

На правах рукописи



Перекалов Александр Алексеевич

**ЭМИССИОННЫЕ СПЕКТРЫ ГАЗОВЫХ И
ЖИДКОСТНЫХ МИШЕНЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ
ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Специальность: 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной
физики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2024

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Института прикладной физики Российской академии наук»

Научный руководитель:	Нечай Андрей Николаевич кандидат физико-математических наук, ИФМ РАН, г. Нижний Новгород
Официальные оппоненты:	Артюков Игорь Анатольевич кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН», г. Москва Кузин Сергей Вадимович доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт солнечно-земной физики СО РАН», г. Иркутск
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «12» декабря 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Институте физики микроструктур РАН - филиале ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603087, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте http://www.ipmras.ru/UserFiles/Diss/2024/perekalov-aleksandr-alekseevich/Diss_PerekalovAA.pdf

Автореферат разослан «11» ноября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Д.Ю. Водолазов

Актуальность темы исследования

Рентгеновское излучение было открыто В.К. Рентгеном в конце XIX века. В начале XX века начались активные исследования в области рентгеновского излучения. Наиболее известные среди таких работ – работа М. Лауэ по дифракции рентгеновского излучения на кристаллах [1] и работа Г. Мозли [2], в которой были обнаружены закономерности в характеристических спектрах рентгеновского излучения. Затем в 1914г. У.Г. и У.Л. Брэгги впервые предложили использовать кристаллическую решетку для выделения монохроматического излучения определенной длины волны из широкого спектра рентгеновского излучения. Эти эксперименты положили начало исследования в областях рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа. В современной литературе спектральный диапазон $\lambda < 0.3$ нм принято называть жестким рентгеновским диапазоном.

Несколько позднее начались активные исследования в области мягкого рентгеновского (МР), от 0,3 нм до 10 нм, и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, от 10 нм до 100 нм. Проведение исследований в указанных спектральных диапазонах более сложное в сравнение с жестким рентгеновским диапазоном. МР и ЭУФ излучения эффективно поглощаются веществами, поэтому при проведении исследований необходимо наличие вакуумной камеры с достаточно низким уровнем остаточного давления. Широкий цикл работ по разработке техники и методики эксперимента в области спектроскопии МР и ЭУФ диапазонах проводили советские физики П. И. Лукирский и М.А. Румш. Несколько позднее большой вклад в создание аппаратуры для проведения спектроскопических исследований в МР и ЭУФ областях спектра внес А. П. Лукирский. В его работах [3,4] подробно исследовано экспериментальное применение дифракционных решеток при исследованиях в МР и ЭУФ диапазонах. На основе данных работ был разработан рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500 [5], позволяющий проводить спектроскопические исследования в данных областях спектра. Также были разработаны методики проведения исследований с использованием данного прибора.

Открытие Комптоном в 1932 году [6] эффекта полного внешнего отражения рентгеновского излучения от поверхности твердых тел положило начало разработке и исследованию рентгеновской оптики, работающей на полном внешнем отражении. Одной из важнейших теоретических работ в области рентгеновской оптики, является монография А.В. Виноградова [7]. В данной монографии проводится подробное теоретическое описание основных физических процессов, происходящих при взаимодействии МР и ЭУФ излучения с веществом и, в частности, с периодическими структурами. В книге показано, что несмотря на большое поглощение МР и ЭУФ излучений во всех веществах и, как следствие, достаточно малые длины пробега квантов, с помощью специально синтезированных периодических структур можно

получить высокие коэффициенты отражения МР и ЭУФ излучений от таких структур, порядка нескольких десятков процентов.

В настоящее время, в связи с развитием технологий изготовления многослойной оптики МР и ЭУФ диапазона, в частности с появлением высокоотражающих многослойных зеркал, для различных длин волн активно развиваются исследования в области проекционной ЭУФ нанолитографии [8,9] и МР микроскопии [10]. Также значительный интерес представляют лабораторные приложения с использованием техники МР и ЭУФ диапазонов. Данные исследования в основном направлены на изучение структуры нанообъектов различного происхождения.

Принципиально важным элементом для проведения лабораторных исследований является высокоинтенсивный точечный источник МР и ЭУФ излучения. Основные требования, предъявляемые к подобным источникам коротковолнового излучения: высокая интенсивность излучения, подходящий для решения конкретной задачи спектр, высокая стабильность характеристик в процессе работы, возможность изменения рабочей длины волны, высокий КПД источника. Было предложено множество конструкций источников, различающихся, как по физическому принципу получения излучения в нужном диапазоне длин волн, так и средней мощности источника. Рентгеновская трубка при своей конструкционной простоте и удобстве в эксплуатации обладает достаточно низким КПД в области МР и ЭУФ излучения. Синхротрон и лазер на свободных электронах позволяют получить высокоинтенсивное излучение в достаточно узкой спектральной полосе (близкой к монохроматической). Однако данные источники представляют собой дорогостоящие установки больших габаритов и применение их в лабораторных условиях на настоящем этапе развития техники невозможно. Сравнительно неплохим источником излучения является газоразрядная плазма, формирующаяся при прохождении короткого сильноточного импульса через газовую мишень. Источники подобного типа имеют сравнительно компактные габариты и невысокую стоимость, но при этом компоненты такого источника имеют сравнительно невысокий срок службы. В наибольшей степени вышеуказанным требованиям удовлетворяют лазерно-плазменные источники излучения, получившие наибольшее распространение [11].

