

Минобрнауки России

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки

«Утверждаю»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

http://www.inp.nsk.su, e-mail: inp@inp.nsk.su

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 27 НОЯ 2024 № 15311 – 44/62151-3521

на \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



Директор ИЯФ СО РАН, академик

П.В. Логачев

2024 г.

## Отзыв

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

на диссертацию Перекалова Александра Алексеевича «Эмиссионные спектры  
газовых и жидкостных мишеней при импульсном лазерном возбуждении»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности

1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация А.А. Перекалова посвящена разработке новых диагностических приборов, а также изучению, с использованием этих приборов, спектральных характеристик и абсолютной интенсивности эмиссионного излучения лазерно-плазменных источников (ЛПИ) в мягком рентгеновском диапазоне и в области экстремального ультрафиолетового излучения (МУФ и ЭУФ, соответственно). Работы проводились на газоструйных и жидкостных мишенях при различных параметрах системы лазерного возбуждения.

**Актуальность темы диссертации.** Современные успехи в изготовлении многослойной оптики МУФ и ЭУФ диапазонов дали толчок к развитию исследований в области нанолитографии и микроскопии, использующих излучение названных диапазонов. Принципиально важной проблемой в развитии данных исследований является проблема создания высокоинтенсивных источников излучения. Установки, использующие в качестве таких источников электронный пучок (синхротроны и лазеры на свободных электронах) весьма сложны и дороги, поэтому исследования удобно проводить на лабораторных источниках. ЛПИ с использованием газовых или жидкостных мишеней свободны от ряда технических недостатков, присущих рентгеновским трубкам и лабораторным источникам, использующим твердотельные мишени, в связи с чем актуальность их развития не вызывает сомнений.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, перечисления основных результатов диссертационной работы, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 194 страницы, содержит 89 рисунков и 18 таблиц, не включая приложения. Объем приложения составляет 14

страниц и содержит 10 таблиц. Список литературы составляет 94 наименования, включая 11 публикаций автора, вынесенных в отдельный список.

**Во Введении** приводится краткое описание исследований в области разработки источников ЭУФ и МР излучения, обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка задачи исследования. Кроме того, формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации в работах, описанных в ее тексте.

**Первая глава** посвящена литературному обзору современного состояния исследований в области разработки лазерно-плазменных источников МР и ЭУФ излучения с различными типами мишеней и различными способами их возбуждения. Приводится ряд эмиссионных спектров и их наиболее важные параметры.

**Вторая глава** посвящена описанию установки, на которой была выполнена экспериментальная часть диссертационной работы. Описаны оригинальные приборы для диагностики излучения лазерной плазмы, которые разработаны при определяющем вкладе автора диссертации. Приведены описания приборов, работающих с использованием многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ): Брэгговского  $\varphi$ -2 $\varphi$  спектрометра и изображающей системы на основе объектива Шварцшильда. Также описаны разработанные системы формирования газоструйных и жидкостных мишеней. Отдельное внимание уделено методикам проведения экспериментальных измерений и проведена оценка погрешностей измерений.

**В Третьей главе** приведены результаты исследований эмиссионных спектров газоструйных мишеней ряда инертных (Ne, Ar, Kr, Xe) и молекулярных (CO<sub>2</sub>, CHF<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>) газов, проведено сравнение мощности излучения этих мишеней, определена наиболее яркая мишень (ксенон).

**В Четвертой главе** приведены результаты исследований эмиссионных спектров жидкостных мишеней некоторых углеродсодержащих (спирты, гексан) и хлорсодержащей (дихлорметан) жидкостей. Некоторые измерения проведены впервые, в частности, измерена абсолютная интенсивность излучения хлорсодержащей жидкостной мишени в спектральных диапазонах 2,5-18 нм.

**В Пятой главе** анализируются основные физические процессы, происходящие в газоструйных мишенях при формировании лазерной искры. На основе модели детонационной волны в однородном газе проводится оценка длины получающейся лазерной искры и температуры плазмы.

