

На правах рукописи



КОТОВ Александр Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ФОКУСИРОВКЕ НА МИШЕНЬ И ДИАГНОСТИКЕ
ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

1.3.19 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: **Соловьев Александр Андреевич**, кандидат физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Кузнецов Андрей Петрович**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва);

Трунов Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (г. Москва)

Защита состоится «6» октября 2025 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru

Автореферат разослан 28 августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Взаимодействие лазерного излучения с веществом представляет интерес с фундаментальной и практической точек зрения. Лазерная плазма является источником вторичного излучения [1–4] и частиц [5–9] с уникальными параметрами, недоступными на классических ускорителях, а изучение ее динамики позволяет не только углубить понимание фундаментальных физических процессов, но и моделировать астрофизические явления [10–13] и исследовать перспективные подходы к инерциальному термоядерному синтезу [14–16].

Критически важным параметром, определяющим характер лазерно-плазменного взаимодействия, является пиковая интенсивность лазерного излучения в фокусе. Для достижения максимальной пиковой интенсивности требуются прецизионные методы контроля как спектральной фазы, влияющей на длительность импульса, так и волнового фронта, определяющего качество фокусировки.

Искажения в волновом фронте пучка возникают из-за неидеальности оптических элементов, ошибок юстировки, а также из-за нелинейных, тепловых и механических эффектов в оптическом тракте. Для коррекции искажений волнового фронта в современных лазерных системах используются адаптивные оптические системы (АОС) [17, 18]. Основными элементами АОС являются: деформируемое зеркало (ДЗ), способное изменять форму отражающей поверхности; датчик волнового фронта (ДВФ); и система управления. В процессе работы АОС осуществляет итеративную коррекцию формы ДЗ, минимизируя расхождения между измеряемым волновым фронтом и эталонным, который определяется в процессе калибровки системы.

Основными факторами, ограничивающими качество калибровки АОС, являются разностные искажения волнового фронта, возникающие между целевой точкой фокусировки и ДВФ, и динамические искажения волнового фронта, которые появляются из-за влияния на волновой фронт пучка нестационарных эффектов, например, потоков воздуха в открытых частях лазерной установки.

Обычно калибровка АОС выполняется посредством слабого настроечного излучения, обладающего стабильными параметрами и высокой частотой повторения, что позволяет достигать практически безабракационной фокусировки. Однако, на мощных лазерных установках ключевым является коррекция волнового фронта именно мощных пучков [19–23]. Сложность коррекции при этом определяется низкой частотой повторения импульсов, нестабильностью параметров пучка и невозможностью прямого измерения фокального пятна в мощном излучении. В связи с этим, актуальной задачей является разработка эффективных подходов к коррекции волнового фронта мощного лазерного

пучка, позволяющих сократить количество требуемых итераций, что критически важно для систем с низкой частотой повторения импульсов.

Коррекция искажений в лазерном пучке играет ключевую роль и в контексте технологий, использующих нелинейные взаимодействия. В последние годы активно развивается метод компрессии сверхмощных лазерных импульсов после компрессора CafCA (Compression after Compressor Approach) [24]. Данный метод основан на самомодуляции лазерного импульса в среде с кубической нелинейностью, приводящей к расширению спектра импульса и приобретению модуляции спектральной фазы, которая затем компенсируется чирпирующими зеркалами.

Метод CafCA позволяет дополнительно сжать лазерный импульс в несколько раз и практически пропорционально степени сжатия увеличить его мощность [25]. Так как уширение спектра происходит в результате фазовой самомодуляции, пучок приобретает специфические нелинейные фазовые искажения (НФИ), приводящие к пространственным неоднородностям формы спектральной фазы и спектра из-за пространственной неоднородности интенсивности проходящего нелинейный элемент лазерного пучка [26]. НФИ можно интерпретировать как изменяющиеся во времени искажения волнового фронта или как разные искажения на разных частотах, поэтому в условиях наличия НФИ возникает необходимость в разработке специальных подходов для измерения и коррекции искажений такого рода.

Таким образом, в силу различий в характере и природе искажений волнового фронта – включая статические и динамические аберрации, а также нелинейные эффекты – работа адаптивной оптической системы оказывается специфичной для каждой конкретной лазерной установки и экспериментальной схемы. Важной задачей при этом является создание быстрых и точных методов калибровки и коррекции искажений волнового фронта, способных обеспечить наилучшую фокусировку сверхмощного лазерного пучка, в том числе и при наличии НФИ.

Однако достижение идеальной фокусировки само по себе не обеспечивает максимальной пиковой интенсивности на мишени, что обусловлено ошибками позиционирования мишени относительно фокуса лазерного пучка и может приводить к существенному снижению интенсивности излучения на поверхности мишени и, как следствие, уменьшению эффективности взаимодействия лазера с веществом. Методы позиционирования мишеней определяются характеристиками самих мишеней, параметрами используемой лазерной установки и особенностями схемы эксперимента, и включают, например, тепловую съемку, ретрофокусировку, прямое наблюдение задней стороны мишени [27-29]. Также контроль положения мишеней может осуществляться путем регистрации продуктов лазерно-плазменного взаимодействия [30], что в основном применяется на лазерных установках с хорошей стабильностью параметров излучения и высокой частотой повторения импульсов. Способность АОС управлять волновым фронтом лазерного пучка позволяет не только эф-

фективно корректировать aberrации, но и осуществлять прецизионное смещение положения фокуса по глубине. Это, в свою очередь, открывает возможности для разработки методов юстировки, обеспечивающих высокоточное совмещение мишени с фокусом.

Помимо задач точной фокусировки и позиционирования мишени, в ряде экспериментов возникает необходимость формирования заданного распределения интенсивности на мишени. В большинстве случаев при фокусировке стремятся получить дифракционно-ограниченное фокальное пятно, однако существуют и задачи, где требуется иная форма распределения — например, в лабораторной астрофизике [12] или при управлении параметрами лазерно-плазменного источника частиц и вторичного излучения [31–33]. Достижение требуемого пространственного профиля интенсивности на мишени возможно посредством управления как амплитудным, так и фазовым распределением пучка. При этом изменение амплитудного профиля, как правило, сопровождается потерями энергии, что делает фазовые методы более предпочтительными. Особенно эффективными среди них являются подходы, основанные на применении АОС, обеспечивающих гибкое и высокоточное управление фазой лазерного пучка.

Таким образом, использование АОС позволяет не только корректировать волновой фронт для достижения максимальной пиковой интенсивности, но и контролируемо вносить искажения в пучок для управления распределением интенсивности на мишени и осуществления прецизионного позиционирования мишени, что делает АОС важным инструментом оптимизации лазерно-плазменного взаимодействия.

Следующим важным аспектом экспериментальных исследований является диагностика лазерной плазмы. Одним из методов исследования динамики плазмы является оптическая диагностика, и в частности, метод накачка-зондирование, основанный на использовании части фемтосекундного драйвера в качестве зондирующего импульса [34]. Отсутствие джиттера между лазерным драйвером и зондирующим импульсом позволяет при помощи данного метода изучать динамику плазмы в фемтосекундном масштабе путем управления положением оптической линии задержки.

Использование части основного лазерного импульса, длительность которого обычно составляет не менее нескольких десятков фемтосекунд приводит к эффекту размытия движения при зондировании релятивистских объектов в лазерной плазме, например, сингулярностей при BISER [35]. Способность метода CafCA уменьшать длительность лазерного импульса открывает возможности для использования данного метода не только в задаче увеличения пиковой интенсивности, но и для создания ультракоротких зондирующих импульсов, способных повысить разрешение оптической диагностики лазерной плазмы.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью исследований является развитие методов управления параметрами лазерного излучения при фокусировке сверхмощных импульсов и диагностике лазерно-плазменного взаимодействия.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Создание комплекса методов, позволяющих существенно поднять точность и скорость калибровки адаптивной оптической системы.
2. Исследование коррекции волнового фронта на сверхмощной фемтосекундной лазерной системе.
3. Повышение интенсивности при фокусировке сверхмощных лазерных пучков с нелинейными фазовыми искажениями после посткомпрессии.
4. Разработка подходов для позиционирования мишеней и создания необходимого распределения интенсивности в фокусе при помощи адаптивной оптической системы.
5. Сокращение длительности зондирующих импульсов для диагностики релятивистских объектов в лазерной плазме.

