

На правах рукописи

Макаров Сергей Станиславович

**ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ
РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Специальность 1.3.9 – «Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: **Пикуз Сергей Алексеевич**
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией № 1.1 «Диагностики вещества в экстремальном состоянии»,
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Официальные оппоненты: **Толочко Борис Петрович**
доктор химических наук,
заведующий лабораторией методов синхротронного излучения,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук»,
Россия, 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18

Попов Николай Леонидович
кандидат физико-математических наук,
высококвалифицированный научный сотрудник лаборатории рентгеновской оптики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»,
Россия, 11999 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук»,
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Защита состоится “_____” _____ 2022 г. в _____ ч. _____ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзыв на автореферат просьба присылать по адресу:
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02).

Автореферат разослан “_____” _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.1.193.01 (Д 002.110.02),
канд. физ.-мат. наук

Тимофеев А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. Актуальность

В широком классе явлений, имеющих место в астрофизике и современной ядерной энергетике, вещество находится в условиях сверхинтенсивного энергетического воздействия. В свою очередь, это воздействие порождает целый комплекс сложных гидродинамических явлений (различные типы неустойчивостей, плазменные струи, ударные волны), понимание которых представляет интерес как для прикладных, так и фундаментальных задач.

В частности, на сегодняшний день существует целый класс астрофизических явлений, картина которых до конца непонятна и требует верификации существующих, а также развития новых теоретических моделей. Например, открытыми остаются вопросы формирования молодых звезд, эволюции остатка сверхновых, образования планетарных систем из-за явления аккреции, формирования ядер суперземель (5-10 масс земли) при сверхвысоких давлениях и др. Все эти явления развиваются на протяжении миллионов лет, и поэтому модели их эволюции не могут быть проверены с помощью экспериментальных наблюдений. Одним из средств решения вышеописанных проблем является постановка в контролируемых лабораторных условиях экспериментов на модельных объектах. Благодаря тому, что гидродинамические системы обладают свойством подобия, результаты таких исследований могут помочь приблизиться к пониманию и описанию физических процессов, происходящих в реальных астрофизических явлениях. Одновременно с этим могут быть решены и прикладные задачи. Так, например, известно, что одним из препятствий к «поджигу» топлива капсулы мишени при управляемом термоядерном синтезе (УТС) является развитие гидродинамических неустойчивостей (Рэля-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова) при её сжатии. Таким образом, исследование и моделирование гидродинамических процессов на тестовых объектах с одной стороны имеет релевантность к астрофизическим явлениям, а с другой - позволяет получать важную информацию для решения задач УТС.

С появлением по всему миру высокоинтенсивных оптических лазеров стало возможным при их воздействии на вещество в лаборатории исследовать сложные явления в индуцированной таким образом плазме. Набор характерных гидродинамических параметров плазмы (скорость разлета, плотность, давление, время жизни, магнитные поля, размеры системы) является масштабируемым к реальным астрофизическим объектам при выполнении условий подобия. Уже сегодня достижимы давления в несколько мегабар при прямом облучении твердотельных мишеней и даже гигабарные при реализации схемы со сферическим обжатием. Эксперименты по

лабораторной астрофизике могут проводиться на оптических пикосекундных установках мегаджоульного уровня энергетики, которые создаются для решения задач УТС. В то же время существует класс задач, которые могут быть исследованы на наносекундных установках суб- и килоджоульного уровня энергетики.

Существующие теоретические модели описывают эволюцию гидродинамических явлений в плотной плазме с высокой детализацией для различных материалов и начальных условий. Однако сложность экспериментальной верификации теоретических предсказаний заключается в том, что такие явления имеют высокую скорость протекания и малое время жизни (нано- и субпикосекундные масштабы времени), малые изменения плотности, а диссипация энергии в конечном счете происходит на субмикронном пространственном масштабе. В связи с этим возникает необходимость развития соответствующих подходов, которые позволили бы диагностировать состояние вещества в столь сложных условиях.

Одним из способов исследования параметров лазерной плазмы является метод зондирования оптическим или ионизирующим излучением. При этом использование оптического излучения обладает ограниченными возможностями, поскольку оно не может проникнуть через плазму с критической плотностью ($n_c \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Это вызывает необходимость использовать ионизирующее излучение (рентгеновское, протоны, электроны, нейтроны). В качестве источников рентгеновского зондирующего излучения могут использоваться лазерно-индуцированная плазма или синхротронные пучки. Свойства лазерно-плазменных источников (конечный размер, низкая когерентность и яркость, полихроматичность) накладывают ограничение на пространственное разрешение, а также контрастность получаемых радиографических данных. Пучки синхротронных источников (СИ) обладают высокой когерентностью зондирующего излучения, однако имеют относительно низкую спектральную яркость, чтобы исследовать процессы, происходящие на нано- и субпикосекундных временах.

Появление рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ) позволяет в полной мере рассчитывать на решение проблем исследования гидродинамических явлений в плазме методами радиографии. С одной стороны, фемтосекундная длительность импульсов от таких установок обеспечивает высокое временное разрешение, а с другой – монохроматичность, высокая когерентность и яркость позволяют получать дифракционно-улучшенные изображения объектов с малыми градиентами плотности. Таким образом, создаются принципиально новые возможности в направлении исследований малоконтрастных гидродинамических явлений в плазме. Однако для более полного использования преимуществ РЛСЭ необходимо применять детекторы, обладающие соответствующими

регистрирующими возможностями, в частности, обеспечивающими субмикронное пространственное разрешение, высокий динамический диапазон и достаточную радиационную стойкость к сверхинтенсивному воздействию.

Перспективными детекторами для регистрации излучения РЛСЭ являются флуоресцентные кристаллические среды, обладающие всеми перечисленными выше преимуществами. При воздействии ионизирующего излучения на такие среды, в их кристаллической решетке возбуждаются локальные дефекты – так называемые центры окраски, которые могут флуоресцировать в оптическом диапазоне. Таким образом, фундаментальное пространственное разрешение таких детекторов может достигать масштабов межатомных расстояний, что открывает перспективы для исследования плазменных явлений на соответствующих масштабах.

Объединение возможностей флуоресцентных кристаллических детекторов и пучков РЛСЭ в качестве зондирующего излучения в радиографическом методе создает принципиально новые возможности для экспериментального исследования широкого класса гидродинамических малоконтрастных быстропротекающих явлений в плазме, имеющих высокое значение для направления лабораторной астрофизики и УТС. Предметом настоящей работы являлось исследование развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и ударных волн в лазерно-индуцированной плазме.