После Пятой главы следуют **основные результаты диссертационной работы**, которые получены при непосредственном участии автора и, по существу, выполняют роль заключения. Особо следует отметить следующие результаты:

1. Создан Брэгговский  $\varphi$ -2 $\varphi$  спектрометр на основе МРЗ. Спектрометр позволяет проводить измерения интенсивности эмиссионного излучения ЛПИ в спектральном диапазоне 2,5÷30 нм.
2. Впервые зарегистрированы изображения лазерной искры в газоструйной мишени криптона на длине волны 11,25 нм с пространственным разрешением в 3,9 мкм. Исследована зависимость размера искры от ряда параметров. Работы проведены с использованием созданной в рамках диссертационной работы изображающей системы на основе двухзеркального объектива Шварцшильда.
3. Разработаны оригинальные методики для работы с модифицированным спектрометром РСМ-500 и созданным на базе МРЗ Брэгговским спектрометром. Следует также подчеркнуть, что последний прибор позволяет проводить абсолютные измерения с погрешностью 20% в диапазоне 2,5-30 нм.
4. Проведено сравнение мощностей эмиссионных спектров различных газоструйных мишеней в диапазоне ЭУФ и сделан вывод, что наиболее интенсивное излучение дает ксеноновая мишень (50 мВт в спектральной полосе

2%), проведена оценка коэффициента конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ (0.8%).

5. В диапазоне «окна прозрачности воды» выявлена наиболее яркая газоструйная мишень ( $\text{CO}_2$ ,  $\lambda = 4$  мкВт), пригодная для рентгеновской микроскопии.

**Новизна** полученных результатов не вызывает сомнений. **Практическая значимость** полученных в работе результатов состоит в их реальном применении для ныне разрабатываемых в ИФМ СО РАН установок, наиболее заметной из которых является экспериментальный источник излучения для ЭУФ литографа (11.2 нм).

Хотя работа в целом выполнена на высоком уровне, в ее изложении и оформлении имеются отдельные недостатки:

1. Первая группа недостатков относится к категории опечаток, возникших, очевидно, в результате многократной переработки автором текста диссертации. Так, во Введении (стр 14) указывается, что диссертация содержит не пять, а четыре главы, там же упомянуто наличие в диссертации заключения, при том, что такого пункта в тексте нет, а его роль выполняет список основных результатов диссертации. Также, начиная со 141 страницы в тексте диссертации имеются ссылки на несуществующие номера таблиц. В главе 5 присутствуют ссылки [94] и [98] на работы, отсутствующие в списке литературы.

2. Во введении (стр. 3) автор несколько вольно трактует термин «мягкий рентгеновский диапазон», в явном виде указывая в качестве границы между жестким и мягким рентгеновским диапазонами длину волны  $\lambda = 0.3$  нм. Несмотря на то, что автор вполне справедливо упоминает литературные источники, использующие данную терминологию, представляется более корректным апеллировать не к литературе, а к принятым международным официальным стандартам. В качестве такового, в частности, можно использовать действующий ISO-21348-2007, который указывает границу  $\lambda = 0.1$  нм. Диссертация, помимо прочих, решает метрологические задачи, в связи с чем терминологическая корректность в этой работе требует дополнительного внимания.

3. В своей работе автор использовал два спектральных прибора - РСМ-500, обладающий высоким спектральным разрешением без абсолютной калибровки и прибор на основе многослойных зеркал (МРЗ) с низким спектральным разрешением, имеющий абсолютную калибровку. К сожалению, количественного сопоставления показаний этих приборов автором не сделано. Имея множество различных спектров, зарегистрированных обеими приборами, автор мог бы определить спектральную характеристику чувствительности РСМ-500 и, зная спектральное разрешение МРЗ, синтезировать из спектров РСМ-500 отклик МРЗ и сравнить с измеряемым спектром. Это бы существенно повысило достоверность представляемых результатов, поскольку соотношение спектров различных источников вызывает вопросы (например, по рис. 44 можно предположить, что спектральные характеристики двух приборов в диапазоне 11-18 нм примерно одинаковы, а по рис. 39 – что спектральная характеристика МРЗ падает с увеличением длины волны).

Кроме того, автор имел в распоряжении еще один абсолютно калиброванный спектральный прибор – двухзеркальный монохроматор на длину волны 11,34 нм, но сравнения измерений двумя приборами в одинаковых условиях в диссертации не приводится.