Научная новизна работы

Разработан метод калибровки адаптивной оптической системы на основе совместного анализа фокального пятна и волнового фронта пучка, что позволяет повысить качество фокусировки за счет корректного учета динамических искажений волнового фронта в процессе калибровки.

Разработана архитектура сверточной нейронной сети для восстановления волнового фронта на основе распределения флюенса в двух плоскостях в окрестности фокуса. Такой подход обеспечивает прямое восстановление волнового фронта и представляет собой альтернативу традиционным итерационным алгоритмам, позволяя значительно сократить время калибровки адаптивной оптической системы и повысить её точность.

Впервые экспериментально реализована компенсация нелинейных фазовых искажений, возникающих при посткомпрессии сверхмощных лазерных импульсов при низкой частоте повторений и В-интеграле порядка 10.

Предложен и численно исследован подход к формированию ультракоротких зондирующих импульсов при помощи метода посткомпрессии. Показано, что наличие пред- и постимпульсов, возникающих при посткомпрессии не приводит к существенной потере информативности оптической диагностики релятивистских объектов.

Практическая значимость работы

Разработаны методы калибровки адаптивных оптических систем, позволяющие определять эталонный волновой фронт соответствующий безабберационной фокусировке, что необходимо для достижения максимальной пиковой интенсивности в фокусе при коррекции волнового фронта мощных пучков.

Показано, что в сверхмощных лазерных системах с низкой частотой повторений, где различия между пучками в настроенном и разовом режимах больше, чем различия между пучками в разовом режиме, финальная коррекция волнового фронта должна производиться непосредственно в мощном пучке. Такой подход позволяет оптимизировать работу лазерной установки и повысить её эффективность.

Экспериментально продемонстрирована возможность коррекции нелинейных фазовых искажений по измерениям волнового фронта как в широком, так и в узком спектральном диапазоне. Полученные результаты подтверждают применимость метода посткомпрессии для повышения сфокусированной пиковой интенсивности сверхмощных лазерных пучков и возможность реализации тракта измерения волнового фронта без использования специализированной широкополосной оптики.

Разработаны методы прецизионного позиционирования, обеспечивающие субэлектронную точность совмещения мишени с фокусом пучка по глубине фокусировки, что позволяет обеспечить на мишени максимальную пиковую интенсивность и повысить эффективность лазерно-плазменного взаимодействия.

Предложен подход к формированию ультракоротких зондирующих импульсов методом посткомпрессии, позволяющий кратно степени сжатия уменьшить эффект размытия движения при диагностике релятивистских объектов в лазерной плазме. Это существенно повышает пространственно-временное разрешение диагностики типа накачка-зондирование.

Методы исследования

В качестве основного инструмента исследований выступала адаптивная оптическая система производства АКА Optics [36]. АОС состояла из биморфного деформируемого зеркала, датчика волнового фронта гартмановского типа и системы управления. Деформируемое зеркало имело апертуру 240 мм, и состояло из стеклянной подложки с отражающим покрытием, к которой были приклеены два пьезодиска. Первый пьезодиск позволял управлять общей кривизной зеркала, второй был сегментирован, и позволял управлять локальными деформациями поверхности. Всего зеркало имело 96 управляемых пьезоактуаторов. Датчик волнового фронта состоял из матрицы камеры и микролинзового раstra. Камера имела КМОП матрицу 2048×2048 пикселей с размером пикселя 5,5 мкм. Микролинзовый растр имел фокусное расстояние 3,2 мм и период 136 мкм.

В численном моделировании создание волновых фронтов проводилось при помощи разложения Цернике [37, 38]. Связь между ближней и дальней зоной обеспечивалась при помощи преобразования Фурье.

Экспериментальные исследования проведены на лазерном комплексе PEARL [39, 40]. Лазерный комплекс PEARL представляет собой параметрическую лазерную систему с усилением чирпированных импульсов. В разовом режиме энергия на выходе компрессора может достигать более 20 Дж. Апер-

тура пучка на выходе из компрессора составляет до 180 мм. Длительность составляет около 60 фс. Центральная длина волны – 910 нм.

Для восстановления волнового фронта пучка на основе распределений флюенса в фокусе и вне фокуса, использовались сверточные нейросети [41]. Для создания нейронной сети использовался язык python и библиотека TensorFlow [42]. TensorFlow – это открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронных сетей.

Распространение лазерных импульсов в среде с керровской нелинейностью моделировалось при помощи численного решения нелинейного уравнения Шредингера относительно огибающей напряженности электрического поля во втором приближении теории дисперсии [24]. Для численного решения уравнения использовался метод расщепления (Split-Step method). Этот метод разделяет уравнение на линейную и нелинейную части, которые решаются по отдельности на каждом шаге по пространственной координате. Линейная часть решается с использованием быстрого преобразования Фурье, а нелинейная часть решается методом Predictor-Corrector.

Положения, выносимые на защиту

1. Совместный анализ фокального пятна и волнового фронта позволяет обеспечить безабберационную калибровку адаптивной оптической системы в условиях наличия динамических искажений.
2. Скорость и точность нахождения эталонного волнового фронта адаптивной оптической системы можно повысить, используя метод предсказания волнового фронта по двум распределениям флюенса в окрестности перетяжки на основе сверточной нейронной сети.
3. Поскольку различия между настроенным и разовым режимами работы параметрической лазерной системы PEARL превышают различия между пучками в разовом режиме, финальная коррекция волнового фронта должна выполняться непосредственно при работе в разовом режиме.
4. Использование адаптивной оптической системы после посткомпрессии мощных фемтосекундных импульсов позволяет увеличить сфокусированную пиковую интенсивность в 3.5 раза за счет компенсации нелинейных фазовых искажений.
5. Адаптивная оптическая система за счет коррекции искажений волнового фронта и возможности управления положением фокуса обеспечивает суббрезевскую точность совмещения острого края мишени с фокусом.
6. Использование метода посткомпрессии для сжатия фемтосекундных зондирующих импульсов позволяет уменьшить эффект размытия движения при детектировании релятивистских объектов кратно степени сжатия, а появляющиеся при этом пред- и постимпульсы не приводят к заметному снижению информативности диагностики.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением математических методов и соответствием экспериментальных данных результатам численных расчетов. Физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и научных школах:

- International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” (NWP-2021)
- Научная школа «Нелинейные волны», г. Нижний Новгород, 2020, 2022, 2024 гг.
- XXVI Нижегородская сессия молодых ученых, г. Нижний Новгород, 2021 г.
- International Conference Laser Optics (ICLO), г. Санкт Петербург, 2020, 2021, 2022, 2024 гг.
- XIV Всероссийская школа для студентов и молодых учёных по лазерной физике и лазерным технологиям, г. Саров, 2023 г.
- VIII International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight 2024), г. Москва, 2024 г.

Результаты работы также обсуждались на научных семинарах в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН. Представленные результаты были отмечены первой премией XXV конкурса работ молодых учёных ИПФ РАН в 2023 г.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертации получены при непосредственном участии диссертанта совместно с научным руководителем и соавторами. В каждый из полученных результатов автор внес определяющий вклад в подготовку и проведение эксперимента, обработку экспериментальных данных, анализ и интерпретацию результатов. В задаче разработки подхода к восстановлению волнового фронта на основе сверточной нейросети автор внес определяющий вклад в концепцию, постановку задачи и численное моделирование. В исследовании по получению ультракоротких зондирующих импульсов автор также отвечал за ключевые этапы численного моделирования.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 129 страниц, и включает 33 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 124 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, приводится степень разработанности темы исследования, формулируются его цели и задачи, новизна работы, указываются методы исследования, дается информация о структуре и объеме диссертации, формулируются положения, выносимые на защиту. Также во введении указаны данные об апробации работы, степени достоверности полученных результатов и личном вкладе автора.

