёт керровскую линзу, которая приводит к образованию микрообласти с интенсивностью в 4-5 раз выше начальной интенсивности пучка. Результаты расчёта – возмущение на выходе из образца и развитие возмущения в зависимости от пройденного расстояния - приведены на рис. 8-9.

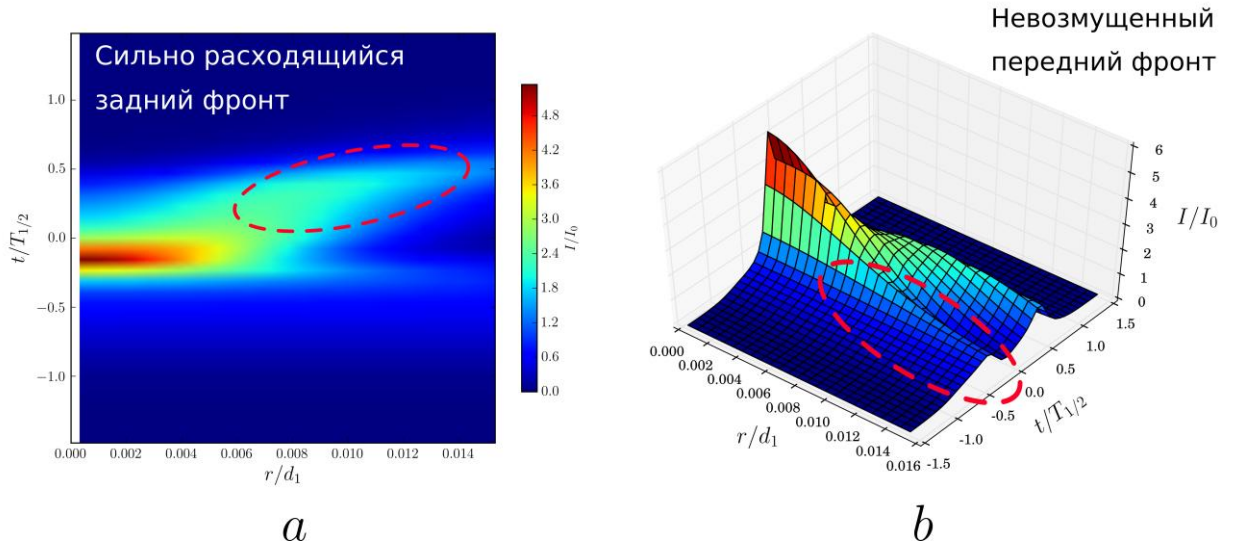


Рис. 8. Пространственно-временное распределение интенсивности в пределах диафрагмы 1 на выходе из образца а) вид сверху, б) вид со стороны переднего фронта. Значения интенсивностей нормированы на начальную максимальную интенсивность пучка, времени – на длительность по полувысоте, а радиуса – на диаметр пучка по полувысоте.

В пространственно-временном распределении интенсивности на выходе из образца (рис. 8) можно выделить следующие области: сильно расходящийся задний фронт (выделен на рис. 8а), область фокусировки излучения и невозмущённый передний фронт (рис. 8б). С невозмущённым передним фронтом мы связываем формирование ядра и сокращённого импульса в дальней зоне.

На рис. 9 продемонстрировано развитие неустойчивости в образце в зависимости от пройденного расстояния. Формирование сфокусированной области начинается вблизи временного максимума импульса с небольшим смещением к задней части импульса (рис. 9(а-б)), что вызвано запаздыванием молекулярной части нелинейного отклика.

