

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук,  
высококвалифицированного научного сотрудника лаборатории рентгеновской  
оптики, Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»  
Попова Николая Леонидовича

на диссертационную работу Макарова Сергея Станиславовича

**«Изучение экстремальных гидродинамических явлений в лазерной плазме  
методом когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого  
разрешения»**

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертационная работа Макарова С.С. посвящена исследованию сложных гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме, а именно неустойчивости Рэлея-Тэйлора и ударных волн, формируемых при воздействии интенсивных лазерных импульсов с веществом в твердотельном состоянии. В рамках настоящей работы использовался метод когерентной рентгеновской радиографии, он был адаптирован для получения рентгенографических картин быстропротекающих и малоконтрастных явлений с субмикронным разрешением.

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения и списка используемой литературы, включающего 132 наименования.

Во **Введении** обоснована актуальность проводимого исследования; представлены цель и задачи работы; описаны научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, а также отмечен личный вклад автора; приведены выносимые на защиту положения; представлен список публикаций и выступлений Макарова С.С. по теме диссертации. В конце Введения описаны структура и объем работы.

В **Главе 1** демонстрируются возможности использования лазерной плазмы для актуальных исследований в области физики высокой плотности энергии, в частности астрофизики и управляемого термоядерного синтеза. Представлен анализ литературы по теме диагностических возможностей современных подходов радиографии для исследования малоконтрастных явлений с использованием рентгеновских источников на основе лазерной плазмы, синхротронов и рентгеновских лазеров на свободных электронах. В рамках развития

радиографических методов диагностики предлагается использование возможностей рентгеновских лазеров на свободных электронах и флуоресцентных кристаллических сред в качестве детекторов для регистрации малоконтрастных и быстропротекающих гидродинамических явлений в лазерной плазме. Перспективность данного подхода обуславливается возможностью одновременного обеспечения субпикосекундного временного и субмикронного пространственного разрешений при поле зрения в области интереса до нескольких мм<sup>2</sup>.

**Глава 2** посвящена исследованию регистрирующих характеристик флуоресцентного кристаллического детектора фторида лития (LiF) и параметров высокоинтенсивных когерентных рентгеновских источников для реализации фазово-контрастной радиографии лазерной плазмы. Развиваются методики определения волновых свойств высокоинтенсивных рентгеновских и оптических пучков с использованием регистрирующих возможностей детектора LiF. Решается задача по получению информации о распределении интенсивности внутри особо сфокусированного пучка суб/микронного размера в области перетяжки. Стоит отметить, что предложенная в рамках диссертационной работы методика определения дозового распределения внутри сфокусированного пучка рентгеновского лазера на свободных электронах может применяться в различных научных центрах с целью контроля интенсивности излучения в поле исследуемого объекта при проведении экспериментов по физике высокой плотности энергии.

В **Главе 3** описана проведенная апробация предложенной методики когерентной рентгеновской радиографии на тестовой мишени, широко используемой в экспериментах с астрофизическим подобием, с мало поглощающими элементами (менее 1%) для кэВ-ых фотонов зондирующего пучка рентгеновского лазера. Исследовано влияния расстояния между объектом и детектором, а также плотности исследуемой мишени на проявление фазового контраста на границах объекта путем моделирования геометрии эксперимента с использованием программного кода WavePropagator. Демонстрируется экспериментальная возможность получения радиографических картин с субмикронным пространственным разрешением и высоким контрастом. Развитая методика применяется для решения задачи наблюдения и исследования турбулентных лазерно-плазменных потоков на микронных масштабах. Использование такого подхода позволило впервые визуализировать развитие неустойчивости Рэлея-Тэйлора до турбулентной стадии развития системы в лабораторном лазерно-плазменном эксперименте и определить основные параметры плазменного потока путем прямого сравнения с гидродинамическими расчетами. Также описаны результаты спектрального анализа турбулентной фазы развития неустойчивости, демонстрирующие наличие не предсказанного ранее (в

рамках коломоговской теории) всплеска интенсивности в измеренном пространственном спектре на микронных масштабах.