Первая глава работы посвящена исследованию методов калибровки АОС в условиях наличия динамических и разностных искажений волнового фронта. В главе рассмотрены, причины возникновения разностных и динамических искажений, их влияние на работу АОС, а также предложены метод динамического переопределения эталонного волнового фронта и метод восстановления волнового фронта на основе сверточной нейросети.

В **разделе 1.1.** описываются принципиальная схема, состав, характеристики и основные принципы работы используемой АОС [36], а также основные механизмы и причины появления разностных искажений волнового фронта. Также, в Разделе 1.1 описаны методы калибровки АОС, их достоинства и недостатки.

В **Разделе 1.2** предлагается метод калибровки АОС на основе совместного анализа фокального пятна и волнового фронта пучка, что позволяет корректно учитывать динамических искажения волнового фронта в процессе калибровки.

Наличие динамических искажений в оптической системе сильно усложняет работу итерационных алгоритмов калибровки АОС на основе анализа фокального пятна. На каждой итерации к стационарным искажениям волнового фронта из-за наличия динамических искажений добавляется ошибка, что сильно ухудшает эффективность. Для решения данной проблемы был предложен метод динамического определения эталонного волнового фронта [A1]. Метод основан на анализе совместно полученных данных о волновом фронте и фокальном пятне. При этом измерение волнового фронта позволяет осуществлять его коррекцию АОС и определять его отличие от эталонного волнового фронта, а на основе анализа фокального пятна рассчитывается оптимизируемая функция, например число Штреля. Таким образом коррекция АОС позволяет стабилизировать волновой фронт в плоскости ДВФ, а дальнейшая оптимизация происходит методом восхождения на холм путем добавления к эталонной форме волнового фронта мод Цернике. Данный метод позволяет снизить влияние динамических аберраций и учитывать ограничения деформируемого зеркала, связанные с гистерезисом и нелинейностью отклика электродов.

Эффективность работы предложенного метода была проверена экспериментально, в сравнении с методами калибровки: (1) на основе алгоритма вос-

хождения на холм по электродам зеркала и (2) на основе алгоритма восхождения на холм по линейным комбинациям электродов, соответствующим модам Цернике.

В методе 1 оптимизация происходила по 96 электродам зеркала, напряжения на которых могут меняться в пределах от -300 до 600 В с шагом 1 В. Помимо этого, функции отклика электродов линейно зависимы, следовательно в задаче существует большое количество локальных экстремумов. При оптимизации методом 1 на каждом шаге изменяется напряжение на одном из электродов зеркала, при этом к изменению волнового фронта из-за искривления поверхности зеркала добавляется ошибка, вызванная динамической аберрацией, что негативно сказывается на процессе оптимизации. Так при небольшой величине динамических искажений волнового фронта с СКО пространственной неоднородности во времени $\sigma_d = 15$ нм методом 1 удалось увеличить число Штреля лишь до $0,3$, а при $\sigma_d = 30$ нм число Штреля не поднималось выше $0,2$.

В методе 2 оптимизация происходила по линейным комбинациям электродов, соответствующим модам Цернике, при этом для оптимизации были выбраны первые 11 мод Цернике. В результате удалось достичь величины S значительно выше, чем методом 1. Так, при $\sigma_d = 15$ нм S было увеличено до $0,7$, а при $\sigma_d = 30$ нм – до $0,55$. При этом процесс оптимизации проходил быстрее и эффективнее по сравнению с методом 1, что связано с меньшим количеством параметров, а также с возможностью их независимой оптимизации.

Предложенный метод показал наилучший результат – как при $\sigma_d = 15$ нм, так и при $\sigma_d = 30$ нм удалось увеличить S до $0,86$. Такая эффективность предложенного метода достигается за счет стабилизации волнового фронта в плоскости ДВФ при помощи активной работы АОС и соответственно сведения влияния динамических аберраций на процесс оптимизации к минимуму. Это проявляется в одинаковом результате при работе при разной величине динамических аберраций в отличие от методов 1 и 2. Также использование ДВФ позволяет учитывать неточности формирования поверхности зеркала вследствие гистерезиса и нелинейности отклика электродов зеркала, что также вносит ошибку при оптимизации методами 1 и 2.

В разделе 1.3 была предложена архитектура сверточной нейронной сети для восстановления волнового фронта на основе распределения флюенса в двух плоскостях в окрестности фокуса. [A2]. Предложенная архитектура сверточной нейронной сети представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Архитектура нейронной сети. В качестве входных данных нейросеть принимает двухканальное изображения флюенса в фокусе и при дефокусировке, а в качестве выходных данных выдает искажения волнового фронта

Данные для обучения нейронной сети были сгенерированы численно. В работе рассматривались два случая ограничения пространственной частоты: 25 (нормальные частоты) и 100 (большие частоты) членов в разложении Цернике, при трех распределениях СКО искажений волнового фронта: от 0 до $0,25 \lambda$ (малые искажения), до $0,6 \lambda$ (средние искажения) и до 1λ (большие искажения). Для каждого случая была обучена отдельная нейросеть с предложенной архитектурой.

Для проведения исследования эффективности работы нейросетей были сгенерированы два набора данных с количеством мод в разложении 25 и 100, распределение СКО искажений волнового фронта при этом было шире, чем в исследуемых наборах, и располагалось в диапазоне от 0 до 2λ .

В качестве функции для оценки работы нейросети, была выбрана функция «эффективности», определяемая как $1 - \frac{СКО_{рез}}{СКО_0}$, где $СКО_{рез} = СКО(ВФ_0 - ВФ_{пред})$ – СКО разности искажений начального волнового фронта и предсказанного волнового фронта, $ВФ_0$ и $ВФ_{пред}$ – искажения истинного и предсказанного волновых фронтов соответственно. Если смотреть на данные величины со стороны системы коррекции волнового фронта, то $СКО_{рез}$ показывает СКО ошибки при коррекции волнового фронта на основе предсказаний нейронной сети, а функция эффективности соответствует тому, какая часть искажений была при этом скорректирована.

На рисунке 2 изображены зависимости эффективности работы нейросети, обученной на разных наборах данных от величины начальных искажений волнового фронта. В описании панелей указано то, сколько мод Цернике было использовано при генерации данных при тестировании и обучении моделей.

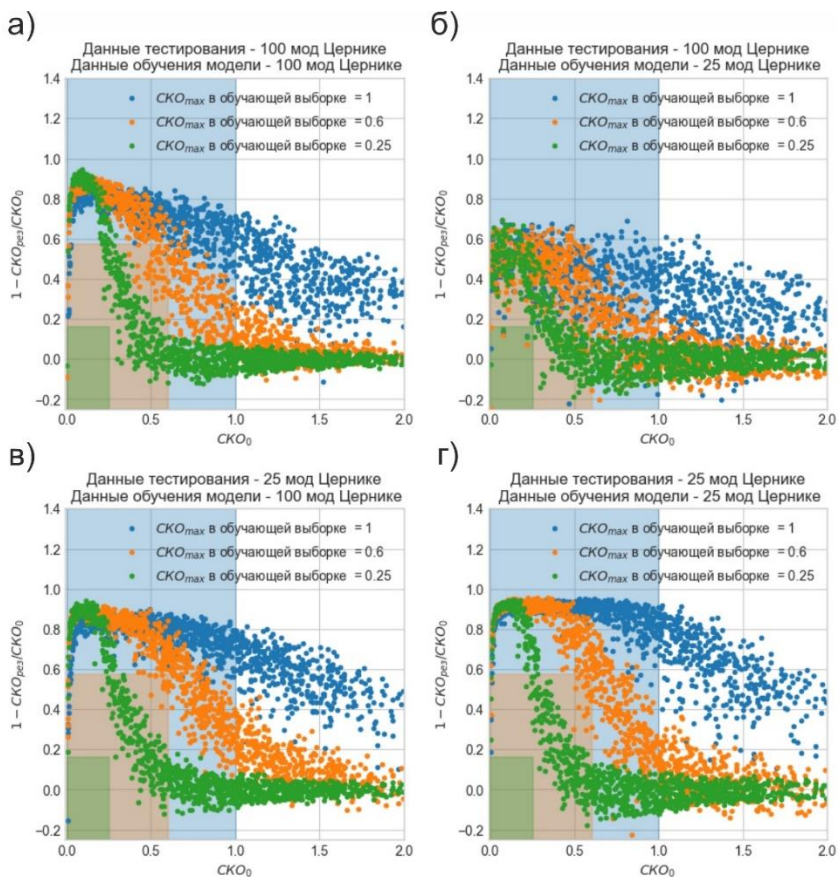


Рис. 2. Зависимость эффективности работы обученных моделей от SCO искажений волнового фронта для разных величин пространственной частоты искажений волнового фронта в обучающих и проверочных данных. Синим цветом обозначены точки для моделей, которые обучались на больших искажениях; оранжевым цветом обозначены точки для моделей, которые обучались на средних искажениях; зеленым цветом обозначены точки для моделей, которые обучались на малых искажениях. Пределы SCO искажений волнового фронта в обучающих выборках обозначены соответствующим цветом на графиках

