

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 12.12.2024 № 16

О Присуждении Перекалову Александру Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эмиссионные спектры газовых и жидкостных мишеней при импульсном лазерном возбуждении» по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики – принята к защите 03 октября 2024 г. (протокол заседания №9) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Перекалов Александр Алексеевич, 1996 года рождения, в 2020 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Радиофизика», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИФМ РАН (срок обучения 01.09.2020 – 31.08.2024), работает в должности младшего научного сотрудника Института

физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Диссертация выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель – Нечай Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. Артюков Игорь Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН»
2. Кузин Сергей Вадимович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией методов исследования Солнца малыми космическими аппаратами Федерального государственного учреждения науки «Институт солнечно-земной физики СО РАН»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН» – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником сектор 8-21 ИЯФ СО РАН Николенко Антоном Дмитриевичем и кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории 10 ИЯФ СО РАН Полосаткиным Сергеем Викторовичем, и утвержденном Логачевым Павлом

Владимировичем, директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН», указала, что «К наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие:

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 изображающая 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».

В конце отзыва делается заключение, что диссертация Перекалова Александра Алексеевича соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель по теме диссертации имеет 11 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, 5 из которых приведены ниже:

1. 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.
2. 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.
3. Radiation of a plasma generated by laser pulse on CO<sub>2</sub>, CHF<sub>3</sub>, and CF<sub>4</sub> 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.
4. Исследование эмиссионных спектров Cl-, Br-, I- содержащих мишеней в спектральном диапазоне 3-6,5 нм 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.
5. 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.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**положительных**):

**1)Калмыков Сергей Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного учреждения науки Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что в работе получен ряд новых важных

результатов, в том числе экспериментальные результаты исследования спектрального состава и интенсивности излучения для ряда химических элементов. **Отзыв содержит 5 замечаний:**

1. В автореферате хотелось бы увидеть те соображения, на которых был основан выбор химического состава мишеней из бесконечного количества возможных?

2. На стр.7 (последняя строка), в разделе «Теоретическая и практическая значимость» указывается, что разработанные в ходе подготовки диссертации приборы и методы «могут быть использованы для диагностики плазмы, в том числе термоядерной» - о чем идет речь? Термоядерная плазма токамаков – водородная, разреженная, полностью ионизированная. В основном, она слабо излучает в непрерывном спектре (тепловое тормозное излучение электронов), и её баланс имеет выражено транспортный характер.

3. На стр. 9, в п. 4 раздела «Положения, выносимые на защиту», содержится замечание: «При возбуждении газоструйных мишеней.... формируется лазерная искра с температурой плазмы порядка  $10^6$  К...» Источник сведений о температуре указан лишь в самом конце автореферата, на стр. 16, в кратком изложении содержания гл. 5 диссертации. Оказывается, это – результат моделирования лазерной плазмы с использованием модели, разработанной в 1970-х годах Ю.П. Райзером на основе его же теории ударно-детонационного пробоя. Эта теория была развита для объяснения процессов, происходящих в лазерной искре при характерных для той эпохи экспериментальных условиях – мощные «многоджоульные» лазеры и протяженные мишени из стационарных газов под давлением до тысяч атмосфер. Было бы правильно сравнить результаты выполненного в диссертации моделирования с результатами, полученными с помощью мощных численных кодов, исходящих из «первых принципов» и использующих обширные базы данных о сечениях ионизации и возбуждения атомов и ионов. Описания таких кодов и полученные с их помощью результаты можно найти, например в широко известном сборнике [«EUV Sources for Lithography», ed. V. Bakshi, 2006].

#### 4. Замечания к рисункам:

А) несмотря на то, что первой задачей диссертационной работы (стр. 6) заявлена «Разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию абсолютно калиброванного брэгговского спектрометра», в автореферате нет ни одного абсолютно калиброванного спектра, полученного на брэгговском спектрометре;

Б) почему на рис.3 приведена мощность излучения в полный телесный угол? Ведь обычно принято, как это сделано на рис.4, - в полусферу (т.е. приводится та часть, которую можно собрать и использовать);

В) мощности излучения на рис. 3 и 4 – пиковые или усредненные, и если верно последнее, то следует указать, по какому промежутку времени выполнялось усреднение?

5. Наконец, в автореферате есть изрядное количество мелких ошибок – стилистических, терминологических, прочих:

А) на стр. 3: «монография А.В. Виноградова [7]» – у этой монографии 6 соавторов;

Б) на стр. 5 появляется впервые, но затем многократно повторяется выражение «эмиссионное излучение» – но ведь излучение всегда эмиссионное, а вот наоборот – «излучательная эмиссия или корпускулярная» – вполне приемлемо;

В) при чтении отвлекает, мешает восприятию содержания чрезмерное увлечение бессмысленными словами-прокладками – «данный, сравнительно, достаточно», иногда это приводит к забавным парадоксам: (стр.4) «Основные требования, предъявляемые к подобным источникам... Высокая интенсивность излучения... Рентгеновская трубка при своей конструкционной простоте и удобстве в эксплуатации обладает достаточно (!) низким КПД».