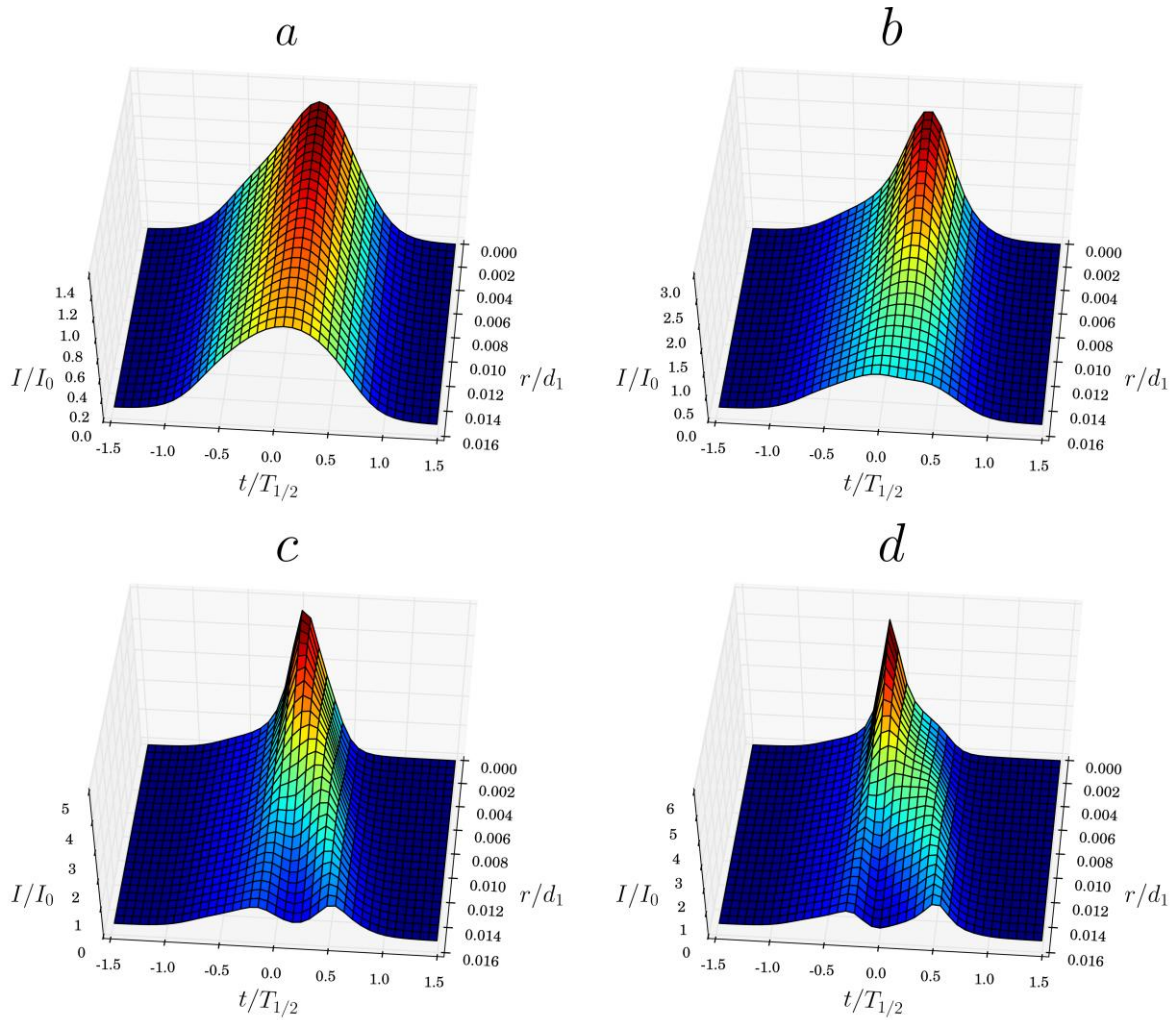


Рис. 9. Эволюция возмущения в образце в зависимости от пройденного расстояния: а) 0.7 мм, б) 0.8 мм, в) 0.9 мм, г) 1.0 мм. Значения интенсивностей нормированы на начальную максимальную интенсивность пучка, времени – на длительность по полувысоте, а радиуса – на диаметр пучка по полувысоте.

Затем уровень интенсивности выходит на примерно постоянный уровень, превышающий начальный в 4-5 раз (рис. 9(г-д)). При этом пик интенсивности смещается ближе к переднему фронту, а излучение заднего фронта из-за рефракции в образующейся плазме переходит в расходящуюся волну. При этом формируется плазменный канал с концентрацией электронов, достигающей $2.9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что составляет 0.7% от критической. Рефракция, вызванная плазмой этого канала, приводит к дополнительному росту расходимости излучения по сравнению с дифракцией на переднем фронте возмущения. Это объясняет наблюдаемый экспериментально (см. рис. 7) большой угол распространения

излучения в коротковолновом крыле спектра, отвечающем заднему фронту возмущения, по сравнению с углом распространения длинноволнового крыла, генерацию которого естественно связать с передней частью возмущения.

На основании данных расчётов с помощью функции Грина была получена спектрально-угловая зависимость для рассеянного излучения. Её сравнение с экспериментально измеренной приведено на рис. 10.