В численных исследованиях метод показал эффективность до 0,9 и положительную эффективность в широких пределах SCO искажений волнового фронта. Также метод был проверен на реальных данных. Экспериментальная проверка данного метода показала хорошее соответствие реальных и восстановленных распределений в фокусе и в окрестности фокуса, и эффективность

порядка 0,65 при СКО искажений волнового фронта 0,4 λ . Результаты проверки эффективности предложенного метода на реальных данных представлены на рис. 3.

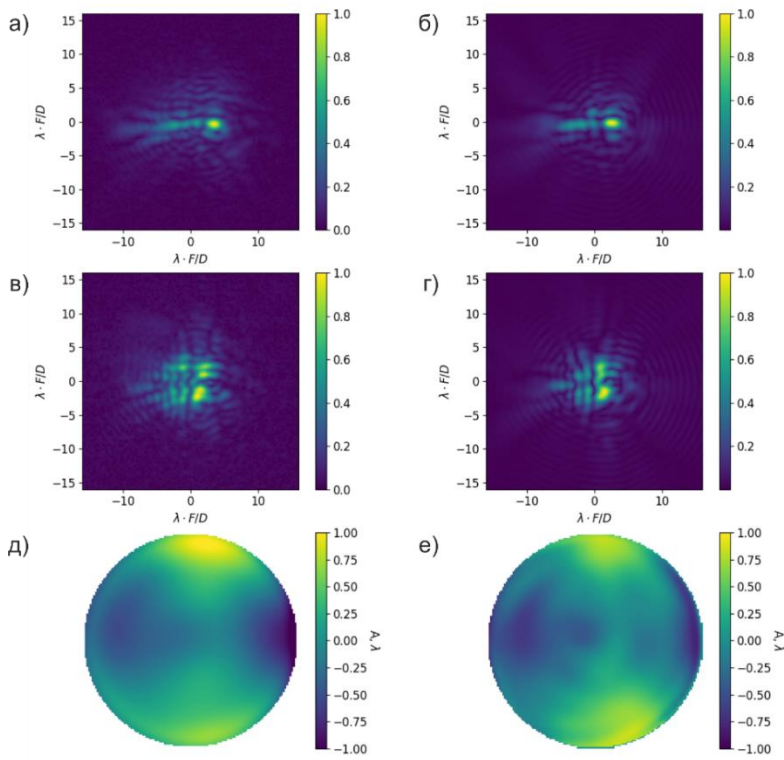


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (а, в, д) и восстановленных при помощи нейросети (б, г, д) данных. На вход нейросети были переданы изображения распределений энергии в фокусе (а) и вне фокуса (в). Нейросеть восстанавливала волновой фронт (е), на основе которого были рассчитаны распределения энергии в фокусе (б) и вне фокуса (г). Волновой фронт, измеряемый ДВФ, показан на панели (д)

Глава 2 работы посвящена исследованию возможности контроля пространственной фазы мощного лазерного пучка как в случае наличия только линейных искажений волнового фронта, так и в случае наличия нелинейных искажений, возникающих при самомодуляции фемтосекундного импульса в нелинейной среде.

В **Разделе 2.1** представлены результаты оптимизации волнового фронта мощных лазерных импульсов при помощи адаптивной системы коррекции волнового фронта на лазерной установке PEARL [39, A7]. Были исследованы

подходы к коррекции волнового фронта мощного пучка по разным режимам работы лазера – разовому и частотному [A3].

В разовом режиме работы энергия лазерного импульса может достигать 20 Дж, длительность импульса составляет порядка 60 фс, центральная длина волны 910 нм, а частота повторения импульсов 1 раз в 20 минут. Данный режим является основным при работе с лазером, в нем достигается максимальная энергия в лазерном импульсе, поэтому именно в разовом режиме необходимо добиться наилучшей фокусировки. Однако из-за низкой частоты повторения, коррекция волнового фронта по данному режиму становится трудоемкой и дорогостоящей.

Наиболее близким к разовому является частотный режим работы лазера. В частотном и разовом режимах профили волнового фронта должны быть близки, поскольку пучок проходит идентичный путь, а вся разница заключается в том, что в частотном режиме работы конечный параметрический усилитель не накачивается. Длительность импульса в частотном режиме работы также составляет 60 фс, центральная длина волны 910 нм, однако из-за отсутствия усиления в последнем параметрическом усилителе энергия в импульсе составляет порядка 10 мДж, а частота повторения увеличивается до 1 Гц. Недостатком частотного режима работы является низкая стабильность энергии в импульсе и неоднородность пространственного распределения в ближней зоне, вызванные наличием джиттера при усилении в лазерной системе.

При коррекции по частотному режиму экспериментально был показан достаточно большой разброс числа Штреля не только между разовым и частотным режимами, но и между соседними реализациями разового режима. Данный эффект можно объяснить различиями в пространственном распределении энергии пучка в ближней зоне в частотном режиме, что сильно снижает эффективность коррекции. Максимальное S в разовом режиме при коррекции по частотному режиму составило порядка 0,6.

Для коррекции волнового фронта по разовому режиму выбирались наиболее удачные выстрелы, заполнение ближней зоны в которых было наиболее близким к ожидаемому. Начальная коррекция при этом была проведена по квазинепрерывному режиму, и соответствовала $S = 0,27$. За несколько шагов коррекции, S было увеличено с 0,27 до 0,66 (рис. 4).

Таким образом, было улучшено качество фокусировки мощных лазерных пучков и установлено, что различия между пучками в настроенном и разовом режимах больше, чем различия между пучками в разовом режиме. Соответственно для достижения наилучшей фокусировки финальная коррекция волнового фронта должна производиться непосредственно в мощном пучке.

В разделе 2.2 была исследована фокусировка лазерного пучка после посткомпрессии [A4]. Метод посткомпрессии, наряду с увеличением пиковой мощности лазерного импульса, ухудшает фокусируемость пучка из-за нелинейных искажений волнового фронта (НФИ), вызванных пространственно-неоднородным профилем пучка. В работе было рассмотрено два подхода к

коррекции волнового фронта, предложенных в [26]. Первый подход был основан на использовании при коррекции эффективной формы волнового фронта, второй – на основе измерений в узкой спектральной полосе около центральной длины волны.

