

*На правах рукописи*

Мартыненко Артем Сергеевич

**СВЕРХПЛОТНАЯ ПЛАЗМА В УСЛОВИЯХ ИЗОХОРИЧЕСКОГО  
НАГРЕВА ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ  
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

Специальность 01.04.08 – «Физика плазмы»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН).

- Научный руководитель: **Пикуз Сергей Алексеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией «Диагностики вещества в экстремальном состоянии» (1.1)  
ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2
- Официальные оппоненты: **Стародубцев Михаил Викторович**  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией «Моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах» (373), Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
- Попруженко Сергей Васильевич**  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук»,  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзыв на автореферат просьба присылать по адресу:  
Диссертационный совет ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 1.1. Актуальность

Экстремальные состояния вещества, создаваемые сверхинтенсивными потоками энергии, плотности которых на много порядков превышают плотность энергии межатомных молекулярных связей, вызывают несомненный интерес. Он в первую очередь связан с тем, что именно такие состояния характерны для широкого класса астрофизических объектов (например, ядер звёзд и газовых гигантов), а также для активных сред перспективных энергетических установок управляемого синтеза.

При этом для таких состояний вещества характерна высокая сложность протекающих процессов и возникающих явлений. Это приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований в относительно контролируемых лабораторных условиях для верификации физических моделей, разрабатываемых для описания этих процессов и явлений.

Быстрое развитие лазерной техники позволило уже в настоящее время обеспечить импульсное воздействие на вещество сверхинтенсивных потоков, достигающих мегаджоульного уровня по энергии и петаваттного уровня по мощности. За счет этого может быть осуществлён нагрев вещества до тысяч эВ и сжатие до нескольких гигабар. Но в то же время особую сложность представляет получение состояний, обладающих высокой плотностью и температурой одновременно. В схемах инерциального синтеза такие условия обеспечиваются за счет динамического сжатия плазмы с температурой в несколько кэВ.

Создание в экспериментальных условиях вещества с плотность порядка плотности твердого тела и температурой около 10–100 эВ до самого недавнего времени экспериментально не было реализовано. Для реализации изохорического нагрева и создания тем самым такого вещества требуется обеспечение условий, при которых время энерговыклада составляет менее характерного времени гидродинамического разлета плазмы, обладающей температурой до нескольких сотен эВ, то есть времени разлёта порядка долей наносекунды. Иными словами, необходимо использование достаточно короткого лазерного импульса.

С другой стороны, для получения новых данных о процессах и состояниях вещества, находящегося в этой области фазовой диаграммы, необходимо обеспечить нагрев в макроскопическом объеме, порядка сотни кубических мкм. Это налагает дополнительное требование, предъявляемое к параметрам греющего лазерного импульса: величина его энергии должна составлять десятки и сотни Дж.

Таким образом, отличным кандидатом для обеспечения импульсного энерговыклада выступает излучение оптических пикосекундных лазерных

комплексов суб-петаваттной мощности, которые стали доступны в последние годы в ведущих мировых научных центрах.

При достижении плотностей плазмы, составляющих порядка или даже превышающих твердотельное значение, начинает проявляться целый набор различных не до конца изученных эффектов. Так открытыми остаются вопросы, связанные с влиянием плотности плазмы на ее излучательные и транспортные свойства, на атомную структуру, потенциалы ионизации и сечения кинетических процессов в многозарядных ионах.

Релятивистская лазерная плазма выступает в роли мощного источника высокоэнергетичных электронов, пробег которых в веществе составляет порядка сотен микрометров. Это создаёт принципиальную возможность **непрямого** изохорического прогрева твердотельных мишеней с использованием лазерных установок, а именно за счёт потока лазерно-ускоренных быстрых электронов. При этом физические процессы, связанные как с динамикой и структурой возникающих электронных токов и индуцируемых электромагнитных полей, так и с механизмами прогрева вещества, представляют отдельный интерес для изучения, в особенности для случая использования пространственно-ограниченных проводящих мишеней.

Важнейшей особенностью применяемых в рамках настоящей диссертационной работы лазерных систем является возможность обеспечения ими сверхвысокого временного контраста лазерного импульса. Это позволило также исследовать процесс изохорического нагрева плотной плазмы счёт **прямого** греющего действия лазерного импульса.

Таким образом, настоящая работа посвящена исследованию свойств плотной плазмы, находящейся в режиме изохорического либо близкого к изохорическому нагреву, за счёт прямого и непрямого воздействия пикосекундных лазерных импульсов сверхвысокого временного контраста и субпетаваттной мощности.

## 1.2. Цели и задачи работы

**Целью** настоящей работы является создание и экспериментальное изучение свойств плазмы твердотельной и околотвердотельной плотности, изохорически нагреваемой за счет прямого и непрямого воздействия пикосекундных лазерных импульсов субпетаваттной мощности и высокого временного контраста.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Создание лазерной плазмы околотвердотельной плотности и измерение ее параметров в схеме *прямого нагрева* плазмы пикосекундным релятивистским лазерным импульсом - за счёт одновременного использования

сложноструктурированных мишеней, плазменного зеркала и ОРСПА технологии усиления.

2. Изучение эффекта *понижения потенциала ионизации* в многозарядных ионах плазмы околотвердотельной и твердотельной плотности, валидация существующих теоретических моделей его описывающих.

3. Обеспечение *непрямого нагрева* вещества до температур в десятки эВ потоком быстрых лазерно-ускоренных электронов в геометрии, позволяющей достоверно определять параметры и изучать процессы в *изохорически нагретой* области

4. Одновременное измерение *температурного профиля и динамики разлета* области, нагреваемой потоком релятивистских электронов. Изучение влияния параметров лазерного импульса на характер прогрева вещества.

5. Исследование *рентгеновских излучательных свойств* релятивистской лазерной плазмы твердотельной плотности и возможностей её применения в качестве рентгеновского источника для задач *абсорбционной рентгеновской спектроскопии* плотной горячей плазмы.

Для обеспечения проводимых работ решались также задачи развития *методов диагностики* плотной релятивистской плазмы:

6. Разработка рентгеноспектральной методики оценки временного контраста пикосекундных лазерных импульсов релятивистской интенсивности и определения временной задержки между началом образования плазмы на поверхности мишени и воздействием основного лазерного импульса.

7. Разработка методики восстановления параметров лазерной плазмы в момент взаимодействия основного лазерного импульса с мишенью, основанной на анализе интегральных по времени эмиссионных рентгеновских спектров.

### 1.3. Научная новизна работы

Впервые с высокой точностью было определено положение края рекомбинационного континуума в зависимости от плотности кремниевой плазмы вплоть до околотвердотельных значений. Наблюдалось исчезновение уровней с главным квантовым числом  $n \geq 4$  в гелиеподобных ионах кремния и пропадание соответствующих эмиссионных рентгеновских спектральных линий.