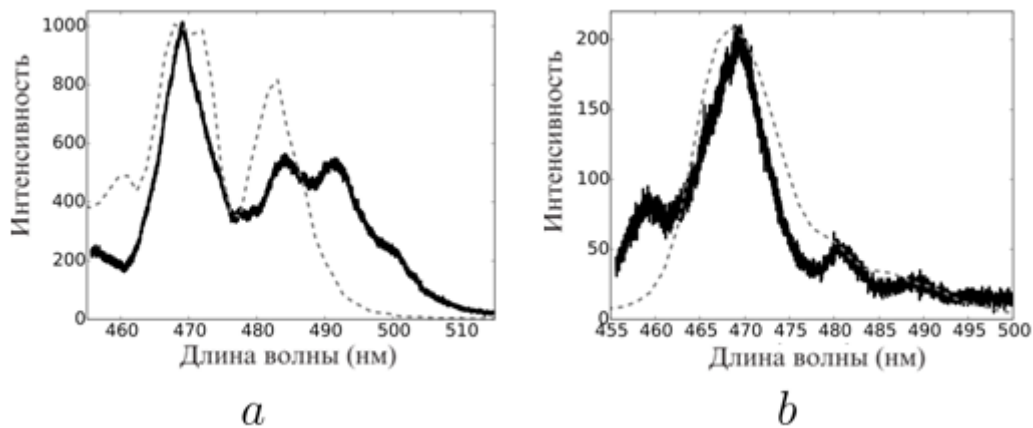


Рис. 10. Сравнение расчётного спектра возмущения в дальней зоне с экспериментально полученным спектром рассеянного излучения: а) экспериментальный спектр всего рассеянного излучения без ядра (сплошная кривая) и расчётный спектр возмущения, проинтегрированный по углу от 0.02 до 0.1 рад (штриховка); б) спектр рассеянного излучения, измеренный под углом 0.1 рад к оси пучка (сплошная кривая) и расчётный спектр возмущения для излучения, распространяющегося под углом 0.085 рад к оси пучка (штриховка).

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Продемонстрирована реализация нового способа сокращения длительности фемтосекундных импульсов, не требующего применения дополнительных дисперсионных элементов. Предлагаемый подход основан на возникновении множественной самофокусировки, в результате чего излучение из центральной части и заднего фронта импульса приобретает сильную угловую расходимость, в то время как излучение переднего фронта сохраняет расходимость близкую к

начальной и формирует в дальней зоне короткий импульс. Физика процесса указывает на максимальную энергетическую эффективность метода для супергауссовых пучков, которые используются в наиболее мощных лазерных системах. На возможность масштабирования по энергии (при сохранении прежнего уровня интенсивности взаимодействия с образцом) указывают физические принципы, лежащие в основе процесса сокращения длительности. Минимальная длительность сокращённого импульса в данном методе определяется материальной дисперсией керровской среды.

2. Реализовано четырёх – пяти кратное сокращение 87 фс спектрально-ограниченных импульсов и 120 фс отрицательно chirпированных импульсов (длительность спектрально-ограниченного импульса 70 фс) в образце кварца толщиной 1 мм при интенсивности выше 3 ТВт/см² без использования дополнительных дисперсионных элементов в режиме формирования множественной самофокусировки.
3. По распределению излучения в фокальной плоскости измерен уровень шумов, усреднённая амплитуда начальных флуктуаций пучка составила 0.07%.
4. В плавленом кварце марки КУ-1 на длине волны 473 нм в схеме с z и с I сканированием по измерению пропускания получено сечение четырёхфотонного поглощения, которое составило $\sigma_4 = (1.0 \pm 0.5) \times 10^{-15} \text{ см}^8 \text{ с}^3$. Подобные измерения для кварца выполнены впервые. Также измерен нелинейный показатель преломления: $n_2 = (2.5 \pm 0.3) \times 10^{-16} \text{ см}^2 / \text{Вт}$.
5. В численную модель для расчёта взаимодействия излучения с прозрачными материалами с керровской нелинейностью, разработанную в лаборатории математического моделирования в физике ВМК МГУ, внедрено приближение медленно меняющейся волны. С помощью данной модели проведён численный расчёт режима самофокусировки,

проанализирована спектрально-угловая зависимость рассеянного излучения.