4. Следует еще отметить, что утверждение, что автор измеряет “абсолютную интенсивность эмиссионного излучения” в указанной спектральной полосе не совсем корректно и может вводить в заблуждение читателей. На самом деле автор

измеряет и приводит мощность, усредненную с учетом спектральной характеристики зеркального спектрометра

$$W = \frac{\int E(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{R(\lambda_0)}$$

где  $W$  – измеряемая автором величина,  $E$  – спектральная плотность мощности излучения,  $R$  – спектральная характеристика МРЗ,  $\lambda_0$  – центральная длина волны выбранного диапазона. Видимо, для этой величины нужно было бы придумать какое-то другое название, подчеркивающее зависимость от спектральной характеристики прибора

5. В диссертации очень бегло обсуждаются вопросы применимости рассматриваемой в главе 5 теоретической модели к конкретному эксперименту:

- a. Нет сравнения длины поглощения лазерного излучения с получающейся длиной искры. Для применимости рассматриваемой модели необходимо, чтобы длина поглощения была много меньше длины искры, что при неполном поглощении, наблюдаемом авторами, вызывает сомнения;
  - b. Для того, чтобы обосновать использование модели однородной плазмы в рассматриваемой геометрии, необходимо сравнивать характерные поперечные размеры газовой струи не с поперечным размером фокусного пятна, как делает автор, а с длиной поглощения, длиной Рэлея и длиной лазерной искры. Кажется, что все эти три размера могут быть порядка или больше размеров струи газа;
  - c. Автор пренебрегает потерями на излучение, совершенно не приводя никаких оценок. Кажется, что измерения, описанные в предыдущих главах, позволяют хотя бы оценить полную мощность излучения, например после сопоставления абсолютных и относительных измерений.
6. Сравнение результатов моделирования с экспериментом могло бы быть более подробным:
- a. Автор приводит расчетные зависимости температуры плазмы от давления и энергии лазерного импульса и одно значение длины лазерной искры при выбранных параметрах эксперимента ( $P=25$  Бар,  $E=0,8$  Дж) для различных газов. При этом в эксперименте измерялась зависимость длины лазерной искры от этих параметров (давления и энергии лазерного импульса), а температура плазмы вообще не измерялась. Было бы неплохо сравнить зависимость длины лазерной искры от давления газа в модели и в эксперименте. Это позволило бы увереннее говорить об адекватности модели;
  - b. Теоретическая модель, построенная автором, предполагает в первую очередь распространение разряда навстречу лазерному излучению (рис. 85). В то же время на фотографии лазерной искры (рис. 70) она кажется симметричной относительно перетяжки лазерного пучка. Хотелось бы понять как это соотносится с теоретической моделью автора.

Очевидно, что перечисленные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертации А.А. Перекалова, которая представляет собой законченную работу и является существенным вкладом в развитие приборов и методов для изучения спектров в МР диапазоне и в области ЭУФ. Результаты изучения эмиссионных спектров газовых и жидкостных мишеней также представляют существенный интерес. Достоверность результатов, приведенных в диссертации, не вызывают сомнений. Автореферат диссертации корректно и полно отражает ее содержание.



Основные результаты работы были опубликованы в реферируемых научных журналах и неоднократно представлялись автором на международных симпозиумах «Нанопизика и нанозлектроника» (ежегодно, с 2019 по 2024 годы) и Объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (КЭЛТ-2021).

Работа А.А. Перекалова заслушана на семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН 12 ноября 2024 года.

Диссертация А.А. Перекалова удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составили

снс сектора 8-21 ИЯФ СО РАН

к.ф-м.н.



Николенко Антон Дмитриевич

тел. +7 (383) 329-43-47, e-mail: A.D.Nikolenko@inp.nsk.su

снс лаборатории 10 ИЯФ СО РАН

к.ф-м.н.



Полосаткин Сергей Викторович

тел. +7 (383) 329-42-39, e-mail: S.V.Polosatkin@inp.nsk.su

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Ученый секретарь

ИЯФ СО РАН

кандидат физико-математических наук



Резниченко Алексей Викторович