

На правах рукописи

Алхимова Мария Андреевна

**РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ,
ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ
ИМПУЛЬСОВ ПЕТАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ НА ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ
МИШЕНИ**

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2018

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и Объединенном институте высоких температур Российской академии наук

Научный руководитель: **Пикуз Сергей Алексеевич**,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией диагностики вещества
в экстремальном состоянии
Объединенного института высоких температур
Российской академии наук,

Официальные оппоненты: **Матафонов Анатолий Петрович**
доктор физико-математических наук,
заместитель начальника отдела 1114
Федерального государственного унитарного
предприятия «Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения»

Иванов Константин Анатольевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник физического
факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской Академии наук (ИОФ РАН)

Защита состоится 20 июня 2018 г. в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.130.05
доктор физ.-мат. наук

Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Исследование плотной лазерной плазмы, формируемой в результате воздействия ультракоротких сверхинтенсивных лазерных импульсов на тонкие твердотельные фольги, представляет огромный интерес, поскольку такая плазма является эффективным источником ультра-яркого рентгеновского и гамма-излучений, пучков высокоэнергичных ионов, электронов и нейтронов. Такие источники находят широкое применение в физике высоких плотностей энергий, лабораторной астрофизике, материаловедении, медицине, биоинженерии и инерциальном термоядерном синтезе. Однако, характеристики этих источников крайне чувствительны к параметрам плазмы, а те, в свою очередь, сильно зависят от условий проведения эксперимента. Таким образом, для оптимизации формируемого в плазме источника, возникает необходимость контролировать основные параметры плазмы. Эта задача довольно сложная, поскольку речь идет о ультрабыстрых фемто- и пикосекундных процессах, протекающих в малом объеме $\sim 10 \text{ мкм}^3$, в котором достигается температура порядка нескольких кэВ. При таких условиях, наиболее универсальным инструментом, позволяющих эффективно получить информацию об основных параметрах плазмы (температура, плотность, компонентный состав) является рентгеновская спектроскопия.

Процессы, проводящие к генерации источника ультра-яркого рентгеновского излучения в плазме, создаваемой лазерным импульсом с интенсивностью $I_{\text{laser}} \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ Вт/см}^2$ на поверхности мишени с атомным номером $Z \sim 10 - 15$ активно изучаются последние годы [1–3]. Ранее было продемонстрировано, что лазерного импульса с интенсивностью $I_{\text{laser}} \sim 8 \times 10^{20} \text{ В/см}^2$, достаточно, чтобы сформировать в плазме источник рентгеновского излучения с $I_{\text{x-ray}} \sim 10^{18} \text{ Вт/см}^2$ [1,4]. При этом в глубине мишени на некотором расстоянии от фокального пятна лазерного излучения происходит формирования полых ионов, линии излучения которых фиксируются на рентгеновских спектрах, и являются идентификатором достижения режима доминирования радиационных процессов в кинетике плазмы, для мишеней с $Z \sim 10 - 15$. Однако, возможность исследовать вещество, образующейся при воздействии сверхинтенсивных $I_{\text{laser}} \geq 10^{21} \text{ Вт/см}^2$ потоков лазерной энергии на мишени, с атомным номером $Z \sim 20 - 30$ появилась сравнительно недавно, в связи с введением в эксплуатацию новых лазерных комплексов петаваттной мощности (например: J-KAREN-P, Кансай, Япония; PEARL H. Новгород, Россия). Плазма, образующая в результате облучения фольг-мишеней из тяжелых элементов релятивистскими лазерными импульсами, представляет собой сложный, неоднородный по пространству и изменяющийся за крайне короткое время объект, характеризующийся рекордно высокими температурами и плотностью близкой к твердотельному значению.

Поэтому, исследование плазмы, образующейся в таких экстремальных условиях, представляет значительный научный и практический интерес. Решение задачи по определению параметров релятивистской лазерной плазмы способствует дальнейшему развитию и оптимизации рентгеноспектральных методов диагностики, применяемых в экспериментах на различных установках, в том числе, для диагностики мощного источника рентгеновского излучения, формируемого в

задачах инерциального термоядерного синтеза, и в задачах медицинского направления.

Цели и задачи исследования

1. Изучение особенностей отражательных свойств сферически-изогнутых кристаллов, применяемых в качестве диспергирующих элементов в рентгеновских спектрометрах, для диагностики плотной лазерной плазмы.

2. Исследование зависимости рентгеновской эмиссии из плотной плазмы, формируемой при облучении мишеней с средним атомным номером (Fe, Cr) лазерными импульсами релятивистской интенсивности, от параметров лазерного импульса.

3. Определение основных параметров плотной плазмы, образующейся при облучении стальных мишеней лазерными импульсами с интенсивностью $I_{\text{л}} \geq 10^{21}$ Вт/см² методами рентгеноспектральной диагностики.

4. Исследование экзотического состояния вещества, формируемого под воздействием яркого импульсного источника ионизирующего излучения, создаваемого при облучении твердотельных Al и Si фольг ультракороткими лазерными импульсами релятивистской интенсивности.

Научная новизна

Впервые обнаружены либо экспериментально подтверждены ряд эффектов, проявляющихся в лазерной плазме при достижении плотности потока лазерного излучения на мишени, превышающей 10^{21} Вт/см²:

- поглощение лазерного импульса в области плазмы с релятивистской критической плотностью
- сильно нелинейный рост интенсивности рентгеновской эмиссии плотной плазмы при увеличении лазерного потока
- возникновение состояния плазмы со значительной концентрацией Ридберговских полых ионов.

Впервые обнаружен эффект резкого роста отражательной способности сферически изогнутого кристалла альфа-кварца в узкой спектральной полосе вблизи К-края поглощения кремния.

Научная и практическая значимость

Основная ценность работы состоит в том, что полученные данные о зависимости рентгеновской эмиссии плазмы от плотности потока лазерной энергии на мишени позволяют оптимизировать параметры установки для создания сверхъяркого, компактного импульсного источника рентгеновского и корпускулярного излучений. Такой источник может быть использован как для фундаментальных исследований в области ядерной физики, так и для решения технологических задач в прецизионной обработке материалов, биотехнологиях, медицине и др.

Развитые в диссертации методы измерения и анализа рентгеновских спектров релятивистской лазерной плазмы активно используются в экспериментах, выполняемых на современных лазерных комплексах: J-KAREN-P (QST: KPSI, Киото, Япония), PEARL (Институте Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород),

Vulcan PW (Национальная Лаборатория Резерфорда-Эплетона, CLF, Великобритания), Titan (Ливерморская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса, США) и др.

Достоверность

Экспериментальные спектры многозарядных ионов, использовавшиеся соискателем для определения параметров 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, а также корреляцией данных, полученных в экспериментах на различных установках. Изложенные в диссертации результаты оригинальны и достаточно полно представлены в работах, опубликованных в высокорейтинговых журналах, а также обсуждались на различных всероссийских и международных конференциях.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично, или при его непосредственном участии.

Для экспериментов по взаимодействию ультракоротких лазерных импульсов с твердотельными мишенями на установках J-KAREN-P, Vulcan PW и PEARL автором разработаны диагностические схемы и подготовлено рентгеноспектральное оборудование.

Автор лично участвовал в проведении серии экспериментов по исследованию эмиссионных свойств фемтосекундной лазерной плазмы на установках J-KAREN-P и PEARL, проводил сбор, обработку, сравнительный анализ и интерпретацию рентгеноспектральных данных.

Автором лично выполнены атомно-кинетические расчеты спектров излучения многозарядных ионов тяжелых элементов (Fe, Cr), проведен сравнительный анализ экспериментальных и модельных спектров, позволивший определить параметры плазмы в представленных в диссертации экспериментах. В результате автором, в частности, обнаружены такие эффекты в релятивистской лазерной плазме, как сильно нелинейный рост рентгеновской эмиссии плотной плазмы и возможность эффективного поглощения лазерного импульса в области плазмы с релятивистской критической плотностью.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Эффект резкого роста отражательной способности сферически изогнутого кристалла α -кварца, в узкой спектральной полосе $\Delta_{\text{pic}} \sim 0.0103 \pm 0.0002 \text{ \AA}$, расположенной с коротковолновой стороны К-края поглощения кремния, при облучении кристалла потоком рентгеновских фотонов интенсивностью порядка 10^{11} Вт/см^2 .
2. Эффект сильно нелинейного роста интенсивности рентгеновского излучения, эмитируемого с передней и тыльной поверхности стальных

мишеней, при облучении их лазерными импульсами релятивистской интенсивности в диапазоне значений $I_{lt} = 1 \times 10^{20} - 3 \times 10^{21}$ Вт/см².

3. Эффект преимущественного поглощения основного фемтосекундного лазерного импульса, областью плазмы с релятивистской критической плотностью, что позволяет в данной области создать состояние с высокой плотностью энергии, достигающей в условиях проведенных экспериментов значений порядка 10^7 Дж/см³.
4. Обнаружение рентгеновских спектральных линий ридберговских полых ионов в излучении лазерной плазмы, образованной при облучении кремниевых мишеней пикосекундными импульсами релятивистской интенсивности.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертации представлены на 14 российских и международных конференциях:

- 1) International School on Ultra-Intense Lasers, Moscow, Russia, 2015;
- 2) 31th International Conference on Equation of States for Matter (EOS'16), Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2016;
- 3) Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation, Prokhorov Institute, Moscow 2016;
- 4) 34th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2016), Moscow, Russia, 2016;
- 5) 43th EPS Conference on Plasma Physics, Leuven, Belgium 2016;
- 6) III Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2017» Москва, Россия, 2016;
- 7) 32th International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (IIFM-2017), Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2017;
- 8) Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation, Prokhorov Institute, Moscow 2017;
- 9) 44th EPS Conference on Plasma Physics, Belfast, Northern Ireland 2017;
- 10) International Conference on Extreme Light (ICEL-2017), Szeged, ELI-ALPS, Hungary 2017;
- 11) Conference on High Intensity Lasers and Attosecond Science in Israel, Tel-Aviv, Israel, December 11-13, 2017;
- 12) Ionization and Ultra intense X-Ray Radiation of High Z Foils by Relativistic Femtosecond Laser Pulses Interaction. International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, Russia, October 3 – 5, 2017;
- 13) International conference on high energy density science 2017 (HEDS2017), Yokohama, Japan, April 18-21, 2017;
- 14) The 6th International Conference on High Energy Density Physics (ICHED2017), Shirahama, Wakayama, Japan, June 5-9, 2017.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатных работах, из которых 11 статей – в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, и 10 тезисов в сборниках трудов конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Её объём составляет 135 страниц, она включает 56 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 146 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