Предложен метод оценки момента образования преплазмы по рентгеновским эмиссионным спектрам лазерной плазмы, создаваемой ультракороткими лазерными импульсами.

Показано, что пластиковые мишенные обкладки позволяют повысить плотность получаемой лазерной плазмы в том числе для случая устравысокого

лазерного контраста, достигнутого за счёт одновременного использования ОРСПА и плазменного зеркала.

Разработан и апробирован метод восстановления параметров адиабатически разлетающейся плазмы в момент взаимодействия основного сверхмощного лазерного импульса с мишенью по её интегральным по времени эмиссионным рентгеновским спектрам.

Впервые было охарактеризовано состояние плотного нагретого вещества, разогреваемого потоком быстрых лазерно-ускоренных электронов, с одновременным применением эмиссионных рентгеноспектральных и абсорбционных рентгенографических методов диагностики для протяжённых мишеней: впервые проведено одновременное восстановление температурного профиля разогретого вещества и описание динамики разлёта мишени. Выявлено определяющее влияние лазерной интенсивности на характер прогрева проволоочки на глубине от 300 мкм; а энергии – на максимальную температуру получаемой плазмы.

#### **1.4. Научная и практическая значимость работы**

Установлено, что одновременное применение пластиковых обкладок ведёт к существенному повышению плотности плазмы вплоть до почти твердотельных значений, в то время как их отсутствие – к генерации плазмы с величиной плотности в несколько раз меньше даже в тех случаях, когда используется излучение лазерной установки ультравысокого контраста.

Показана возможность оптимизации источников жёсткого рентгеновского излучения на основе твердотельных мишеней для абсорбционной спектральной диагностики плотной горячей плазмы.

Полученные экспериментальные данные о положении границы фоторекомбинационного континуума позволили верифицировать существующие теоретические модели, описывающие изменения атомной структуры веществ при высоких плотностях и температурах.

Экспериментальные данные о параметрах прогреваемого потоком горячих электронов токов используются для верификации численных моделей, описывающих динамику и структуру возникающих электронных токов, механизмы прогрева вещества

Разработанные методы оценки момента образования преплазмы и параметров плазмы в момент прихода основного лазерного импульса, основанные на анализе рентгеновских эмиссионных спектров лазерной плазмы, уже используются при обработке и интерпретации экспериментальных данных на современных лазерных установках, в частности на установках Vulcan PW (RAL, Великобритания), Phelix (GSI, Германия).

### 1.5. На защиту выносятся:

1. Рентгеноспектральный метод определения момента плазмообразования относительно времени прихода основного лазерного импульса релятивистской мощности на мишень, основанный на анализе профиля и относительных интенсивностей диэлектронных сателлитов и линии  $Lu_a$ .

2. Метод восстановления плотности и электронной температуры адиабатически разлетающейся плазмы в момент взаимодействия основного сверхмощного лазерного импульса с мишенью, основанный на анализе профилей линий  $Lu_\beta$  и  $He_\beta$  в интегрированном по времени рентгеновском эмиссионном спектре.

3. Демонстрация роли внешнего пластикового покрытия для обеспечения изохорического нагрева микронных тонкоплёночных мишеней, облучаемых пикосекундными релятивистскими лазерными импульсами ультравысокого контраста с интенсивностью до  $3 \times 10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup>, и результаты рентгеноспектральных измерений параметров создаваемой таким образом плазмы.

4. Экспериментальная зависимость величины понижения потенциала ионизации от плотности плазмы, создаваемой при облучении микронных фольг кремния высококонтрастным оптическим лазерным импульсом релятивистской интенсивности. Наблюдение смещения границы фоторекомбинационного континуума в излучении гелиеподобных ионов и исчезновение уровней с главным квантовым числом  $n \geq 4$  в гелиеподобных ионах плазмы твердотельной и околотвердотельной плотности.

5. Экспериментальное подтверждение изохорического характера нагрева тонкопроволочной мишени потоком релятивистских электронов, ускоренных в поле пикосекундного лазерного импульса ( $\sim 1 \times 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>), полученное за счёт одновременного определения профилей плотности и температуры плотного нагретого вещества методами рентгеновской эмиссионной спектроскопии и покадровой радиографии.

6. Эффект увеличения максимальной температуры изохорически нагретой области тонкопроволочной проводящей мишени за счет роста энергии релятивистского лазерного импульса при отсутствии зависимости этой температуры от лазерной интенсивности, изменяемой варьированием диаметра фокального пятна и длительности импульса в диапазоне от  $6 \times 10^{18}$  до  $1 \times 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

### 1.6. Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в подготовке, проведении, а также последующей обработке результатов серии

экспериментов по исследованию плотной нагретой плазмы на установках Phelix (GSI, Германия), Vulcan PW (RAL, Великобритания), PALS (IPP, Чехия), VEGA (CLPU, Испания). Материалы, полученные на первых двух установках, легли в основу настоящей диссертации. Автор выполнял численные расчёты эмиссионных спектров многозарядных ионов, а также разрабатывал модель адиабатического разлёта плазмы, использовавшуюся для описания экспериментальных данных и определения параметров плазмы.

### **1.7. Достоверность результатов**

Экспериментальные спектры многозарядных ионов, использовавшиеся для диагностики плазмы, были получены при помощи современного измерительного оборудования, обеспечивающего высокое пространственное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласием с данными более ранних работ других авторов в области пересечения. Изложенные в диссертации результаты представлены в работах, опубликованных в высокорейтинговых журналах, а также докладывались на различных всероссийских и международных конференциях.

### **1.8. Апробация работы**

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались лично на 12-ти всероссийских и международных конференциях и симпозиумах:

- Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics (NPP 2020), Москва (Россия), 2-6 декабря, 2020;
- 19th International Conference Laser Optics (ICLO 2020), Санкт-Петербург (Россия), 2-6 ноября 2020;
- International Conference on Ultrafast Optical Science (UFL-2020), Москва (Россия), 28 сентября - 2 октября 2020;
- XXXV International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS-2020), Кабардино-Балкария, Эльбрус (Россия), 1-6 марта 2020;
- VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2020), Москва (Россия), 11-14 февраля 2020;
- XII Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Саров (Россия), 25-28 июня 2019;
- 3rd European Conference on Plasma Diagnostics (ECPD-2019), Лиссабон (Португалия), 6-10 мая 2019;



- International Conference on High Energy Density (ICHED-2019), Оксфорд (Великобритания), 31 марта – 1 апреля 2019;
- 17th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2019), Москва (Россия), 25-27 марта 2019;
- XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS-2019), Кабардино-Балкария, Эльбрус (Россия), 1-6 марта 2019;
- V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2019), Москва (Россия), 12-15 февраля 2019;
- International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018), Москва (Россия), 1-5 октября 2018.