В качестве мишеней в ЛПИ могут использоваться мишени различных типов: мишени из жидких и твердотельных материалов, газовые мишени, кластерные пучки.

Твердотельные мишени обладают высокой плотностью, эффективно поглощают лазерное излучение, при их возбуждении импульсами сфокусированного лазерного излучения возможно получить высокоинтенсивное МР и ЭУФ излучение. Также при использовании твердотельных мишеней существенно снижены требования к производительности откачной системы установки. Основной недостаток данного типа мишеней состоит в сильном

загрязнении оптических элементов продуктами эрозии мишени. А для получения стабильных эмиссионных характеристик ЛПИ с твердотельной мишенью необходимо использование точной системы позиционирования и непрерывного перемещения мишени.

Одним из наиболее перспективных типов мишеней в лабораторных ЛПИ являются газовые струи различных газов, в первую очередь инертных. Использование газоструйных мишеней позволяет избежать технических проблем связанных с сильным загрязнением оптических элементов продуктами эрозии мишени в процессе работы источника. Газоструйные мишени не требуют для своей работы точной системы позиционирования мишени. Кроме того, подобные мишени самообновляемы, поэтому позволяют получать эмиссионное излучение со стабильными характеристиками в течение длительного периода времени. Сложность работы с газоструйными мишенями состоит в том, что для получения высокой интенсивности эмиссионного излучения в МР и ЭУФ спектральных областях необходимо добиться высокой плотности газовой мишени в области фокуса лазерного излучения.

Жидкостные мишени занимают промежуточное положение между газовыми и твердотельными. Жидкости обладают высокой плотностью, эффективно поглощают лазерное излучение и генерируют МР и ЭУФ излучение. Для работы с жидкостными мишенями удобно использовать откачку криогенными насосами, либо использовать азотные ловушки. Вместе с тем, в настоящее время жидкостные мишени гораздо менее изучены ввиду худшей, по сравнению с газовыми и твердотельными мишенями, временной стабильности эмиссионных характеристик ЛПИ, связанных с процессами, происходящими при истечении жидкой струи в вакуум.

Степень разработанности проблемы

Исследования в области спектроскопии эмиссионного МР и ЭУФ излучения в ЛПИ с газоструйными и жидкостными мишенями сталкиваются с рядом довольно значительных экспериментальных трудностей: необходимо наличие высокопроизводительных откачных систем для поддержания низкого уровня остаточного давления в вакуумной камере; необходимо достичь высокой плотности мощности лазерной излучения в области фокуса; необходимо наличие высокочувствительных спектрометров, работающих в МР и ЭУФ диапазонах с высоким спектральным разрешением. По этим причинам исследования в данной области характеризуются невысокой степенью разработанности.

Большая часть исследований, приведенных в общедоступной литературе посвящена изучению ЛПИ с оловянной и ксеноновой мишенями. Подобные ЛПИ разрабатываются для ЭУФ нанолитографии, поэтому достаточно хорошо исследованы спектры Sn и Xe мишеней, а также измерены интенсивности излучения в абсолютных единицах. Для других мишеней проводилось

значительно меньшее количество исследований. Так для газоструйных мишеней проводились в основном исследования спектров инертных легких газов. При этом значительно меньшее внимание уделялось молекулярным газам. Измерения интенсивностей излучения в абсолютных единицах проводились для небольшого числа спектральных полос, в основном в диапазоне длин волн 2,5-5 нм. Также практически не известны исследования, посвященные изучению эмиссионных спектров и интенсивностям излучения в абсолютных единицах для газоструйных мишеней в зависимости от плотности мишени (давления газа на входе в сопло) и энергии возбуждающего лазерного импульса.

Среди жидкостных мишеней ранее исследовались лишь некоторые углеродсодержащие жидкости и криогенные жидкостные мишени, полученные с помощью сжижения при азотных температурах некоторых инертных и молекулярных газов. При этом спектры галогенсодержащих жидкостей и интенсивности эмиссионного МР и ЭУФ излучения в абсолютных единицах практически не изучены.

Цели диссертационной работы

Основная цель настоящей диссертационной работы – разработка новых диагностических методов и приборов, и изучение спектральных характеристик и абсолютных значений интенсивности эмиссионного излучения лазерно-плазменных источников мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения при использовании газоструйных и жидкостных мишеней при различных параметрах системы лазерного возбуждения.

Задачи диссертационной работы

Для достижения цели диссертационной работы решались следующие задачи:

1) Разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию абсолютно калиброванного Брэгговского спектрометра на основе многослойных рентгеновских зеркал для проведения измерений интенсивности эмиссионного излучения ЛПИ в МР и ЭУФ спектральном диапазоне.

2) Разработка изображающей системы и ее применение для измерения размера источника на длине волны 11,25 нм с пространственным разрешением в несколько микрометров, регистрация изображений лазерной искры в газоструйных мишенях и определение её размеров.

3) Разработка методик исследования эмиссионных свойств ЛПИ с газоструйными и жидкостными мишенями, в том числе в абсолютных единицах.

4) Экспериментальное исследование эмиссионных спектров и измерение абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения лазерно-плазменных источников с газоструйными мишенями инертных (Ne, Ar, Kr, Xe) и молекулярных газов (CO₂, CHF₃, N₂) в спектральном диапазоне 2,5-18 нм.