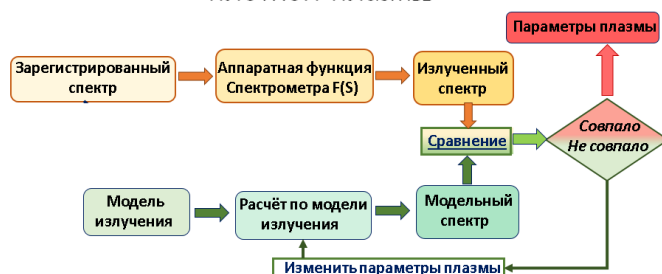
Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, раскрыта новизна работы и её практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматриваются особенности отражательных свойств кристаллов, применяемых для диагностики плотной плазмы. Параграф § 1.1 посвящен описанию рентгеновских фокусирующих спектрометров высоким пространственным разрешением (ФСПР) [5] (рисунок 1(б)), их конфигурации и особенностям применения в экспериментах, проводимых на ПВТ-лазерных комплексах. В **разделе 1.1.3** рассматриваются проблемы обработки измеренных в эксперименте спектров и объясняется необходимость тщательного учета аппаратной функции спектрометра (рисунок 1 (а)), наиболее сложным элементом которой является учет отражательных свойств кристаллов.

В **параграфах § 1.2 и § 1.3** представлены результаты экспериментального исследования особенностей отражательных свойств сферически изогнутых кристаллов слюды и альфа-кварца, широко используемых в качестве диспергирующего элемента ФСПР, в экспериментах с плотной лазерной плазмой. В § 1.2 описана методика диагностики отражательной способности кристаллов, основанная на сравнении рентгеновских эмиссионных спектров лазерной плазмы, регистрируемых с помощью спектрометров, один из которых оборудован прекалиброванным кристаллом, а второй - исследуемым образцом другого кристалла. Такая методика позволила уточнить характер кривой для второго порядка отражения сферически изогнутого кристалла слюды, используемого, в экспериментах, описанных последующих главах. В **разделе 1.2.2** показано, как влияет выбор кривой отражения кристалла на форму и относительные интенсивности восстановленного рентгеновского эмиссионного спектра алюминиевой плазмы (рисунок 2).

(а)

Принцип рентгеноспектральной диагностики плотной плазмы



(б)

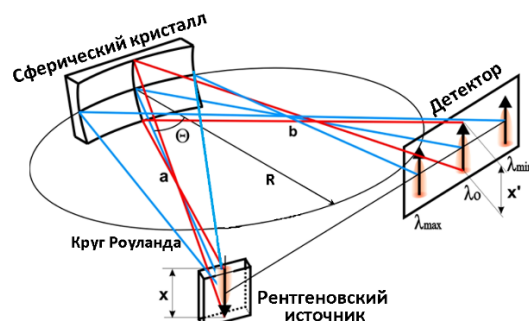


Рисунок 1. (а) Блок-схема, иллюстрирующая принцип рентгеноспектральной диагностики плотной лазерной плазмы; (б) Схема рентгеновского спектрометра ФСПР.

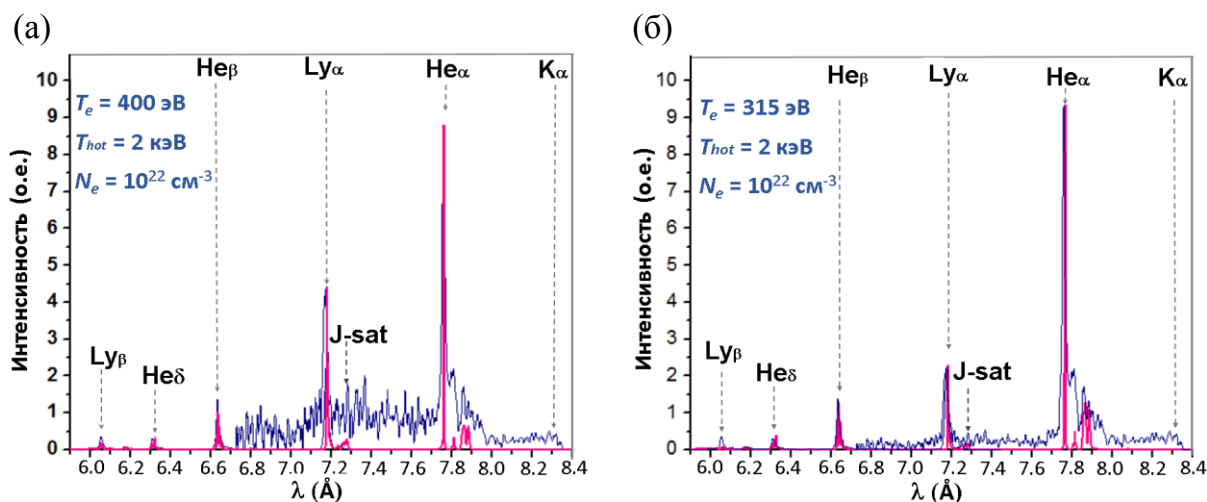


Рисунок 2. Эмиссионные рентгеновские спектры Al плазмы, восстановленные с помощью, уточненной (б) и рассчитанной в рамках общей теории дифракции (а) кривых отражения кристалла слюды, и результаты моделирования FLYCHK.

Из рисунка видно, что выбор кривой отражения, с уточнением для случая сферически изогнутого кристалла слюды, позволяет на 20 % точнее определить электронную температуру плазмы.

В § 1.3 описан способ высокоточного ($\Delta E \sim 0.6$ эВ) измерения положения минимума кривой отражения сферически изогнутого кристалла альфа-кварца (рисунок 3) с тетрагональной решеткой (1010). Положение минимума кривой отражения определялось на основе сравнения спектров рентгеновского излучения Al, Si и Fe лазерной плазмы, за счет точной калибровки дисперсионной кривой и составило $\lambda(\text{SiO}_2)_{\text{min.}} = 6.7175$ Å.

На измеренных в эксперименте спектрах впервые был зафиксирован пик (рисунок 3(а)), отвечающий резкому росту отражательной способности сферически изогнутого кристалла альфа-кварца, наблюдаемому в узкой спектральной полосе вблизи К-края поглощения кремния.

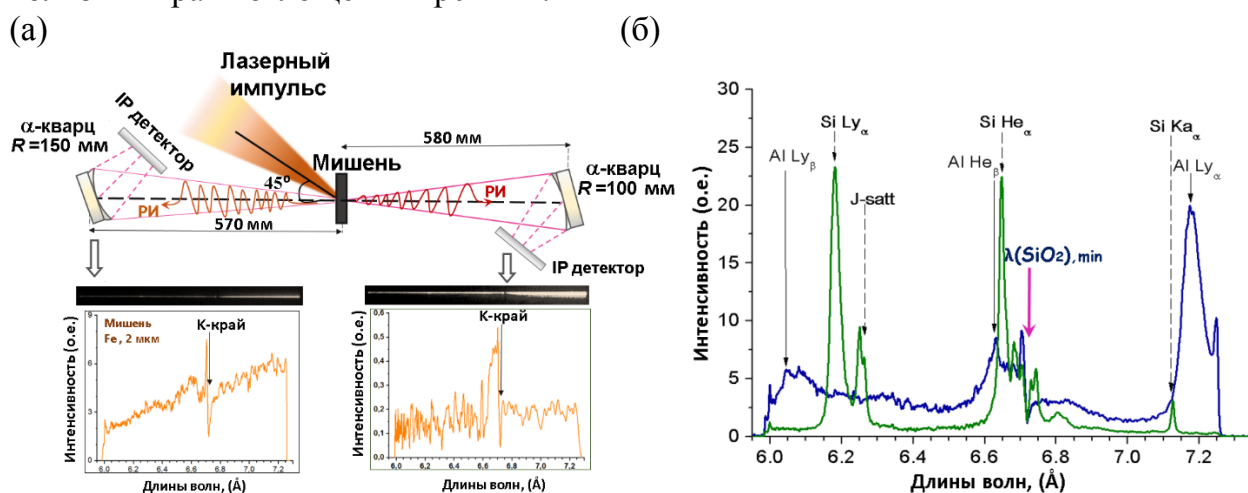


Рисунок 3. (а) Детальная схема регистрации спектров рентгеновского излучения плотной лазерной плазмы, с помощью ФСПР, оборудованных кристаллами альфа-кварца; (б) измерение положения минимума кривой отражения сферически изогнутого кристалла альфа-кварца по эмиссионным спектрам Al и Si плазмы.

В разделе 1.3.3 приводится сравнение выполненных измерений с результатами расчета для кривой отражения кристалла кварца, выполненного в рамках общей теории дифракции, и с измерения кривой поглощения кристалла, выполненными методом исследования тонкой структуры (XANES) (рисунок 4). Измеренный в эксперименте минимум кривой отражения соответствуют значению максимума К-края поглощения кремния, измеренного при помощи XANES.

