

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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

В настоящее время в связи с разработкой систем промышленной проекционной литографии с использованием экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения большое значение имеют научные исследования, связанные с источниками ЭУФ излучения. Лазерно-плазменные источники (ЛПИ), как известно, являются одними из наиболее ярких в диапазоне мягкого рентгеновского и ЭУФ излучения, и могут эффективно использоваться как в промышленных литографах, так и в лабораторных установках для решения различных экспериментальных задач. Такие источники требуются для тестирования создаваемых рентгенооптических элементов, в том числе многослойных рентгеновских зеркал, а также для проведения исследований в области рентгеновской микроскопии и материаловедения в спектральном диапазоне мягкого рентгеновского излучения длин волн 2 – 30 нм.

Отдельную группу ЛПИ представляют собой источники на основе газовых и жидкостных мишеней, реализация которых позволяет избежать целого ряда проблем, связанных с эксплуатацией твердотельной лазерно-плазменной мишени, таких как: загрязнение оптики и вакуумной камеры осколками материала мишени, сложность восстановления и рециркуляции рабочего материала и т.п.

Ключевым параметром ЛПИ являются спектральные характеристики, которые во многом определяют область возможного применения и перспективность для различных приложений. При исследовании спектров важно оценить абсолютную величину интенсивности излучения, поэтому требуется разработка соответствующих методик и инструментов для количественных измерений энергетических параметров излучения в рабочем спектральном диапазоне.

Решению указанных **актуальных и практически важных** задач посвящена диссертационная работа А.А. Перекалова, в ходе которой автором были разработаны и использованы **новые** методы и инструментальные рентгенооптические средства измерения и визуализации.

Диссертация А.А. Перекалова состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражено личное участие автора, представлены методология и методы исследования, а также апробация полученных результатов.

Первая глава является литературным обзором работ, связанных с разработкой и изучением газовых и жидкостных лазерно-плазменных источников излучения в спектральном диапазоне длин волн от 2 нм до 20 нм. Представлены и проанализированы основные опубликованные результаты, указывающие на возможность получения интенсивных линий в спектрах таких ЛПИ.

Вторая глава описывает установку и методики, использованные в экспериментах по диагностике излучения и визуализации лазерной плазмы. Подробно описаны схема экспериментальной установки исследования спектров излучения ЛПИ на основе импульсного Nd:YAG лазера и система формирования газоструйных и жидкостных мишеней. Большое внимание уделено также описанию двух используемых спектрометрических систем: спектрометра РСМ-500 на основе дифракционных решёток скользящего падения и брэгговского спектрометра на основе многослойных рентгеновских зеркал с периодами 3,65-18,2 нм. Первый спектрометр использовался для получения спектров ЛПИ с высоким спектральным разрешением, около 0,04 нм, второй – для измерения интенсивности излучения в требуемом спектральной интервале в абсолютных единицах. Необходимо отметить подробное описание автором методики определения абсолютного числа фотонов и оценки погрешности его измерений. Важная частью данной главы является также описание объектива Шварцшильда, специально разработанного для получения изображения лазерной плазмы на длине волны 11,25 нм.

Третья глава посвящена исследованию спектров газоструйных мишеней. Необходимо отметить большой объём проделанной автором экспериментальной работы: представлены измеренные спектры излучения лазерной плазмы 6 различных газов (Ar, Kr, Xe, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CHF<sub>3</sub>), их зависимость от давления и энергии лазерного импульса, измерена абсолютная интенсивность излучения в различные спектральные интервалы шириной 0,1-0,4 нм. Особенно следует отметить результаты, полученные при генерации мягкого рентгеновского излучения в спектральном диапазоне «окна прозрачности воды», важного

для биологической микроскопии. Кроме того, в данной главе представлено увеличенное ЭУФ-изображение лазерной плазмы («лазерной искры») в газоструйной криптоновой мишени при разных давлениях. В конце главы приводится сводная таблица результатов по спектрам всех изученных в диссертационной работе материалов газоструйных мишеней. Необходимо отметить, что в ходе исследований ксеноновой газоструйной мишени был зарегистрирован высокий коэффициент конверсии 1,1 % в спектральную полосу 2% около длины волны 11,2 нм (в телесный угол  $2\pi$ ).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований спектров излучения различных жидкоструйных мишеней. Можно отметить, что в целом интенсивность излучения ЛПИ в этом случае ниже, чем в случае газоструйных мишеней. Однако, сравнительно более высокая плотность жидкости позволяет говорить о возможности получения достаточно высокой интенсивности излучения в дальнейшем при увеличении мощности лазерных импульсов. В конце главы также содержится полезная сводная таблица по исследованным жидкоструйным мишеням.

Пятая глава является теоретическим исследованием физических процессов в лазерной плазме газовых мишеней. На основе известной модели «световой детонации» выполнена численная оценка температуры плазмы, образующейся в зоне лазерной искры при возбуждении газоструйных мишеней лазерными импульсами при разном давлении газа.

В заключении представлены основные результаты работы, а в приложении - таблицы спектральных линий ионов исследованных газов в диапазоне длин волн 5 - 18 нм.

