

**Московский физико-технический институт
(государственный университет)**

На правах рукописи

УДК 533.9.621.373.8+535 33-32

Медников Константин Николаевич

**Исследование взаимодействия струи благородного газа в
вакууме с лазерной плазмой и лазерным излучением
методами спектроскопии МР диапазона**

Специальность 01 04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



003 160655

Москва – 2007 г.

Работа выполнена на Кафедре квантовой радиофизики
Московского физико-технического института
(государственного университета)

Научный руководитель доктор физико-математических наук
Рагозин Евгений Николаевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук
Бушуев Владимир Алексеевич
кандидат физико-математических наук
Артюков Игорь Анатольевич

Ведущая организация институт спектроскопии РАН, г Троицк

Защита состоится “ ” ноября 2007 года в 10 часов
на заседании Диссертационного совета К 212.156 05 при Московском
физико-техническом институте по адресу
141700, г Долгопрудный Московской обл, Институтский пер, д 9,
Московский физико-технический институт

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан “ ” 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Коршунов С М

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

К мягкому рентгеновскому (МР) диапазону условно относят излучение с длинами волн от 10 Å до 300 Å. И хотя освоение МР диапазона осложнено поглощением в воздухе и отсутствием подходящих материалов для элементов прозрачной оптики и отражающей оптики нормального падения, достигнут значительный прогресс в использовании МР излучения в науке, технике, медицине и других областях.

Интерес к мягкому рентгеновскому диапазону обусловлен несколькими причинами. Во многих случаях МР-излучение предоставляет единственную возможность получения информации об уровнях энергии и краях поглощения многозарядных ионов в лабораторной плазме.

В МР области спектра достигается принципиально более высокое пространственное разрешение, определяемое дифракционным пределом, чем в видимом свете. В связи с этим сейчас все более широкое применение находит рентгеновская микроскопия.

С развитием технологии нанесения тонких пленок и микролитографии появились многослойные рентгеновские зеркала, позволившие создать спектрографы, микроскопы и телескопы нормального падения, ранее существовавшие только в оптическом диапазоне спектра. Появление МЗ делает возможной проекционную рентгеновскую литографию, требующую высокого пространственного разрешения и большой светосилы для передачи изображения большой площади.

Спектроскопия МР диапазона является одним из самых мощных способов диагностики плазмы. Она незаменима в исследованиях

термоядерной плазмы, активной среды рентгеновских лазеров, астрофизической плазмы. Недавним достижением стало появление аперiodических многослойных зеркал, обладающим заданным профилем коэффициента отражения. Был создан спектрограф, обладающий свойствами, присущими ранее только приборам видимого диапазона – высоким разрешением в широком спектральном диапазоне, большой светосилой, пространственным разрешением и большим полем зрения. Актуальной задачей является как расширение области применения таких приборов, так и разработка новых рентгенооптических элементов.

В последние годы импульсная струя (облако) газа, созданная при помощи газового клапана высокого давления, неоднократно использовалась в качестве мишени в лазерно-плазменных экспериментах. Облако газа занимает небольшой объем, что благоприятствует выходу МР излучения. Кроме того, лазерная плазма, получаемая при облучении газовой мишени, имеет малые градиенты электронной плотности по сравнению с твердотельной лазерной плазмой, что уменьшает преломление МР излучения. Все это делает получающуюся плазму перспективной активной средой рентгеновского лазера. Так, струя частично кластеризованного ксенона рассматривается как лазерная мишень для “чистого” (безосколочного) лазерно-плазменного источника МР излучения для проекционной рентгеновской микролитографии, абсорбционной спектроскопии, рефлектометрии и т.п., почти не оказывающего вредного воздействия на окружающую оптику, в отличие от плазмы твердотельной мишени. Взаимодействие мощного лазерного излучения с кластерами представляет значительный интерес как источник специфической высокотемпературной плазмы и высокоэнергетических частиц, фотонов и т.п. В связи с этим в последнее время приобретает актуальность задача по экспериментальному определению характеристик

и теоретическому моделированию импульсной струи (в том числе сверхзвуковой) благородного газа в вакууме

Говоря о других применениях импульсной струи газа, отметим работы по генерации высоких гармоник лазерного излучения, спектр которых простирается в МР диапазон до ~ 10 нм и короче, а также сравнительно давно ведущиеся работы по созданию лазеров МР–ВУФ диапазона на переходах многозарядных Ne-, N₁-, Pd-подобных ионов, возбуждаемых излучением лазеров

Другим возможным механизмом создания инверсной среды рентгеновского лазера является заселение верхних уровней многозарядных ионов в результате перезарядки их на нейтральных атомах. Интерес к этому процессу обусловлен тем, что сечение перезарядки относительно велико и процесс носит квазирезонансный характер, то есть происходит селективное заселение некоторых уровней и ион как правило оказывается в возбужденном состоянии