1.2. Цели и задачи работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование с субмикронным разрешением малоконтрастных быстропротекающих гидродинамических явлений таких как развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора и парных ударно-волновых структур в наносекундной лазерной плазме.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Развитие и апробация методики фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения с использованием флуоресцентного кристаллического детектора LiF и зондирующего короткоимпульсного излучения когерентных монохроматических пучков РЛСЭ. Дополнительно решались подзадачи:
 - Определение отклика детектора LiF в широком диапазоне энергий фотонов, интенсивностей и поглощенных доз монохроматического когерентного рентгеновского излучения.
 - Определение волновых свойств высокоинтенсивных рентгеновских и лазерных источников на основе анализа дифракционных картин

- тестовых объектов, зарегистрированных с субмикронным пространственным разрешением на детекторе LiF.
- Развитие методики визуализации и прецизионного количественного измерения профиля интенсивности и накопленной дозы по фокальному пятну пучка РЛСЭ с целью получения прямых данных об интенсивности воздействия на мишень.
 - Оптимизация расстояния объект-детектор для улучшения видности фазово-контрастной картины.
2. Исследование с субмикронным пространственным и субпикосекундным временным разрешениями развития неустойчивости Рэля-Тейлора до турбулентной фазы в наносекундной лазерной плазме, а также измерение пространственного спектра вплоть до стадии диссипации энергии.
3. Исследование с субмикронным пространственным и субпикосекундным временным разрешениями эволюции и морфологии парной волновой структуры «упругий предвестник – пластическая ударная волна» при воздействии высокоинтенсивного наносекундного оптического лазера на твердотельную мишень.

1.3. Научная новизна работы

Предложена и апробирована методика регистрации фазово-контрастных рентгеновских изображений малоcontrastных гидродинамических явлений лазерной плазмы со сверхвысоким разрешением.

Впервые с субмикронной точностью экспериментально визуализировано развитие неустойчивостей Рэля-Тейлора в лазерно-индуцированной наносекундной плазме вплоть до турбулентной фазы.

Прямым методом впервые экспериментально зарегистрирована с микронной точностью динамика развития и исследована морфология лазерно-индуцированной парной волновой структуры «упругий предвестник – пластическая УВ» в алмазе.

Впервые с высокой точностью получены экспериментальные данные по определению функций отклика и пространственного разрешения, а также радиационной устойчивости детектора LiF при воздействии когерентных моноэнергетических пучков как традиционных синхротронных источников, так и рентгеновских лазеров на свободных электронах.

Апробирована методика определения волновых свойств высокоинтенсивных рентгеновских источников и фемтосекундных оптических лазеров, основанная на анализе дифракционных картин от тестовых объектов, зарегистрированных на детектор LiF с субмикронным разрешением. Данный подход применен для анализа волновых свойств лазерного пучка, взаимодействующего с газокластерной средой, а также

определения вклада излучения от лазерно-индуцированного рентгеновского источника фемтосекундной длительности.

С использованием детектора LiF впервые прямым методом измерена каустика пучка, дана оценка реального размера пучка и распределения интенсивности внутри него на Европейском РЛСЭ, сфокусированного вплоть до нескольких сотен нанометров для целей будущих экспериментов по физике высокой плотности энергии (ФВПЭ).

1.4. Научная и практическая значимость работы

Измеренный с микронным разрешением пространственный спектр развития турбулентности в наносекундной лазерной плазме, а также найденная в нем особенность в виде локальной немонотонности могут использоваться для развития и валидации теорий турбулентности на стадии диссипации энергии. До сегодняшнего дня данная область ещё не имела экспериментальных радиографических исследований. Полученные параметры плазменных потоков при развитии неустойчивости Рэля-Тейлора могут быть использованы и масштабированы для развития технологий инерциального синтеза в схемах непрямого обжата капсулы мишени, а также для фундаментальных задач астрофизики.

Данные по прямой регистрации развития ударных волн в алмазе открывают новые возможности для построения и проверки уравнений состояния вещества УРС при сверхвысоких давлениях (в несколько миллионов атмосфер).

Развитая методика фазово-контрастной когерентной рентгенографии сверхвысокого разрешения открывает новые возможности для валидации и развития теоретических моделей, описывающих малоконтрастные явления в лазерной плазме, где требуется субмикронная точность измерений. Методика уже успешно используется на РЛСЭ SACLA (Япония) для решения широкого круга задач по физике высокой плотности энергии (ФВПЭ). Также планируется в скором времени её применение на Европейском РЛСЭ (Германия).

Результаты работы по определению метрологических свойств детектора LiF могут быть использованы для верификации и развития теоретических описаний образования и эволюции центров окраски в данном кристалле. Определенное значение порога абляции детектора LiF под воздействием сверхинтенсивных импульсов РЛСЭ может быть использовано при планировании радиографических экспериментов по ФВПЭ. Также эти данные могут быть использованы при разработке технологий прецизионной обработки и наноструктурировании материалов высокоинтенсивными рентгеновскими пучками.

Предложенная методика визуализации и количественного измерения профиля интенсивности и накопленной дозы по фокальному пятну рентгеновского пучка может использоваться для определения параметров РЛСЭ. В частности, детектор LiF уже применялся для диагностики пучка на Европейском РЛСЭ в течение нескольких пользовательских экспериментов. Точное определение размера и формы фокального пятна на субмикронном уровне имеет важное значение для ряда исследований по ФВПЭ, требующих либо точечного источника подсветки (метод рентгенографии), либо экстремальной интенсивности рентгеновского нагрева вещества.

1.5. На защиту выносятся:

1. Методика регистрации фазово-контрастных рентгеновских изображений быстропротекающих малоконтрастных явлений в лазерной плазме с субмикронным пространственным и фемтосекундным временным разрешениями в схеме с параллельным зондирующим пучком рентгеновского лазера на свободных электронах и флуоресцентным кристаллическим детектором LiF. Функции отклика и разрешающей способности детектора LiF, измеренные в широком диапазоне энергий фотонов (0.5-12 кэВ), интенсивностей и поглощенных доз (от порога чувствительности до порога абляции детектора) монохроматического когерентного рентгеновского излучения.

2. Пространственный спектр турбулентности, генерируемой при развитии неустойчивости Рэлея-Тейлора в наносекундной лазерной плазме, измеренный вплоть до микронных масштабов и стадии диссипации энергии методом когерентной рентгеновской радиографии. Наличие локальной немонотонности в выявленном спектре на пространственном масштабе 3.9 ± 0.1 мкм, которая проявляется только на поздних временах развития плазменного потока.