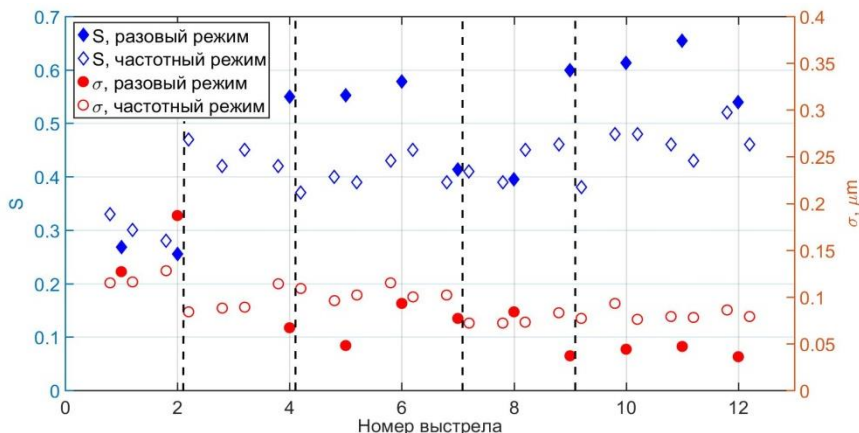


Рис. 4. Экспериментальная зависимость числа Штреля S и СКО искажений волнового фронта σ в разовом и в частотном режимах, при коррекции в разовом режиме. Вертикальными линиями отмечены выстрелы, на основании измерения волнового фронта которых происходила коррекция

Изначально мощный лазерный пучок в схеме без нелинейного элемента (НЭ) был сфокусирован до $S = 0,73$. Далее в пучок был помещен НЭ, не внесший заметных искажений в волновой фронт пучка при малой мощности. Вследствие появления НФИ число Штреля уменьшилось до 0,16. После нескольких шагов коррекции на основе эффективной формы волнового фронта S увеличилось до 0,43. При этом форма волнового фронта в каналах с измерениями в полном спектре и в узком спектре были схожи, что говорит о возможной коррекции как на основе эффективной формы волнового фронта, так и на основе волнового фронта, измеренного в узкой спектральной полосе около центральной длины волны.

В условиях наличия НФИ имеет смысл ввести определение отношения пиковых интенсивностей в абберационном и безабберационном случаях по аналогии с числом Штреля, и обозначить его как S_i . Разница между S_i и S проявляется только для импульсов с НФИ, волновые фронты которых в разные моменты времени имеют разную форму. Кроме того, значение S_i нельзя измерить напрямую так же, как S , но его можно оценить на основе численного моделирования самомодуляции [26]. По оценкам максимальное расчетное значение числа Штреля с учетом остаточных искажений волнового фронта, наблюдаемых в эксперименте, составляет $S = 0,52$ при $S_i = 0,62$. Полученное в

эксперименте значение $S = 0,43$, что на 16 % ниже. Используя ту же пропорцию, можно оценить S_i в эксперименте как 0,52, что на 16 % ниже теоретического значения. Соответственно использование АОС после посткомпрессии сверхмощных фемтосекундных импульсов позволило увеличить сфокусированную пиковую интенсивность в 3,5 раза за счет компенсации нелинейных фазовых искажений. Результаты эксперимента приведены на рисунке 5.

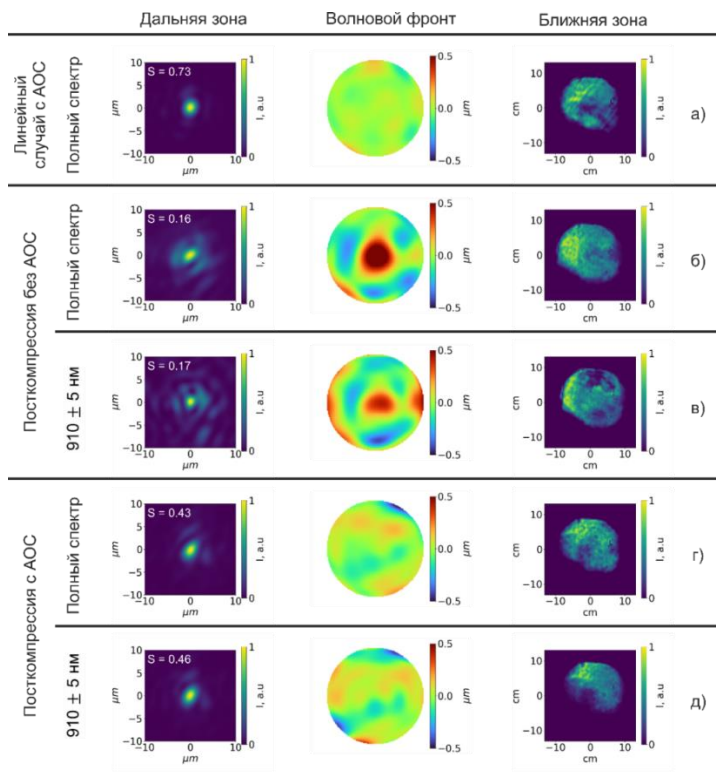


Рис. 5. Изображения дальней зоны (первый столбец), искажений волнового фронта (средний столбец) и ближней зоны (правый столбец) пучка в разных случаях: (а) без посткомпрессии после коррекции линейной части искажений волнового фронта, (б, в, г, д) с посткомпрессией; (б, в) – с коррекцией только линейной части искажений волнового фронта, (г, д) – коррекция на основе измерений эффективного волнового фронта; (б, г) во всем спектре, (в, д) в узкой спектральной полосе 910 ± 5 нм. Значения S и СКО составляли: а) $S = 0,73$, СКО = 60 нм; б) $S = 0,16$, СКО = 214 нм; в) $S = 0,17$, СКО = 175 нм; г) $S = 0,43$, СКО = 91 нм; д) $S = 0,46$, СКО = 108 нм

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность коррекции нелинейных фазовых искажений по измерениям волнового фронта

как в широком, так и в узком спектральном диапазоне. Полученные результаты подтверждают применимость метода CafCA для повышения сфокусированной пиковой интенсивности сверхмощных лазерных пучков и возможность реализации тракта измерения волнового фронта без использования специализированной широкополосной оптики.

Глава 3 посвящена экспериментальным методам настройки и диагностики лазерно-плазменного взаимодействия. В данной главе предлагаются подходы для прецизионного позиционирования мишени и создания распределения в фокусе в виде полосы при помощи АОС, а также предлагается техника укорочения зондирующего лазерного импульса при помощи CafCA.

В **Разделе 3.1** предлагаются методы совмещения фокального пятна и мишени при помощи АОС: метод позиционирования мишени в подсветке дефокусированного лазерного пучка и метод наведения по перекрытию краем мишени фокального пятна. Предложенные методы наведения и настройки основаны на способности ДЗ управлять сходимостью лазерного импульса путем внесения в волновой фронт пучка соответствующей добавки и могут быть реализованы в эксперименте в канале диагностики фокального пятна с дополнительным измерением ближней зоны излучения.

Так как в канале диагностики фокального пятна осуществляется перенос изображения из точки фокуса на матрицу камеры, то при введении АОС большой дефокусировки в волновой фронт пучка, возможно наблюдать в данном канале диагностики тень от мишени и осуществлять диагностику ее положения в плоскости фокуса. Помимо этого, при использовании тонких мишеней при достаточном разрешении данный метод позволяет настраивать положение мишени вдоль направления фокусировки.

Одним из методов настройки, наиболее часто используемых в экспериментах с тонкими мишенями, является метод перекрытия части фокального пятна краем мишени [8, А6, А7]. Суть метода наведения по перекрытию заключается в разном влиянии перекрытия части пучка в фокусе и вне фокуса на ближнюю зону. В зависимости от того с одной или с другой стороны от фокуса располагается мишень, она будет перекрывать разные части пучка, что хорошо заметно в ближней зоне. В фокусе же мишень будет блокировать часть компонент пространственного спектра пучка, в результате чего затемнение будет происходить не на одной из частей пучка, а по всей его апертуре. Данный метод позволяет настраивать положение фокуса относительно края мишени, используя при этом диагностику ближней зоны после точки фокусировки, которая может быть организована в канале измерения фокального пятна путем добавления делителя пучка и линзы.

На рисунке 6 показана экспериментальная демонстрация влияния перекрытия пучка в окрестности фокуса на ближнюю зону при разных значениях дефокусировки, вносимой АОС. Фокусировка пучка с $D = 10$ см осуществлялась внеосевым параболическим зеркалом с $F = 42$ см, число Штреля составляло порядка 0,85.

