

ОТЗЫВ

официального оппонента Кузнецова Андрея Петровича
на диссертационную работу Котова Александра Владимировича
**«Управление параметрами фемтосекундного лазерного излучения при
фокусировке на мишень и диагностике лазерно-плазменного
взаимодействия»**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Диссертационная работа Котова А.В. посвящена разработке методов управления волновым фронтом в сверхмощных лазерных системах и диагностике лазерно-плазменного взаимодействия. Основное место в работе занимают методы калибровки адаптивной оптической системы и коррекции волнового фронта в сверхмощных пучках, в том числе компенсация сопутствующих методу компрессии сверхмощных лазерных импульсов после компрессора (CafCA) нелинейных фазовых искажений. Описаны подходы к прецизионному позиционированию мишеней и к формированию заданных распределений интенсивности за счёт управления волновым фронтом пучка. Также предлагается подход к сокращению длительности зондирующих импульсов при помощи техники CafCA для повышения разрешающей способности диагностики типа накачка-зондирование.

Актуальность представленных в диссертационной работе исследований определяется тем, что эффективность лазерно-плазменного взаимодействия, результатом которого могут быть ускоренные частицы или вторичное излучение, напрямую зависит от пиковой интенсивности в фокусе и соответственно качества фокусировки излучения. При этом качественная фокусировка на сверхмощных лазерных системах недостижима без корректного учёта линейных, динамических и нелинейных искажений волнового фронта, характерных для сверхмощных фемтосекундных лазерных систем и для режимов их работы с возникновением нелинейных эффектов. Ситуацию также осложняет характерная для таких систем низкая частота повторений импульсов и стабильность их параметров от выстрела к выстрелу. Достижение максимальной пиковой интенсивности на мишени также сопряжено с точностью ее позиционирования относительно фокуса лазерного импульса, и разработка точных методов юстировки является важной экспериментальной задачей, которая сильно зависит от параметров мишени и

схемы эксперимента. Исследование динамики плазмы часто требует определенную конфигурацию плазменного потока, создание и перестройка которой может требовать существенных изменений в оптическом тракте пучка. Использование для данной задачи адаптивной оптики открывает широкие возможности в экспериментах. Метод накачка-зондирование, основанный на использовании части фемтосекундного драйвера в качестве зондирующего импульса, является удобным и распространенным инструментом для исследований лазерной плазмы, однако исследование с его помощью объектов движущихся с релятивистскими скоростями приводит к эффекту размытия движения. Сокращение длительности зондирующего импульса позволило бы повысить разрешение таких плазменных объектов сохранив фемтосекундный уровень синхронизации.

Первая глава работы посвящена калибровке адаптивной оптической системы и методам, позволяющим поднять ее качество. При работе с адаптивной оптической системой важным шагом является нахождение эталонного волнового фронта, от которого будет зависеть последующая коррекция волнового фронта методом фазового сопряжения. В данной работе был предложен метод калибровки, объединяющий информацию о фокальном пятне и измерениях волнового фронта, что повышает качество эталонного волнового фронта за счет корректного учета динамических искажений волнового фронта в процессе калибровки. Также была разработана архитектура сверточной нейронной сети, восстанавливающей волновой фронт по двум распределениям флюенса вблизи фокуса, что представляет собой альтернативу классическим итерационным алгоритмам и в перспективе также позволит увеличить скорость и качество калибровки адаптивной оптической системы. Разработанные методы калибровки адаптивных оптических систем позволяют определять эталонный волновой фронт, который соответствующий практически безабберационной фокусировке, что критически важно для достижения максимальной пиковой интенсивности при коррекции волнового фронта сверхмощных пучков.