Высказана гипотеза о том, что сравнительно недавно обнаруженное мягкое рентгеновское излучение комет возникает при перезарядке многозарядных ионов солнечного ветра на составляющих хвостов комет

Сечение перезарядки неоднократно измерялось в пучковых экспериментах, однако при этом остается неизвестным распределение образующихся продуктов реакции по уровням. Спектроскопические наблюдения перезарядки позволяют это сделать по переходам многозарядных ионов в МР области. В немногочисленных имеющихся спектроскопических экспериментах процессы перезарядки связывают с появлением или увеличением интенсивности отдельных спектральных линий в плазме, что, однако, может быть связано и с другими процессами, или сравнивают измерения с результатами численного моделирования

Таким образом, исследование перезарядки многозарядных ионов является актуальной научной задачей

Цели работы

Основными целями работы являлись

- Измерение распределения плотности в импульсной струе ксенона в вакууме,
- исследование и оптимизация безосколочного лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемого в импульсной струе ксенона при фокусировке пучка Nd лазера;
- спектроскопическое исследование процессов перезарядки многозарядных ионов бора и углерода на атомах струи благородного газа,
- разработка новых широкополосных многослойных зеркал на основе аперидических структур для диапазона длин волн короче 12,5 нм

Научная новизна

- 1 Предложен оригинальный метод измерения плотности импульсной струи газа в вакууме по поглощению монохроматического мягкого рентгеновского излучения. Для ксенона при длине волны 13,6 нм чувствительность метода (пороговая “плотность столба”) составляет около 10^{16} атомов/см².
- 2 Выполнен уникальный эксперимент по спектроскопическому наблюдению процесса перезарядки ядер бора и углерода на нейтральных атомах инертных газов с применением широкополосного стигматического спектрографа МР диапазона на основе аперидического многослойного зеркала нормального падения. Определены отношения парциальных сечений реакции перезарядки

- 3 Разработаны широкополосные аперриодические многослойные зеркала нормального падения на основе пар материалов $^{238}\text{U}/\text{C}$ и $^{238}\text{U}/\text{V}_4\text{C}$, обладающие постоянным коэффициентом отражения 7.5% в интервале 6.7-11.1 нм и 4% в интервале 4.4-7 нм

Практическая значимость работы

- 1 Исследовано распределение плотности в импульсной струе газообразного ксенона при истечении в вакуум через цилиндрическое и коническое (сверхзвуковое) сопла при различных давлениях стагнации
- 2 Реализован и оптимизирован "чистый" (безосколочный) импульсный источник мягкого рентгеновского (12.5 – 25 нм) излучения, возбуждаемый наносекундными импульсами неодимового лазера в импульсной струе ксенона. Увеличена эффективность источника в области $\lambda < 15$ нм за счет снижения фотопоглощения в периферии газовой струи. Зарегистрирован спектр источника в диапазоне 12.5 – 25 нм. Получены изображения источника и определены его пространственные и яркостные характеристики на длине волны 13.5 нм
- 3 Исследовано взаимодействие струи инертного газа (He, Ne, Xe) с налетающей лазерной плазмой от удаленной (на ~1 см) твердотельной мишени (B, $(\text{CH}_2)_n$, CF_4). В области взаимодействия "многозарядные ионы – газ" зарегистрированы с пространственным разрешением линейчатые спектры, возбуждаемые при перезарядке многозарядных ионов плазмы на атомах благородного газа.
- 4 Определены отношения парциальных сечений перезарядки ядер бора и углерода на нейтральных атомах He, Ne, Xe

- 5 Выполнено “восстановление” структуры широкополосного зеркала скользящего падения по измеренной зависимости коэффициента отражения от угла на длине волны 0 154 нм от угла скольжения Сравнение “восстановленной” и исходной структуры демонстрирует роль переходных слоев

Положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения плотности импульсной струи ксенона по поглощению монохроматического излучения в МР области спектра.
2. Оптимизация компактного лазерно–плазменного источника мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемого в импульсной струе Хе в вакууме импульсами неодимового лазера. Увеличение выхода излучения при $\lambda < 15$ нм Абсолютное измерение выхода рентгеновского излучения на длине волны 13 5 нм и измерение размеров светящейся области
3. Спектроскопическое исследование процессов перезарядки многозарядных ионов бора и углерода на атомах струи благородного газа (He, Ne, Xe) Определение отношений парциальных сечений перезарядки на возбужденные уровни ионов В V и С VI
4. Расчеты широкополосных аperiodических многослойных зеркал нормального падения на основе пар материалов $^{238}\text{U}/\text{B}_4\text{C}$ и $^{238}\text{U}/\text{C}$, обладающих равномерным коэффициентом отражения (7 5% в интервале 6 7-11 нм и 4% в интервале 4.4-7 нм)