5) Экспериментальное исследование эмиссионных спектров и измерение абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения лазерно-плазменных

источников с жидкостными мишенями (спирты, циклогексан, дихлорметан) в спектральном диапазоне 2,5-18 нм.

б) Проведение численного моделирования основных параметров плазмы, формируемой в зоне лазерной искры лазерно-плазменных источников МР и ЭУФ излучения с газоструйными мишенями.

Научная новизна

В работе были получены новые научно обоснованные результаты, являющиеся важными для развития теоретических основ формирования МР и ЭУФ и спектров лазерной плазмы для газоструйных и жидкостных мишеней. В частности, для газоструйных мишеней инертных (Ar, Kr, Xe) и молекулярных газов (CO₂, CHF₃, N₂), возбуждаемых сфокусированными лазерными импульсами с плотностью мощности в фокусном пятне порядка $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² для ряда спектральных линий впервые получены абсолютные интенсивности излучения. Найдены параметры газоструйных источников и системы лазерного возбуждения, обеспечивающие максимальную эффективность конверсии энергии лазерного излучения в МР и ЭУФ излучение. Также впервые получен ряд эмиссионных спектров и абсолютные интенсивности излучения для жидкостных мишеней спиртов, циклогексана и дихлорметана в спектральных диапазонах 2,5-5 нм и 5-18 нм.

Впервые получены изображения лазерной искры в газоструйной мишени криптона на длине волны 11,25 нм с пространственным разрешением в несколько микрометров и проведено исследование влияния параметров импульсной газоструйной мишени криптона и лазерного пучка на размер источника излучения.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в данной диссертационной работе изображения лазерной искры в газоструйных мишенях, размеры излучающей области и зарегистрированные интенсивности эмиссионного излучения в абсолютных единицах имеют большую ценность для построения теоретических моделей взаимодействия лазерного излучения с плотностью мощности порядка $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² с плотными газовыми средами. Практическая ценность полученных в работе результатов заключается в то, что разработанные системы формирования газоструйных и жидкостных мишеней, а также методы их характеристики и найденные оптимальные режимы работы уже нашли применения в лабораторных ЛПИ для МР и ЭУФ и рефлектометров, рентгеновского микроскопа и разрабатываемого в настоящее время экспериментального источника излучения для ЭУФ литографа на рабочую длину волны 11,2 нм.

Разработанные в ходе диссертационной работе Брэгговский абсолютно калиброванный спектрометр на основе многослойных рентгеновских зеркал и изображающая система, предназначенные для работы в МР и ЭУФ диапазонах могут быть использованы для диагностики плазмы, в том числе термоядерной.

Экспериментально полученные эмиссионные спектры и абсолютные значения интенсивностей наиболее ярких спектральных линий в диапазоне длин волн 2,5-18 нм используются для разработки МР микроскопов и ЭУФ литографов нового поколения.

Методология и методы исследований

Объектом исследования диссертационной работы является эмиссионное МР и ЭУФ излучение лазерной плазмы, образующейся при возбуждении газоструйных и жидкостных мишеней сфокусированными лазерными импульсами наносекундной длительности. Исследования спектров проводились при помощи рентгеновского спектрометра-монокроматора РСМ-500. Данный спектрометр позволяет получить эмиссионные спектры с высоким спектральным разрешением, а затем определить излучающие ионы и переходы, которые формируют регистрируемые эмиссионные линии. Для измерения интенсивности эмиссионного излучения лазерной плазмы в абсолютных единицах проводилось сканирование эмиссионных спектров при помощи Брэгговского зеркального спектрометра. Все оптические элементы данного спектрометра прокалиброваны, что позволяет проводить измерения интенсивности излучения в абсолютных единицах. С помощью Брэгговского зеркального спектрометра проводились исследования абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения в двух диапазонах длин волн 2,5-5 нм и 5-18 нм. При возбуждении газоструйных мишеней также проводились исследования зависимости абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения от давления газа на входе в сопло и энергии возбуждающего лазерного импульса. Получение изображения лазерной искры в газоструйных мишенях на длине волны 11,25 нм с микрометровым разрешением проводилось с помощью оригинальной изображающей системы на основе двухзеркального объектива Шварцшильда с пятикратным увеличением.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Разработанные системы формирования импульсных газовых и жидкостных мишеней, диагностическое оборудование и экспериментальные методики позволяют формировать струйные мишени с концентрацией частиц на оси потока до 10^{20} см⁻³ и проводить исследования эмиссионных спектров лазерно-плазменных источников в диапазоне длин волн 2,5-18 нм.

2) Разработанные Брэгговский спектрометр на основе многослойных рентгеновских зеркал, методики калибровки и проведения измерений позволяют проводить измерения интенсивности эмиссионного излучения лазерно-плазменных источников в диапазоне 2,5-30 нм в абсолютных единицах с точностью 20%.

3) Разработанные изображающая система на основе объектива Шварцшильда с пятикратным увеличением и полем зрения 2,6·2,6 мм, и методики проведения исследований позволяют получать изображения и измерять линейные размеры

источника рентгеновского излучения в окрестности 11,25 нм со спектральным разрешением $\pm 0,08$ нм и пространственным разрешением лучше 4 мкм.