3. Прямая экспериментальная регистрация формирования и эволюции парной структуры «упругий предвестник – пластическая волна» в ударной волне, генерируемой воздействием мощного наносекундного лазера на алмаз. Валидация упругопластической модели развития такой структуры и подтверждение релевантности гидродинамических расчетов, выполненных методом сглаженных частиц в двумерной геометрии, при нагрузке алмаза до давлений вплоть до нескольких сотен ГПа.

4. Методика прямого прецизионного измерения каустики и распределения интенсивности в пучке рентгеновского лазера на свободных электронах, сфокусированного вплоть до нескольких сотен нанометров, с субмикронной точностью при применении флуоресцентного детектора LiF.

1.6. Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментов, а также анализе полученных данных на уникальных пользовательских установках в ведущих научных центрах: синхротронный источник DESY (Германия), синхротронный источник Soleil (Франция), Европейский РЛСЭ (Германия), РЛСЭ SACLA (Япония). Автором развита методика фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, которая была применена для исследования гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме. Автором выполнено численное моделирование для интерпретации зарегистрированных в экспериментах фазово-контрастных картин.

1.7. Степень достоверности и апробация работы

Экспериментальные данные, представленные в работе, были получены в ведущих научных центрах с использованием современных синхротронных источников, обеспечивающих высокую когерентность и монохроматичность рентгеновского пучка. Для контроля параметров, необходимых в экспериментах, использовалось современное измерительное оборудование, обеспечивающее высокое пространственное, временное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласованностью с моделированием.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 15 работ в рецензируемых научных журналах, включенных в международные реферативные базы данных и системы цитирования: WoS, Scopus и перечень ВАК.

Кроме того, основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались лично автором и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях (одно выступление в качестве приглашенного докладчика): European XFEL Users' Meeting 2017 and DESY Photon Science Users' Meeting 2017, DESY Hamburg and European XFEL, Schenefeld, Германия, 25-27 января 2017; International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, Россия, 3-5 октября 2017; Совещание пользователей Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований (20 – 23 ноября 2017 года), Москва, Россия, 20-23 ноября 2017; XVIII Межвузовская научная школа молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия, 4-5 декабря 2017; International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018),

Москва, Россия, 1-5 октября 2018; Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation 2019, Москва, Россия, 25-28 марта 2019 (*в качестве приглашенного докладчика*); International Conference on High Energy Density, Оксфорд, Великобритания, 31 марта - 5 апреля 2019; The European Conference on Plasma Diagnostics, Лиссабон, Португалия, 6-9 мая 2019; XII Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, г. Саров, Нижегородская обл., Россия, 25-28 июня 2019; International Conference on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight-2019", Lebedev Physical Institute, Москва, Россия, 30 сентября - 4 октября 2019; XX Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, Россия, 25-26 ноября 2019; XXXV International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2020), Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 1-6 марта 2020; Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics, режим удаленного доступа (zoom), Россия, 16-17 декабря 2020; XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS 2021), Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 1-5 марта 2021;

1.8. Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, содержащего 132 наименования; изложена на 113 страницах машинописного текста, включая 71 рисунок и 3 таблицы.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** описывается актуальность темы работы; сформулированы цели и задачи работы; обсуждается новизна исследования, его научная и практическая значимость, личный вклад автора; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; описана структура диссертации; а также приводится список основных публикаций автора по теме работы.

Одним из диагностических методов для исследования гидродинамических явлений, имеющих место в лазерно-индуцированной плазме, является рентгеновская радиография. Она позволяет изучать пространственную и временную эволюцию таких явлений и дает информацию о состоянии и плотности вещества во всем объеме исследуемого объекта. **Глава 1** посвящена обзору экспериментальных исследований быстропротекающих гидродинамических явлений в лазерно-индуцированной плазме с использованием современных рентгенографических платформ. В **разделе 1.1** описаны основные классы задач по физике высокой плотности энергии, которые могут быть решены в лабораторных экспериментах с использованием наносекундных оптических лазеров. Наиболее доступным и

широко используемым зондирующим излучением в рентгенографическом методе является рентгеновский источник на основе плазмы, созданной при взаимодействии оптического лазера с тонкой проволокой из металла толщиной в несколько десятком мкм. Ограничения данного подхода обсуждаются в **пункте 1.2.1**. На сегодняшний день наилучшее разрешение рентгенографии с использованием лазерной плазмы составляет порядка 10-20 мкм при временном разрешении ~ 1 пс, что для большого числа приложений недостаточно.

В качестве зондирующего импульса в радиографическом методе может использоваться также излучение от современных синхротронных источников. В **пункте 1.2.2** рассматривается применение рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ) для целей фазово-контрастной рентгенографии. Установки такого типа обеспечивают генерацию когерентного и моноэнергетического импульсного излучения сверхкороткой длительности (до десятков фемтосекунд), что позволяет с помощью пучков РЛСЭ исследовать сверхбыстрые и малоконтрастные процессы. Однако при работе с такими интенсивными источниками возникает необходимость в разработке новых методов диагностики пучков и детекторов, используемых в рентгенографических экспериментах. В качестве перспективного регистрирующего устройства для метода рентгенографии предлагается использование флуоресцентного кристаллического детектора LiF. **Раздел 1.3** посвящен описанию использования детектора LiF для регистрации радиографических изображений. Принципы формирования и визуализации скрытых рентгеновских изображений в кристалле LiF рассмотрены в **пункте 1.3.1**. В **пункте 1.3.2** продемонстрированы примеры использования такого детектора для задач радиографии с использованием рентгеновского излучения лазерной плазмы. В заключении главы, **разделе 1.4**, предлагается в качестве развития метода фазово-контрастной рентгенографии использование зондирующих пучков РЛСЭ в паре с детектором LiF для решения поставленных в данной работе задач, рисунок 1.

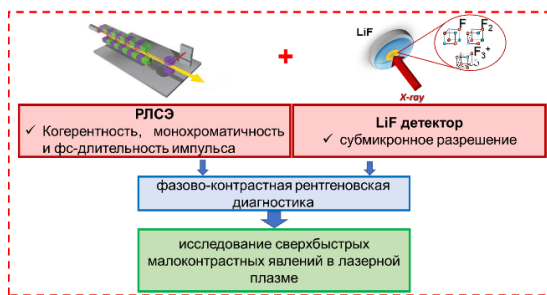


Рис. 1. Схема рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, предложенная в рамках диссертационной работы.