### 1.9. Публикации

Основные результаты диссертации представлены в 13-ти публикациях, 9 из которых опубликованы в журналах, включенных в системы цитирования Web of Science и Scopus.

### 1.10. Структура и объём работы

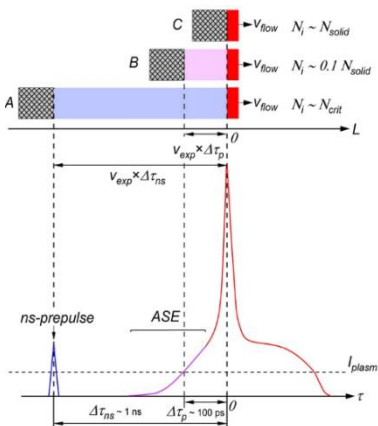
Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, содержащего 197 наименований; она изложена на 122 страницах машинописного текста, включая 53 рисунка, 5 таблиц.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** приводится обоснование и актуальность темы работы; сформулированы цели и задачи исследования; обсуждаются новизна работы, её научная и практическая значимость, личный вклад автора; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; описана структура диссертации; а также приводится список основных публикаций автора по теме работы.

Для задач обеспечения условий изохорического нагрева принципиальным является вопрос характеристики временных профилей лазерных импульсов и определения момента плазмообразования при облучении твердотельных мишеней и прямом прогреве вещества. Для установок пс-длительности подобное представляется достаточно трудоёмкой задачей, которую невозможно проводить в режиме «онлайн» для каждого отдельного выстрела. **Глава 1** посвящена альтернативному способу решения поставленной задачи, а именно разработанной в рамках диссертационной работы методике определения момента образования лазерной плазмы относительно времени воздействия, основного лазерного импульса на мишень по интегрированным по времени эмиссионным рентгеновским спектрам

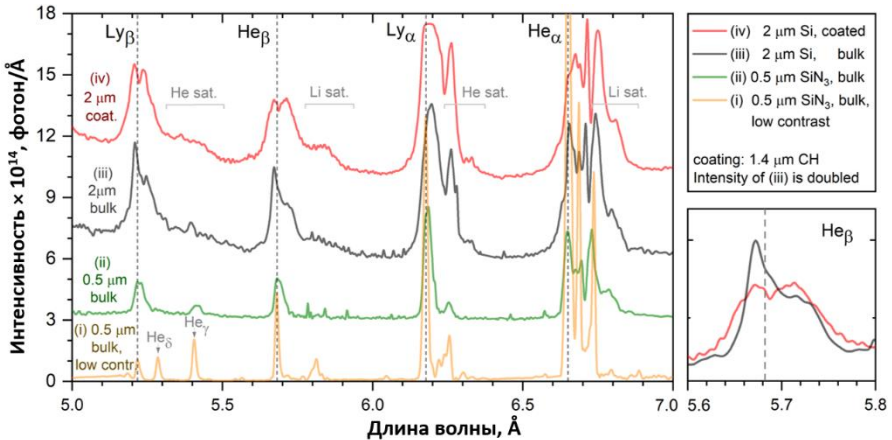
образовавшейся плазмы. В § 1.1 обсуждается вопрос создания плотной горячей плазмы в лабораторных условиях. Акцент делается на её создании за счёт использования сверхмощных лазерных импульсов. Облучение твердотельных мишеней такими импульсами является в настоящий момент одним из достаточно распространенных и хорошо себя зарекомендовавших способов получения плазмы высокой плотности (§ 1.1.1). В § 1.1.2 приводится обзор нескольких существующих субпетаваттных экспериментальных лазерных комплексов и их возможностей; а в § 1.1.3 и § 1.1.4 даётся общее описание и обзор параметров, обеспечиваемых установками Phelix (GSI, Германия) и Vulcan PW (RAL, Великобритания). Именно на них были получены основные экспериментальные данные, лёгшие в основу настоящей работы. Обеспечению изохорического нагрева мишени за счёт действия лазерных импульсов может мешать её гидродинамический разлет, инициируемый действием интенсивного предимпульса или пьедестала, как это обсуждается § 1.1.5. На Рис. 1 показан модельный временной профиль лазерного импульса и даётся оценка плотности плазмы в момент прихода основного лазерного импульса для различных сценариев. Раздел § 1.2 посвящён разработанному рентгеноспектральному методу оценки момента времени образования преплазмы и характеристики временного лазерного профиля. Метод основан на анализе структуры характеристической линии  $Lu_{\alpha}$  и её диэлектронных сателлитов рентгеновского эмиссионного спектра создаваемой плазмы и тем самым определения её электронной плотности и температуры (§ 1.2.1). В качестве примера в § 1.2.2 приведён анализ экспериментальных эмиссионных рентгеновских спектров, полученных при облучении кремниевых фольг толщиной 0.5 мкм лазерными импульсами с использованием и без использования плазменного зеркала, то есть в условиях высокого и низкого лазерного контраста, соответственно, см. Рис. 2. Для этих



**Рис. 1.** Условный временной профиль короткого лазерного импульса, генерируемого установками, основанными на CPA и ОРCPA принципах. Горизонтальной линией  $I_{plasm}$  отмечена граница плазмообразования. В верхней части рисунка изображены области, на которые успеет распространиться преплазма в случае А образования за счёт наносекундного предимпульса; в случае В – за счёт лазерного пьедестала и в случае С – за счёт основного импульса.

случаев были определены плотности, составляющие 1/5 и 1/170 от твердотельного значения, что приблизительно соответствует моментам плазмообразования и началу её гидродинамического разлета в 1 и 25 пс относительно момента прихода основного лазерного импульса на мишень. Таким образом, наблюдение эмиссионных спектров плазмы, особенно в окрестности резонансной линии Н-подобных многозарядных ионов, позволяет для каждого импульса контролировать его временной профиль по параметру, наиболее важному с точки зрения создания состояний вещества со сверхвысокой плотностью энергии. В § 1.3 приводятся основные результаты данной главы.