4) При возбуждении газоструйных мишеней Ag, Kr, Xe, CO₂, CHF₃, N₂ импульсным излучением Nd:YAG лазера с плотностью мощности $\sim 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² формируется лазерная искра с температурой плазмы порядка 10⁶ К, длина искры вдоль лазерного луча составляет около 1 мм, а диаметр около 0,3 мм.

5) Среди изученных газовых мишеней Ag, Kr, Xe, CO₂, CHF₃, N₂ в окрестности длины волны 11,2 нм, представляющей интерес для ЭУФ литографии следующего поколения наибольшей конверсионной эффективностью обладает ЛПИ с газоструйной мишенью Xe. Зарегистрированная интенсивность излучения в 2% полосу в 2π стерадиан составляет 50 мВт, что соответствует коэффициенту конверсии SE=0,8%. Среди изученных газовых мишеней Ag, Kr, Xe, CO₂, CHF₃, N₂ для ЭУФ микроскопии в окрестности 13 нм наибольшей интенсивностью излучения обладает ЛПИ с газоструйной мишенью Ag. На длине волны 13,8 нм источник излучает $2 \cdot 10^{13}$ фот/имп в 4π стерадиан. Для МР микроскопии в «водном окне прозрачности» наибольшей интенсивностью обладает ЛПИ с газоструйной мишенью CO₂. На длине волны 3,37 нм источник излучает $7 \cdot 10^{12}$ фот/имп 4π стерадиан.

Публикации по теме диссертационной работы

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 26 работ, выполненных в соавторстве. Опубликовано 11 статей в научных журналах [A1-A11] и 15 публикаций в сборниках конференций и тезисов докладов.

Личный вклад автора

В исследованиях, описанных в диссертационной работе, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, участие при сборке и вводе в эксплуатацию научно-исследовательской установки, экспериментальное измерение эмиссионных спектров и абсолютных интенсивностей зарегистрированного излучения, анализ и обработка полученных результатов и проведение численных оценок основных параметров лазерной искры. Сборка и ввод в эксплуатацию научно-исследовательской установки, а также измерение эмиссионных спектров лазерной плазмы с помощью спектрометра-монохроматора РСМ-500 проводились совместно с А. Н. Нечай. Сборка, и ввод в эксплуатацию Брэгговского зеркального спектрометра, а также измерение абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения лазерной плазмы проведено при определяющем вкладе автора. Разработка и аттестация изображающей системы на основе двухзеркального объектива Шварцшильда, а также получение изображений лазерной искры в газоструйной мишени криптона проведены при определяющем вкладе автора. Анализ и обработка полученных экспериментальных данных проводились совместно с А. Н. Нечай. Проведение численных оценок основных параметров лазерной искры выполнено совместно с В. Е. Гусевой.

Апробация результатов

Апробация результатов, полученных в данной диссертационной работе, была проведена на ряде международных и отечественных конференций. Результаты, изложенные в данной диссертационной работе, докладывались на следующих научных конференциях: Международные симпозиумы «Нанозфизика и нанозлектроника» г. Нижний Новгород в 2020 - 2024 годах; объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черноголовка, 2021 г.; научная школа «Современная рентгеновская оптика» в 2022-2023 годах.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, включая обзор литературы, заключения и списка литературы, изложена на 194 страницах, содержит 89 рисунков и 18 таблиц.

Краткое содержание диссертации

Во введении приводится краткое описание ранее проведенных исследований в области разработки источников МР и ЭУФ излучения, обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка цели исследования. Формулируются задачи работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации. Указывается структура и объем диссертации и публикации по теме диссертационной работы в журналах и сборниках.

В первой главе проводится обзор литературы и приводится описание современного состояния исследований в области разработки лазерно-плазменных источников МР и ЭУФ излучения с различными типами мишеней. Первая часть литературного обзора посвящена описанию исследований ЛПИ с газоструйными мишенями в спектральном диапазоне 5-18 нм. Приведены описанные в литературе эмиссионные спектры ряда газоструйных мишеней инертных и молекулярных газов. Отдельное внимание в данном разделе уделено исследованиям эмиссионных свойств газоструйных мишеней ксенона, как наиболее перспективной мишени для ЛПИ, предназначенных для разрабатываемых ЭУФ литографов нового поколения. В литературном обзоре описаны ранее проведенные измерения эмиссионных спектров ксенона и влияние поглощения излучения в периферийной части струи и остаточном газе в вакуумной камере на величину сигнала, регистрируемого в спектральном диапазоне 8-16 нм [12]. Отдельно обсуждаются результаты исследований абсолютных интенсивностей излучения на длинах волн 11,2 и 13,5 нм, перспективных для ЭУФ литографии. В следующей части литературного обзора описаны исследования ЛПИ с газоструйными мишенями в спектральном диапазоне 2-5 нм, в том числе в так называемом «окне прозрачности воды» 2,3-4,4 нм. Приводятся зарегистрированные значения абсолютных интенсивностей для наиболее важных для МР микроскопии эмиссионных линий. В конце

литературного обзора описаны проведенные ранее исследования ЛПИ с жидкостными мишенями в спектральном диапазоне 2,5-20 нм. Последовательно описаны эмиссионные спектры и абсолютные интенсивности излучения, зарегистрированные при исследовании жидкостных мишеней капельного типа, жидкоструйных мишеней и криогенных жидкостных струй, полученных при ожигении некоторых инертных и молекулярных газов.