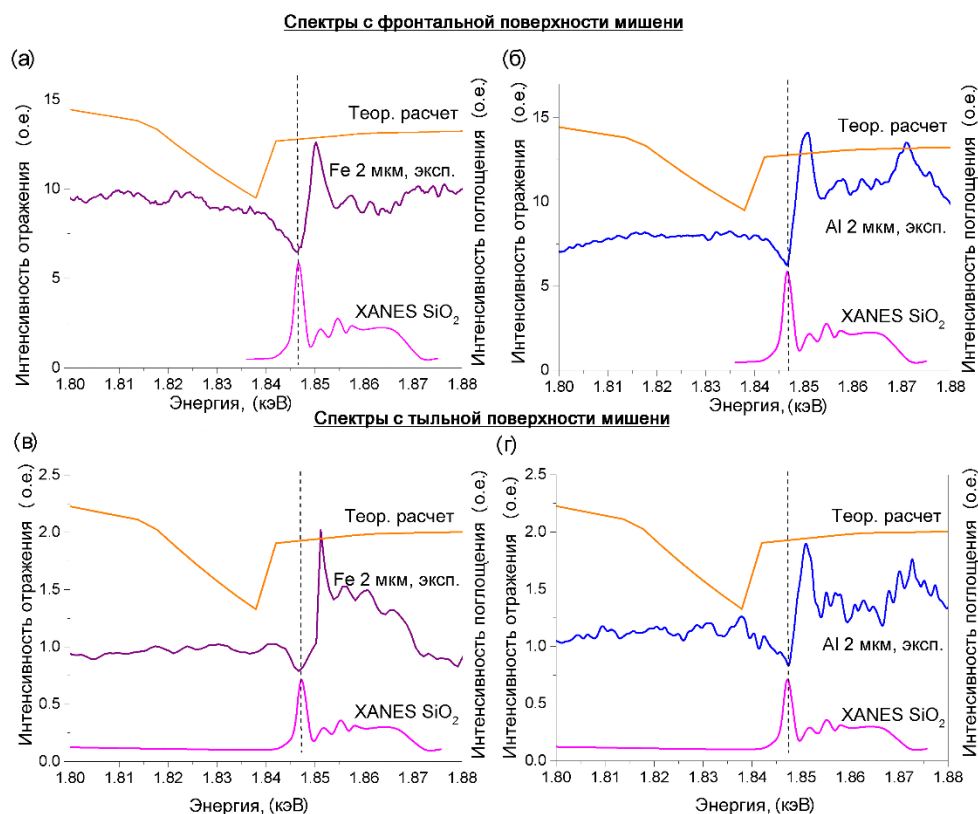


Рисунок 4. Сравнение измеренных в эксперименте спектров, с кривой отражения, рассчитанной в рамках общей теории дифракции [6], и кривой для поглощения кремния в составе кристалла альфа-кварца, измеренной методом XANES [7].

Глава 2 посвящена исследованию эмиссионных свойств лазерной плазмы - как рентгеновского источника, формируемого фемтосекундными лазерными импульсами при облучении стальных мишеней. В параграфе 2.1 приводится описание лазерной системы установки J-KAREN-P (QST, KPSI, Япония) [8], а также подробно рассмотрена двухканальная диагностическая схема, разработанная для проведения рентгеноспектральных измерений на данной установке. В параграфах § 2.2 и § 2.3 представлены результаты серии экспериментов, проведенных на лазерном комплексе J-KAREN-P. Параграф 2.2 посвящен исследованию зависимости рентгеновской эмиссии из плазмы стали от интенсивности лазерного импульса на поверхности мишени. Схема регистрации эмиссионных спектров стали представлена на рисунке 5. Лазерный импульс с длиной волны $\lambda = 800$ нм и энергией $E_{lt} \approx 10$ Дж фокусировался под углом 45° к нормали к поверхности стальной мишени (AISI 304, толщина $h = 5$ мкм) в фокальное пятно диаметром $d = 1.5$ мкм. Плотность потока лазерного излучения на мишени достигала

$I_{lt} \approx 3 \times 10^{21}$ Вт/см². При помощи двух спектрометров ФСПР, в эксперименте за одну лазерную вспышку, регистрировались рентгеновские эмиссионные спектры, испускаемые с передней (облучаемой лазером) и тыльной поверхности мишени одновременно (рисунок 6). Проинтегрировав измеренные спектры в диапазоне длин волн $\lambda = 1.7 - 2.1$ Å, удалось зафиксировать сильно нелинейный рост рентгеновской эмиссии плазмы с увеличением лазерной интенсивности на поверхности мишени (рисунок 7).

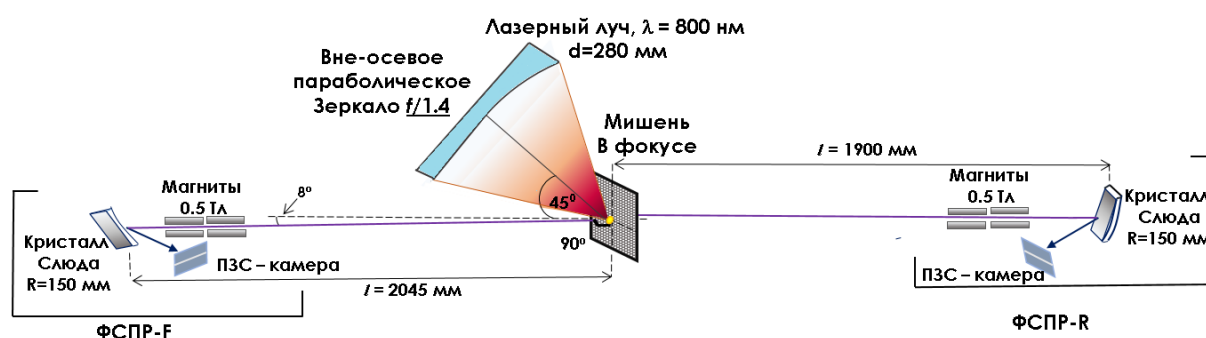


Рисунок 5. Схема регистрации спектров рентгеновского излучения стали в экспериментах на установке J-KAREN-P.

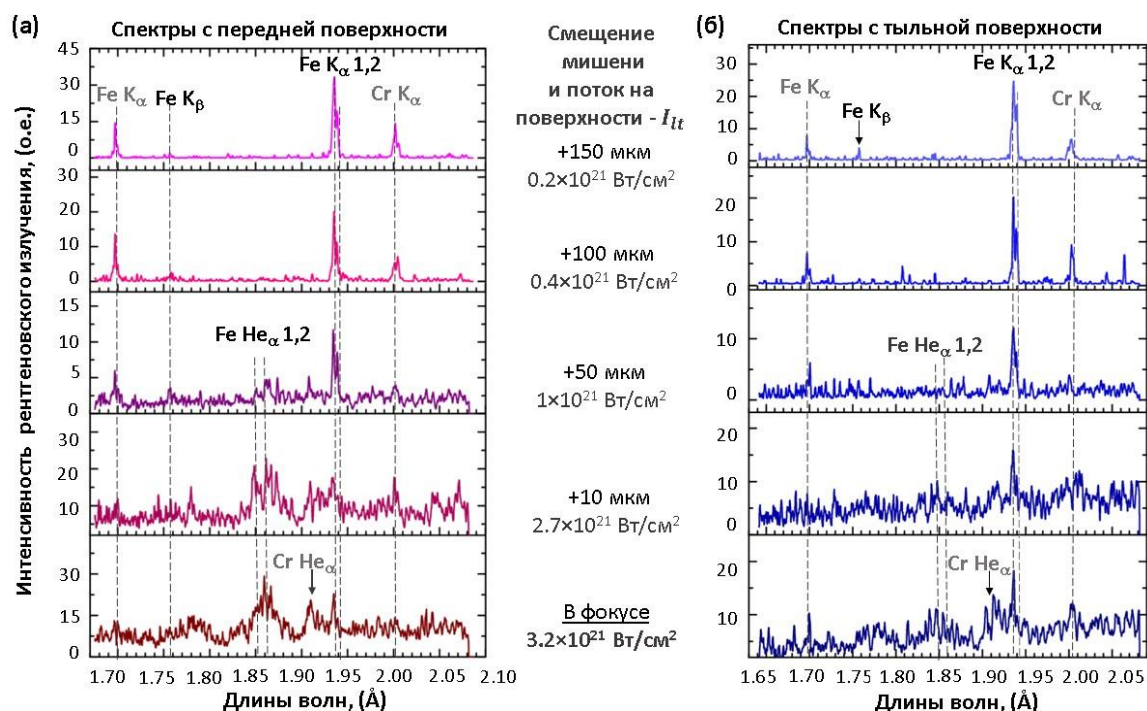


Рисунок 6. Спектры рентгеновского излучения лазерной плазмы, испускаемые из стальных фольг толщиной 5 мкм при облучении их фемтосекундными ($\tau \sim 40$ фс) лазерными импульсами с энергией $E_{lt} \approx 10$ Дж, при различных значениях лазерной интенсивности на мишени. (а) спектры, эмитируемые с передней и (б) тыльной поверхности мишени, измеренные для одной и той же лазерной вспышки.

В разделе 2.2.3 детально рассмотрен метод оценки объемной электронной температуры плазмы по наклону непрерывной части измеренного спектра, в случае, когда вклад в измеренный спектр дают различные порядки отражения кристалла слюды.

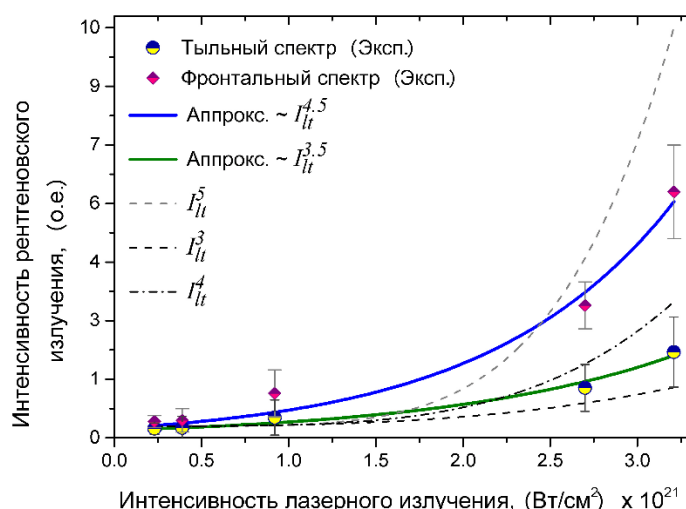


Рисунок 7. Полная интенсивность рентгеновского излучения, как функция различных значений лазерной интенсивности на поверхности мишени — I_{lt} . Значения интенсивности рентгеновского излучения получены путем интегрирования спектральных данных в диапазоне длин волн 1.7 – 2.1 Å.

Таблица 1. Оценка объемной электронной температуры плазмы (T_e) в зависимости от лазерной интенсивности на поверхности мишени (I_{lt}) для случая «нормального» лазерного контраста.

Смещение мишени l_f (мкм)	0	10	50	100	150
I_{lt} ($\times 10^{21}$ Вт/см ²)	3.2	2.7	0.9	0.4	0.2
Передняя пов. мишени, T_e (эВ)	850(±50)	780(±40)	320(±40)	160(±50)	140(±50)
Тыльная пов. мишени, T_e (эВ)	450(±50)	400(±40)	210(±40)	160(±50)	140(±50)

В параграфе § 2.3 обсуждается влияние временного лазерного контраста на формирование спектров многозарядных ионов. На рисунке 8 приведены спектры излучения стальной плазмы, наблюдаемые с передней поверхности мишени, для случая «низкого» $K_{laser} \sim 10^{5-6}$ и «нормального» $K_{laser} \sim 10^{10}$ лазерного контраста.