**Глава 2** посвящена разработке способа, позволяющего определить начальные параметры свободно разлетающейся лазерной плазмы с учётом её остывания и разлёта, используя для этого интегральные по времени эмиссионные рентгеновские спектры плазмы. Эмиссионная рентгеновская диагностика плазмы является достаточно мощным инструментом для определения параметров и изучения свойств плазмы. Но её применение затруднено тем, что характерное время существования лазерной плазмы в наиболее интересные начальные моменты времени, когда её плотность наибольшая, составляет порядка нескольких пикосекунд; и



**Рис. 2.** Экспериментальные эмиссионные рентгеновские спектры плазмы для разных мишеней и условий лазерного облучения: (i) оранжевая и (ii) зеленая кривые соответствуют облучению 0.5 мкм SiN<sub>3</sub> фольг без использования и с использованием плазменного зеркала; (iii) черная и (iv) красная кривые – облучению 2 мкм Si фольг без покрытия и с покрытием в виде пластиковых СН обкладок толщиной 1.4 мкм с обеих сторон. В случаях (ii)–(iv) было использовано плазменное зеркало. Для удобства восприятия интенсивность спектра (iii) увеличена в 2 раза.

временного разрешения существующих регистрирующих приборов попросту не хватает для её рентгеноспектральной диагностики. Поэтому необходимо развивать подходы, позволяющие оценить параметры на начальных моментах существования плазмы по интегральным по времени экспериментальным данным с учетом её эволюцию, как это обсуждается в § 2.1.

В § 2.2 описан разработанный в рамках настоящей работы способ определения начальных параметров плазмы, основанный на т.н. приближении адиабатического разлёта, учитывающего процессы остывания и гидродинамическое расширения плазмы. Плазма представляется как набор последовательно сменяющих друг друга состояний (стадий), как проиллюстрировано на Рис. 3-а. Излучение каждой из этих стадий даёт вклад в общий интегральный по времени спектр с учётом весовых коэффициентов, оцениваемых из геометрических соображений (§ 2.2.1). Плотность плазмы определяется на основании сравнения экспериментального и модельного спектров, а именно интенсивностей и уширений характеристических линий  $\text{Lu}_\beta$  и  $\text{He}_\beta$ , излучаемых водородо- и гелио-подобными ионами, (§ 2.2.2). Были получены модельные графики зависимости величины уширения этих линий от начальных параметров плазмы, её температуры и плотности (§ 2.2.3). В § 2.2.4 рассматриваются границы применимости метода. Он подходит для определения начальных параметров плазмы, созданной короткими лазерными импульсами, порядка и менее 1 пс; а также обладает ограничениями на ожидаемую начальную температуру исследуемой плазмы, 0.25–1 кэВ.

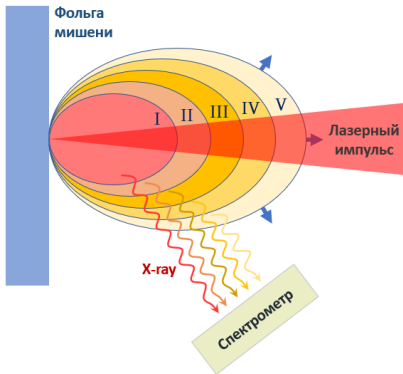


Рис. 3. Иллюстрация предлагаемого подхода адиабатического разлёта плазмы.

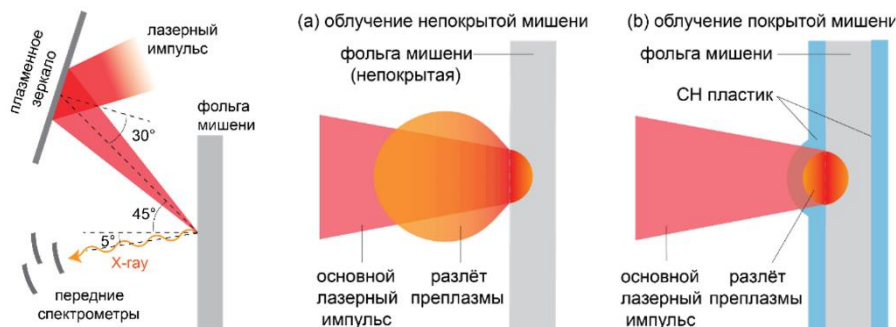
Таблица 1. Величины ионных плотностей ( $n_i$ ) и ширин на полувысоте ( $\Delta\lambda$ ) потдельности для I–V стадий существования плазмы в приближении её адиабатического разлёта; для суммы стадий I–V с учётом весовых коэффициентов; для стационарного приближения и эксперимента.

	$n_i \times 10^{21}$ , ион/см <sup>3</sup>	$\Delta\lambda \text{ He}_\beta$ , мÅ
I	2E22	10.4
II	1.1E22	8.6
III	6.3E21	7.5
IV	3.6E21	7
V	2E21	6.5
Сумма I–V		8.4
Стац. пр.	1e22	8.4
Эксп-т		8.4

В качестве примера был проведён анализ экспериментального спектра, результаты чего представлены в § 2.2.5, а также в **Таблице 1**, где приведено сравнение ширины линии  $\text{He}_\beta$  на полувысоте в эксперименте, в приближениях стационарного и адиабатического разлётов отдельно для каждой стадии I–V и их сумме. Делается оценка ионной плотности, которая демонстрирует, что рассматриваемый подход позволяет уточнить значение плотности в большую сторону относительно стационарного приближения, в  $\sim 2$  раза. В § 2.3 приводятся основные результаты данной главы.

**Глава 3** посвящена созданию и изучению свойств сверхплотной плазмы при прямом воздействии лазерного излучения на твердотельную мишень. Рассматриваются вопросы обеспечения изохорического нагрева за счёт использования сложноструктурированных мишеней, а также проявления эффектов плотности в атомной структуре многозарядных ионов такой плазмы.

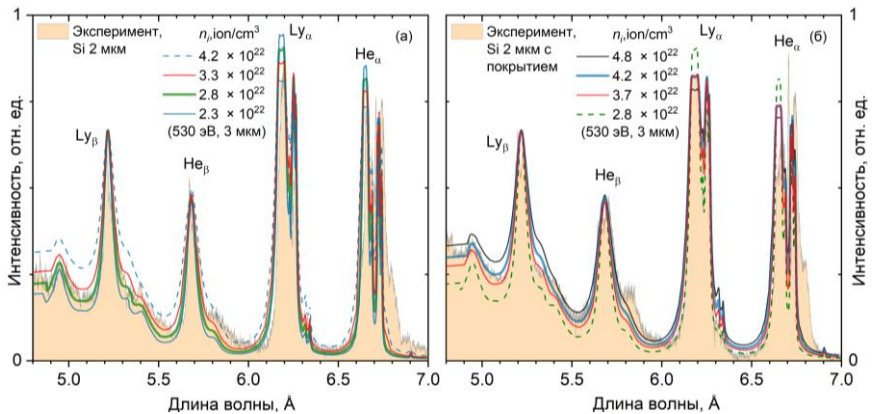
Для повышения лазерного контраста на современных лазерных установках используются различные методы, как внедряемые в лазерные системы уже на этапе их строительства или модернизации (речь идёт в первую очередь о принципах СРА, ОРСРА), так и методы последующего повышения контраста, например, т.н. плазменных зеркал. Тем не менее, когда речь идёт о сверхинтенсивных лазерных импульсах, указанных выше способов повышения лазерного контраста может оказаться недостаточно для предотвращения преждевременного плазмообразования за счёт действия интенсивного пьедестала. Преплазма может образоваться и начать расширяться уже за десятки пс до прихода основного лазерного импульса, а её плотность упасть на порядок и более, как это было показано в Главе 1. В этом



