

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИГиЛ СО РАН  
д.ф.-м.н. Е.В. Ермаков  
" 07 " апреля 2022 г.



№ \_\_\_\_\_

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
на диссертационную работу Макарова Сергея Станиславовича  
«ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В  
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ  
РАДИОГРАФИИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ»  
по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы»,

Диссертационная работа **Макарова Сергея Станиславовича** посвящена исследованию с субмикронным разрешением малоконтрастных быстропротекающих гидродинамических явлений, с использованием рентгеновских лазеров на свободных электронах.

**Оценка актуальности работы**

В экспериментальной физике Экстремального Состояния Вещества (ЭСВ) большое значение имеет временное разрешение. Более высокие параметры в веществе могут быть получены в лабораторных условиях только в ограниченном временном и пространственном промежутках. Если для получения ударных волн (УВ) используются взрывчатые вещества (ВВ), то размер сжатого вещества составляет порядка 1 см. А необходимое временное разрешение порядка 100 нс. Использование мощных лазеров для создания УВ привело к увеличению выделяемой энергии (на единицу площади) на

несколько порядков, что позволяет получать гораздо большие сжатия вещества. Но одновременно с этим резко упали длительность существования и размеры сжимаемой области. Кроме того, при развитии гидродинамических явлений (неустойчивостей) границы имеют малые изменения плотности.

Лазеры для создания УВ имеют длительность импульса от  $\sim$  пс. Диаметр (площадь) пятна для лазерного облучения также имеет размер  $\sim 10$  мкм. В связи с этим возникает необходимость развития соответствующих экспериментальных подходов, которые позволили бы диагностировать состояние вещества в столь сложных условиях.

Появление рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ) с длительностью импульса до 10 фс подняло на новый уровень диагностики ЭСВ. Фемтосекундная длительность импульсов от таких установок обеспечивает не только высокое временное разрешение, но и монохроматичность, высокую когерентность и яркость, что позволяет получать дифракционно-улучшенные изображения объектов с малыми градиентами плотности.

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 малококонтрастных быстропротекающих явлений в плазме.

Целью диссертационной работы Макарова С.С. работы являлось исследование развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и ударных волн в лазерно-индуцированной плазме.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Развита и апробирована методика фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения с использованием флуоресцентного детектора LiF и зондирующего излучения когерентных пучков РЛСЭ.
2. Развита методика визуализации и прецизионного количественного измерения профиля интенсивности рентгеновского излучения ускорительных комплексов.
3. Проведено исследование с субмикронным пространственным и субпикосекундным временным разрешениями развития неустойчивости Рэлея-Тейлора в лазерной плазме и движения УВ в алмазной мишени.

Таким образом, можно заключить, что **актуальность** темы диссертационной работы Макарова С.С., связанная с исследованием ЭСВ, формируемого в условиях воздействия на твердотельные мишени



наносекундных лазерных импульсов и соответствующей необходимостью развития диагностических методов и подходов, не вызывает сомнений.

### **Научная новизна работы**

Впервые с высокой точностью получены экспериментальные данные по определению функций отклика и пространственного разрешения, а также радиационной устойчивости детектора LiF при воздействии пучков как традиционных синхротронных источников, так и рентгеновских лазеров на свободных электронах. Впервые с субмикронной точностью экспериментально визуализировано развитие неустойчивостей Рэлея-Тейлора в лазерно-индуцированной наносекундной плазме вплоть до турбулентной фазы. Прямым методом впервые экспериментально зарегистрирована с микронной точностью динамика развития волновой структуры «упругий предвестник – пластическая УВ» в алмазе.

### **Научная и практическая значимость работы**

Измеренный с микронным разрешением пространственный спектр развития турбулентности в наносекундной лазерной плазме, может использоваться для развития и валидации теорий турбулентности. До сегодняшнего дня данная область ещё не имела экспериментальных радиографических исследований с таким временным и пространственным разрешением. 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 новое направление по регистрации малоконтрастных объектов во многих веществах. Методика уже успешно используется в ведущих зарубежных центрах. 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.

Разработанные в работе методики и полученные результаты могут быть использованы в ряде организаций и научных центров, осуществляющих исследования по физике высокой плотности энергии, таких как ИГиЛ СО РАН, синхротрон "КИСИ-Курчатов", РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ – ВНИИТФ, ФГУП «ВНИИА», НИЯУ МИФИ и др. для рентгеновской радиографии и исследования гидродинамических явлений в плазме.

### **Анализ содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемых обозначений и списка литературы. Диссертационная работа содержит 113 страниц машинописного текста, включающего в себя список литературы, состоящий из 132 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, описаны новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация работы, структура и объём диссертации.