Не смотря на сохраняющуюся величину интенсивность лазерного импульса $I_{lt} \approx 3 \times 10^{21}$ Вт/см² и большую энергию лазерного импульса (рисунок 8 (а)), в спектрах, измеренных для случая «низкого» контраста, отсутствуют линии излучения многозарядных ионов железа и хрома. Это сделало невозможным измерение параметров плазмы по линейчатой части спектра, но позволило оценить объемную электронную температуру плазмы по наклону непрерывной части спектра.

В разделе 2.3.3 приведены зависимости эмиссии рентгеновского излучения стальной от величины лазерной интенсивности на поверхности мишени (рисунок 9), а также представлены оценки для объемной электронной температуры плазмы (Таблица 2). Таким образом, показано, что спектры рентгеновского излучения позволяют увидеть эффект улучшения лазерного контраста, который

диагностируется по появлению на спектрах новых компонент, соответствующих переходам в многозарядных ионах железа и хрома и росту их относительной интенсивности.

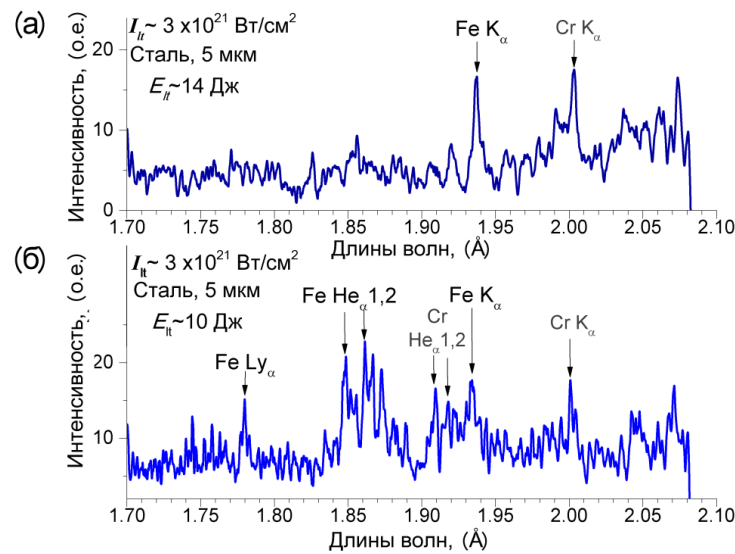


Рисунок 8. Спектры рентгеновского излучения, испускаемого стальными фольгами, при облучении их фемтосекундными ($\tau \approx 40$ фс) лазерными импульсами (а), при «низком» лазерном контрасте $\sim 10^{-6}$; (б) при «нормальном» контрасте $\sim 10^{10}$.

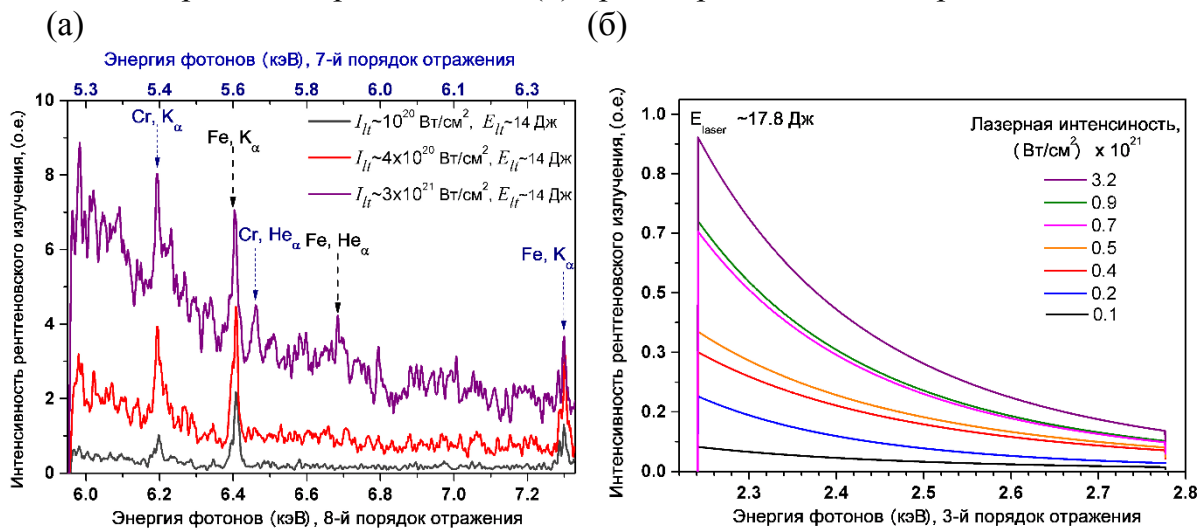


Рисунок 9. Эмиссионные рентгеновские спектры плазмы стали (а), измеренные за одну лазерную вспышку, и (б) оценка вклада тормозного излучения, приходящего из третьего порядка отражения кристалла слюды, в измеренные спектры, в зависимости от интенсивности лазерного импульса.

Таблица 2. Оценка объемной электронной температуры плазмы (T_e) в зависимости от лазерной интенсивности на поверхности мишени (I_{lt}), для случая «низкого» лазерного контраста.

I_f (мкм)	-25	0	25	50	75	125	175
$I_{lt} (\times 10^{21} \text{ Вт/см}^2)$	0.7	3.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1
Передняя пов. мишени	520	620	330	240	210	160	120
T_e , (эВ)	(± 50)	(± 50)	(± 40)	(± 50)	(± 40)	(± 50)	(± 50)

В третьей главе приводятся результаты измерения параметров плотной лазерной плазмы, образованной при облучении стальных фольг фемтосекундными лазерными импульсами, с умеренной $\sim 5 \times 10^{19}$ Вт/см² и релятивистской $\sim 3 \times 10^{21}$ Вт/см² интенсивностями. Измеренные в эксперименте спектры сравниваются с результатами атомно-кинетических расчетов для спектров излучения многозарядных ионов железа и хрома. В § 3.1 обсуждается выбор модели излучения плазмы для рассматриваемых экспериментальных условий и приводится краткое описание программных пакетов, используемых для моделирования. В разделе 3.1.1 описана концепция «нескольких плазменных зон», ранее предложенная в работе [4], и позволяющая наиболее точно описать измеренный в эксперименте спектр, являющийся интегрированным по времени и пространству.

Параграф 3.2 посвящен определению параметров плазмы на основе сравнения измеренных в эксперименте спектров (рисунок 10 (а)) и результатов моделирования, выполненного с помощью радиационно-столкновительного кода FLYCHK [9,10]. В разделе 3.2.2 показано, что спектр, измеренный в эксперименте с умеренным значением лазерной интенсивности на мишени, может быть описан одним набором термодинамических параметров плазмы: $T_e = 10(\pm 3)$ эВ – электронная температура плазмы, и электронная плотность плазмы – $N_e = 1 \pm (0.2) \times 10^{23}$ см⁻³ с учетом 1% горячих электронов (рисунок 10 (б)).

В разделе 3.2.3 показано, что спектр, измеренный в эксперименте с релятивистской лазерной интенсивностью, имеет более сложную структуру (рис 10(а)), и для его описания необходимо применять концепцию нескольких плазменных зон, схематично представленных на рисунке 11(а). Каждая из зон отвечает определенной области плазмы и дает свой вклад в линейчатый спектр. Зона 1 – область взаимодействия основного лазерного импульса с мишенью, размер которой порядка диаметра фокального пятна. Плазма в Зоне 1 характеризуется наиболее высокой температурой, порядка нескольких кэВ, и высокой степенью ионизации, а ее электронная плотность, как правило, равна критической. Зоны 2 и 3 располагаются по мере возрастания расстояния до оси лазера – r . Они лежат на периферии фокального пятна, и несколько глубже в слоях мишени и нагреваются небольшими потоками лазерного излучения, быстрыми электронами и рентгеновским излучением из центральной зоны. Введение таких 3-х зон служит ступенчатой аппроксимацией для монотонной функции изменения электронной температуры плазмы – $T_e(r)$. Зона 1 соответствует излучению линий гелиоподобного железа и хрома, в то время как Зона 2 необходима для описания переходов в Li, Be, и В-подобных ионах, линии излучения которых располагаются на правом крыле Fe He $_{\alpha}$, а Зона 3 – соответствует линиям излучения наиболее холодной области плазмы, таким как: Fe K $_{\alpha}$, K $_{\beta}$ и Cr K $_{\alpha}$.

Однако, эмиссия Li, Be- и В-подобных сателлитов сильно чувствительна к температуре плазмы (рисунок 12(а)), поэтому Зона 2 рассматривалась как две подзоны 2.1 и 2.2 с температурами $T_{e2.1} > T_{e2.2}$ и электронной плотностью близкой к твердотельной ($N_1 < N_{e2.1} \sim N_{e2.2} < N_{e,solid}$) (рисунок 12 (б)).