Глава 2 посвящена определению метрологических характеристик детектора LiF и параметров сверхинтенсивных когерентных рентгеновских источников для реализации фазово-контрастной радиографии. В **разделе 2.1** описаны постановки экспериментов, выполненных в рамках диссертационной работы. Для высокоточных измерений в широком диапазоне энергий фотонов использовались современные синхротронные источники (СИ): PETRA III (Германия, пункт 2.1.1), Soleil (Франция, пункт 2.1.2), РЛСЭ SACLA (Япония, пункт 2.1.3), Европейский РЛСЭ (Германия, пункт 2.1.4). В **разделе 2.2** приведены результаты экспериментов с использованием вышеуказанных установок. В частности, была найдена функция отклика детектора LiF в широком диапазоне поглощенных доз (вплоть до $\sim 2 \cdot 10^5$ Дж/см³), пункт 2.2.1, работы [2,7,13]. Показано, что она определяется только величиной накопленной дозы в кристалле и не зависит от энергии падающего излучения, а также может быть описана степенной зависимостью. В пункте 2.2.2 показано, что динамический диапазон детектора LiF составляет $\sim 10^7$ при облучении традиционными СИ (рисунок 2), однако может уменьшаться до значения $\sim 2 \cdot 10^5$ при облучении пучками РЛСЭ мощностью более 4 ± 0.4 кДж/см³/импульс из-за абляции кристалла.

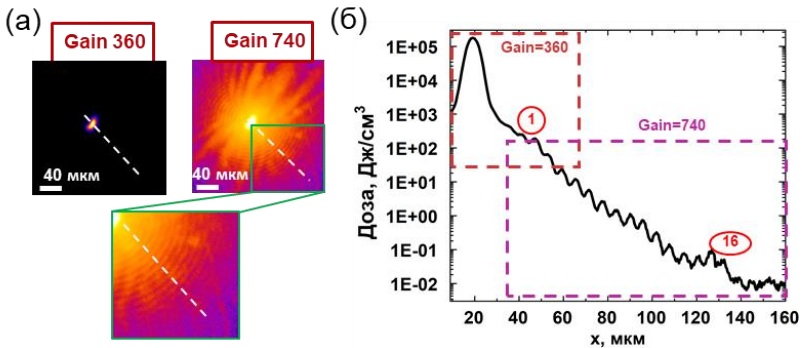


Рис. 2. Результаты эксперимента, демонстрирующего высокий динамический диапазон детектора LiF ($\sim 10^7$) [2]: (а) Зарегистрированное изображение дифракционной картины, сформированной за круглым отверстием диаметром 5 мкм, полученное при экспозиции синхротронным пучком PETRA-III с энергией фотонов 500 эВ кристалла LiF. Считывание сигнала с детектора производилось конфокальным микроскопом Carl Zeiss LSM700 при параметрах усиления фотоэлектронного умножителя gain=360 отн. ед. и gain=740 отн. ед. (б) Распределение поглощенной дозы, восстановленное из двух изображений LiF на кадре (а) вдоль пунктирной белой линии.

В **пункте 2.2.3** проверяется теоретическое предположение о том, что пространственное разрешение детектора LiF может ограничиваться размытием от каскада вторичных электронов, образовавшихся при

воздействии жестких рентгеновских фотонов (энергией несколько кэВ) с кристаллической решеткой детектора. В диапазоне энергий 5-12 кэВ явной зависимости найдено не было, что отражено в работе [7]. Показано, что разрешение LiF составляет величину не хуже 600 нм для фотонов энергией 7 кэВ.

Одним из методов восстановления волновых свойств излучения в рентгеновском и оптическом спектральных диапазонах является подход, основанный на исследовании дифракционной картины, полученной от таких источников. Применение детектора LiF для развития дифракционного метода рассматривается в **разделе 2.3** и описано в работах [6,8,15]. В **пунктах 2.3.1-2.3.2** описывается методика использования открытого программного кода WavePropagator для расчета фазово-контрастных картин за тестовыми объектами. Для апробации предложенного подхода было выполнено исследование волновых свойств фемтосекундного оптического лазера интенсивностью $I = 10^{18}$ Вт/см², прошедшего через газово-кластерную среду и тестовую сетку, **пункт 2.3.3**, работа [11]. Было найдено, что конверсия во вторую гармонику основного излучения с длиной волны $\lambda = 800$ нм составляет менее 10%, а вклад в наблюдаемую дифракционную картину излучения от сформированного лазерно-плазменного рентгеновского источника ~ 80%.

Одним из подходов рентгенографии с использованием излучения РЛСЭ является реализация схемы с расходящимся пучком, рисунок 3а. В таком случае стоит задача получения информации о распределении интенсивности внутри импульса, который используется в качестве зондирующего излучения. В настоящее время РЛСЭ демонстрируют значительные колебания спектра и распределения интенсивности от импульса к импульсу, поэтому чрезвычайно важным является развитие методов с возможностью одноимпульсного измерения волновых свойств. Стоит отметить, что диагностика высокоинтенсивных рентгеновских пучков часто ограничивается пространственным разрешением используемого детектора. В **разделе 2.4** предлагается методика диагностики параметров сфокусированных пучков РЛСЭ с использованием детектора LiF. Постановка проведенного эксперимента на Европейском РЛСЭ на станции физики высокой плотности энергии описана в **пункте 2.4.1**. Результаты измерения каустики и распределения интенсивности с субмикронным разрешением внутри рентгеновского пучка, сфокусированного до нескольких мкм и нескольких сотен нанометров, описаны в **пунктах 2.4.2-2.4.3** соответственно и частично отражены на рисунке 3(б,в). В **разделе 2.5** приводятся основные результаты главы 2.

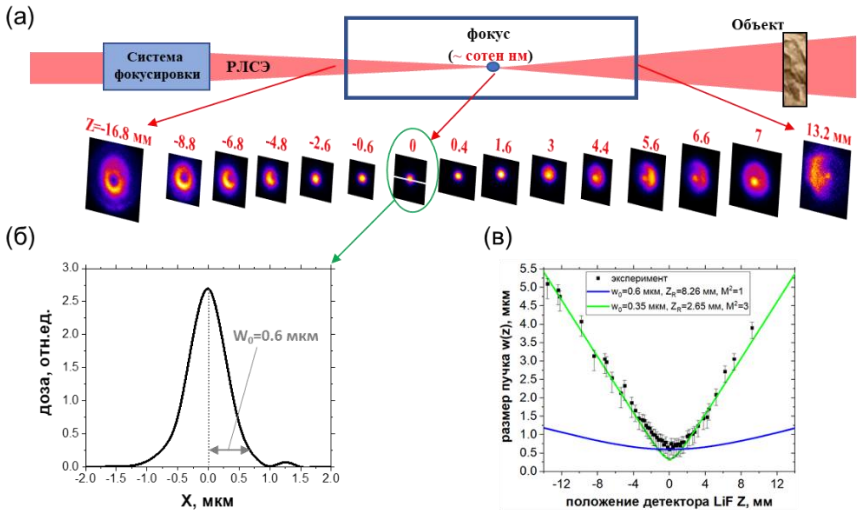


Рис. 3. (а) Типичная схема рентгенографии с расходящимся пучком РЛСЭ. Ниже показаны измерения профиля пучка вдоль оси распространения сфокусированного излучения Европейского РЛСЭ бериллиевой рефракционной оптикой. (б) Восстановленный на детекторе LiF дозовый профиль пучка в точке наилучшей фокусировки $z = 0$ мм. (в) Сравнение экспериментального размера пятна $w(z)$, измеренного на изображениях LiF, с каустикой, рассчитанной для разных параметров w_0 и M^2 .

