

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора химических наук, заведующего лабораторией методов синхротронного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук» Толочко Бориса Петровича 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 экспериментальному моделированию астрофизических процессов в контролируемых лабораторных условиях на модельных объектах.

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.

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.

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.

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. 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, 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.

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. Показано, что разрешение LiF составляет величину не хуже 600 нм для фотонов энергией 7 кэВ.

Глава 3 посвящена развитию и апробации методики когерентной фазово-контрастной рентгенографии для исследования гидродинамических явлений в лазерной плазме. 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**). Приведен модельный расчет для используемой мишени, демонстрирующий зависимость размера первого дифракционного максимума на границе модуляций от расстояния до детектора.

Апробация развитой методики когерентной рентгенографии описана в **разделе 3.2**. 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, 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**. Целью эксперимента было наблюдение и исследование турбулентности вплоть до микронных масштабов и стадии диссипации энергии в контролируемых условиях.

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. 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.

Для экспериментального исследования турбулентной фазы, которая проявляется на поздних временах, был произведен спектральный анализ полученных рентгенографических LiF изображений, **пункт 3.2.5**. Анализ показал, что в целом наблюдается колмогоровский спектр, однако на пространственных масштабах 3.9 ± 0.1 мкм в эксперименте отчетливо различима локальная немонотонность в виде всплеска интенсивности. Данная особенность проявляется только на поздних временах развития индуцированного плазменного потока и не имеет физического объяснения на данный момент.

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. В рамках Главы 4 была решена задача исследования морфологии и эволюции малококонтрастной парной волновой структуры (упругий предвестник – пластическая УВ) в алмазе с использованием методики когерентной фазово-контрастной рентгеновской радиографии. 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 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). Путем сравнения экспериментальных картин с гидродинамическими расчетами в двумерной геометрии, 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). Дополнительно были произведены оценки на ширину передних фронтов УВ, результаты которых описаны в разделе 4.4.

Актуальность работы. Постановка в контролируемых лабораторных условиях экспериментов, моделирующих астрофизические процессы на модельных объектах – актуальная современная задача. 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.

Научная новизна. Предложена и апробирована методика регистрации фазово-контрастных рентгеновских изображений малококонтрастных 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.

Теоретическая значимость работы. 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 + СНBr). 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.

Эти два результата имеют теоретическую значимость для развития астрофизики и физики экстремальных состояний.

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть применены в следующих организациях: РФЯЦ ВНИИТФ, РФЯЦ ВНИИЭФ, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», ФГБУН СКИФ – филиал Института катализа СО РАН, Институт ядерной физики СО РАН, Институт гидродинамики СО РАН.

Апробация и публикации. 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 14-ти всероссийских и международных конференциях.

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.

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.

Замечания.

1. На странице 34 автор описывает эксперимент с использованием синхротронного источника Soleil для определения метрологических характеристик флуоресцентных кристаллических детекторов. В частности, автор пишет: «Поток фотонов, падающих на детектор LiF, измерялся до и после каждого облучения диодом». Зачем делались эти два измерения? Для стабильного источника излучения достаточно одного измерения. На этот вопрос автор не дает ответа. Кроме того, автор не объясняет процедуру обработки этих двух измерений.
2. На странице 34 автор описывает метрологический эксперимент по набору дозы кристаллом LiF. Автор не указал точность измерения дозы (ошибку измерений), что чрезвычайно важно для метрологических экспериментов.
3. В эксперименте по исследованию процесса распространения лазерно-индуцированной ударной волны в твердом веществе (Рисунок 4.4) для получения одной рентгенограммы, например при $t=3$ нс, требуется один кристалл алмаза, который после ударного воздействия полностью разрушается. Следовательно, для получения 5-ти рентгенограмм (при $t=3, 5, 8, 10, 12$ нс,) требуется 5 кристаллов алмаза. Автор не обосновал как можно «сшить» данные, полученные на 1-м кристалле с данными от 4-х других кристаллов.
4. Лазерно-индуцированная ударная волна должна иметь сферическую форму, однако на рентгенограммах Рисунка 4.4 при $t=3$ нс она не сферическая. Автор не объясняет это явление.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. 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.

Официальный оппонент, заведующий лабораторией методов синхротронного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт

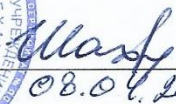
химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук»; 630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18; тел. (383) 329-41-05, solid.nsc.ru, email: bptolochko@solid.nsc.ru; доктор химических наук (научная специальность – 1.4.15– Химия твердого тела).


Толочко Б.П.

08 04 2022 г.

Подпись Толочко Б.П. заверяю:
Ученый секретарь Института
д.х.н.




Шахтшнейдер Т.П.
08.04.2022

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИХТТМ СО РАН)

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18,

Телефон: +7 (383) 332-40-02 (канцелярия, общая справочная информация),

e-mail: secretary@solid.nsc.ru