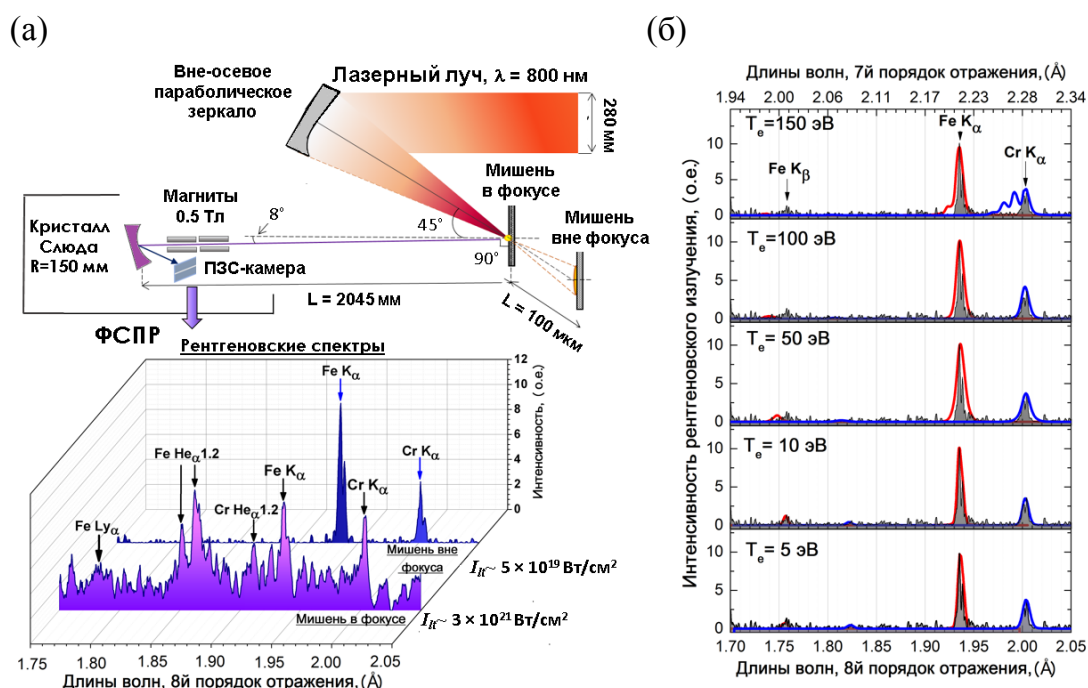


Рисунок 10. (а) Схема эксперимента и спектры рентгеновского излучения стали, зарегистрированные на ПЗС-камеру в случаях умеренной и релятивистской лазерной интенсивности на мишени; (б) Модельные спектры излучения стали при разных значениях электронной температуры плазмы, рассчитанные для $N_e = 10^{23}$ см $^{-3}$ и линейного размера плазмы в направлении наблюдения $d \sim 2$ мкм. Концентрация горячих электронов с температурой 10 кэВ в плазме составляет 1%.

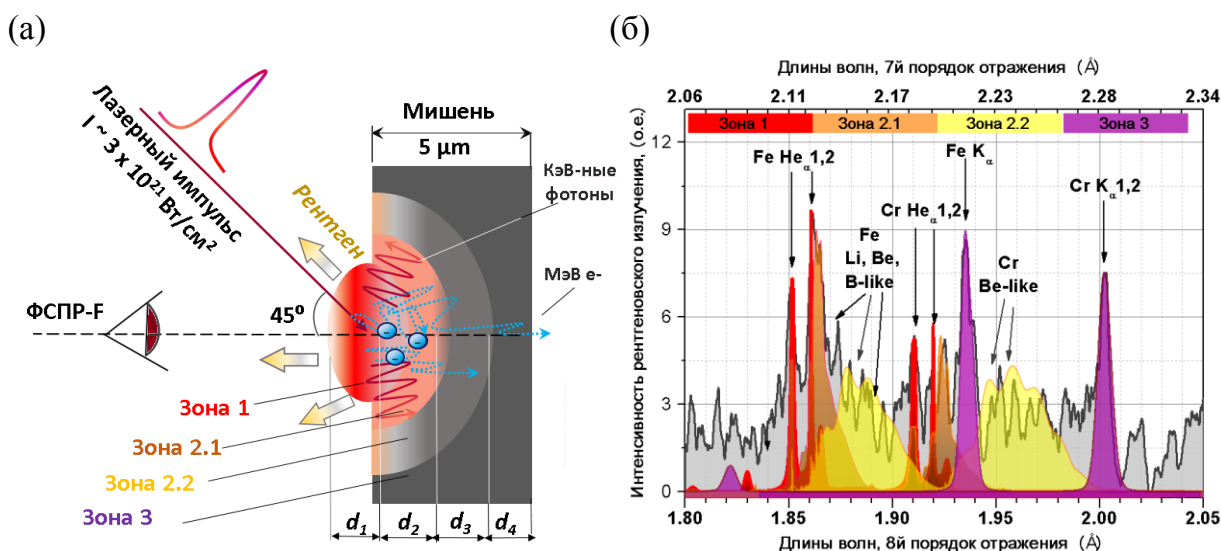


Рисунок 11. (а) Схема взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса со стальной мишенью. (б) Вклады различных плазменных зон в наблюдаемый рентгеновский эмиссионный спектр стали, рассчитанные для параметров, представленных в таблице 3.

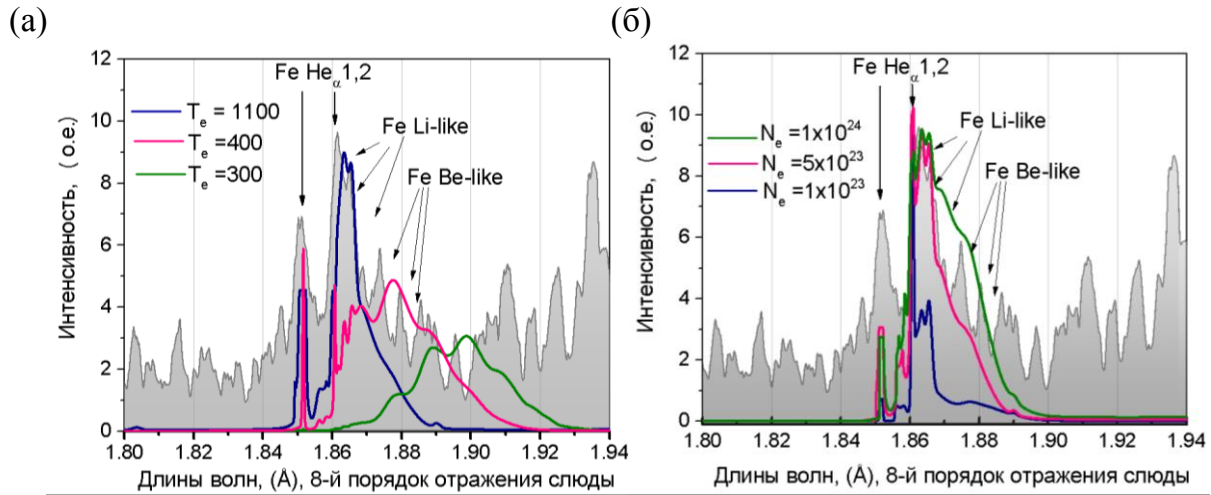


Рисунок 12. (а) Эмиссионный спектр железа, рассчитанный при фиксированных значениях: $N_e = 5 \times 10^{23} \text{ см}^{-3}$, $d = 2 \text{ мкм}$ и различных электронных температурах. (б) Эмиссионный спектр железа, рассчитанный при фиксированных значениях: $T_e = 900 \text{ эВ}$, $d = 2 \text{ мкм}$ и различных значений электронной плотности плазмы. В расчеты включалась 1% -ая доля горячих электронов с $T_{hot} = 10 \text{ кэВ}$.

В разделе 3.2.5 продемонстрировано, что Спектр, измеренный в втором эксперименте, когда $I_{lt} \sim 3 \times 10^{21} \text{ Вт/см}^2$, может быть описан только при использовании концепции нескольких плазменных зон. Сравнение моделирования и измеренного в эксперименте спектра приведено на рисунке 11(б), а параметры плазмы, рассчитанные для каждой из плазменных зон, даны в таблице 3.

Таблица 3. Параметры плазмы, используемые в модельных расчетах для зон 1 – 3.

Зона	1	2.1	2.2	3
$N_e (\text{см}^{-3})$	$5(\pm 0,1) \times 10^{22}$	$5(\pm 0,2) \times 10^{23}$	$5(\pm 0,2) \times 10^{23}$	$1(\pm 0,2) \times 10^{23}$
$T_e (\text{эВ})$	$2100(\pm 40)$	$1100(\pm 20)$	$300(\pm 20)$	$10(\pm 3)$
$d (\text{мкм})$	2	1.5	1.5	1.5
$T_{hot} (\text{кэВ})$	1%, 10 кэВ	1%, 10 кэВ	1%, 10 кэВ	1%, 10 кэВ

Значение электронной плотности, определенное для наиболее горячей области плазмы (Зона 1), соответствует значению для релятивистской критической плотности плазмы [11]:

$$N_{cr.rel} = \frac{(\pi a/4) m_e \omega^2}{4\pi e^2} \quad \text{где } a = \lambda (\text{мкм}) \left[\frac{I(\text{Вт/см}^2)}{1.37 \times 10^{18}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

и более чем в 30 раз превышает значение для критической электронной плотности $N_{cr} [\text{см}^{-3}] \approx 10^{21} \cdot \lambda^{-2} [\text{мкм}] \sim 1.7 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, в эксперименте впервые наблюдался эффект поглощения основного лазерного импульса областью плазмы с релятивистской критической электронной плотностью.

Глава 4 посвящена диагностике экзотического состояния вещества с большой концентрацией полых ионов [12,13]. Параграф § 4.1 содержит информацию о типах полых ионах, наблюдаемых в эмиссионных спектрах лазерной плазмы и их

механизмах возбуждения, основным из которых является рентгеновское излучение (рисунок 13). **Параграфы § 4.2 и § 4.3** посвящены диагностике мощного рентгеновского источника, формируемого при воздействии высокоинтенсивных ($I_{\text{л}} \geq 10^{20}$ Вт/см²) лазерных импульсов пико- и фемтосекундной длительности на Al ($Z = 13$) и Si ($Z = 14$) мишени. Идентификация радиационного источника и его анализ проводились по рентгеновским спектрам, содержащим линии, отвечающие переходам в полых ионах.