Глава 3 посвящена развитию и апробации методики когерентной фазово-контрастной рентгенографии для исследования гидродинамических явлений в лазерной плазме. В Главе 2 (**раздел 2.4**) было показано, что при использовании схемы с сфокусированным зондирующим излучением РЛСЭ необходимо точно контролировать распределение интенсивности внутри пучка, которое может быть сильно неоднородным, рисунок 3а, и как результат влиять на качество получаемых рентгенографических картин. В рамках диссертационной работы была реализована схема с параллельным пучком РЛСЭ. В **разделе 3.1** обсуждаются параметры геометрии эксперимента, которые могут влиять на качество фазово-контрастной картины (ФЗК). Для демонстрации изображающей способности предлагаемой диагностической платформы была выполнена рентгенография специально подготовленной мишени с модуляциями, широко используемой для исследования эволюции неустойчивости Рэля-Тейлора (НРТ) в экспериментах с астрофизическим подобием (**пункт 3.1.1**), работа [3]. На рисунке 4(а,б) приведен модельный расчет для используемой мишени, демонстрирующий зависимость размера первого дифракционного максимума на границе модуляций от расстояния до

детектора. На рисунке 4в показана экспериментальная дифракционно-улучшенная картина мишени с модуляциями, зарегистрированная на детектор LiF при его установке на расстоянии 100 мм от объекта. Стоит отметить, что на изображении разрешены составляющие мишени с поглощением рентгеновских фотонов менее 1%, что возможно только благодаря проявлению фазового контраста.

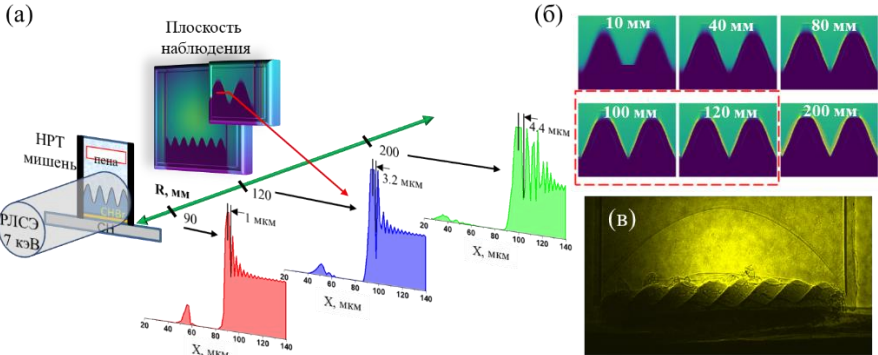


Рис. 4. (а) Схема задания геометрии эксперимента для моделирования прохождения импульса РЛСЭ через мишень с нанесенными модуляциями. Расчеты проводились для расстояний «мишень-детектор» в диапазоне $R = 10\text{--}200$ мм. Справа представлены распределения интенсивности излучения в плоскости детектора на одной из модуляций в зависимости от расстояния R . (б) Результаты моделирования видности фазового контраста на границах мишени от расстояния «мишень-детектор» [10]. (в) Фазово-контрастное рентгеновское изображение, зарегистрированное на детектор LiF, при облучении импульсом РЛСЭ SACLA [3].

Апробация развитой методики когерентной рентгенографии описана в **разделе 3.2** и отражена в работе [1]. Исследовалась эволюция неустойчивости Рэля-Тейлора в наносекундной лазерной плазме вплоть до турбулентной фазы. Экспериментальное исследование этого явления имеет решающее значение для построения и верификации теоретических предсказаний в физике высокой плотности энергии (см. например, рис. 5б), однако из-за ограничений диагностических и численных методов полное описание турбулентного спектра в плазменных системах все еще отсутствует. Постановка проведенного эксперимента с использованием РЛСЭ SACLA (Япония) описана в **пункте 3.2.1** и схематично показана на рисунке 5а. Целью эксперимента было наблюдение и исследование турбулентности вплоть до микронных масштабов и стадии диссипации энергии в контролируемых условиях. В **пункте 3.2.3** была решена задача расчета геометрии эксперимента, чтобы эффект фазового контраста уже начал проявляться на

границах мишени, но ширина первого дифракционного максимума имела микронный масштаб и не ухудшала пространственное разрешение экспериментальной радиографической платформы (работа [10]). Результаты визуализации эволюции неустойчивости Рэля-Тейлора показаны на рисунке 5в и подробно описаны в пункте 3.2.3.

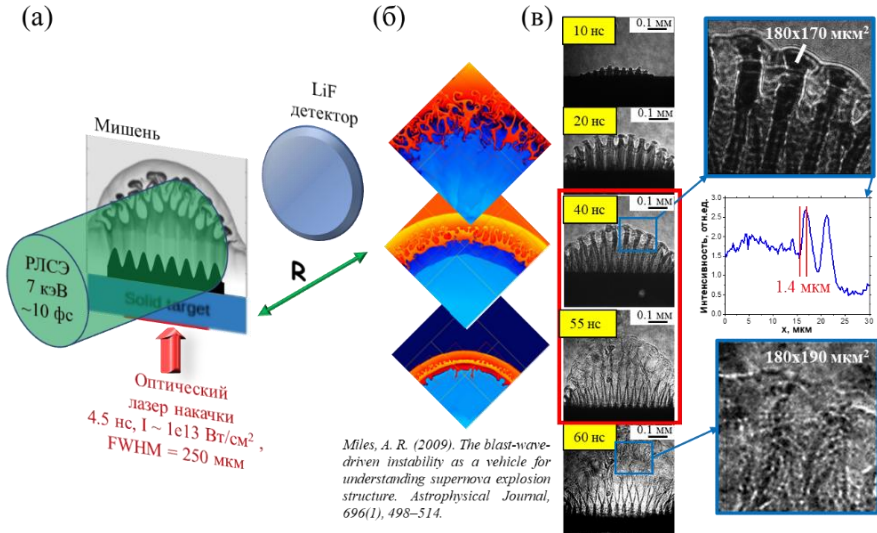


Рис. 5. (а) Схема эксперимента по исследованию эволюции неустойчивости Рэля-Тейлора в лазерно-индуцированной наносекундной плазме на РЛСЭ SACLA. (б) Модельные картины эволюции ударно-индуцированной неустойчивости, демонстрирующие сходства с развитием астрофизических объектов. (в) Экспериментальные рентгенографические изображения на детекторе LiF для времен 10-60 нс после взаимодействия оптического лазера с модулированной мишенью [1].