**2) Асадчиков Виктор Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института Кристаллографии РАН отмечает, что в работе получен ряд новых актуальных результатов: разработаны и изготовлены оригинальные диагностические приборы, позволяющие проводить диагностику лазерной плазмы, образующейся в ЛПИ;

зарегистрирована мощность ЭУФ излучения мишени Хе на длине волны 11,2 нм в спектральной полосе 2% в телесный угол  $2\pi$ , которая составила 50 мВт, что соответствует коэффициенту конверсии порядка 1%; зарегистрированы изображения лазерной искры на длине волны 11,25 нм в газоструйной мишени криптона с пространственным разрешением 3,9 мкм. Отзыв содержит **3 замечания:**

1. На рисунке 1 не изображены элементы объектива Шварцшильда, о котором неоднократно говорится в автореферате. Причем создание этого объектива и разработка экспериментальных методик с его применением являются одним из основных достижений автора.

2. В автореферате автор пишет на стр. 11-12 «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». То есть создается впечатление, что в конструкции установки имеется 2 импульсных клапана, но рис.1 изображен только один. Непонятно, где неточность, в самом рисунке и подписи к нему, либо в описании установки, данном в тексте.

3. Автор пишет: «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». Однако рис.5 приведены только эмиссионные спектры жидкостных мишеней этанола и дихлорметана в диапазоне длин волн 5-18 нм, причем в относительных единицах.

**3)Коробейщиков Николай Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела Прикладной физики ФГБОУ «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» в отзыве на автореферат диссертации отмечает, что достоинствами работы являются получение и анализ эмиссионных свойств в виде спектров излучения с идентификацией зарегистрированных спектральных линий и получение абсолютных интенсивностей излучения газоструйных мишеней, формируемых при истечении различных газов. Результаты актуальны как для понимания фундаментальных физических процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с газовой средой, так и для различных практических приложений лазерно-плазменных источников для разработки литографии нового поколения, рентгеновской микроскопии и др. Отзыв содержит **2 замечания:**

1. Истечение рабочих газов при использованных в работе условиях (коническое сопло, большое давление газа на входе в сопло) должно сопровождаться конденсацией и формированием газовых кластеров. Хотя кластеры упоминаются в вводной части, автор не указывает их присутствие в активируемой струе и степень их влияния на полученные результаты.

2. Помимо излучения от газовых мишеней, автором исследованы эмиссионные спектры жидкостных мишеней, формирующихся в результате истечения ряда жидкостей (спирты, циклогексан, дихлорметан) через капилляр в вакуум. Такие результаты указаны в разделе «Научная новизна» и приведены в Главе 4. Однако, ни в разделе «Основные положения, выносимы на защиту», ни в «Основных результатах диссертационной работы» почему-то нет их описания.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных в том числе физике полупроводниковых лазеров, инфракрасной оптоэлектронике, узкозонным полупроводникам на основе HgCdTe (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент

Артюков И.А. – более 10 публикаций, оппонент Кузин С.В. – более 15 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

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

**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 микрометров.

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

**Исследованы** эмиссионные спектры и **измерены** абсолютные значения **интенсивности излучения** при возбуждении газоструйных мишеней инертных (Ar, Kr, Xe) и молекулярных (CO<sub>2</sub>, CHF<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>) газов импульсным излучением Nd:YAG лазера с плотностью мощности  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> в диапазоне длин волн 2,5-18 нм при различных давлениях газов на входе в сопло.

**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.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:**

Разработанные системы формирования газоструйных и жидкостных мишеней, методы их характеристики и найденные оптимальные режимы

работы 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 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.

#### **Оценка достоверности результатов исследования:**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием для их получения ряда апробированных в ИФМ РАН и других мировых лабораториях экспериментальных методик и подкрепляется хорошим согласием эксперимента и теории. Основные результаты работы докладывались на ряде международных конференций.

**Личный вклад соискателя** состоит в получении основных экспериментальных данных работы и их анализе. Разработка, сборка и ввод в эксплуатацию зеркального спектрометра и изображающей системы на основе объектива Шварцшильда проведены при определяющей вкладе автора. Подготовка всех публикаций по выполненной работе проводилась с активным участием соискателя. Он также принимал непосредственное участие в постановке задач диссертационной работы.

**В ходе защиты диссертации** официальным оппонентом И.А. Артюковым было высказано следующее замечание:

«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.».

Соискатель Перекалов А.А. в своём ответе сообщил, что

«Использованные пленочные фильтры подавляют излучение на 3-4 порядка в УФ диапазоне и на 4-5 порядков в видимом диапазоне, в зависимости от используемой структуры. Полученные значения определены экспериментально и их следовало бы явно указать в тексте диссертации для более точного описания характеристик, используемых фильтров.»

Официальный оппонент С.В. Кузин высказал следующее замечание:

«На рис. 20 приведены спектральные ширины линий кислорода. Однако из пояснений неясно, какие именно линии имеются ввиду и откуда взяты значения ширин этих линий.»

Соискатель Перекалов А.А. в своём ответе сообщил, что

«На рис. 20 показаны наблюдаемые с помощью Брэгговского спектрометра ширины отдельно стоящих линий ионов кислорода O VI. Данная величина характеризует прибор, а именно его спектральное разрешение с учетом всех факторов, влияющих на разрешение (ширина кривой отражения МРЗ, угловая расходимость падающего пучка, конечный размер диафрагмы и др.). Спектральная ширина линий в ЭУФ диапазоне существенно меньше разрешения спектрометра.»

**На заседании 12.12.2024 г. диссертационный совет**, за разработанные приборы и методики для диагностики излучения лазерной плазмы в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах, а также за экспериментально полученные результаты исследования эмиссионных спектров лазерно-плазменных источников в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах, в том числе за измеренные интенсивности излучения

в абсолютных единицах принял решение присудить Перекалову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов науки по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0.

Председатель  
диссертационного совета



Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 12.12.2024 г.