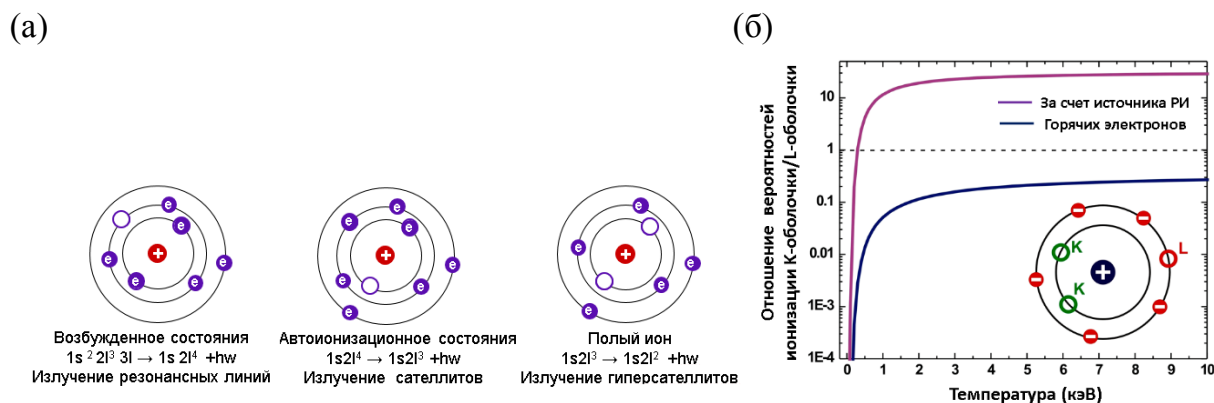


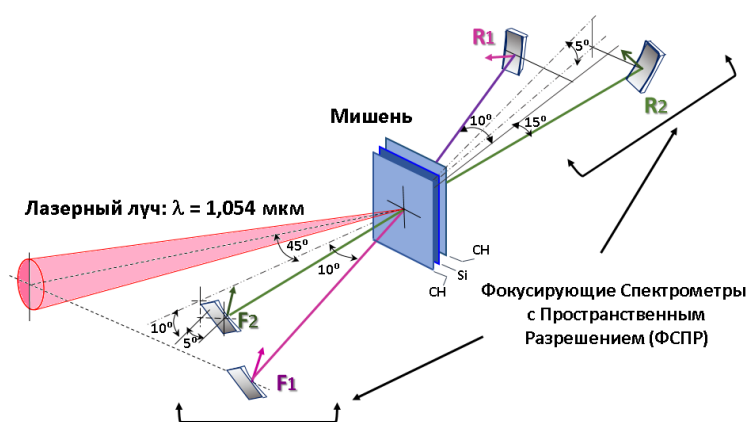
Рисунок 13. (а) Структура электронных оболочек, возбужденного, автоионизационного и полого состояния иона. (б) Вероятность формирования состояния КК-полого иона под действием источника горячих электронов либо внешнего источника рентгеновского излучения.

В § 4.2 приводится сравнение измеренных в эксперименте, проводимом на установке Vulcan PW (CLF, RAL, Великобритания)[14] (рисунок 14(а)), эмиссионных спектров Si плазмы с моделированием, выполненным с помощью кода ATOMIC [3,15], при включении в расчёт внешнего радиационного источника излучения (рисунок 16). Это впервые позволило обнаружить новый тип полых ионов, у которых не только удалены два электрона с внутренней К-оболочки, но и внешние электроны возбуждены в состояние $n > 2$. Такие полые ионы получили название — Ридберговские полые ионы, поскольку их линии излучения лежат в спектральной области между линиями резонансных переходов ($\text{Ly}\beta$, $\text{He}\beta$) ридберговской серии (рисунок 15). Принцип формирования состояний полых ионов в результате действия внешнего рентгеновского источника, возникающего в центральной области плазмы при воздействии мощного ПВт-лазерного импульса пикосекундной длительности представлен на рисунке 14 (б).

В результате полевой ионизации, электроны в центральной области плазмы (область фокального пятна лазера) ускоряются до МэВ-ных энергий, часть из них осциллирует сквозь толщину мишени и испускает рентгеновское излучение различной степени жесткости. Такое рентгеновское излучение поглощается в слоях мишени и может приводить к возбуждению состояний полых ионов в периферийных областях мишени, если мощность источника не ниже 10^{17} Вт/см² [1,16,17]. Механизмы, приводящие к формированию мощного рентгеновского источника, включают в себя как томсоновское рассеяние падающего и рассеянного

лазерного излучения, так и тормозное излучение в плазменном поле на границе фольги.

(а)



(б)

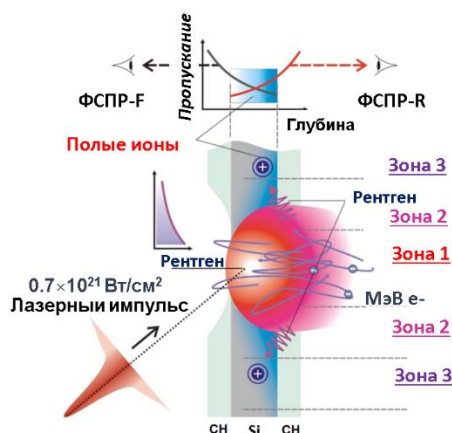


Рисунок 14. (а) Схема измерения спектров рентгеновского излучения в экспериментах, проводимых на петаваттном лазерном комплексе Vulcan PW; (б) Схема создания состояний полых ионов под действием рентгеновского источника, формируемого при облучении CH(0.5 мкм)-Si(2 мкм)-CH(0.5 мкм) сэндвич-мишени оптическими лазерными импульсами пикосекундной длительности и наблюдение спектров полых ионов с обеих сторон мишени.

(а)

(б)

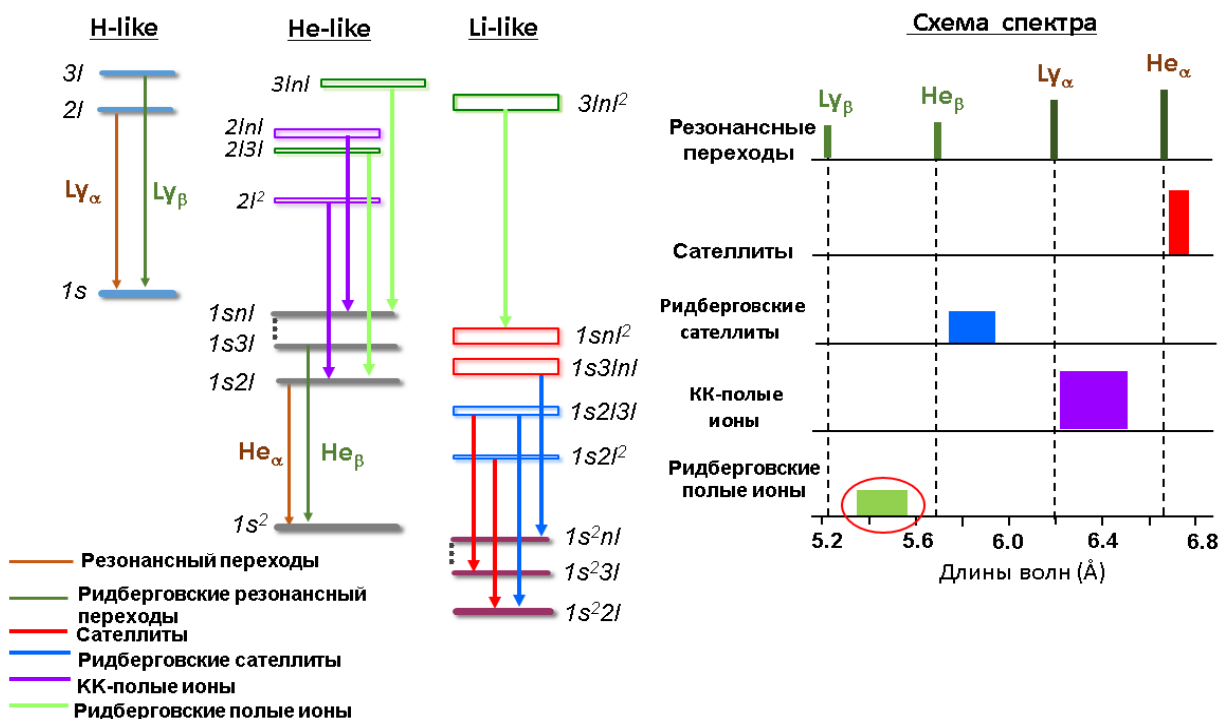


Рисунок 15. Схема расположения линий КК-полых ионов и линий Ридберговских полых ионов в спектре от Н-подобного до Li- подобного ионов кремния. (а) схема спектроскопических переходов. (б) Диаграмма расположения линий в спектре.

Излучение Ридберговских и КК-полых ионов наблюдалось в основном на спектрах с тыльной поверхности мишени (рисунок 16). Параметры плазмы, используемые в модельных расчётах, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры плазмы, используемые в модельных расчетах.

Спектр с фронтальной поверхности			
Зона	1	2	3
T_e (эВ)	550	180	-
N_e (см ⁻³)	10^{22}	3×10^{23}	3×10^{23}
T_{hot} (кэВ), %	10 кэВ, 1 %	10 кэВ, 1 %	10 кэВ, 1 %
T_{rad} (кэВ)	-	2	3
Спектр с тыльной поверхности			
T_e (эВ)	400	90	10
N_e (см ⁻³)	10^{22}	3×10^{23}	3×10^{23}
T_{hot} (кэВ), %	10 кэВ, 1 %	10 кэВ, 1 %	10 кэВ, 1 %
T_{rad} (кэВ)	-	2	3

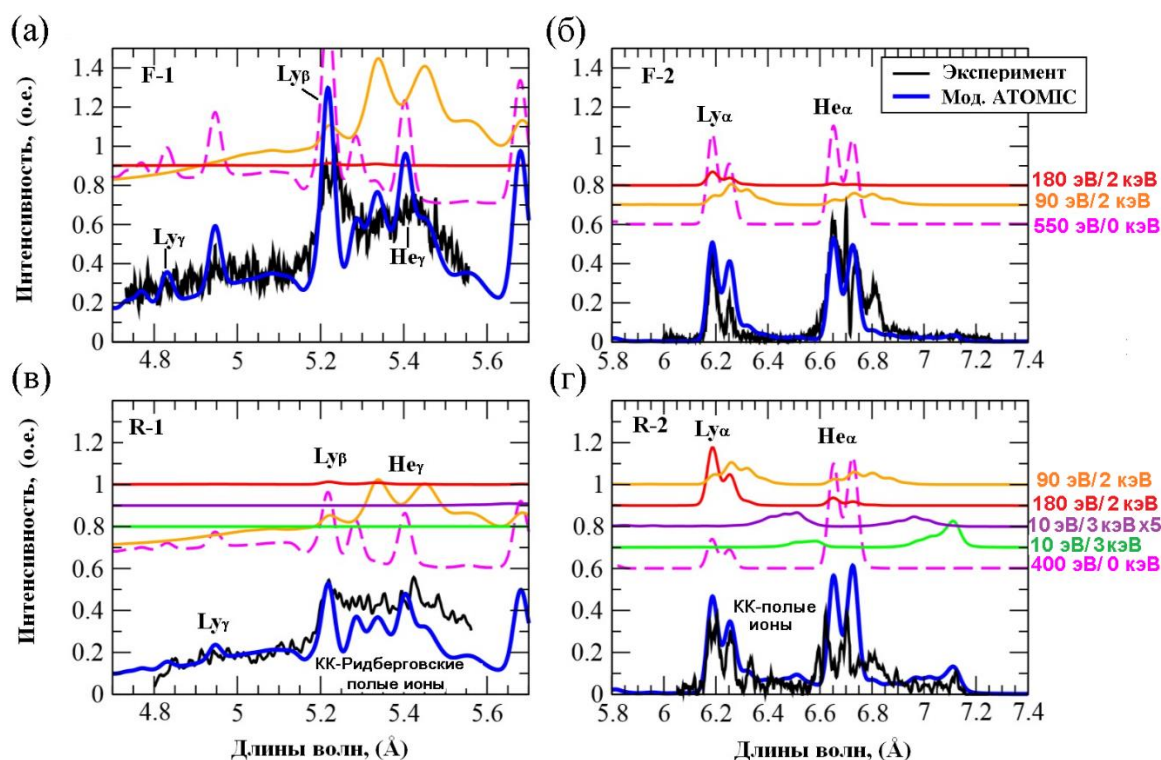


Рисунок 16. Сравнение измеренных в эксперименте спектров рентгеновского излучения и модельного расчета, выполненного с помощью программы АТОМИС в концепции трех плазменных зон.