Сравнение полученных экспериментальных картин с результатами гидродинамических расчетов, выполненных кодами FLASH и MULTI, описано в пункте 3.2.4. Основываясь на сходстве расчетных и рентгенографических картин для линейной фазы развития НРТ, которая наблюдалась вплоть до 50 нс, из моделирования были получены основные параметры индуцированного плазменного потока, таблица 1. Рассчитанное значение числа Рейнольдса ($\sim 10^7$) указывает на то, что в момент времени 50 нс система уже находилась как минимум в каскадном режиме передачи энергии.

Таблица 1. Полученные с помощью гидродинамического моделирования параметры плазменного потока, наблюдаемого в эксперименте по исследованию эволюции неустойчивости Рэля-Тейлора на РЛСЭ SACLA [1].

Расчетный параметр	Формула	MULTI	FLASH
Положение границы (L)	расчет	388 мкм	391 мкм
Плотность СН (ρ)	расчет	0.2 г/см ³	0.22 г/см ³
Температура (T)	расчет	1.1 эВ	0.8 эВ
Давление (P)	расчет	43 кбар	26 кбар
Скорость струи (u)	расчет	5.7 км/с	5.5 км/с
Полученные параметры			
Ионизация (Z_C, Z_H, Z_O)	модель Томаса — Ферми	0.9, 0.4, 1	0.9, 0.4, 1
Средняя ионизация	$(15Z_C + 12Z_H + 4Z_O)/31$	0.7	0.7
Вязкость η	Clérouin formula	$5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$	$4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$
Re	uL/η	$4 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$
Инерц. длина e	$5.31e5n_e^{-0.5}$	52 нм	50 нм
Инерц. длина ионов	$2.28e7/Z \cdot (m_i/(amu \cdot n_i))^{0.5}$	7.7 мкм	7.4 мкм
Длина диссипации	$L/Re^{3/4}$	0.7 нм	0.6 нм

Для экспериментального исследования турбулентной фазы, которая проявляется на поздних временах был произведен спектральный анализ полученных рентгенографических LiF изображений, пункт 3.2.5, результаты которого показаны на рисунке 6 и подробно описаны в работе [1]. Как можно видеть, в целом наблюдается колмогоровский спектр (схематично показан на рис. 6в), однако на пространственных масштабах 3.9 ± 0.1 мкм в эксперименте отчетливо различима локальная немонотонность в виде всплеска интенсивности, см. рис. 6б. Данная особенность проявляется только на поздних временах развития индуцированного плазменного потока и не имеет физического объяснения на данный момент. Представленное наблюдение развития турбулентности в лазерной плазме беспрецедентно и открывает новые возможности для проверки и верификации теоретических описаний такой системы. В разделе 3.3 обобщаются результаты главы 3.

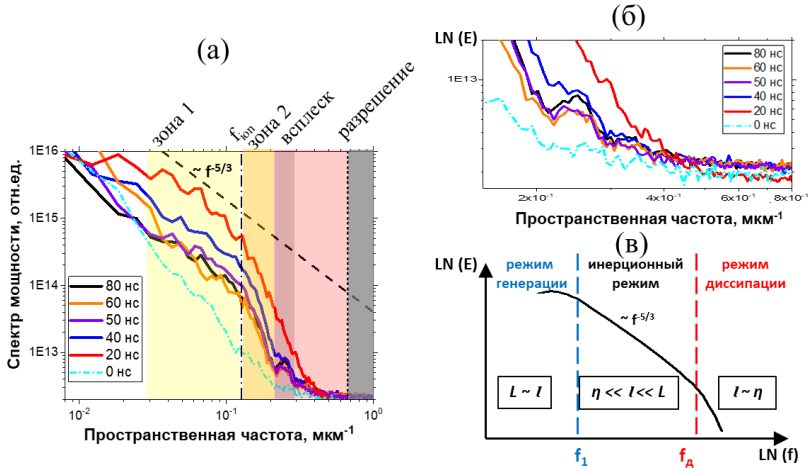


Рис. 6. (а) Пространственные спектры мощности турбулентной зоны для времен $t = 20\text{--}80$ нс. Также для сравнения изображен спектр области мишени (СН-пенны) до воздействия оптического лазера накачки $t = 0$ нс. (б) увеличенная область спектра, демонстрирующая наличия всплеска на частотах $f \sim 0.25$ мкм^{-1} . (в) Схематичное изображение колмогоровского спектра с каскадным режимом переноса энергии.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию распространения ударных волн (УВ) в лазерно-нагруженном твердом веществе. При высоких давлениях нагрузки происходит переход от упругого к неупругому отклику вещества. В данной фазе возможно существование двух ударных волн – упругий предвестник и следующая за ним более медленная пластическая УВ. До сегодняшнего дня исследование распространения упругопластических УВ исследовалось в основном интерференционным методом VISAR, который позволяет измерять их скорости на выходе из вещества. Однако такой подход не позволяет проводить прямые измерения, а дает лишь ограниченное представление о том, как сложные волны ведут себя внутри образца. В рамках Главы 4 была решена задача исследования морфологии и эволюции малоконтрастной парной волновой структуры (упругий предвестник – пластическая УВ) в алмазе с использованием методики когерентной фазово-контрастной рентгеновской радиографии, развитой в Главе 3. Схема проведенного эксперимента с использованием РЛСЭ SACLA (Япония) показана на рисунке 7а. Для формирования ударных волн в алмазе использовался оптический лазер накачки длительностью 5 нс и интенсивностью $I \sim 10^{13}$ Вт/см².

В разделе 4.2 и на рисунке 7б представлены результаты прямой визуализации эволюции распространения парной волновой структуры от

момента появления упругого предвестника до стадии затухания пластической УВ. Было выполнено сравнение полученных данных с результатами гидродинамических расчетов, выполненных в двумерной геометрии методом сглаженных частиц (SPH), рисунок 8. Путем сравнения экспериментальных картин с гидродинамическими расчетами в двумерной геометрии (см. рис. 7б и рис. 8а), выполнена калибровка и валидация упругопластической модели для давлений вплоть до ~ 350 ГПа. Определены основные параметры индуцированных волн (скорость частиц алмаза u и самих УВ V , плотность ρ и давление P в области УВ), таблица 2. Дополнительно были произведены оценки на ширину передних фронтов УВ, результаты которых описаны в разделе 4.4. В разделе 4.5 обобщаются результаты главы 4.