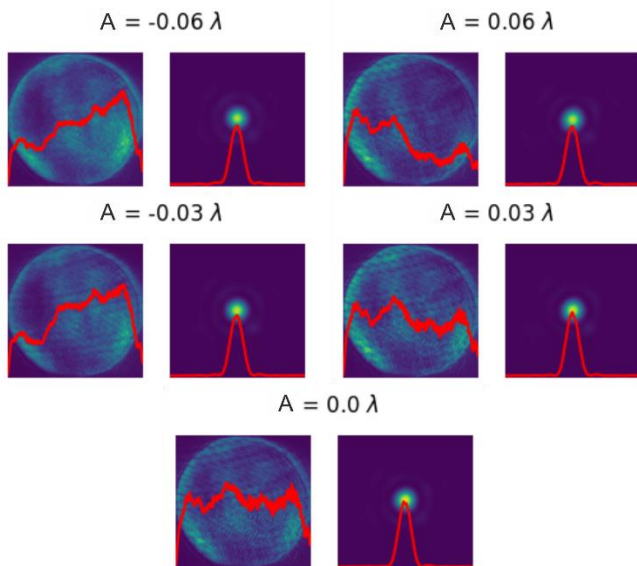


Рис. 6. Результаты эксперимента по демонстрации влияния на ближнюю зону перекрытия острым краем мишени части пучка в окрестности фокуса при разных значениях амплитуды дефокусировки (A). На рисунках приведены изображения деформированной из-за перекрытия ближней зоны пучка и пучка в окрестности фокуса в условиях без перекрытия для оценки, наблюдаемой на мишени интенсивности. Красной линией на изображениях ближней зоны показан интегральный профиль пучка, а на изображениях пучка в окрестностях фокуса – горизонтальное сечение. Интенсивности на изображениях пучков в области фокуса нормирована на максимум для пучка при $A = 0$

Результаты эксперимента показали, что наведение фокального пятна на мишень может осуществляться с точностью лучше, чем 0.015λ для амплитуды дефокусировки, что соответствует смещению $\Delta z = 0,24\lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2 \approx 3,8\lambda$ и в несколько раз меньше рэлееской длины ($\sim \lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2$).

Таким образом, точный контроль волнового фронта позволяет не только обеспечить качественную фокусировку пучка, но и совмещение края мишени с фокусом с субрэлееской точностью, что критически важно при проведении многих экспериментов. Рассмотренные методы позиционирования мишени и совмещения ее с фокусом пучка активно используются на лазерном комплексе PEARL для настройки тонких мишеней [8, A6, A7]. Они позволяют эффективно решать задачи прецизионного наведения даже в условиях сложных экспериментальных схем, где мишень имеет фиксированное положение или ограниченные возможности перемещения. В таких случаях использование

АОС значительно упрощает процесс настройки положения фокуса, минимизируя необходимость использования более сложных методов позиционирования и механического перемещения крупноапертурной оптики.

В Разделе 3.2 обсуждается возможность управлять волновым фронтом излучения при помощи АОС в задачах создания специфических распределений энергии на мишени на примере создания распределения в виде полосы.

Создание фокального пятна в виде полосы с большим аспектным соотношением применяется при изучении разлета лазерной плазмы в магнитном поле [12]. АОС позволяет реализовать такую фокусировку без потерь энергии и с возможностью быстро переключаться между различными размерами полосы, ее ориентацией в плоскости мишени, а также круглым фокусным пятном или иной его формой. Данный метод был использован при проведении эксперимента по исследованию разлета плазмы, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом, в магнитном поле, результаты которого находятся на стадии обработки. При помощи АОС создавались фокальные пятна с разным аспектным соотношением, вдоль двух направлений плоскости мишени – поперек и вдоль магнитного поля, что позволяло формировать однородную протяженную плазму. На рис. 7 приведены теневые фотографии плазмы в разных плоскостях при фокусировке лазерного импульса в виде полосы. В эксперименте полоска формировалась при помощи добавления в волновой фронт пучка поправки, представляющей из себя комбинацию астигматизма и дефокусировки.

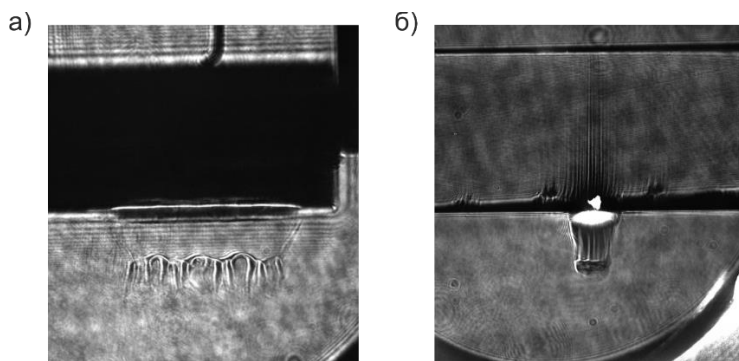


Рис. 7. Теневые фотографии лазерной плазмы при фокусировке лазерного импульса в виде полосы. Вид вдоль мишени (а) и поперек мишени (б)

Стоит отметить, что качество полосы также зависит от искажений волнового фронта пучка, которые могут приводить к ее существенному искажению. Поэтому коррекция искажений волнового фронта, как и при фокусировке в круглое пятно является важным шагом перед формированием необходимого распределения.

Таким образом, использование АОС позволяет проводить исследования лазерной плазмы, параметры которой могут варьироваться при помощи изменения формы фокального пятна. При этом управление распределением интенсивности на мишени не требует существенных изменений в схеме, что позволяет осуществлять перестройку между различными вариациями фокусировки за короткое время и без потерь энергии. Также теоретические и практические работы [31–33] показывают, что возможность вносить контролируемые искажения в волновой фронт пучка может позволить управлять параметрами лазерно-плазменного источника.

В Разделе 3.3 в качестве способа укорочения зондирующего импульса предлагается использовать метод посткомпрессии CafCA, основанный на уширении спектра в процессе самомодуляции в среде с керровской нелинейностью и последующей компенсацией квадратичной спектральной фазы чирпирующими зеркалами [A5]. Метод накачка-зондирование, основанный на использовании части фемтосекундного драйвера в качестве зондирующего импульса, является удобным инструментом для лабораторных исследований фемтосекундной лазерной плазмы.

Отсутствие джиттера между лазерным драйвером и зондирующим импульсом позволяет изучать динамику процессов в фемтосекундном масштабе путем управления положением оптической линии задержки. Многие системы петаваттного уровня мощности имеют длительность импульса порядка 30–40 фс. Однако изображения движущихся с релятивистскими скоростями объектов, полученные с помощью зондирующих импульсов такой длительности, существенно размыты. Эффект размытия можно уменьшить за счет сжатия пробного импульса [43, 44] что является сложной технической задачей, учитывая, что необходимо сохранить уровень фемтосекундной синхронизации.

Нелинейное взаимодействие моделировалось посредством численного решения нелинейного уравнения Шредингера относительно огибающей напряженности электрического поля. В расчетах использовались параметры импульсов лазерного комплекса J-KAREN-P и чирпированных зеркал «Ultrafast Innovations» с известной зависимостью GDD от длины волны, представленной на рисунке 10. Рассмотренные в работе чирпирующие зеркала имеют значительную модуляцию GDD, а это означает, что при каждом отражении в импульс вводится дополнительная паразитная спектральная фаза. Многократное применение таких зеркал приводит к снижению эффективности сжатия и появлению пред- и постимпульсов. Поэтому для достижения необходимой длительности зондирующего импульса при помощи рассматриваемых чирпирующих зеркал необходимо оптимизировать параметры среды, флюенс и количество отражений. Численно было установлено, что минимальная длительность сжатого импульса, достигается при толщине нелинейной среды 0.7 см при 5 отражениях от рассматриваемых чирпирующих зеркал. При этом минимальное значение длительности импульса постепенно уменьшается с увеличением флюенса, поэтому в качестве оптимума были

взяты разумные с точки зрения эксперимента значения флюенса 105 мДж/см^2 . При таких параметрах В-интеграл будет около 28, а длительность на полувысоте составит 11,8 фс. Спектр и временная форма исходного и сжатого импульсов представлены на рис. 8. Как было показано ранее в [35], такая длительность подходит для исследования особенностей, излучающих BISER-излучение.