**Рис. 4.** (а) Схема эксперимента, показывающая относительное положение спектрометров ФСПР, фольги мишени, плазменного зеркала, а также направление прихода лазерного импульса. Схема лазерного облучения фольги (б) непокрытой и (в) покрытой дополнительным прозрачным для лазерного излучения слоем СН пластика. Показано состояние мишени и степень разлёта преплазмы в момент прихода основного лазерного импульса на мишень.

случае, основная часть лазерной энергии будет вложена в вещество с плотностью значительно твердотельной. В то же время использование различных сложноструктурированных мишеней может создать благоприятные условия для удержания преплазмы от существенного разлёта и получения горячей плотной плазмы. Первая часть настоящей главы посвящена исследованию эффективности комплексного применения указанных способов повышения контраста и удержания плазмы.

Эксперимент был проведён на лазерной установке Vulcan PW (CLF, Великобритания), его постановка приведена на **Рис. 4-а** и также описана в § 3.1. Для получения плазмы околотвердотельной плотности использовались мишенные пластиковые обкладки, препятствующие значительному разлёту преплазмы к моменту прихода основного лазерного импульса (§ 3.2.1). Ультравысокий контраст достигался за счёт использования технологии ОРСРА и плазменного зеркала. На **Рис. 2** приводятся рентгеновские эмиссионные спектры, полученные в широком спектральном диапазоне, 4,7–7,5 Å, и с высоким спектральным разрешением при облучении кремниевых мишеней различной толщины и конфигурации, как обсуждается в § 3.2.2. Определение плотностей плазмы осуществлялось на основании сравнения полученных спектров с результатами атомно-кинетических расчетов (§ 3.2.3). Было выполнено сравнение плотностей плазмы, полученных при облучении кремниевых фольг толщинами 0,5 мкм (§ 3.2.4) и 2 мкм мишеней с пластиковыми СН обкладками и без них (§ 3.2.5), как проиллюстрировано на



**Рис. 5.** Пример определения плотности плазмы (а) непокрытой 2 мкм Si фольги и (б) и покрытой пластиковыми обкладками, 1,4 мкм СН + 2 мкм Si + 1,4 мкм СН. Сплошными толстыми линиями выделены модельные кривые, лучше всего описывающие эксперимент.

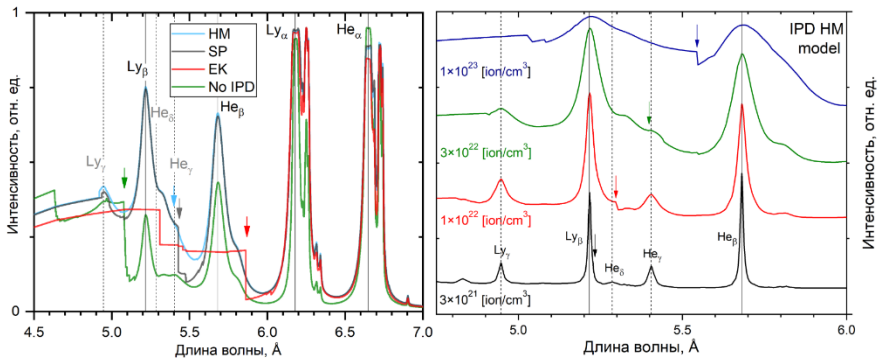
**Рис. 5.** Показано, что за счёт применения обкладок плотность плазмы в наиболее горячем состоянии – в момент непосредственно после воздействия основного лазерного импульса – была увеличена в 2 раза и составила порядка 80% от твердотельной. При этом было экспериментально получено плазменное состояние с плотностью энергии порядка  $Q = 5 \times 10^7$  Дж/см<sup>3</sup>. Это свидетельствует об эффективности применения мишеней с обкладками для получения плазмы околотвердотельной плотности даже в случае использования лазеров ультравысокого контраста, как отмечено в § 3.2.6.

При достижении высоких плотностей плазмы появляется множество актуальных вопросов, связанных с влиянием высокой величины плотности плазмы на её атомную структуру. Одним из наиболее показательных здесь является т.н. эффект понижения потенциала ионизации (ППИ) в ионах плотной плазмы, наиболее ярко проявляющийся при плотностях, близких к твердотельным значениям, равным им или превышающим их. Следующая часть Главы 3 посвящена как раз экспериментальному изучению этого эффекта. Он заключается в понижении энергии выхода электрона, пропаданию целого ряда связанных состояний и уменьшению энергии оставшихся связанных состояний. Все это должно приводить к существенному изменению всех энергий связи в плазме, статистической суммы, а значит, и уравнениям состояния, модификации ионизационного баланса, столкновительной динамики и транспортных свойств такой сверхплотной плазмы, как это обсуждается в § 3.3.1. Для описания эффекта понижения потенциала ионизации (ППИ) сейчас чаще всего используются два альтернативных подхода – две теоретические модели – в которых ключевыми параметрами являются либо среднее межэлектронное, либо среднее межйонное расстояние. Валидация применимости каждой из моделей для случая плотной лазерной плазмы может быть осуществлена лишь экспериментально. Причём в настоящий момент нет однозначного понимания того, какой моделью можно было бы в полной мере описать такое состояние вещества. Так, недавние экспериментальные данные, полученные на оптическом лазере, свидетельствуют о верности межйонной модели. Это противоречит другим экспериментальным данным, полученным при воздействии на мишень излучения рентгеновского лазера на свободных электронах. При этом отличие в эмиссионных рентгеновских спектрах плазмы, предсказываемых указанными моделями ППИ, особенно ярко проявляется в области околотвердотельных плотностей (§ 3.3.2), как показано на **Рис. 6-а** и **Рис. 6-б**. Можно видеть явную зависимость положения границы фоторекомбинационного континуума и наличия некоторых характеристических спектральных линий от выбираемой модели ППИ и плотности плазмы. В рамках диссертационной работы демонстрируются результаты примененного впервые способа валидации теоретических