Во второй главе приводится подробное описание научно-исследовательской установки, на которой была выполнена экспериментальная часть диссертационной работы, Брэгговского спектрометра, методик проведения экспериментальных измерений и проведена оценка погрешностей измерений. Описаны основные системы, входящие в состав научно-исследовательской установки: система вакуумной откачки, лазерно-оптическая система, система формирования газоструйной и жидкостной мишеней, система диагностики МР и ЭУФ излучения. Особое внимание уделяется оригинальным приборам для диагностики излучения лазерной плазмы, разработанным при определяющем вкладе автора работы. Схема исследовательской установки изображена на рис. 1.

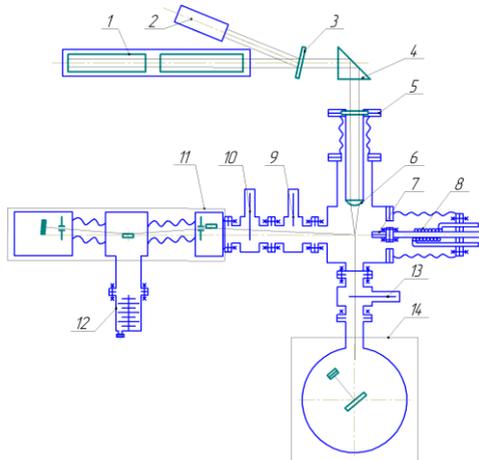


Рис. 1. Схема исследовательской установки. 1 – лазер, 2 – датчик мощности лазерного излучения, 3 – делительная пластинка, 4 – призма, 5 – оптический ввод, 6 – линза, 7 – сопло, 8 – импульсный клапан, 9 – вакуумный затвор, 10 – пленочный свободновисящий фильтр, 11 – спектрометр-монокроматор РСМ-500, 12 – турбомолекулярный насос, 13 – пленочный свободновисящий фильтр, 14 – Брэгговский спектрометр на основе многослойных рентгеновских зеркал.

Для формирования газоструйной мишени используется конусное сверхзвуковое сопло, с диаметром критического сечения 500 мкм, перед входом в сопло установлен импульсный клапан, что позволяет формировать плотную

газовую мишень, при умеренных расходах газа. Для формирования жидкостной мишени также используется импульсный клапан, на выходе из которого установлен капилляр диаметром 100 мкм.

Диагностика МР и ЭУФ излучения осуществляется следующими приборами: рентгеновский спектрометр-монохроматор РСМ-500, Брэгговский зеркальный спектрометр и изображающая система на основе объектива Шварцшильда. В рамках диссертационной работы проводилась модернизация РСМ-500, а именно была модернизирована откачная система прибора – был установлен турбомолекулярный насос производительностью 100 л/с для улучшения вакуума в камере спектрометра. Также вместо штатного детектора – пропорционального счетчика в качестве детектора был установлен вторичный электронный умножитель ВЭУ-7 для увеличения эффективности регистрации сигнала в МР и ЭУФ спектральном диапазоне. В настоящей диссертационной работе спектроскопические измерения при помощи РСМ-500 проводились в диапазоне длин волн 2,5-18 нм.

Брэгговский зеркальный спектрометр – оригинальный прибор с абсолютно калиброванными оптическими элементами, разработанный при определяющем вкладе автора работы. Данный спектрометр предназначен для измерения интенсивности излучения плазмы в абсолютных единицах. Основной узел прибора – φ -2 φ гониометр, на котором расположены многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) и детектор излучения. При повороте МРЗ на гониометре на угол φ относительно падающего пучка, в соответствии с условием Вульфа-Брэгга изменяется длина волны, отражаемая МРЗ. За счет использования комплекта сменных МРЗ в данной работе измерения с помощью спектрометра проводились в диапазоне длин волн 2,5-18 нм. В качестве детектора излучения использовался фотодиод SPD-100UV. Для снижения уровня длинноволновой шумовой составляющей сигнала использовались два свободновисящих пленочных фильтра.

Вторым оригинальным прибором, разработанным в диссертационной работе, является изображающая система на основе сферического объектива Шварцшильда. Данная система предназначена для получения изображения лазерно-плазменного источника в ЭУФ диапазоне и измерения размеров излучающей области с высоким пространственным разрешением. Основной узел прибора – сферический объектив Шварцшильда с напыленными МРЗ, отражающими излучение на длине волны 11,25 нм. Для регистрации изображения источника используется КМОП матрица, подавление длинноволновой шумовой составляющей сигнала осуществляется с помощью многослойных пленочных фильтров.

В третьей главе описаны исследования эмиссионных свойств газоструйных мишеней ряда инертных (Ne, Ar, Kr, Xe) и молекулярных (CO₂, CHF₃, N₂) газов. Для формирования газоструйных мишеней использовалось сверхзвуковое истечение газа в объём вакуумной камеры через сопло конического профиля. В

ходе проведения исследований для варьирования концентрации числа частиц в зоне лазерной искры проводилось изменение давления газа на входе в сопло в диапазоне 2-25 бар. Для возбуждения мишеней использовалось сфокусированное излучение лазера, работающего в импульсном режиме. В данной диссертационной работе использовался Nd:YAG лазер, длительность лазерного импульса составляла 5,2 нс, энергия одного импульса изменялась в пределах 0,4 – 0,8 Дж, соответствующая плотность мощности излучения в фокусном пятне составила $2,5 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

В первой части главы описаны исследования эмиссионных свойств газоструйных мишеней в спектральном диапазоне 2,5-18 нм. Приведены зарегистрированные эмиссионные спектры ряда инертных и молекулярных газов. Для зарегистрированных спектров проведена идентификация наблюдаемых эмиссионных линий, определены ионы и переходы, которым соответствуют наблюдаемые линии. На рис. 2 показаны экспериментально зарегистрированные эмиссионные спектры газоструйных мишеней аргона и ксенона.