Публикации автора в рецензируемых журналах по теме диссертации

1. А. И. Аристов, Я. В. Грудцын, Л. Д. Михеев, А. В. Поливин, С. Г. Степанов, В. А. Трофимов, В. И. Яловой, Явление уширения спектра и самокомпрессии отрицательно чирпированных фемтосекундных импульсов видимого диапазона в кварце //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 12. – С. 1097-1099.
2. С. В. Алексеев, А. И. Аристов, Я. В. Грудцын, Н. Г. Иванов, Б. М. Ковальчук, В. Ф. Лосев, С. Б. Мамаев, Г. А. Месяц, Л. Д. Михеев, Ю. Н. Панченко, А. В. Поливин, С. Г. Степанов, Н. А. Ратахин, В. И. Яловой, А. Г. Ястремский, Гибридные фемтосекундные системы видимого диапазона на основе ХеF(C-A)-усилителя: состояние и перспективы //Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – №. 3. – С. 190-200.
3. Я. В. Грудцын, И. Г. Зубарев, А. В. Корибут, И. Е. Кучик, С. Б. Мамаев, Л. Д. Михеев, С. Л. Семёнов, С. Г. Степанов, В. А. Трофимов, В. И. Яловой, Фазовая самомодуляция в тонком кварце в сходящемся пучке отрицательно чирпированного фемтосекундного излучения //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 5. – С. 415-420.
4. Ya. V. Grudtsyn, A. V. Koribut, V. A. Trofimov, and L. D. Mikheev, Femtosecond pulse self-shortening in Kerr media due to transient regime of multiple filamentation // Journal of the Optical Society of America B. – 2018. – Т. 35. – №. 5. – С. 1054-1058.
5. Я. В. Грудцын, А. В. Корибут, Л. Д. Михеев, В. А. Трофимов, Самосопряжение фемтосекундных импульсов в керровских средах: роль модуляционной неустойчивости в формировании спектра // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 4. – С. 306-312.

Публикации автора в материалах международных конференций по теме диссертации

- 1 A.I. Aristov, Ya.V. Grudtsyn, O.N. Krokhin, L.D. Mikheev, A.V. Polivin, S.G. Stepanov, V.A. Trofimov, V.I. Yalovoi. “New method for fs pulse self-compression relying on spectral broadening of down-chirped pulses in fused silica”, XI International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers - AMPL, September 16-20, 2013, Tomsk, Russia. Book of Abstracts, p.74
- 2 Ya.V. Grudtsyn, S.B. Mamaev, L.D. Mikheev, S.G. Stepanov, V.A. Trofimov, V.I. Yalovoy. “Spectral Broadening and Self-compression of Down-chirped Fs Pulses in Transparent Bulk Kerr Media”. International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL2014), October 12 - 17, 2014, Goa, India. Book of Abstracts, p.87.
- 3 Ya.V. Grudtsyn, I. G. Zubarev, A.V. Koribut, I.E. Kuchik, S.B. Mamaev, L.D. Mikheev, V.I. Yalovoi. “Spectrum broadening and selfcompression of negatively chirped fs pulses in thin fused silica plate”, XII International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers - AMPL, September 13-18, 2015, Tomsk, Russia. Book of Abstracts, p.73
- 4 Ya.V. Grudtsyn, A.V. Koribut, L.D. Mikheev, V.A. Trofimov. “Plasma-shutter Self-compression in Thin Plastic Films”. International Committee on Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL2016), 11-16 September 2016, Montebello, Québec, Canada, Book of Abstracts, p.110.
- 5 V.A. Trofimov, I.E. Kuchik, L.D. Mikheev, Ya.V. Grudtsyn. “Explicit solution of FWM problem under the interaction of copropagating laser beams in medium with cubic nonlinear response”. SPIE Photonics Europe, 2016, Brussels, Belgium, Nonlinear Optics and its Applications IV. Proceedings of SPIE Vol. 9894 (2016) 989412.
- 6 Ya.V. Grudtsyn, A.V. Koribut, L.D. Mikheev, V.A. Trofimov. International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2017), October 03-05, 2017, Moscow, Russia. Book of Abstracts, p.140.

- 7 Ya.V. Grudtsyn, A.V. Koribut, L.D. Mikheev, V.A. Trofimov. International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018), October 01-05, 2018, Moscow, Russia. Book of Abstracts, p.156.