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Физического института им П Н Лебедева РАН, конференции «20th International Conference X05 X-ray and Inner-Shell Processes» (The University of Melbourne, Australia, 4-8 July 2005), трех Всероссийских

конференциях «Рентгеновская оптика» (Н Новгород, ИФМ РАН, 18-21 марта 2002 г , 11-14 марта 2003 г и , 2-5 мая 2004 г), двух международных симпозиумов «Нанозфизика и нанозлектроника» (Н Новгород, ИФМ РАН, 25-29 марта 2005 г и 10-14 марта 2007 г), Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», (8 – 13 июня 2003г, г Троицк Моск Обл), российском научном форуме «Демидовские чтения», (Москва, 25-28 февраля 2006 г), научных конференциях МФТИ (Долгопрудный – Москва, в 2002 г , 2003 г , 2004 г и 2006 г)

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в одиннадцати печатных работах [4, 6, 8, 9, 10], опубликованных в рецензируемых научных журналах и трудах конференций [1, 2, 3, 5, 7, 11]

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы В диссертации 87 страниц, 36 рисунков, 6 таблиц. Список литературы состоит из 107 наименований

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность выбранной темы, излагается краткое содержание работы

В Главе 1 описывается экспериментальная установка – основу ее составляет вакуумная камера "Икар" ($\varnothing 9 \text{ м} \times 3 \text{ 8 м}$), твердотельный лазер на кристаллах ортоалюмината иттрия, активированного неодимом ($\lambda=1 \text{ 08 мкм}$, 0 4 Дж , 6 нс), импульсный газовый клапан

Описывается оптико-спектральный комплекс для проведения измерений в мягком рентгеновском диапазоне ($12 \text{ 5} - 30 \text{ нм}$), включающий в себя современные рентгенооптические компоненты Дается

характеристика таким элементам, как многослойные рентгеновские зеркала нормального падения (в том числе и широкополосные на основе аperiодических структур), многослойные абсорбционные фильтры и дифракционные решетки на пропускание. Уделяется внимание детекторам излучения и показывается возможность проведения абсолютных измерений в МР диапазоне спектра.

В Главе 2 исследовано распределение плотности в импульсной струе газообразного ксенона при истечении в вакуум через цилиндрическое и коническое (сверхзвуковое) сопла при различных давлениях стагнации. Разработана техника измерения распределения плотности в струе по ее изображениям, получаемым при просвечивании импульсом МР излучения ($\lambda = 13,6$ нм), генерируемого при помощи лазерно-плазменного источника МР излучения наносекундного диапазона. Эти изображения (абсорбционные рентгенограммы) формируются при помощи фокусирующей многослойной оптики нормального падения, которая одновременно служит для монохроматизации излучения (Рис 1)

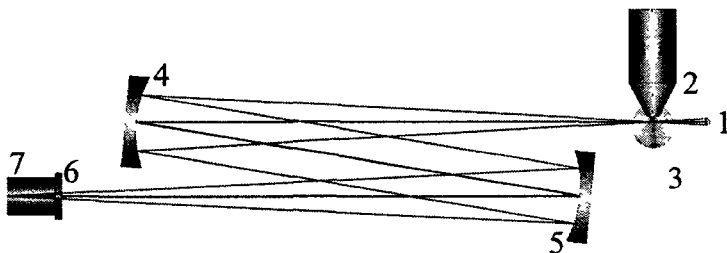


Рис 1 Схема эксперимента по регистрации абсорбционных рентгенограмм импульсной струи газа 1 – плазма вольфрамовой лазерной мишени, 2 – импульсный газовый клапан высокого давления, 3 – поле зрения оптической системы из двух многослойных

зеркал 4 и 5, ($R=1000$ мм, $\lambda_0=13.6$ нм), 7 – рентгеновская фотопленка УФ-4, закрытая от видимого и УФ света абсорбционным фильтром 6

Информация о плотности струи заключена в коэффициенте ослабления интенсивности лучей, прошедших через различные участки струи (см Рис 2) $I(\lambda_0, y) = I_0(\lambda_0) \exp[-\tau(\lambda_0, y)]$, где $I_0(\lambda_0)$ – исходная интенсивность зондирующего монохроматического излучения с длиной волны λ_0 , $\tau(\lambda_0, y) = 2\sigma_a \int_0^{\infty} N(r = \sqrt{x^2 + y^2}) dx$ – значение оптической толщины вдоль луча, проходящего параллельно оси x на расстоянии y от оси струи (предполагается, что струя обладает осевой симметрией), $\sigma_a = 2r_e f_2$ – сечение поглощения (в расчете на один атом), r_e – классический радиус электрона, f_2 – мнимая часть атомного фактора рассеяния. Поглощение на данной длине волны в МР диапазоне не зависит от агрегатного состояния вещества (в данном случае от степени кластеризации ксенона) и зависит лишь от интегральной плотности вдоль траектории луча и атомного номера элемента (т.е. от f_2)