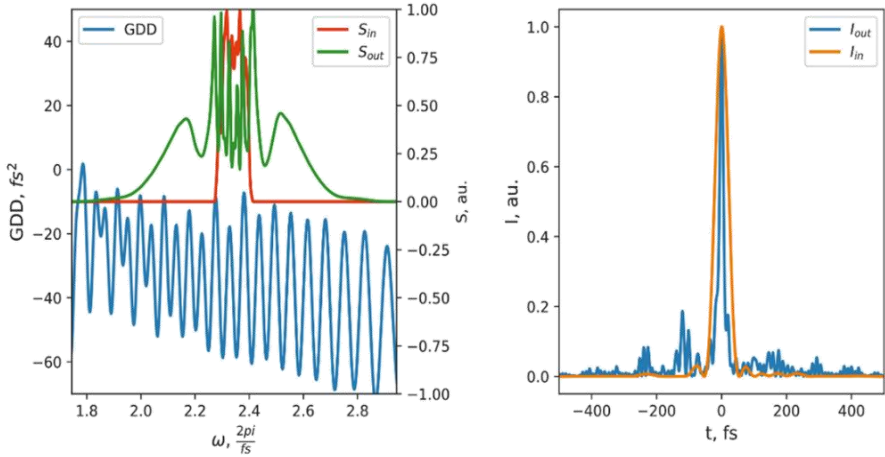


Рис. 8. Левая панель: правая ось – нормированные на максимум амплитуда исходного спектр импульса S_{in} и смоделированного уширенного спектра в оптимальной точке S_{out} ; левая ось – GDD чирпированных зеркал. Правая панель: нормированные на максимум исходная I_{in} и смоделированная сжатая I_{out} огибающие импульсов

Таким образом, численные исследования показали, что импульсы лазерной системы J-KAREN-P могут быть сжаты с 47 до 11,8 фс методом CafCA при помощи нескольких отражений от коммерческих чирпирующих зеркал «Ultrafast Innovations». Такое сжатие обеспечивает четырехкратное уменьшение эффекта размытия движения при зондировании. Появляющиеся из-за модуляции GDD зеркал пред- и постимпульсы, хоть и приводят к снижению контраста получаемых изображений, однако оно не является критическим. Благодаря своей простой экспериментальной реализации, метод укорочения зондирующих импульсов при помощи CafCA может быть реализован практически в любой фемтосекундной лазерной системе путем введения небольшого количества пассивных элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан метод динамического определения эталонного волнового фронта, основанный на совместном измерении фокального пятна и волнового фронта пучка. Метод обеспечивает эффективную калибровку адаптивной оптической системы в условиях присутствия разностных и динамических искажений волнового фронта. При помощи данного метода получен эталонный волновой фронт, соответствующий числу Штреля 0,86.

2. Разработан метод определения волнового фронта по двум распределениям флюенса в окрестности перетяжки на основе сверточной нейронной сети. В численных экспериментах данный метод показал точность до 90 %. Экспериментальная проверка предложенной модели нейросети показала схожесть реальных и восстановленных распределений флюенса в фокусе и вне фокуса, а также точность порядка 65 % при СКО искажений волнового фронта 0,4λ.

3. Исследованы особенности коррекции фазовых искажений мощного лазерного пучка. Показано, что, поскольку различия между настроечным и разовым режимами работы лазерной установки PEARL больше, чем различия между пучками в разовом режиме, коррекцию необходимо проводить непосредственно по разовому режиму работы лазера. При помощи адаптивной оптической системы в мощном лазерном пучке число Штреля увеличено до 0,73.

4. Экспериментально показана возможность компенсации нелинейных фазовых искажений при помощи адаптивной оптической системы на основе деформируемого зеркала. В результате коррекции число Штреля, определенное по флюенсу, увеличено до 0,43, что по оценкам соответствует увеличению числа Штреля, определяемому по интенсивности, до 0,52.

5. Предложено использовать адаптивную оптическую систему в задачах позиционирования мишени и создания требуемых распределений интенсивности в фокусе. При безабберационной фокусировке острый край мишени совмещен с фокусом пучка по глубине с субрэлеевской точностью. Продемонстрирована возможность создания при помощи адаптивной оптической системы распределения интенсивности на мишени в виде полоски с произвольной ориентацией.

6. Предложено использовать метод CafCA для получения ультракоротких зондирующих импульсов. Численно показана возможность сжатия лазерных импульсов J-KAREN-P с 47 до 11,8 фс при помощи нескольких отражений от коммерческих чирпирующих зеркал. Показано, что появляющиеся после CafCA пред- и постимпульсы не приводят к существенной потере информативности оптической диагностики.

Список цитированной литературы

1. Laser-driven x-ray and neutron source development for industrial applications of plasma accelerators / CM Brenner, SR Mirfayzi, DR Rusby et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2015. — Vol. 58, no. 1. — P. 014039.
2. Laser-wakefield accelerators for high-resolution X-ray imaging of complex microstructures / Amina E Hussein, Nancy Senabulya, Yong Ma et al. // *Scientific reports*. — 2019. — Vol. 9, no. 1. — P. 3249.
3. Gamma-ray generation in ultrahigh-intensity laser-foil interactions / EN Nerush, I Yu Kostyukov, L Ji, A Pukhov // *Physics of Plasmas*. — 2014. — Vol. 21, no. 1.
4. Experimental Study of Terahertz Radiation Generation in the Interaction of Ultrashort Laser Pulse with Gas Targets / RS Zemskov, SE Perevalov, AV Kotov et al. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. — 2023. — Vol. 65, no. 12. — pp. 877–887.
5. Daido Hiroyuki, Nishiuchi Mamiko, Pirozhkov Alexander S. Review of laser-driven ion sources and their applications // *Reports on progress in physics*. — 2012. — Vol. 75, no. 5. — P. 056401.
6. Nakajima Kazuhisa. Laser-driven electron beam and radiation sources for basic, medical and industrial sciences // *Proceedings of the Japan Academy, Series B*. — 2015. — Vol. 91, no. 6. — pp. 223–245.
7. Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration / SE Perevalov, KF Burdonov, AV Kotov et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2020. — Vol. 62, no. 9. — P. 094004.
8. Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures / A Soloviev, K Burdonov, SN Chen et al. // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — P. 12144.
9. Recent advances in laser-driven neutron sources / A Alejo, H Ahmed, A Green et al. // *Il nuovo cimento C*. — 2016. — Vol. 38, no. 6. — pp. 1–7.
10. Detailed characterization of laser-produced astrophysically-relevant jets formed via a poloidal magnetic nozzle / DP Higginson, G Revet, B Khair et al. // *High Energy Density Physics*. — 2017. — Vol. 23. — pp. 48–59.
11. Laboratory modeling of YSO jets collimation by a large-scale divergent interstellar magnetic field / R Zemskov, K Burdonov, A Soloviev et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2024. — Vol. 681. — P. A37.
12. Laboratory modelling of equatorial ‘tongue’ accretion channels in young stellar objects caused by the Rayleigh-Taylor instability / K Burdonov, W Yao, A Sladkov et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Vol. 657. — P. A112.
13. Laboratory disruption of scaled astrophysical outflows by a misaligned magnetic field / G Revet, B Khair, E Filippov et al. // *Nature communications*. — 2021. — Vol. 12, no. 1. — P. 762.
14. Fast heating scalable to laser fusion ignition / RI Kodama, H Shiraga, K Shigemori et al. // *Nature*. — 2002. — Vol. 418, no. 6901. — pp. 933–934.