Глава 1 посвящена обзору мировой литературы по использованию метода рентгеновской радиографии для исследования гидродинамических явлений в лазерно- индуцированной плазме. Обсуждаются проблемы и ограничения использования того или иного метода (и детекторов) для целей рентгеновской радиографии. Показана перспективность использования детектора LiF в паре с пучками рентгеновских лазеров на свободных электронах для исследования быстропротекающих малоконтрастных гидродинамических явлений в лазерно- индуцированной плазме.

В главе 2 определены основные метрологические характеристики кристалла LiF как детектора рентгеновского излучения в широком диапазоне поглощенных доз и интенсивностей моноэнергетических синхротронных пучков. Описывается методика использования такого детектора для контроля интенсивности и энергетического распределения внутри пучков рентгеновских лазеров с субмикронным пространственным разрешением. Полученные в исследовании результаты позволяют расширить применение детектора LiF для диагностики высокоинтенсивных когерентных рентгеновских пучков, а также в радиографических экспериментах по физике высоких плотностей энергии с использованием пучков рентгеновских лазеров на свободных электронах.

В главе 3 Развита и апробирована схема фазово-контрастной рентгенографии для исследования гидродинамических неустойчивостей в лазерной плазме. Впервые экспериментально визуализировано развитие неустойчивостей Рэлея-Тейлора вплоть до турбулентной фазы в наносекундной лазерно-индуцированной плазме.

В главе 4 методика когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения успешно применена для исследования гидродинамических явлений в лазерно- нагруженном твердом веществе. Впервые прямым методом зарегистрировано распространения парной волновой структуры «упругий предвестник – пластическая УВ» в алмазе.

Необходимо отметить отличительные особенности диссертационной работы Макарова С.С.



1. Данная работа имеет большое методическое значение. В ней задаются два новых экспериментальных направления: дальнейшая разработка рентгеновских детекторов с микронным разрешением и постановка гидродинамических экспериментов с использованием рентгеновских лазеров фемтосекундным временным разрешением.
2. Автором развита и впервые применена методика фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, которая была применена для исследования гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме и твердом веществе.
3. Автором организована огромная кооперация научных сотрудников ведущих организаций (по источникам излучения и детекторам) в мире. При проведении экспериментов использовались самые передовые установки в мире на данное время. Такая кооперация предполагает большие способности к общению и работе в многонациональном коллективе.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Основные результаты и выводы, сформулированные соискателем в виде защищаемых положений, соответствуют поставленным задачам и в полной мере опубликованы в высокорейтинговых российских и зарубежных научных изданиях (15 публикаций), а также представлены на престижных международных конференциях.

### **Общая оценка работы**

Диссертационная работа Макарова С. С. выполнена на высоком уровне, обладает целостностью и написана понятным и грамотным текстом. Цели и задачи диссертации соответствуют специальности 1.3.9 – Физика плазмы. В работе решены все поставленные научные задачи, а объём диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к научно-квалификационной работе на соискание степени кандидата наук. Автореферат диссертации соответствует основным положениям диссертации, её содержанию. **Личный вклад** автора не вызывает сомнений.

### **Замечания**

По содержанию диссертации можно задать ряд вопросов (замечаний).

- По главе 2. Как зависит пространственное разрешение детектора на LiF от глубины сканирования (считывания)?
- По главе 3. Ничего не сказано о свойствах пены, в которой развиваются неустойчивости (размеры пор и их равномерность)?
- По главе 4. Можно ли использовать детектор LiF для измерения поглощения (при уменьшении пространственного разрешения)?

Указанные замечания не умаляют ценности работы и не снижают достоинства диссертационного исследования.

## Заключение

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Макарова Сергея Станиславовича «ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ» по уровню выполнения, объёму, актуальности, новизне и значимости полученных результатов представляет собой полноценное законченное научное исследование, соответствующее требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в т.ч. соответствует п. 9-11 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (ред.11.09.2021г.), а автор работы, **Макаров Сергей Станиславович**, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Диссертационная работа была доложена и одобрена на научном семинаре ИГиЛ СО РАН (протокол № 1 от 14.03.2022 г.).


### Отзыв подготовил:


#### **Тен Константин Алексеевич**

Кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», ведущий научный сотрудник лаборатории «Физики взрыва» (630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 15, тел. +7 333-32-99, igil@hydro.nsc.ru, email: kten276@gmail.com)

Подпись К.А. Тена заверено  
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН,  
к.ф.-м.н. Хе Александр Канчерович



  
Тен К.А.  
« 07 » 04 2022 г.

  
Хе А.К.  
07.04.2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: пр. Лаврентьева 15, г. Новосибирск, 630090

Телефон: +7 (383)-333-16-12,

e-mail: igil@hydro.nsc.ru