моделей, основанного на рентгеноспектральном измерении зависимости положения границы фоторекомбинационного континуума от плотности плазмы, полученной при облучении твердотельных мишеней оптическими лазерными импульсами. Для уже показанных ранее на **Рис. 2** экспериментальных спектров были измерены положения границ фоторекомбинационного континуума и изучен связанный с его смещением эффект последовательно «пропадания» эмиссионных спектральных линий (§ 3.3.3). Впервые были измерены положения этой границы для кремниевой плазмы в диапазоне плотностей от  $1 \times 10^{21}$  до  $4 \times 10^{22}$  ион/см<sup>3</sup>, как показано на

**Рис. 7.** С высокой спектральной точностью продемонстрировано последовательное пропадание линий вплоть до линии He<sub>γ</sub> (включительно), что соответствует вырождению уровней с главным квантовым числом  $n \geq 4$ . В отличие от более ранних исследований, полученные данные позволяют достоверно и напрямую продемонстрировать преимущество межйонных моделей над межэлектронными при описании плазмы, нагреваемой оптическим лазерным излучением (§ 3.3.4). Показано, что этот эффект может быть использован в диагностике при описании рекомбинационных процессов в He-подобных ионах плазмы для уточнения её плотности (§ 3.3.5).

В четвертой части данной главы рассматриваются радиационные свойства релятивистской лазерной плазмы твердотельных мишеней в контексте использования такой плазмы в качестве рентгеновского источника для абсорбционной спектральной диагностики плазмы. Этот тип диагностики



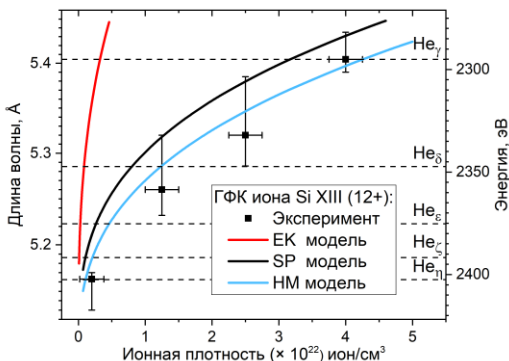
**Рис. 6.** (а) Сравнение расчётных спектров для различных моделей понижения потенциала ионизации при ионной плотности, электронной температуре и толщине плазмы  $n_i = 4 \times 10^{22}$  ион/см<sup>3</sup>,  $T_e = 500$  эВ и 3 мкм, соответственно. Межэлектронная модель обозначена как EK, межйонные – SP, HM. (б) Сравнение расчётных спектров при различных значениях плотности плазмы и фиксированных температуре 500 эВ и толщине 3 мкм для межйонной модели (HM). Стрелками отмечены границы фоторекомбинационного континуума.



является одним из ключевых при исследовании плотного нагретого вещества. При этом на свойства внешнего источника рентгеновского излучения накладывается целый ряд требований – он должен быть короткоимпульсным, микронных масштабов, а его спектр не должен содержать интенсивных спектральных линий в интересующей области, а его яркость должна превышать яркость собственного свечения исследуемого плазменного объекта (§ 3.4.1). Эти условия следуют из соображений, что исследуемые состояния плазмы, как правило, существуют на временах порядка единиц или десятков пикосекунд, занимают крайне малый объем, порядка десятков  $\text{мм}^3$ , а также интенсивно излучают в рентгеновском диапазоне.

Для решения поставленной задачи было предложено использование излучения плазмы высокой плотности в спектральном диапазоне фоторекомбинационного континуума, как потенциально отвечающего всем обозначенным условиям. Эту идею хорошо иллюстрируют расчётные спектры излучения плазмы в области фоторекомбинационного диапазона для некоторых элементов и соединений (§ 3.4.2), показанные на Рис. 8. В работе сформулированы принципы выбора атомного элемента мишени подсветки в зависимости от требуемого диапазона регистрации абсорбционного спектра, материала исследуемой плазмы.

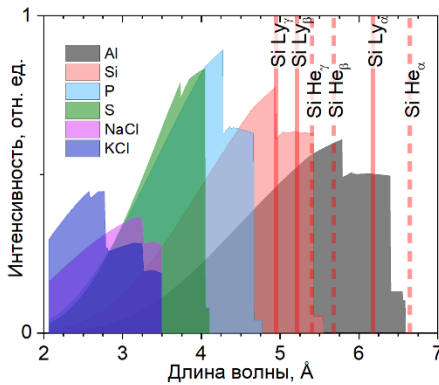
Были экспериментально определены излучательные свойства мишеней различных конфигураций в области пика фоторекомбинационного континуума (§ 3.4.3). В качестве мишеней использовались кремниевые и алюминиевые фольги, толщины которых менялись в диапазоне от 0.5 до 30  $\mu\text{м}$ . Было установлено, что максимум светимости наблюдался при толщине мишени порядка 10  $\mu\text{м}$  (§ 3.4.4, Рис. 9). Наблюдалось положительное влияние обкладок мишени на светимость плазмы в требуемом спектральном диапазоне. В § 3.4.5 приведены выводы о возможности использования подобной плазмы в качестве эффективного источника жёсткого



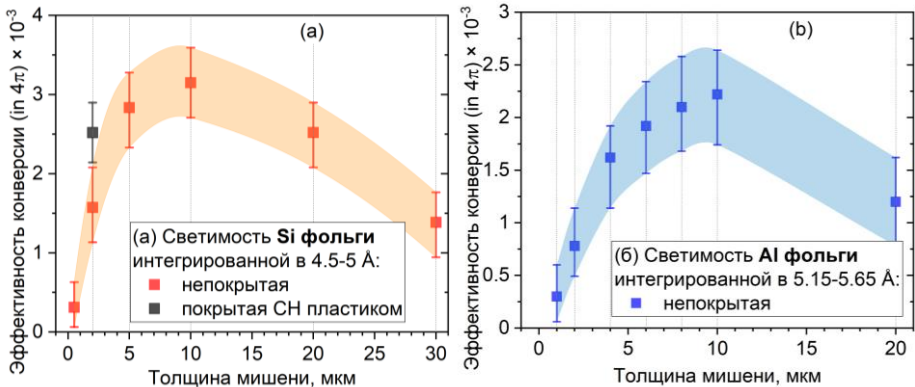
**Рис. 7.** Зависимость положения границы фоторекомбинационного континуума от ионной плотности плазмы согласно моделям НМ, SP и ЕК; и сравнение с экспериментальными данными. Горизонтальными пунктирными прямыми отмечены положения линий He-подобных ионов Si XIII.

рентгеновского излучения, например, в схеме абсорбционной спектральной диагностики нагретого плотного вещества. В § 3.5 обобщаются результаты данной главы.