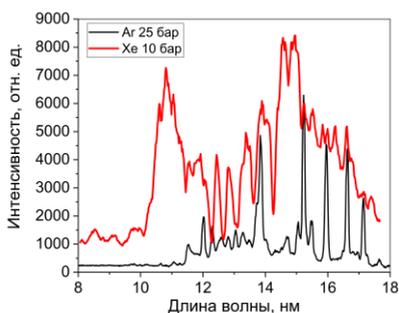


Рис. 2. Эмиссионные спектры газоструйных мишеней аргона и ксенона.

Полученные экспериментальные данные приведены в виде спектров и таблиц. Также проводилась регистрация спектров лазерной плазмы газоструйных мишеней в спектральном диапазоне 5-18 нм при различных давлениях газа на входе в сопло. Представлены полученные зависимости абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения в различные спектральные полосы. Экспериментально показано, что для систем лазерного возбуждения мишени с плотностью мощности излучения в фокусном пятне порядка 10^{12} Вт/см² для различных газов существует оптимальное давление газа на входе в сверхзвуковое сопло, позволяющее получить максимальную интенсивность излучения на заданной длине волны (оптимальная плотность мишени).

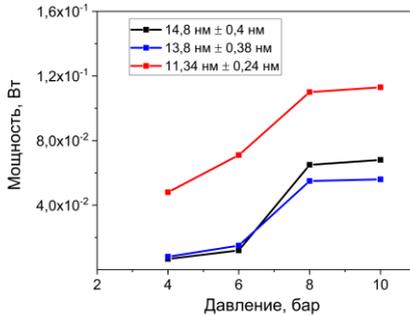


Рис. 3. Зависимость мощности излучения лазерной искры в газоструйной мишени ксенона в 4л стерадиан от давления.

Как видно из рис. 3, за счёт увеличения давления газа на входе в сопло от 4 до 10 бар получено увеличение интенсивности регистрируемого излучения. Зависимости выходят на насыщение при давлении свыше 8 бар (для используемой лазерной системы и откачной систем). Дополнительно в диссертационной работе с помощью двухзеркального монохроматора проведены измерения мощности эмиссионного излучения газоструйной мишени ксенона в спектральной полосе, соответствующей полосе работы разрабатываемых литографических машин $11,16 \pm 0,13$ нм в зависимости от расстояния между фокусом лазерного излучения и краем сопла при различных давлениях ксенона на входе в сопло. Полученные зависимости показаны на рис. 4.

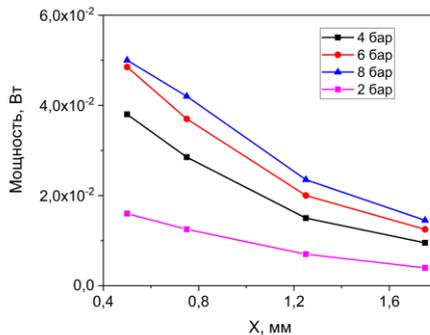


Рис. 4. Зависимости мощности излучения лазерной плазмы ксенона в полосе $11,16 \pm 0,13$ нм в 2л стерадиан от расстояния между точкой фокуса лазерного излучения и краем сопла.

Во второй части главы описаны исследования размеров излучающей области лазерной искры в газоструйной мишени криптона. Приведены зарегистрированные с помощью объектива Шварцшильда изображения лазерной искры на длине волны 11,25 нм. По полученным изображениям определены геометрические размеры излучающей области, которые составили порядка 100-800 мкм. Также приведены полученные по результатам исследований зависимости размеров излучающей области от давления газа на входе в сопло и энергии лазерного импульса.

В четвертой главе описаны исследования эмиссионных свойств жидкостных мишеней некоторых углеродсодержащих (спирты, гексан) и хлорсодержащей (дихлорметан) жидкостей. Для формирования мишеней использовался капилляр диаметром 100 мкм, оснащенный импульсным клапаном с электромагнитным приводом.

В тексте главы описаны исследования эмиссионных свойств жидкостных мишеней в спектральном диапазоне 2,5-18 нм. Продемонстрированы зарегистрированные эмиссионные спектры ряда спиртов (метанол, этанол, изопропанол), циклогексана и дихлорметана. На рис. 5 изображены зарегистрированные спектры жидкостных мишеней дихлорметана и этанола.

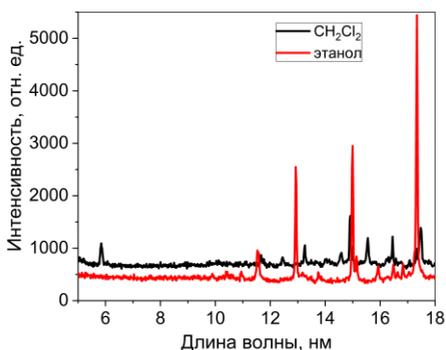


Рис. 5. Эмиссионные спектры жидкостных мишеней этанола и дихлорметана в диапазоне длин волн 5-18 нм.