В Глава 4 посвящена исследованию распространения упругопластических ударных волн в твердотельных веществах при их лазерно-ударном нагружении. В качестве мишени был выбран алмаз, как сочетающим сверхвысокую жесткость, твердость, оптическую прозрачность и теплопроводность, делающими его популярным в исследованиях, направленных на достижение сверхвысоких давлений в веществе. Использование развитой методики когерентной радиографии позволило впервые пронаблюдать и исследовать парную волновую структуру от момента расщепления ударной волны на упругий предвестник и пластическую ударную волну до момента затухания последней. Благодаря полученным экспериментальным рентгенографическим картинам впервые удалось выполнить прямое сравнение с двумерным численным моделированием механики сплошной среды и тем самым калибровать и верифицировать модель прочности алмаза в диапазоне нескольких Мбар, а также определить параметры наблюдаемых ударных волн.

В конце работы дано **Заключение**, в котором описаны основные результаты, полученные в рамках диссертационного исследования.

**Актуальность** темы диссертации Макарова С.С. не вызывает сомнений и четко описана в тексте работы. Появление рентгеновских лазеров на свободных электронах открыло принципиально новые возможности для метода когерентной радиографии в исследованиях по физике высоких плотностей энергии. Используемое излучение таких установок в качестве зондирующего позволяет проникать в плотные материалы и регистрировать даже малые изменения плотности на масштабах нескольких фемтосекунд. Тем самым создаются уникальные возможности для того, чтобы изучать с высокой точностью процессы и явления, происходящие внутри вещества, недоступные как для оптического излучения, так и рентгеновского излучения лазерной плазмы. Экспериментальные исследования эволюции гидродинамических явлений, полученные в контролируемых лабораторных условиях, чрезвычайно важны для решения различных существующих проблем в области физики плазмы, получения уравнений состояния вещества, астрофизики и управляемого термоядерного синтеза.

Представленные на защиту положения сформулированы на основе анализа полученных в ходе диссертационного исследования результатов и четко отражены в тексте работы. Самосогласованность экспериментальных данных, их воспроизводимость, а также согласованность с различными теоретическими расчетами и численными моделями указывает на **достоверность полученных результатов**. Список литературы, используемой автором, содержит 132

наименования, как русскоязычных, так и англоязычных, опубликованных в ведущих научных журналах и изданиях. Полученные результаты и выводы сравнивались с традиционными теориями развития гидродинамических явлений и экспериментальными данными, полученными в исследованиях последних лет. Личный вклад автора в проделанную работу не вызывает сомнений.

Развитые в ходе работы диагностические подходы и полученные с помощью них уникальные результаты по исследованию эволюции гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме определяют **научную новизну** диссертации Макарова С.С. Отдельно хочется отметить **теоретическую значимость** результатов по измерению пространственного спектра турбулентности в наносекундной лазерной плазме, полученных с микронным разрешением. Вид спектра за областью инерционного диапазона передачи энергии и, в частности, наличие всплеска интенсивности в нем, не предсказываемого колмогоровской теорией, могут быть использованы для развития и валидации гидродинамических теорий и численных кодов. Также **теоретическую значимость** представляют полученные рентгенографические данные по регистрации формирования и развития парной волновой структуры в алмазе. Эти данные были **впервые** получены прямым методом и могут использоваться для калибровки упругопластических моделей деформации алмаза.

Полученные в работе результаты, а также разработанные экспериментальные подходы имеют несомненную **практическую значимость** и могут быть востребованы в таких исследовательских центрах и институтах как «Институт прикладной физики РАН», НИЦ "Курчатовский институт", «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН», «Физический институт РАН», «НИЯУ МИФИ», а также многих других российских и зарубежных научных организациях, проводящих исследования в области лазерно-плазменного воздействия и физики высоких плотностей энергии. В частности, развитый и апробированный подход когерентной рентгеновской радиографии малококонтрастных объектов и явлений со субмикронным разрешением имеет **практическую значимость** и может использоваться на экспериментальных станциях синхротронных источников таких как "КИСИ-Курчатов" (НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ», Россия), ESRF (Франция), EXFEL (XFEL), SACLA XFEL (Япония) и др.