Параграф 4.3 посвящен диагностике мощного рентгеновского источника, формируемого при воздействии высокоинтенсивных ($I_t \geq 10^{20}$ Вт/см²) лазерных импульсов фемтосекундной длительности на тонкие (0.8 мкм) Al мишени. Результаты эксперимента, выполненного на установке PEARL (ИНФ РАН,

г. Нижний Новгород) сравниваются с результатами моделирования, выполненного при помощи кода ATOMIC в концепции «трех плазменных зон» (рисунк17(а)).

Только учет внешнего радиационного источника, с характерной температурой $T_{rad} \sim 1.5$ кэВ, позволил описать измеренный в эксперименте спектр. Параметры плазмы, используемые в расчётах приведены в таблице 5. При этом удалось продемонстрировать, что излучение линий КК-полых ионов сильно зависит от температуры радиационного источника, и может быть использовано для ее определения с высокой точностью ($\Delta T_{rad} \sim 0.1$ кэВ).

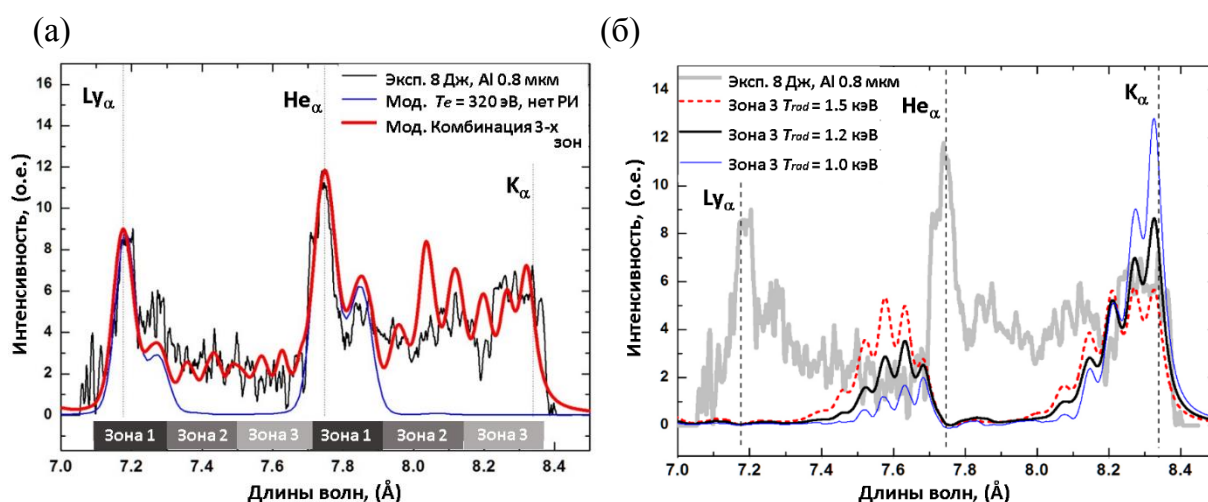


Рисунок 17. (а) Характерная спектрограмма, полученная на установке PEARL при использовании мишени из алюминиевой фольги. Отмечены резонансные линии Н- и He- подобных ионов алюминия, линия K_{α} и указаны спектральные области, содержащие переходы в КК- и KL- полых ионах алюминия; (б) Зависимость эмиссии плазмы из пространственной от температуры внешнего рентгеновского источника.

Таблица 5. Параметры плазмы, используемые в модельных расчетах.

Зона	1	2	3
N_e , (см ⁻³)	1.7×10^{22}	3×10^{23}	3×10^{23}
T_e , (эВ)	315	60	5
T_{rad} , (кэВ)	-	1.5	1.2

Заключение

В диссертационной работе с помощью методов рентгеновской диагностики исследован ряд особенностей, характерных для мощного источника рентгеновского излучения, формируемого при облучении твердотельных фольг с атомным номером $Z \sim 15 - 25$ ультракороткими лазерными импульсами петаваттной мощности. На основе эмиссионных рентгеновских спектров лазерной плазмы были исследованы особенности отражательных свойств сферически изогнутых кристаллов слюды и альфа-кварца, в результате чего была предложена методика уточнения кривой

отражения кристалла, основанная на использовании лазерной плазмы как источника рентгеновского излучения и дополнительного кристаллического спектрометра с заранее измеренными характеристиками используемого в нем кристалла. На основе предложенной методики, получена кривая для второго порядка отражения сферически-изогнутого кристалла слюды.

На основе сравнения спектров рентгеновского излучения плотной лазерной плазмы, регистрируемых спектрометрами с высоким пространственным разрешением ($\lambda/\Delta\lambda \sim 3000$), было проведено измерение положения минимума кривой отражения кристалла альфа-кварца с тетрагональной кристаллической решеткой (1010). Полученные значения для минимума кривой отражения равно $\lambda(\text{SiO}_2)_{\min} = 6.7175 \text{ \AA}$. При этом, был обнаружен эффект резкого роста отражательной способности кристалла α -кварца в спектральной полосе шириной $\Delta\lambda_{\text{pic}} \sim 0.0183 \pm 0.0002 \text{ \AA}$, вблизи коротковолновой границы К-края поглощения кремния. Показано, что этот эффект не зависит от геометрии кристалла: его размеров, радиуса кривизны, и не зависит от материала облучаемой лазером мишени, но по-видимому, связан с интенсивностью потока рентгеновских фотонов, падающего на поверхность кристалла, которая в данных экспериментальных условиях превышала 10^{11} Вт/см^2 .

Исследования рентгеновского излучения, эмитируемого из стальных фольг ($Z \sim 25$), при облучении их фемтосекундными лазерными импульсами ПВТ-мощности показали, что мощность излучения и спектральный состав рентгеновского источника сильно меняется при изменении таких параметров лазерного импульса как плотность потока лазерного излучения на мишени, в диапазоне $I_{\text{lt}} \sim 1 \times 10^{20} - 3 \times 10^{21} \text{ Вт/см}^2$ и величина лазерного контраста $K_{\text{laser}} \sim 10^6 - 10^{10}$.

Впервые в экспериментах с фемтосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности показано, что энергия основного лазерного импульса поглощается областью плазмы с релятивистской критической плотностью, что позволило в условиях данного эксперимента, получить плазму с температурой $2100(\pm 40) \text{ эВ}$ и плотностью $N_{\text{cr. rel.}} \approx 5 \times 10^{22} \text{ см}^3$, более чем в 30 раз превышающей значение критической плотности для длины волны лазерного излучения $\lambda = 800 \text{ нм}$, т.е. реализовать эффект релятивистского просветления плазмы.

В рентгеновских спектрах лазерной плазмы, образованной при облучении тонких кремниевых сэндвич-мишеней пикосекундными лазерными импульсами ПВТ-мощности ($I_{\text{lt}} \sim 3 \times 10^{20} \text{ Вт/см}^2$), в диапазоне длин волн $\lambda = 5.2 - 5.5 \text{ \AA}$ впервые были зарегистрированы линии, соответствующие переходам в полых ионах нового типа, получившим название — Ридберговские полые ионы.