Для зарегистрированных спектров проведена идентификация наблюдаемых эмиссионных линий, определены ионы и переходы, которым соответствуют наблюдаемые линии. Полученные экспериментальные данные приведены в виде спектров и таблиц. В конце первой части главы обсуждаются полученные результаты. Абсолютные интенсивности, зарегистрированные при использовании жидкостных мишеней сравнимы с интенсивностями, зарегистрированными при исследованиях газоструйных мишеней молекулярных газов, и несколько уступают тяжелым инертным газам.

Оригинальным результатом данной главы являются зарегистрированные эмиссионные спектры хлорсодержащей мишени (дихлорметана), а также измеренные интенсивности излучения в абсолютных единицах.

В пятой главе анализируются основные физические процессы, происходящие в газоструйных мишенях при формировании лазерной искры. Особое внимание уделяется эффекту перемещения поглощающего лазерное излучение слоя плазмы с высоким средним зарядом навстречу лазерному лучу. Приводится краткое описание основных механизмов, которые могут приводить к возникновению данного эффекта. Описывается применение расчетной модели, построенной в [13,14], для проведения оценок численных основных параметров лазерной искры при тех же экспериментальных условиях, для которых проведены измерения эмиссионных спектров и абсолютных интенсивностей излучения. Обсуждаются основные допущения, использованные при построении данной модели, и их применимость для конкретных экспериментальных условий. Подробно рассказывается о методике проведения оценок основных параметров лазерной искры на основе полученных в главе 3 экспериментальных данных. Показаны основные полученные при проведении оценок численных значений параметров искры результаты – зависимости температуры плазмы от давления газа на входе в сопло и оценки длины лазерной искры (характерного размера искры вдоль направления распространения лазерного луча). В конце главы обсуждаются полученные результаты.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

Основные результаты диссертационной работы:

К основным результатам, полученным в данной диссертационной работе, можно отнести следующие:

1) Разработан и изготовлен Брэгговский спектрометр на основе многослойных рентгеновских зеркал, позволяющий проводить измерения интенсивности эмиссионного излучения лазерно-плазменных источников в абсолютных единицах в спектральном диапазоне 2,5-30 нм. Погрешность проведения измерений с помощью данного прибора не более 20%.

2) Разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию изображающая система на основе двухзеркального объектива Шварцшильда, позволяющая получать изображение источника МР и ЭУФ излучения на длине волны 11, 25 нм с пространственным разрешением в несколько микронметров.

3) Разработаны методики для исследования эмиссионных спектров ЛПИ при помощи решеточного спектрометра скользящего падения РСМ-500 и измерения интенсивности эмиссионного излучения в абсолютных единицах с помощью Брэгговского зеркального спектрометра в спектральном диапазоне 2,5-18 нм.

4) Впервые зарегистрированы изображения лазерной искры в газоструйной мишени криптона на длине волны 11,25 нм с пространственным

разрешением в 3,9 мкм и установлены зависимости размеров лазерной искры от давления газа и энергии лазерных импульсов.

5) Исследованы эмиссионные спектры и интенсивности эмиссионного излучения в абсолютных единицах при возбуждении газоструйных мишеней инертных (Ar, Kr, Xe) и молекулярных (CO₂, CHF₃, N₂) газов импульсным излучением Nd:YAG лазера с плотностью мощности $\sim 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² в диапазоне длин волн 2,5-18 нм при различных давлениях газов на входе в сопло. На длине волны 13,88 нм, представляющей интерес для ЭУФ микроскопии, интенсивность излучения эмиссионной линии ионов Ar VIII (2p⁶3p – 2p⁶5d) составила $2 \cdot 10^{14}$ фот/с в телесный угол 4π стерадиан при давлении газа на входе в сопло 25 бар. В окрестности 11,2 нм, представляющей интерес для ЭУФ литографии, наиболее яркое эмиссионное излучение зарегистрировано для газоструйной мишени Хе. Зарегистрированная мощность ЭУФ излучения в спектральной полосе 2% в полупространство составила 50 мВт, что соответствует коэффициенту конверсии энергии лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм в ЭУФ на уровне 0,8%.

6) По результатам численного моделирования получены зависимости температуры плазмы от давления газ-мишеней на входе в сопло и энергии лазерного импульса. Получены оценки длины лазерной искры, составляющей порядка 1 мм, что хорошо согласуется с результатами эксперимента.

Список публикаций автора

A1. Нечай, А. Н. Эмиссионные свойства лазерной плазмы при ее возбуждении на молекулярно-кластерных струях углекислоты / А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко // Журнал Технической Физики. – 2019. – Т. 89. Вып. 11. – С. 1656-1662.

A2. Нечай, А. Н. Наблюдение лазерной искры на скачке уплотнения в газоструйной мишени / А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. И. Чхало, Н. Н. Салащенко // Письма в Журнал Технической Физики. – 2019. – Т. 45. Вып. 9. – С. 14-16.

A3. Нечай, А. Н. Эмиссионные спектры легких инертных газов Ne и Ar в диапазоне 3–20 nm при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней / Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. Вып. 11. – С. 146-152.

A4. Нечай, А. Н. Эмиссионные спектры тяжелых инертных газов Kr, Xe в диапазоне 3–20nm при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней / А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. Вып. 3. – С. 266-271.