Представленные в диссертационной работе результаты прошли обширную **апробацию** и докладывались перед научным сообществом на 14-ти всероссийских и международных конференциях (в т.ч. Великобритании, Португалии, Германии). Всего по результатам диссертационного исследования Макарова С.С. **опубликовано** 15 работ в научных журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, а также удовлетворяющих

перечню ВАК (12 из них - в журналах, индексируемых системой Web of Science). Содержание публикаций достаточно полно отражает результаты научных исследований диссертационной работы.

Диссертация представляет из себя цельное и законченное научное исследование. Задачи и содержание работы соответствуют паспорту специальности 1.3.9 – Физика плазмы. Текст работы содержит необходимые разделы, в соответствии с требованиями ВАК, а также обладает внутренней логикой и единством. Изложение материалов диссертации выполнено на высоком уровне. В конце каждой главы сделаны четкие выводы, отражающие, основные результаты проведенных исследований. Стоит отметить хорошее владение автором научных терминов и приятную для чтения манеру подачи материала. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Тем не менее, по диссертации Макарова С.С. хотелось бы привести несколько **замечаний**:

1. В названии диссертации отражено, что исследование в работе выполняется с использованием методики когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения. Однако в некоторых частях работы используются фразы “методика когерентной фазово-контрастной радиографии” (например, стр. 14, 67, 91), “методика фазово-контрастной радиографии” (например, стр. 6, 9, 31), “методика когерентной рентгеновской радиографии” (например, стр. 9, 103). На мой взгляд, необходимо было бы выбрать и использовать одно название методики по всему тексту, либо уточнить отличия, если они есть. Иначе оказывается не вполне понятно, отличается ли “когерентная рентгеновская радиография” от “когерентной фазово-контрастной методики”.
2. В Главе 3 полученные в эксперименте данные по развитию неустойчивости Рэлея-Тэйлора сравниваются со статистической теорией Колмогорова.
  - Делается предположение, что наблюдаемая в эксперименте турбулентность однородна и изотропна. В частности, на рисунке 3.19 производится сравнение измеренного пространственного спектра только с колмогоровским спектром. Хотелось бы также видеть сравнение с другими теориями развития турбулентности.
  - В пункте 3.2.5 обсуждаются результаты спектрального анализа для радиографических данных, полученных с использованием мишени с двойными модуляциями поверхности (рисунок 3.16). Было бы полезно сравнить пространственные спектры с данными от мишени с “мономодулированной поверхностью” (рисунок 3.14) для более качественного анализа.
3. В пункте 4.4 описываются результаты оценки ширины передних фронтов наблюдаемых в эксперименте ударных волн в алмазе. Стоит отметить, что на

рентгенографических изображениях, полученных на детекторе LiF наблюдается проекция этих волн и поэтому измеренная ширина фронтов по данным картинам будет заведомо больше истинной, поскольку в эксперименте волны сферические. Учитывался ли этот факт при численных расчетах программным кодом WavePropagator и дальнейшем сравнении с экспериментом?

4. Некоторые рисунки содержат англоязычные обозначения и фразы. В работе встречаются пунктуационные и орфографические ошибки, а также опечатки (например, повтор номера формулы 3.1 на страницах 76 и 78). Однако, они не затрудняют восприятие диссертации.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают достоверность полученных результатов и общей значимости диссертационной работы.

Таким образом, на основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что диссертация Макарова С.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9-11 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (ред.11.09.2021г.), а ее автор Макаров Сергей Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Отзыв составил официальный оппонент, Попов Николай Леонидович, высококвалифицированный научный сотрудник лаборатории рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»; 119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53; тел. 8(499)132-65-54, lebedev.ru, popovnl@lebedev.ru; кандидат физико-математических наук (научная специальность – 1.3.8. Физика конденсированного состояния).



Попов Н.Л.

"04" апрель 2022 г.

Подпись Попова Н.Л. и сведения удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН,

к.ф.-м.н.

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53;

Тел. +7(499) 132-69-78; kolobov@lebedev.ru



Колобов А. В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН)  
Почтовый адрес: 119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53,  
Телефон: +7 (499) 132-65-54, e-mail: [office@lebedev.ru](mailto:office@lebedev.ru)