Показано, что сверхяркий источник рентгеновского излучения, с плотностью потока $I_{\text{x-ray}} \sim 10^{18} \text{ Вт/см}^2$ может быть сформирован, при воздействии на тонкие фольги с атомным номером $Z \sim 15$, как пико- так и фемтосекундных лазерных импульсов, если плотность потока лазерного излучения на мишени $I_{\text{lt}} \geq 3 \times 10^{20} \text{ Вт/см}^2$. Наличие мощного источника рентгеновского излучения в центральной области плазмы, приводит к формированию экзотического состояния вещества с большой концентрацией полых ионов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. **Алхимова М.А., Фаенов А.Я., Скобелев И.Ю., Пикуз С.А.**, Определение кривой отражения сферически изогнутого кристалла слюды, применяемого для диагностики рентгеновского излучения релятивистской лазерной плазмы// КСФ РАН 2016. №10, стр. 3–6.
2. **Пикуз С.А., Скобелев И.Ю., Алхимова М.А., Покровский Г.В., Колган Дж., Пикуз Т.А., Фаенов А.Я., Соловьев А.А., Бурдонов К.Ф., Еремеев А.А., Сладков А.Д., Османов Р.Р., Стародубцев М.В., Гинзбург В.Н., Кузьмин А.А., Сергеев А.М., Фукс Дж., Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Шайкин И.А., Яковлев И. В.**, Формирование плазмы с определяющей ролью радиационных процессов при облучении тонких фольг импульсом суб-петаваттного лазера PEARL// Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики 2017. 105(1), 15–20.
3. **Alkhimova M.A., Faenov A.Ya., Skobelev I.Yu., Pikuz T.A., Nishiuchi M., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Dover N.P., Kondo Ko., Ogura K., Fukuda Y., Kiriyaama H., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Pikuz S.A., Kando M., Kodama R., and Kondo K.**, High resolution X-ray spectra of stainless steel foils irradiated by femtosecond laser pulses with ultra-relativistic intensities // Optics Express 2017. 25(23), 29501–29511.
4. **Faenov A.Ya., Alkhimova M.A., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Nishiuchi M., Sakaki H., A.S. Pirozhko A.S., A. Sagisaka A., Dover N.P., Kondo Ko., Ogura K., Fukuda Y., Kiriyaama H., Andreev A., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Pikuz Jr. S.A., Kando M., Kodama R. and Kondo K.**, The effect of laser contrast on generation of highly charged Fe ions by ultra-intense femtosecond laser pulses// Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2017. 123(7), 197.
5. **Oks, E., Dalimier, E., Faenov, A. Ya., Angelo, P., Pikuz, S. A., Tubman, E., Butler N.M.H., Dance R.J., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Alkhimova M.A., N. Booth N., Green J., Gregory C., Andreev A., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P. and Woolsey N.**, Using X-ray spectroscopy of relativistic laser plasma interaction to reveal parametric decay instabilities: a modeling tool for astrophysics// Optics Express 2017. 25(3), 1958–1972.
6. **Dover N.P., Nishiuchi M., Sakaki H., Alkhimova M.A., Faenov A.Ya., Fukuda Y., Kiriyaama H., Kon A., Kondo K., Nishitani K., Ogura K., Pikuz T.A., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Kando M., and Kondo K.**, Scintillator-based transverse proton beam profiler for laser-plasma ion sources // Review of Scientific Instruments 2017. 88(7), 073304.
7. **Colgan J., Faenov A.Ya., Pikuz S.A., Tubman E., Butler N.M.H., Abdallah J. jr., Dance R.J., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Alkhimova M.A., Booth N., Green J., Gregory C., Andreev A., Lotzsch R., Uschmann I., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P., and Woolsey N.**, Evidence of high-n hollow-ion emission from Si ions pumped by ultraintense x-rays from relativistic laser plasma, // Europhys. Letters 2016. 114(3), 35001.
8. **Alkhimova M.A., S.A. Pikuz, Faenov A.Ya., and I.Yu. Skobelev**, Determination of spectral reflectivity of spherically bent mica crystals applied for diagnostics of relativistic laser plasmas // Journal of Physics: Conference Series 2016. Vol. 744 (1).
9. **Alkhimova M.A., Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A., Nishiuchi M., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka S., Dover N.P., Ko. Kondo, Ogura K., Fukuda Y., Kiriyaama H., Eriskepov T., Bulanov S.V., Andreev A., Kando M., Zhidkov A.**

Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Kodama R. and Kondo K., X-ray emission from stainless steel foils irradiated by femtosecond PW laser pulses// Journal of Physics: Conference Series 2017. Vol. 946, 012018.

10. Dalimier E., Faenov A.Ya., Oks E., Angelo P., Pikuz T.A., Fukuda Y., Andreev A., Koga J., Sakaki H., Kotaki H., Pirozhkov A., Hayashi Y., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A., Kawachi T., Kando M., Kondo K., Zhidkov A., Tubman E., Butler N.M.H., Dance R.J., **Alkhimova M.A.**, Booth N., Green J., Gregory C., McKenna P., Woolsey N. and Kodama R., X-ray spectroscopy of super-intense laser-produced plasmas for the study of nonlinear processes. Comparison with PIC simulations// Journal of Physics: Conference Series 2017. Vol. 810 (1).

11. Nishiuchi M., Kiriya H., Sakaki H., Dover N.P., Kondo K., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Fukuda Y., Nishitani K., Miyahara T., Ogura K., **Alkhimova M.A.**, Pikuz T.A., Faenov A.Y., Watanabe Y., Koga J., Bulanov S.V., Kando M., Kondo K. High Contrast High Intensity Petawatt J-KAREN-P Laser facility at QST. Proceedings of SPIE 10241, UNSP 102410N (2017).

12. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Skobelev I.Yu., Faenov A.Ya., “Determination on spectral reflectivity of spherically bent mica crystals applied for diagnostics on relativistic laser plasmas” // Abstract of XXXI International Conference on Equations of State for Matter, ELBRUS-2016, p.248–249.

13. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Skobelev I.Yu., Faenov A.Ya., Pikuz T.A., “Hollow ions emission from dense laser plasma produced by PW-laser pulses”// тезисы X конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение” (MDPA2016), стр. 231–233.

14. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Tubman E., Colgan J., Faenov A.Ya., Butler N., Dance R., McKenna P., Booth N., Skobelev I.Yu., Zhidkov A.G., N. Woolsey, Exotic dense matter states pumped by ultrabright X-ray source formed by relativistic laser plasma // Abstracts of 43th EPS Conference on Plasma Physics, Leuven, Belgium. 2016. Vol. P.5.118.

15. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Skobelev I.Yu., Faenov A.Ya., “Features in mica and quartz spherically bent crystal reflectivity appeared in experiments with relativistic laser plasma”// Abstracts of Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation, Moscow, GPI RAS, Russia 2016, P. 21.

16. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Tubman E., Colgan J., Faenov A.Ya., Butler N., Dance R., McKenna P., Booth N., Skobelev I.Yu., Zhidkov A.G., N. Woolsey, “Radiation properties of Hollow ions produced by ultrabright X-ray source formed by relativistic laser plasma”// Book of abstracts of 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2016. Moscow, Russia.

17. **Alkhimova M.A.**, Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A., Nishiuchi M., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Dover N.P., Kondo K., Ogura K., Fukuda Y., Kiriya H., Esirkepov T., Bulanov S.V., Kando M., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Kodama R., Kondo K., “Ultra-intense K-shell emission from stainless steel foils irradiated by ultra-intensive femtosecond laser pulses” //Book of abstracts of International conference on extreme light (ICEL-2017), Szeged, Hungary.

18. **Alkhimova M.A.**, Pikuz S.A., Faenov A.Ya., Skobelev I.Yu., Pikuz T.A., Colgan J., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S., Kando M., Kondo K., Kodama R. “Ultra-bright X-ray source generation from thin Al and Fe solid foils irradiated with 200 TW fs laser pulses”//

Тезисы в сборнике докладов III Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии” (ЛаПлаз) 2017, стр. 193.

19. **Alkhimova M.A., Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A., Nishiuchi M., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Dover N.P., Kondo Ko., Ogura K., Fukuda Y., Kiriyaama H., Esirkepov T., Bulanov S.V., Kando M., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Kodama R., Kondo K.** “Generation of x-ray emission and highly charged Fe ions by ultra-intense femtosecond laser pulses” // Abstracts of 44th EPS Conference on Plasma Physics, Belfast, UK. 2017. Vol. P.4.201.

20. **Alkhimova M.A., Pikuz S.A., Faenov A.Ya., Skobelev I.Yu., Pokrovskiy G.V., Pikuz T.A., Colgan J., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S., Kando M., Kondo K., Kodama R.** “Ultra-bright X-ray source generation from thin Al and Fe solid foils irradiated with 200 TW fs laser pulses” // Book of abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, ELBRUS-2017, P.78.

21. **Alkhimova M.A., Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A., Nishiuchi M., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Dover N.P., Kondo Ko., Ogura K., Fukuda Y., Kiriyaama H., Esirkepov T., Bulanov S.V., Kando M., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Kodama R., Kondo K.** “Ultra-bright X-ray source generation from thin Al and Fe solid foils irradiated with 200 TW fs laser pulses” // Abstracts of Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation, Moscow, GPI RAS, Russia 2017.

Список литературы, цитируемой в автореферате

1. Пикуз С.А. и др., Создание экзотических состояний вещества с помощью рентгеновского излучения, генерируемого при фокусировке петаваттного лазерного импульса на // Успехи Физических Наук. 2014. Т. 184, № 7. С. 759–765.

2. Andriyash A.V. et al. Lasers and high energy density physics at the All’Russian Research Institute of Technical Physics (VNIITF) // Uspekhi Fiz. Nauk. 2006. Vol. 176, № 10. P. 1110.

3. Colgan J. et al. Exotic dense-matter states pumped by a relativistic laser plasma in the radiation-dominated regime // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110, № 12.

4. Faenov A.Y. et al. Nonlinear increase of X-ray intensities from thin foils irradiated with a 200 TW femtosecond laser // Sci. Rep., 2015. Vol. 5, P. 13436.

5. Faenov A.Y. et al. High-performance x-ray spectroscopic devices for plasma microsources investigations // Phys. Scr. 1994. Vol. 50, № 4. P. 333–338.

6. CXRO X-Ray Interactions With Matter. URL:http://henke.lbl.gov/optical_constants.

7. Li D. et al. Silicon K-edge XANES spectra of silicate minerals // Springer. 1995. Vol. 22, № 2. P. 115–122.

8. Kiriyaama H. et al. High-contrast, high-intensity petawatt-class laser and applications // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2015. Vol. 21, № 1. P. 232–249.

9. FLYCHK URL: <http://nlte.nist.gov/FLY/>.

10. Chung H.K. et al. The How To For FLYCHK @ NIST. 2008.

11. Nerush E. et al. Laser field absorption in self-generated electron-positron pair plasma // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 106, № 3. P. 035001.

12. Skobelev I.Y. et al. Spectra of hollow ions in an ultradense laser plasma // Uspekhi Fiz. Nauk. 2012. Vol. 182, № 1. P. 49.

13. Hansen S.B. et al. Detailed analysis of hollow ions spectra from dense matter

- pumped by X-ray emission of relativistic laser plasma// Phys. Plasmas. 2014. Vol. 21, № 3.
14. Danson C. et al. Vulcan Petawatt—an ultra-high-intensity interaction facility // Nucl. Fusion., 2004. Vol. 44, № 12. P. 239–246.
15. Hakel P. et al. The new Los Alamos opacity code ATOMIC // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. Pergamon, 2006. Vol. 99, № 1–3. P. 265–271.
16. Zhidkov A.G. et al. Pulse duration effect on the distribution of energetic particles produced by intense femtosecond laser pulses irradiating solids // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8, № 8. P. 3718–3723.
17. Zhidkov A., Sasaki A. Effect of field ionization on interaction of an intense subpicosecond laser pulse with foils // Phys. Plasmas. 2000. Vol. 7, № 5. P. 1341–1344.