A5. Нечай, А. Н. Эмиссионные спектры молекулярных газов N₂ и CO₂ в диапазоне 3-20 nm при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней / А.Н. Нечай, А.А. Перекалов,

Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. Вып. 6. – С. 755-759.

А6. Гусева, В. Е. Эмиссионные спектры молекулярных газов CHF₃, CCl₂F₂, SF₆ в диапазоне 3-20nm при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней / В. Е. Гусева, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. Вып. 2. – С. 217-223.

А7. Гусева, В. Е. Эмиссионные спектры жидкоструйных мишеней гексана C₆H₁₄, дихлорметана CH₂Cl₂, бромистого метилена CH₃Br диапазоне 4-20nm при импульсном лазерном возбуждении / В. Е. Гусева, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. Вып. 7. – С. 991-995.

А8. Гусева, В. Е. Исследование эмиссионных свойств газоструйных мишеней в "водном окне прозрачности" 2.3–4.4 nm при импульсном лазерном возбуждении / В. Е. Гусева, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Журнал Технической Физики. – 2022. – Т. 92. Вып. 8. – С. 1185-1191.

А9. Nechay, A. N. Radiation of a plasma generated by laser pulse on CO₂, CHF₃, and CF₄ gas-jet targets in the "water transparency window" 2.3–4.4 nm / A. N. Nechay, A. A. Perekalov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo // Applied Physics B. – 2023. – V. 129. Iss. 2. P. 49.

А10. Гусева, В. Е. Исследование эмиссионных спектров Cl-, Br-, I-содержащих мишеней в спектральном диапазоне 3-6,5 nm при возбуждении импульсным лазерным излучением / В.Е. Гусева, С. А. Гарахин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. Вып. 5. – С. 425-429.

А11. Guseva, V. E. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets / V. E. Guseva, A. N. Nechay, A. A. Perekalov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo // Applied Physics B. – 2023. – V. 129. Iss. 10. P. 155.

Литература

1. Friedrich, W. INTERFERENZ-ERSCHEINUNGEN BEI RONTGENSTRAHLEN / W. Friedrich, P. Knipping, M. Laue // Naturwissenschaften. – 1952. – V. 39. – №. 16. – P. 361-368.

2. Moseley, H. G. J. The high-frequency spectra of the elements / H. G. J. Moseley // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1913. – V. 26. – №. 156. – P. 1024-1034.

3. Лукирский, А. П. Применение дифракционных решеток и эшелеттов в области ультрамягкого рентгеновского излучения / А. П. Лукирский, Е. Н. Савинов // Оптика и спектроскопия. – 1963. – Т. 14. – №. 2. – С. 285-294.

4. Лукирский, А. П. Отражение рентгеновского излучения с длинами волн от 23.6 до 190.3 Å, некоторые замечания об эффективности дифракционных

решеток / А. П. Лукирский, Е. П. Савинов, О. А. Ершов, И. И. Жукова, В. А. Фомичев // Оптика и спектроскопия. – 1965. – Т. 19. – №. 3. – С. 425.

5. Лукирский, А. П. Аппаратура и методы рентгеновского анализа (СКБ РА) / А. П. Лукирский, И. А. Брытов, Н. И. Комяк. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 192 с.

6. Compton, A. H. The total reflexion of X-rays / A. H. Compton // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1923. – V. 45. – №. 270. – P. 1121-1131.

7. Виноградов, А. В. Зеркальная рентгеновская оптика / А. В. Виноградов, И. А. Брытов, Ф. Я. Грудский, М. Т. Коган, И. В. Кожевников, В. А. Слемзин; под общей ред. А. В. Виноградова. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 463 с.

8. Салащенко, Н.Н. Коротковолновая проекционная нанолитография / Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Вестник Российской Академии Наук. – 2008. – Т. 78. – №. 5. – С. 450-457.

9. Chkhalo, N. I. Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics / N. I. Chkhalo, N. N. Salashchenko // AIP Advances. – 2013. – V. 3. – №. 8. – P. 082130.

10. Takman, P. A. C. High-resolution compact X-ray microscopy / P. A. C. Takman, H. Stollberg, G. A. Johansson, A. Holmberg, M. Lindblom, H. M. Hertz // Journal of microscopy. – 2007. – V. 226. – №. 2. – P. 175-181.

11. Stamm, U. High-power EUV lithography sources based on gas discharges and laser-produced plasmas / U. Stamm, I. Ahmad, I. Balogh, H. Birner, D. Bolshukhin, J. Brudermann, S. Enke et al. // Emerging Lithographic Technologies VII. – SPIE. – 2003. – V. 5037. – P. 119-129.

12. de Bruijn, R. Absorption of EUV in laser plasmas generated on xenon gas jets / R. de Bruijn, K. Koshelev, G. Kooijman, E. S. Toma, F. Bijkerk // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2003. – V. 81. – №. 1-4. – P. 97-105.

13. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 688 с.

14. Райзер, Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1974. – 308 с.

Перекалов Александр Алексеевич

ЭМИССИОННЫЕ СПЕКТРЫ ГАЗОВЫХ И ЖИДКОСТНЫХ МИШЕНЕЙ ПРИ
ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Автореферат

Подписано к печати 03.10.2024 г.

Тираж 60 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур
Российской академии наук — филиала Федерального
государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

603087, Нижегородская область, Кстовский район, д.
Афонино, ул. Академическая, д. 7.