В Главе 4 рассматривается эффективный способ изохорического прогрева вещества, альтернативный прямому греющему действию лазерного импульса. Многочисленные экспериментальные и модельные данные свидетельствуют о генерации значительного количества высокоэнергетичных электронов при взаимодействии сверхмощных лазерных импульсом с веществом. Их пробег в веществе составляет сотни микрометров, что создаёт принципиальную возможность обеспечения непрямого изохорического прогрева твердотельных мишеней потоком горячих электронов (§4.1.1). При этом физические процессы, связанные как с динамикой и структурой возникающих электронных токов, так и с механизмами прогрева вещества,



**Рис. 8.** Модельные профили фоторекомбинационного континуума для элементов с  $Z = 13$ – $16$  и  $19$ . Линии резонансных серий не включены в рассмотрение из соображений наглядности (хотя их положение обозначено для кремния). Спектры получены в предположении фиксированной вложенной лазерной энергии с учётом нагрева и ионизации.

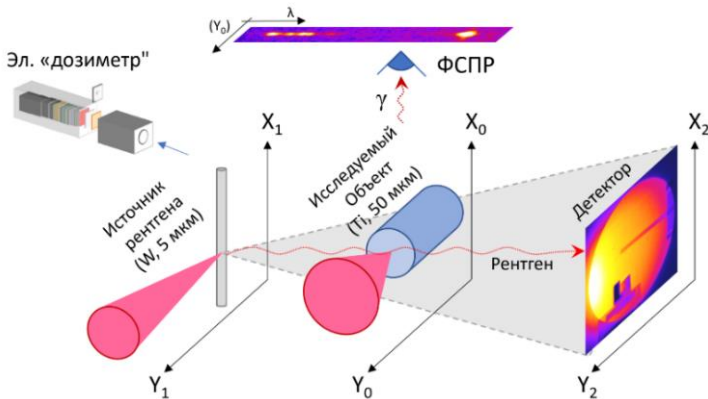


**Рис. 9.** Зависимости светимостей плазмы от толщины твердотельных мишеней для (а) кремния в диапазоне  $4.5$ – $5$  Å и (б) алюминия в диапазоне  $5.15$ – $5.65$  Å.

настолько сложны, что до сих пор не могут быть в полной мере описаны в рамках существующих теоретических моделей. В результате, актуальной задачей является экспериментальная валидация существующих численных моделей и накопление новых знаний о происходящих процессах.

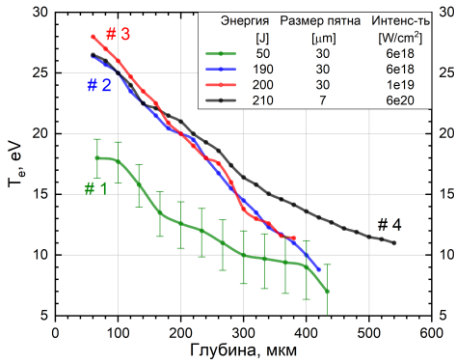
В § 4.1.2 представлен обзор недавних результатов применения такого подхода в экспериментах с использованием мишеней из тонких фольг и отдельно стоящих проводящих проволочек микронного диаметра.

В рамках настоящей работы был проведён эксперимент по изохорическому нагреву подобных проволочек их титана диаметром 50 мкм, облучение было проведено в торцевой и боковой конфигурациях. Эксперимент был впервые проведён с одновременным применением эмиссионной рентгеновской и радиографической диагностик. Схема эксперимента, выполненного на суб-петаваттном пикосекундном лазере PHELIX, показана на **Рис. 10** и представлена в разделе (§ 4.2.2). Эмиссионные спектры были зарегистрированы с разрешением по пространству вдоль оси проволоки диаметром 50 мкм, что позволило диагностически разделить излучение лазерной короны и плотного горячего вещества, формируемого внутри мишени (§ 4.2.3). Температура прогрева вещества определялась по сдвигу характеристических линий  $K_{\alpha}$  эмиссионных рентгеновских спектров плазмы (§ 4.2.4). Характерная температура вещества при этом оказалась в диапазоне от 10 до 30 эВ. Были получены температурные профили вдоль оси проволоки до порядка 0.5 мм вглубь мишени (§ 4.2.5), как показано на **Рис. 12**. Продемонстрировано, что максимальная характерная температура прогрева при торцевом облучении в среднем в 1.25 раза больше, чем при боковом облучении, а характерная глубина прогрева при этом заметно не изменяется.

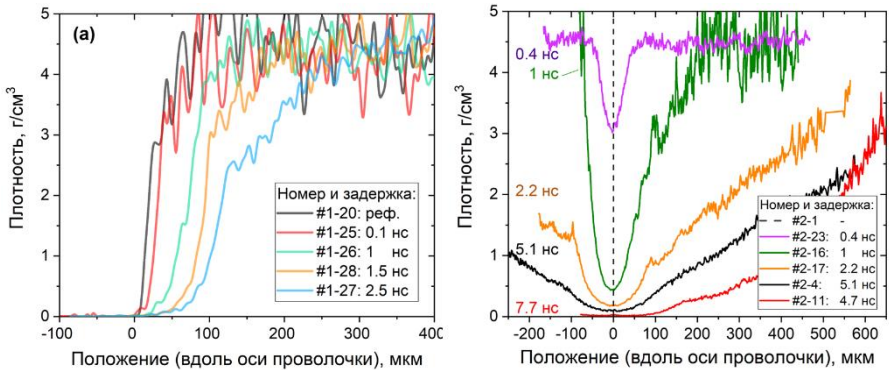


**Рис. 10.** Схема эксперимента с облучением торца тонкой титановой проволоочки. Показаны положения радиографической и эмиссионной спектральной диагностик.

Использование радиографической диагностики позволило осуществить покадровую регистрацию гидродинамического процесса разлёта мишени в диапазоне времён 0.1–8 нс (§ 4.2.6). По ним стало возможным дать оценку на скорость движения фронта гидродинамического расширения в теле проволоочки, составившей 40–70 км/с. На основании этого был сделан вывод о том, что регистрируемый рентгеноспектральными методами прогрев мишени потоком горячих электронов до температур в десятки эВ успевает произойти до начала её расширения. Таким образом, можно говорить об изохорическом характере прогрева вещества и адекватности предположения о твердотельной величине плотности плазмы при определении её температурных профилей (§ 4.2.8, Рис. 12). Помимо того, была выполнена оценка температуры плазмы в лазерной короне, показавшая температуру, в 20 раз превышающую



**Рис. 12.** Экспериментальные температурные профили излучения горячей твердотельной плазмы при изохорическом нагреве титановых тонких проволоочек потоками лазероускоренных горячих электронов. Параметры лазерных импульсов указаны в легенде; для удобства восприятия погрешности на графике указаны только для одного случая.