Список литературы, цитированной в автореферате

- [1] Kobayashi T., Shirakawa A., Fuji T. Sub-5-fs transform-limited visible pulse source and its application to real-time spectroscopy //IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2001. – Т. 7. – №. 4. – С. 525-538.
- [2] Zhou M. L., Yan X. Q., Mourou G. et al. Proton acceleration by single-cycle laser pulses offers a novel monoenergetic and stable operating regime //Physics of Plasmas. – 2016. – Т. 23. – №. 4. – С. 043112.
- [3] Gildenburg V. B., Vvedenskii N. V. Optical-to-THz wave conversion via excitation of plasma oscillations in the tunneling-ionization process //Physical review letters. – 2007. – Т. 98. – №. 24. – С. 245002.
- [4] Rolland C., Corkum P. B. Compression of high-power optical pulses // Journal of the Optical Society of America B. – 1988. – Т. 5. – №. 3. – С. 641-647.
- [5] Mével E. Tcherbakoff O. Salin F. et al. Extracavity compression technique for high-energy femtosecond pulses // Journal of the Optical Society of America B. – 2003. – Т. 20. – №. 1. – С. 105-108.
- [6] Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration in a white-light filament //Optics letters. – 2006. – Т. 31. – №. 2. – С. 274-276.
- [7] Zair A., Guandalini A., Schapper F. et al. Spatio-temporal characterization of few-cycle pulses obtained by filamentation //Optics express. – 2007. – Т. 15. – №. 9. – С. 5394-5405
- [8] Курилова М. В., Урюпина Д. С., Мажорова А. В. и др. Формирование оптических импульсов длительностью до 8 фс при филаментации коллимированного фемтосекундного лазерного излучения в аргоне //Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – №. 10. – С. 879-881.

- [9] Shumakova V., Malevich P., Ališauskas S. et al. Multi-millijoule few-cycle mid-infrared pulses through nonlinear self-compression in bulk // *Nature communications*. – 2016. – Т. 7. – С. 12877.
- [10] Ashihara S., Nishina J., Shimura T. et al. Soliton compression of femtosecond pulses in quadratic media // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2002. – Т. 19. – №. 10. – С. 2505-2510.
- [11] Faure J., Glinec Y., Santos J. J. et al. Observation of laser-pulse shortening in nonlinear plasma waves // *Physical review letters*. – 2005. – Т. 95. – №. 20. – С. 205003.
- [12] He Z. H., Nees J. A., Hou B. et al. Ionization-induced self-compression of tightly focused femtosecond laser pulses // *Physical review letters*. – 2014. – Т. 113. – №. 26. – С. 263904.
- [13] Ya. V. Grudtsyn, A. V. Koribut, V. A. Trofimov, and L. D. Mikheev, Femtosecond pulse self-shortening in Kerr media due to transient regime of multiple filamentation // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2018. – Т. 35. – №. 5. – С. 1054-1058.
- [14] Жерихин А. Н., Матвеец Ю. А., Крюков П. Г., Чекалин С. В. О происхождении временной структуры ультракоротких лазерных импульсов // *Квантовая электроника*. – 1974. – Т. 1. – №. 4. – С. 956-959.
- [15] Басов Н. Г., Крюков П. Г., Матвеец Ю. А. и др. Формирование мощных наносекундных импульсов в лазерной установке на неодимовом стекле // *Квантовая электроника*. – 1974. – Т. 1. – №. 6. – С. 1428-1434.
- [16] Mironov S., Lozhkarev V., Luchin G. et al. Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femtosecond radiation // *Applied Physics B*. – 2013. – Т. 113. – №. 1. – С. 147-151.
- [17] Sheik-Bahae M., Said A. A., Van Stryland E. W. High-sensitivity, single-beam n_2 measurements // *Optics letters*. – 1989. – Т. 14. – №. 17. – С. 955-957.

- [18] Басов Н.Г., Кертеc И., Крюков П. Г. и др. Нелинейные потери в оптических квантовых генераторах и усилителях ультракоротких импульсов// ЖЭТФ.- 1971.- Т.60-С.533
- [19] Басов Н.Г., Крюков. П. Г., Сенатский Ю. В., Чекалин С. В. Получение мощных ультракоротких импульсов света на неодимовом стекле// ЖЭТФ.- 1969.- Т.57-С.1175
- [20] Malitson I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica //Josa. – 1965. – Т. 55. – №. 10. – С. 1205-1209.
- [21] Kandidov V. P., Kosareva O. G., Golubtsov I. S. et al. Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media (or supercontinuum generation) //Applied Physics B. – 2003. – Т. 77. – №. 2-3. – С. 149-165.
- [22] Kosareva O. G., Kandidov V. P., A. Brodeur et al. Conical emission from laser–plasma interactions in the filamentation of powerful ultrashort laser pulses in air //Optics letters. – 1997. – Т. 22. – №. 17. – С. 1332-1334.
- [23] Гейнц Ю. Э, Голик С. С., Землянов А. А. и др. “Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике”//Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №. 2. – С. 133-141.