15. Laser challenges for fast ignition / JD Zuegel, S Borneis, C Barty et al. // *Fusion Science and Technology*. — 2006. — Vol. 49, no. 3. — pp. 453–482.
16. Laser driven neutron sources: characteristics, applications and prospects / J Alvarez, J Fern´andez-Tobias, K Mima et al. // *Physics Procedia*. — 2014. — Vol. 60. — pp. 29–38.
17. Adaptive system for high power lasers / Alexander G Aleksandrov, AL Rukosuev, V Ye Zavalova et al. // *XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers / SPIE*. — Vol. 5120. — 2003. — pp. 156–163.
18. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti: sapphire laser beam / Vadim Vasil’evich Samarkin, Aleksandr Georgievich Alexandrov, Ilia Vladimirovich Galaktionov et al. // *Quantum Electronics*. — 2022. — Vol. 52, no. 2. — P. 187.
19. Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²) / S-W Bahk, Pascal Rousseau, TA Planchon et al. // *Optics letters*. — 2004. — Vol. 29, no. 24. — pp. 2837–2839.
20. Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited Petawatt / Alexander S Pirozhkov, Yuji Fukuda, Mamiko Nishiuchi et al. // *Optics express*. — 2017. — Vol. 25, no. 17. — pp. 20486–20501.
21. Improvement of the focusing ability by double deformable mirrors for 10-PW-level Ti: sapphire chirped pulse amplification laser system / Zhen Guo, Lianghong Yu, Jianye Wang et al. // *Optics Express*. — 2018. — Vol. 26, no. 20. — pp. 26776–26786.
22. Achieving the laser intensity of 5.5×10^{22} W/cm² with a wavefront-corrected multi-PW laser / Jin Woo Yoon, Cheonha Jeon, Junghoon Shin et al. // *Optics express*. — 2019. — Vol. 27, no. 15. — pp. 20412–20420.
23. Realization of laser intensity over 10^{23} W/cm² / Jin Woo Yoon, Yeong Gyu Kim, Il Woo Choi et al. // *Optica*. — 2021. — Vol. 8, no. 5. — pp. 630–635.
24. Khazanov Efim Arkad’evich, Mironov S Yu, Mourou G´erard. Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach // *Physics-Uspekhi*. — 2019. — Vol. 62, no. 11. — P. 1096.
25. 11 fs, 1.5 PW laser with nonlinear pulse compression / Vladislav Ginzburg, Ivan Yakovlev, Anton Kochetkov et al. // *Optics express*. — 2021. — Vol. 29, no. 18. — pp. 28297–28306.
26. Improvement of the focusability of petawatt laser pulses after nonlinear post-compression / Mikhail Martyanov, Sergey Mironov, Mikhail Starodubtsev et al. // *JOSA B*. — 2022. — Vol. 39, no. 7. — pp. 1936–1944.
27. Characterization of multiterawatt laser-solid interactions for proton acceleration / P McKenna, KWD Ledingham, I Spencer et al. // *Review of scientific instruments*. — 2002. — Vol. 73, no. 12. — pp. 4176–4184.
28. Target Diagnostic Systems for Proton, Electron, and X-ray Generation Experiments Based on Ultraintense Laser-Target Interactions / IlWoo Choi,

HyungTaek Kim, Nasr Hafz et al. // Journal of the Korean Physical Society. — 2009. — Vol. 55, no. 2. — pp. 517–527.

29. A confocal microscope position sensor for micron-scale target alignment in ultra-intense laser-matter experiments / Christopher Willis, Patrick L Poole, Kramer U Akli et al. // Review of Scientific Instruments. — 2015. — Vol. 86, no. 5.

30. Metrology for sub-Rayleigh-length target positioning in $\sim 1022 \text{ W/cm}^2$ laser-plasma experiments / EA Vishnyakov, A Sagisaka, K Ogura et al. // High Power Laser Science and Engineering. — pp. 1–58.

31. Adaptive control of laser-wakefield accelerators driven by mid-IR laser pulses / J Lin, Y Ma, R Schwartz et al. // Optics Express. — 2019. — Vol. 27, no. 8. — pp. 10912–10923.

32. Notable improvements on LWFA through precise laser wavefront tuning / Driss Oumbarek Espinos, Alexandre Rondepierre, Alexei Zhidkov et al. // Scientific Reports. — 2023. — Vol. 13, no. 1. — P. 18466.

33. Propagation and focusing dependency of a laser beam with its aberration distribution: Understanding of the halo induced disturbance / Alexandre Rondepierre, Driss Oumbarek Espinos, Alexei Zhidkov, Tomonao Hosokai // Optics Continuum. — 2023. — Vol. 2, no. 6. — pp. 1351–1367.

34. Басов Н. Г. Диагностика плотной плазмы. — Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.

35. Optical probing of relativistic plasma singularities / Timur Zh Esirkepov, Jie Mu, Yanjun Gu et al. // Physics of Plasmas. — 2020. — Vol. 27, no. 5.

36. AKA Optics. — <http://www.akaoptics.com/>.

37. Zernike Frits. Diffraction theory of the knife-edge test and its improved form, the phase-contrast method // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 94, p. 377–384. — 1934. — Vol. 94. — pp. 377–384.

38. Goodwin Eric P., Wyant James C. Field guide to interferometric optical testing / SPIE Bellingham, WA. — 2006.

39. Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals / V V Lozhkarev, G I Freidman, V N Ginzburg et al. // Laser Physics Letters. — 2007. — jun. — Vol. 4, no. 6. — pp. 421–427. — URL: <https://doi.org/10.1002/lapl.200710008>.

40. Research in plasma physics and particle acceleration using the PEARL petawatt laser / Aleksandr Andreevich Soloviev, Konstantin Feliksovich Burdonov, Vladislav Naumovich Ginzburg et al. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 2024. — Vol. 194, no. 3. — pp. 313–335.

41. LeCun Yann, Bengio Yoshua et al. Convolutional networks for images, speech, and time series // The handbook of brain theory and neural networks. — 1995. — Vol. 3361, no. 10. — P. 1995.

42. Developers TensorFlow. TensorFlow // Zenodo. — 2022.

43. Development of a dual beam facility for multiple wavelength, short pulse optical probing of experiments in Target Area 2 / DR Symes, EJ Divall, PS Foster et al.

44. Few-cycle optical probe-pulse for investigation of relativistic laserplasma interactions / MB Schwab, A S'avert, O J'ackel et al. // *Applied Physics Letters*. — 2013. — Vol. 103, no. 19. — P. 191118.

Публикации автора по теме диссертации

A1. Котов А. В., Перевалов С. Е., Стародубцев М. В., Земсков Р. С., Александров А. Г., Галактионов И. В. и др. Адаптивная система коррекции оптических аберраций излучения мощных лазеров с динамическим определением эталонной формы волнового фронта // *Квантовая электроника*. — 2021. — Т. 51, № 7. — С. 593—596.

A2. Котов А. В., Родимков Ю.А., Мееров И.Б., Волокитин В.Д., Перевалов С.Е., Бурдонов К.Ф. и др. Восстановление волнового фронта лазерного пучка на основе анализа распределения интенсивности в фокусе и вне фокуса с использованием свёрточной нейронной сети // *Изв. вузов. Радиофизика*. — 2024. — Т. 67, № 11—12. — С. 1013—1019.

A3. Соловьев А. А., Котов А. В., Перевалов С. Е., Есюнин М. В., Стародубцев М. В., Александров А. Г. и др. Адаптивная система коррекции волнового фронта лазерного комплекса PEARL // *Квантовая электроника*. — 2020. — Т. 50, № 12. — С. 1115—1122.

A4. Soloviev A., Kotov A., Martyanov M., Perevalov S., Zemskov R., Starodubtsev M. et al. Improving focusability of post-compressed PW laser pulses using a deformable mirror // *Optics Express*. — 2022. — Т. 30, № 22. — С. 40584—40591.

A5. Kotov A. V., Esirkepov T. Z., Soloviev A. A., Sagisaka A., Ogura K., Bierwage A. et al. Enhanced diagnostics of radiating relativistic singularities and BISER by nonlinear post-compression of optical probe pulse // *Journal of Instrumentation*. — 2022. — Т. 17, № 07. — С. P07035.

A6. Kumar D., Šmíd M., Singh S., Soloviev A., Bohlin H., Burdonov K., Fente G., Kotov A. et al. Alignment of solid targets under extreme tight focus conditions generated by an ellipsoidal plasma mirror // *Matter and radiation at extremes*. — 2019. — Т. 4, № 2.

A7. Соловьев А. А., Бурдонов К. Ф., Гинзбург В. Н., Глявин М. Ю., Земсков Р. С., Котов А. В. и др. Исследования в области физики плазмы и ускорения частиц на петаваттном лазере PEARL // *Успехи физических наук*. — 2024. — Т. 194, № 3. — С. 313—335.

КОТОВ Александр Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ФОКУСИРОВКЕ НА МИШЕНЬ И ДИАГНОСТИКЕ
ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 23.06.2025 г.
Формат 60×90 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 21(2025).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46