В целом, характеризуя диссертацию А.А. Перекалова, необходимо отметить большой объём экспериментальной работы, выполненной автором, при этом **все выводы и рекомендации диссертации подтверждены экспериментально, апробированы и опубликованы**. Поставленная цель диссертационной работы успешно достигнута. **Достоверность** результатов диссертации определяется применением автором различных современных методов лабораторных спектрометрических исследований (спектрометр РСМ-500, брэгговский спектрометр, двухзеркальный монохроматор), соответствием полученных данных результатам, опубликованных другими научными группами, а также успешным обсуждением результатов диссертационной работы на научных семинарах и конференциях.

Измеренные значения интенсивности мягкого рентгеновского и ЭУФ излучения, а также спектры многих газовых и жидкоструйных мишеней, полученные А.А.

Перекаловым в спектральном диапазоне длин волн 2-20 нм при средней интенсивности лазерного импульса около  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, являются новыми экспериментальными данными, ценными для различных **практических** применений и, несомненно, должны рассматриваться как **новые научные результаты**. Также к **новым результатам** в диссертационной работе следует отнести впервые полученное качественное изображение (пространственное разрешение около 4 мкм) длинной лазерной искры в газовой струе на длине волны 11,25 нм в большом поле зрения (около 1 мм).

Несмотря на однозначно положительное впечатление от диссертационной работы А.А. Перекалова считаю необходимым сделать следующие замечания:

1. Глава 5 данной диссертационной работы является теоретической, с описанием физических процессов в лазерной плазме и численной оценкой её параметров. Более логичной данная глава выглядела бы в начале работы, предшествуя всей экспериментальной части исследований в качестве теоретического базиса.
2. В Таблице 1 подпись является неточной, так как в таблице представлена не «абсолютная интенсивность», а коэффициент конверсии.
3. При описании спектрометра РСМ-500 необходимо было отметить, что речь идёт, конечно, об отражающих дифракционных решётках скользящего падения. В соответствующей Таблице 4 указан не угол скольжения, а угол падения (от нормали).
4. В подписи к Рис.14 на горизонтальной оси правильно писать не «длина волны», а «сдвиг (изменение) длины волны».
5. Автор часто использует в тексте ссылку в виде «описано в соответствующем разделе» (например, на стр.55). Более понятным была бы точная ссылка на соответствующий номер раздела или главы диссертационной работы.
6. На стр.59 указана неправильная ссылка на Рис.31 вместо Рис.23 (?).
7. При описании зеркал объектива Шварцшильда (стр.31) не указаны диаметры зеркал. При этом радиусы кривизны зеркал и расстояние между зеркалами (см. Рис.23) предполагают неконцентрическую конфигурацию объектива, что желательно было бы отметить в тексте. Неконцентрическая схема, строго говоря, не является объективом Шварцшильда.

8. Утверждение на стр.66 «Используемые пленочные фильтры хорошо подавляют паразитное излучение в УФ и видимой областях спектра» требует количественного обоснования через указание величины коэффициентов пропускания/поглощения таких тонких фильтров в УФ и видимом диапазонах.
9. Следует также обратить внимание на многократное использование автором несистемного обозначения единиц длястерадиана – [стер] вместо [ср].
10. В тексте достаточно часто встречаются качественные оценки автором параметров и величин в тех местах, где более естественным было бы использование численных значений. Например, «сложность достижения *высокого* уровня вакуума» (стр. 76).
11. Хотелось бы видеть более определенные рекомендации автора по использованию различных мишеней и режимов в разных спектральных интервалах в качестве выводов и результатов диссертационной работы.

Описанные выше недостатки, в-основном, носят характер опечатки и не снижают высокий уровень научной и практической значимости работы.

Диссертация представляет собой завершенное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком уровне. Диссертация имеет все необходимые разделы от постановки цели и научных задач до описания методов и результатов экспериментов, их анализа, выводов и заключения. По результатам диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе одиннадцать научных статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

**Автореферат** диссертации правильно и всесторонне дает представление о проделанной работе, содержит в кратком виде всю необходимую информацию, характеризующую полученные в процессе исследования результаты, основные положения и выводы диссертации. Автореферат и опубликованные работы соответствуют содержанию диссертации.

Диссертационная работа Александра Алексеевича Перекалова «Эмиссионные спектры газовых и жидкостных мишеней при импульсном лазерном возбуждении» соответствует паспорту специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней»,

утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с изменениями на 11 сентября 2021 года), а ее автор, Александр Алексеевич Перекалов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук (01.04.05 - Оптика),  
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник,  
и.о. заведующего лабораторией рентгеновской оптики отделения квантовой радиофизики,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)  
Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Эл. почта: artyukovia@lebedev.ru  
Телефон +7 (916) 321-98-41



Артюков Игорь Анатольевич  
22 ноября 2024 г.

Даю согласие на обработку персональных данных



Артюков Игорь Анатольевич  
22 ноября 2024 г.

Подпись Артюкова И.А. заверяю

Ученый секретарь ФИАН  
кандидат физико-математических наук



А.В. Колобов  
22 ноября 2024 г.