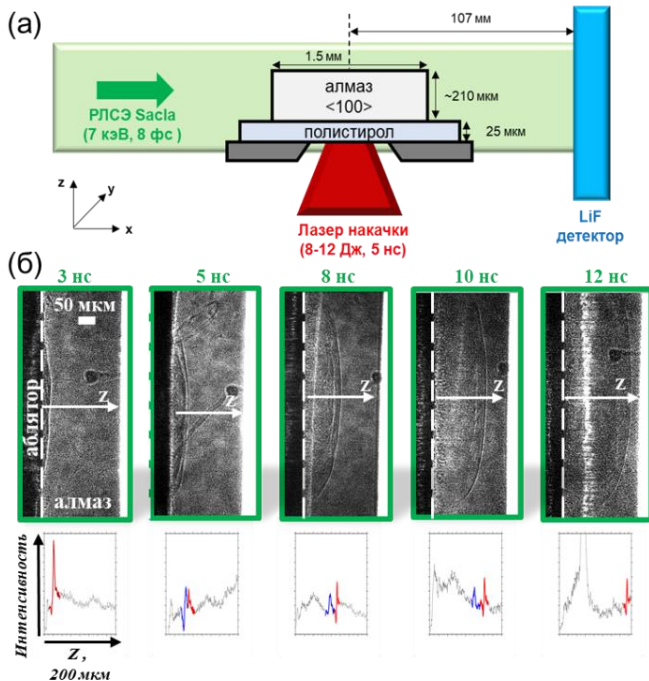


Рис. 7. Исследование эволюции распространения парной волновой структуры в алмазе для времен 3 – 12 нс после воздействия лазера накачки на мишень: (а) схема эксперимента; (б) рентгенографические изображения, зарегистрированные на детектор LiF, и соответствующие распределения интенсивности фазово-контрастных LiF изображений вдоль направления Z .

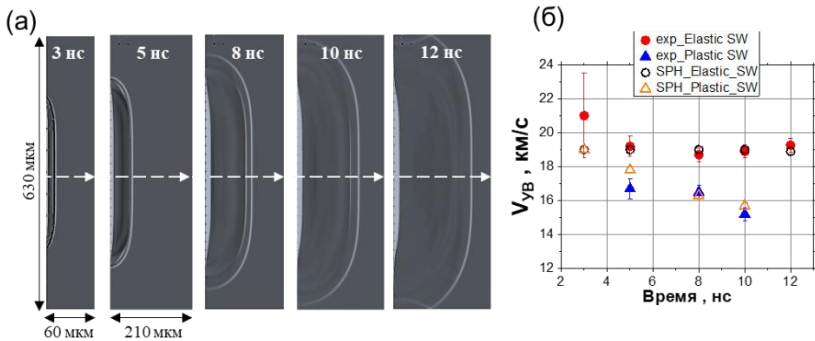


Рис. 8. (а) результаты двумерного SPH моделирования для времен 3-12 нс. (б) скорости наблюдаемых ударных волн в разные моменты времени. Красными и синими маркерами обозначены данные, полученные из рентгенографических изображений LiF; черными и оранжевыми – из SPH моделирования.

Таблица 2. Параметры ударных волн, полученные из гидродинамического моделирования методом сглаженных частиц. Индекс 1 соответствует данным для упругого предвестника, индекс 2 – для упругой УВ.

Время, нс	u_1 , км/с	V_1 , км/с	ρ_1 , г/см ³	P_1 , ГПа	u_2 , км/с	V_2 км/с	ρ_2 , г/см ³	P_2 , ГПа
3	5.5	19	4.97	310	5.5	19	4.97	310
5	1.67	19	3.88	56	3.33	17.2	4.35	154
8	1.67	19	3.88	56	2.38	16.3	4.06	95
10	1.67	19	3.86	56	1.86	15.7	3.91	66
12	1.67	19	3.88	56	1.67	0	3.88	56

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

- развита методика фазово-контрастной рентгенографии сверхвысокого разрешения для исследования быстропротекающих малоcontrastных явлений (с пропуском менее 1 %) в лазерной плазме. Найдено оптимальное расстояние, на которое необходимо установить детектор от мишени, чтобы эффект фазового контраста начал проявляться, но не замывал итоговое разрешение в рентгенографическом изображении.

- исследованы функции отклика и разрешающей способности флуоресцентного кристаллического детектора LiF в широком диапазоне энергий, интенсивностей и поглощенных доз когерентного моноэнергетического рентгеновского излучения (РИ). Продемонстрирована возможность регистрации сигнала с субмикронным пространственным

разрешением от таких источников при энергии фотонов несколько кэВ. Дополнительно определена величина мощности РИ, при которой происходит абляция детектора.

- разработан подход, позволяющий по дифракционным изображениям тестовых объектов, зарегистрированных с суб/микронным разрешением на детектор LiF, исследовать волновые свойства высокоинтенсивных рентгеновских/оптических источников, которые используются в методе радиографии. Исследован спектральный состав фемтосекундного оптического излучения и вклад рентгеновского лазерно-плазменного источника, образовавшегося при взаимодействии лазера интенсивностью $\sim 10^{18}$ Вт/см² с кластерной мишенью.

- продемонстрировано, что применение детектора LiF в экспериментах с использованием высокоинтенсивного сфокусированного излучения РЛСЭ позволяет измерять каустику и распределение интенсивности внутри таких пучков с субмикронным разрешением и динамическим диапазоном не менее $\sim 2 \cdot 10^5$.

- впервые с микронной точностью исследовано развитие неустойчивости Рэля-Тейлора до турбулентной фазы в плазме, индуцированной взаимодействием оптического лазера интенсивностью $I \sim 10^{13}$ Вт/см² и длительностью ~ 5 нс с модулированной мишенью (полистирол + СНВг). Произведено сравнение с результатами гидродинамического моделирования для линейной фазы развития неустойчивости, в результате чего определены физические параметры лазерно-плазменной системы (ионизация, вязкость, число Рейнольдса, инерционная длина ионов и электронов и др.). Впервые измерен пространственный спектр вплоть до стадии диссипации энергии вихрей турбулентности, а также выявлена в нем локальная немонотонность на масштабах нескольких микрон.