**Рис. 11.** Профили плотности вдоль центральной оси разлетающейся титановой проволоочки при (а) торцевой и (б) боковой конфигурациях её облучения. Профили соответствуют разным моментам времени после облучения мишени «греющим» импульсом, как указано в легендах.

максимальную температуру плотной плазмы внутри проволоочки (§ 4.2.7). Была установлена и количественно измерена резкая зависимость температуры прогрева проволоки от величины вкладываемой лазерной энергии. При этом увеличение интенсивности в диапазоне от  $6 \times 10^{18}$  до  $1 \times 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> (за счёт уменьшения длины импульса и диаметра пятна фокусировки) не приводило к повышению температуры прогрева в приповерхностной области мишени, но оказывало влияние на общую глубину прогрева вещества (§ 4.2.8). В § 4.3 приводятся основные результаты данной главы.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

- разработан метод оценки длительности пьедестала пикосекундного лазерного импульса релятивистской мощности по рентгеновским спектрам создаваемой им плазмы;
- разработан подход, позволяющий по интегрированным по времени и пространству рентгеновским спектрам излучения плазмы оценить её параметры в момент прихода основного лазерного импульса с учётом гидродинамики разлёта плазмы и характера её остывания;
- продемонстрировано, что использованием мишеней с пластиковым покрытием может обеспечить генерацию сверхплотной лазерной плазмы, причём влияние обклада выражено даже при использовании лазеров ультравысокого контраста. Таким образом была получена плазма с плотностью энергии порядка  $Q = 5 \times 10^7$  Дж/см<sup>3</sup>;
- впервые с высокой точностью были экспериментально измерены положения границ фоторекомбинационного континуума и связанный с ним эффект последовательно «пропадания» эмиссионных спектральных линий вплоть до Ne $\nu$  включительно (то есть уровней с главным квантовым числом  $n \geq 4$ ) по мере увеличения плотности лазерной плазмы кремниевых мишеней от  $1 \times 10^{21}$  до  $4 \times 10^{22}$  ион/см<sup>3</sup>;
- продемонстрирована возможность использования плазмы лёгких элементов (на примере элементов с  $Z = 13-16, 19$ ) в качестве эффективного источника жёсткого рентгеновского излучения, для схем абсорбционной спектральной диагностики; была найдена оптимальная толщина мишени с точки зрения максимизации светимости;
- исследована плотная горячая плазма, создаваемая потоком горячих лазеро-ускоренных электронов. Впервые это было осуществлено при одновременном применении методов радиографии и рентгеноспектральной эмиссионной спектроскопии. Это позволило получить «покадровую» развёртку гидродинамического процесса разлёта мишени и профиль температуры прогрева вещества до 0.5 мм вглубь мишени; при этом была исследована роль энергии и интенсивности на характер и степень прогрева вещества.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

Martynenko A.S., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu. et. al. "Optimization of a laser plasma-based X-ray source according to WDM absorption spectroscopy requirements" // *Matter and Radiation at Extremes*, Vol. 6, Issue 1, Page 014405 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0025646>

Martynenko A.S., Pikuz S.A., Antonelli L., et. al. "Role of relativistic laser intensity on isochoric heating of metal wire targets" // *Optics Express*, Vol. 29 (2021). <https://doi.org/10.1364/OE.415091>

Martynenko A.S., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A. et. al. "Determining the Short Laser Pulse Contrast Based on X-Ray Emission Spectroscopy" // *High Energy Density Physics*, Vol. 38, Page 100924 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2021.100924>

Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Filippov E.D. et. al. "Precise wavelength measurements of Potassium He- and Li-like satellites in a laser plasma of a mineral target" // *Matter and Radiation at Extremes*, Vol. 6, Issue 1, Page 014402 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0019496>

Ryazantsev S. N., Skobelev I. Y., Martynenko A. S. et. al. "Analysis of Ly $\alpha$  Dielectronic Satellites to Characterize Temporal Profile of Intense Femtosecond Laser Pulses" // *Crystals*, Vol. 11, Issue 2, Page 130 (2021). <https://doi.org/10.3390/cryst11020130>

Martynenko A.S., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu. et. al. "Effect of plastic coating on density of plasma formed in Si foil targets irradiated by ultra high-contrast relativistic laser pulses" // *Physical Review E*, Vol. 101, Issue 4 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.101.043208>

Martynenko A.S., Skobelev I.Yu., and Pikuz S.A. "Possibility of estimating high-intensity-laser plasma parameters by modelling spectral line profiles in spatially and time-integrated X-ray emission" // *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.125, No. 2 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7149-4>

Jakubowska K., Mancelli D., Benocci R. et. al. "Reflecting laser-driven shocks in diamond in the megabar pressure range" // *High Power Laser Science and Engineering*, Vol. 9, Issue 1, 010000e3 (2021). <https://doi.org/10.1017/hpl.2020.38>

Cristoforetti G., Antonelli L., Mancelli D. et. al. "Time evolution of stimulated raman scattering and two plasmon decay at laser intensities relevant for shock ignition in a hot plasma" // *High Power Laser Science and Engineering*, Vol. 7, e51 (2019). <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.37>

Мартыненко А.С., Скобелев И.Ю., Пикуз С.А. и др. "Определение параметров пикосекундной лазерной плазмы на начальных этапах её формирования методами высокоразрешающей рентгеновской спектроскопии" // *Вестник Объединенного института высоких температур*, т. 3 (2019). <https://doi.org/10.33849/2019209>

Filippov E.D., Martynenko A.S., Cervenak M. et. al. "X-ray time-resolved diagnostics of hot electron generation in shock ignition relevant experiments" // *International Conference Laser Optics (ICLO, 2020)*. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285718>

Martynenko A. S., Pikuz S. A., Ryazantsev S. N. et. al. "X-ray spectroscopy validation of ionization potential depression models in dense plasma created by petawatt laser pulses" // *International Conference Laser Optics (ICLO, 2020)*. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285922>

Pikuz S.A., Faenov A.Y., Pikuz T.A. et. al. "X-ray radiation properties of plasma under interaction of femtosecond laser pulses with  $\sim 1022$  W/cm<sup>2</sup> intensities" // *International Conference Laser Optics 2018, (IEEE, 2018)*, p. 234 (2018). <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435524>

**Мартыненко Артем Сергеевич**

**СВЕРХПЛОТНАЯ ПЛАЗМА В УСЛОВИЯХ ИЗОХОРИЧЕСКОГО  
НАГРЕВА ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСАМИ  
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

Автореферат

---

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.1,0
Тираж 150 экз.	Заказ N	Бесплатно

---

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2