Во второй главе работы были проведены исследования коррекции волнового фронта сверхмощных лазерных пучков. Показано, что для систем, где отличия между волновым фронтом в настроенном и разовом режимах работы лазера превосходят различия между пучками в разовом режиме, финальную коррекцию следует выполнять непосредственно в мощном пучке. Далее был исследован режим работы лазерной установки с использованием

технологии посткомпрессии импульсов, при которой возникают нелинейные фазовые искажения, которые приводят к сильному ухудшению фокусировки, что нивелирует эффект увеличения интенсивности за счет уменьшения длительности импульса. Впервые была экспериментально продемонстрирована возможность компенсации нелинейных фазовых искажений при больших значениях В-интеграла 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. Совместное применение методов калибровки адаптивной оптической системы, коррекции волнового фронта сверхмощных пучков, технологии CafSA и компенсации нелинейных фазовых искажений позволило почти на порядок поднять пиковую интенсивность при фокусировке на лазерном комплексе PEARL.

Третья глава работы посвящена подходам к прецизионному позиционированию мишеней, формированию заданных распределений интенсивности за счёт управления волновым фронтом пучка и диагностике лазерно-плазменного взаимодействия. Разработаны методы прецизионного позиционирования, обеспечивающие субрэлеевскую точность совмещения мишени с фокусом пучка по глубине фокусировки, что позволяет обеспечить на мишени максимальную пиковую интенсивность и повысить эффективность лазерно-плазменного взаимодействия. Также продемонстрирована возможность формирования требуемых распределений интенсивности в фокусе на примере распределений в виде вытянутых полос за счёт целенаправленного изменения формы волнового фронта, что позволяет осуществлять быструю перестройку формы распределения без внесения существенных изменений в оптический тракт. Для оптической диагностики лазерной плазмы предложен и численно исследован метод формирования ультракоротких зондирующих импульсов при помощи CafSA, позволяющийкратно степени сжатия уменьшить эффект размытия движения при диагностике релятивистских объектов в лазерной плазме. Показано, что наличие пред- и постимпульсов, возникающих после CafSA не приводит к существенной потере информативности диагностики.

Результаты диссертационной работы являются новыми, оригинальными и достоверными. Достоверность полученных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах и их представлением на

всероссийских и международных конференциях. Результаты работы подкреплены сочетанием моделирования и эксперимента, и характеризуются понятными численными характеристиками, позволяющими оценить эффективность предложенных подходов и методов. Научные положения, выводы и рекомендации работы обоснованы.

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.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

К содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. В части работы, связанной с компенсации нелинейных фазовых искажений после нелинейного укорочения CaF_2 , предлагается два подхода к коррекции волнового фронта, предполагающих использования для сигнала обратной связи полного спектра излучения и узкой спектральной полосы вблизи центральной длины волны. При этом, при обработке экспериментальных данных с широкополосного канала обратной связи не учтена неоднородность спектральной чувствительности датчика волнового фронта и фокальной камеры, что может существенно повлиять результаты измерений в полном спектре.

2. Из текста диссертации не понятно какие существуют ограничения у разработанных методов калибровки адаптивной оптической системы.

3. Не представлены характерные погрешности измерения таких параметров как число Штреля и СКО искажений волнового фронта.

4. В тексте диссертации желательно было бы отразить критерии выбора архитектуры нейронной сети в задаче восстановления волнового фронта.

Указанные недостатки ни в коей мере не влияют на положительную оценку работы. В целом диссертация А.В. Котова выполнена на высоком научном уровне.

Считаю, что диссертационная работа «Управление параметрами фемтосекундного лазерного излучения при фокусировке на мишень и диагностике лазерно-плазменного взаимодействия» удовлетворяет

требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор за разработку методов управления параметрами фемтосекундного лазерного излучения при фокусировке на мишень и диагностике лазерно-плазменного взаимодействия несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

17.09.2025

А.П. Кузнецов

Официальный оппонент:

Кузнецов Андрей Петрович

доктор физико-математических наук (01.04.21 «Лазерная физика» и 01.04.08 «Физика плазмы»)

директор института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Почтовый адрес: 115409, Москва, Каширское ш., 31

Тел.+7 (903) 661-30-49, e-mail: apkuznetsov@mephi.ru

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