- впервые прямым методом зарегистрирована парная волновая структура «упругий предвестник – пластическая ударная волна», генерируемая при воздействии оптического лазера интенсивностью $I \sim 10^{13}$ Вт/см² и длительностью ~ 5 нс на алмаз. Исследованы морфология и основные параметры образовавшихся ударных волн от момента появления упругого предвестника до затухания пластической УВ (скорость, плотность, давление, ширина фронта, времена появления предвестника и замытия пластической УВ). Выполнена калибровка и валидация упругопластической модели, описывающий данный процесс в двумерной геометрии.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Rigon G., Albertazzi B., Pikuz T., Mabey P., Bouffetier V., Ozaki N., Vinci T., Barbato F., Falize E., Inubushi Y., Kamimura N., Katagiri K., Makarov S., Manuel M. J.-E., Miyanishi K., Pikuz S., Poujade O., Sueda K., Togashi T., Umeda Y., Yabashi M., Yabuuchi T., Gregori G., Kodama R., Casner A., and Koenig M. “Micron-scale phenomena observed in a turbulent laser-produced plasma” // *Nature communications*, Vol. 12, Article number: 2679, (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22891-w>
2. Makarov S., Pikuz S., Ryazantsev S. et al. “Soft x-ray diffraction patterns measured by a lif detector with sub-micrometre resolution and an ultimate dynamic range” // *Journal of Synchrotron Radiation*, Vol. 27, p. 625-632, (2020). <https://doi.org/10.1107/S1600577520002192>
3. Faenov A. Y., Pikuz T. A., Mabey P., Albertazzi B., Michel Th., Rigon G., Pikuz S. A., Buzmakov A., Makarov S., Ozaki N., Matsuoka T., Katagiri K., Miyanishi K., Takahashi K., Tanaka K. A., Inubushi Y., Togashi T., Yabuuchi T., Yabashi M., Casner A., Kodama R., and Koenig M. “Advanced high resolution x-ray diagnostic for hep experiments” // *Scientific reports*, Vol. 8, Article number: 16407, (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34717-9>
4. Filippov E. D., Makarov S. S., Burdonov K. F. et al. “Enhanced x-ray emission arising from laser-plasma confinement by a strong transverse magnetic field” // *Scientific reports*, Vol. 11, Article number: 8180, (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87651-8>
5. Khiar B., Revet G., Ciardi A., Burdonov K., Filippov E., Béard J., Cerchez M., Chen S. N., Gangolf T., Makarov S. S., Ouillé M., Safronova M., Skobelev I. Yu., Soloviev A., Starodubtsev M., Willi O., Pikuz S., and Fuchs J. “Laser-produced magnetic-rayleigh-taylor unstable plasma slabs in a 20 T magnetic field” // *Physical Review Letters*, Vol. 123, Article number: 205001, (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.205001>
6. Pikuz T., Faenov A., Ozaki N., Matsuoka T., Albertazzi B., Hartley N. J., Miyanishi K., Katagiri K., Matsuyama S., Yamauchi K., Habara H., Inubushi Y., Togashi T., Yumoto H., Ohashi H., Tange Y., Yabuuchi T., Yabashi M., Grum-Grzhimailo A. N., Casner A., Skobelev I. Yu., Makarov S., Pikuz S., Rigon G., Koenig M., Tanaka K. A., Ishikawa T., and Kodama R. “Development of new diagnostics based on lif detector for pump-probe experiments” // *Matter and Radiation at Extremes*, Vol. 3, p.197–206, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.mre.2018.01.006>
7. Mabey P., Albertazzi B., Michel Th., Rigon G., Makarov S., Ozaki N., Matsuoka T., Pikuz S., Pikuz T., and Koenig M. “Characterization of high spatial resolution lithium fluoride x-ray detectors” // *Review of Scientific Instruments*, Vol. 90, Article number: 063702, (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5092265>
8. Ivanov K. A., Gozhev D. A., Rodichkina S. P., Makarov S. V., Makarov S. S., Dubatkov M. A., Pikuz S. A., Presnov D. E., Paskhalov A. A., Eremin N. V., Brantov A. V., Bychenkov V. Yu, Volkov R. V., Timoshenko V. Yu., Kudryashov S. I., and Savel'ev A.

- B. “Nanostructured plasmas for enhanced gamma emission at relativistic laser interaction with solids” // *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 123, Article number: 252, (2017). <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6826-4>
9. Макаров С.С., Жвания И. А., Пикуз С. А. и др. Исследование параметров высокоинтенсивных тепловых и когерентных рентгеновских источников с помощью кристаллов фторида лития (обзор). *Теплофизика высоких температур*. том 58. выпуск 4. стр. 670–688. (2020). <https://doi.org/10.31857/S0040364420040109>
 10. Makarov S. S., Pikuz T. A., Buzmakov A. V. et al. “X-ray radiography based on the phase-contrast imaging with using lif detector”// *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1787, Article number: 01202, (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012027>
 11. Makarov S.S., Pikuz T.A., Buzmakov A.V. et al. “Properties of laser beam passed through cluster plasma studied with diffraction pattern method” // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1556, Article number: 012007, (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1556/1/012007>
 12. Bonfigli F., Hartley N. J., Inubushi Y., Katagiri K., Koenig M., Matsuoka T., Makarov S., Montekali R. M., Nichelatti E., Ozaki N., Piccinini M., Pikuz S., Pikuz T., Sagae D., Vincenti M. A., Yabuuchi T. “Photoluminescent radiation-induced color centers in lithium fluoride for detection of pulsed 10 keV XFEL beam” // *IL NUOVO CIMENTO C*, Vol. 44, Article number: 146, (2021). <https://doi.org/10.1393/ncc/i2021-21146-x>
 13. Bonfigli F., Hartley N., Inubushi Yu., Koenig M., Matsuoka T., Makarov S., Montekali R. M., Nichelatti E., Ozaki N., Piccinini M., Pikuz S., Pikuz T. A., Sagae D., Vincenti M. A., Yabashi M., and Yabuuchi T. “Photoluminescence properties and characterization of lif-based imaging detector irradiated by 10 keV xfel beam” // *SPIE Proceedings*, Vol. 11035, Article number:110350N, (2019). <https://doi.org/10.1117/12.2520907>
 14. Макаров С.С., Пикуз С.А., Черняев А.П. “In-situ измерение профиля сфокусированного пучка синхротронного излучения флуоресцентным детектором с динамическим диапазоном 1е6” // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*, Выпуск 1, элект. №: 1910401, (2019). <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2019/1/1910401/>
 15. Макаров С.С., Пикуз С.А., Пикуз Т.А., и др. “Выбор геометрии эксперимента при определении волновых свойств излучения рентгеновского лазера дифракционным методом” // *Вестник Объединенного института высоких температур*, Том 1, стр.136–139, (2018). <https://doi.org/10.33849/2018129>

Макаров Сергей Станиславович

**ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ
РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ СВЕРХВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ**

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.1,0
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2