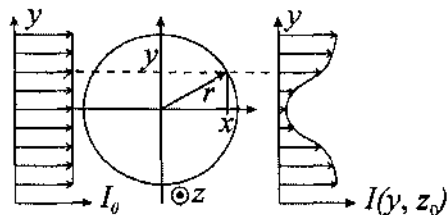


Рис 2 Схема, поясняющая метод измерения плотности по поглощению монохроматического излучения

Определение плотности по абсорбционным рентгенограммам струи проводилось двумя способами. В первом за основу принималась форма радиального распределения плотности $N(r, z_0)$, известная из имеющихся гидродинамических расчетов для конкретной геометрии сопла. Расчетное

радиальное распределение плотности умножалось на коэффициент f . Затем проводился подбор подгоночного коэффициента f по наилучшему соответствию расчетного контура интенсивности с экспериментальным контуром в трех сечениях $z_0 = 0,5, 1,0$ и $1,5$ мм. Контур интенсивности получались из контуров плотности $fN(r, z_0)$ в результате моделирования рентгенооптической системы с учетом рассеяния на зеркалах (этот метод для краткости назовем “прямым согласованием”, см. Рис. 3). Во втором способе радиальное распределение плотности определялось с помощью преобразования Абеля от измеренного профиля интенсивности.

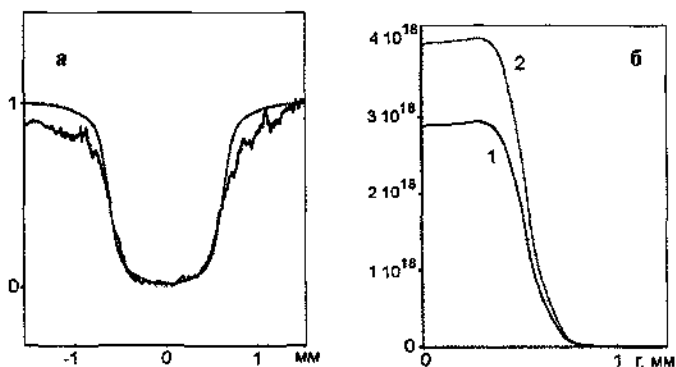


Рис 3 (а) Экспериментальный радиальный профиль интенсивности $I(r, z = 0,5)$ в сечении, перпендикулярном оси струи и проходящем на расстоянии $0,5$ мм от среза сопла, а также его аппроксимация расчетным профилем интенсивности в этом сечении (б) Экспериментальный (1) и расчетный (2) профили плотности. Профиль (1) соответствует экспериментальному профилю интенсивности $I(r, z = 0,5)$ на рис (а)

Использование монохроматического излучения обеспечило довольно высокую точность абсолютных измерений плотности ($\sim 10\%$), а выбор длины волны вблизи максимума полосы поглощения ксенона обеспечил

высокую – в сравнении с интерферометрией в видимом диапазоне – чувствительность метода (пороговая “плотность столба” ксенона составляет 10^{16} атомов/см²) Измеренные абсолютные значения плотности и ее распределение находятся в хорошем согласии с расчетами

В Главе 3 исследован чистый (безосколочный) источник мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемый в импульсной струе Хе в вакууме импульсами неодимового лазера ($\lambda=1.08$ мкм, 0.4 Дж, 6 нс) Схема диагностического комплекса приведена на Рис 4

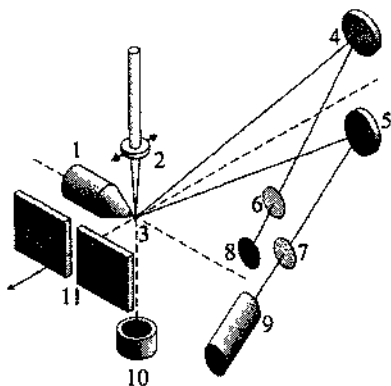


Рис 4 Схема эксперимента и расположения диагностического оборудования (1) импульсный газовый клапан высокого давления со сверхзвуковым соплом, (2) фокусирующая линза, закрепленная на электромеханическом трансляторе, управляемом компьютером, (3) ксеноновая плазма в фокусе, (4, 5) одинаковые периодические Mo/Si многослойные зеркала ($R=250$ мм, $\lambda_0 = 13.5$ нм, $\Delta\lambda_{1/2} = 0.5$ нм), (6, 7) свободные многослойные абсорбционные Zr/Si фильтры с апертурой 8 мм, (8) кассета с рентгеновской фотоэмульсией УФ-4, (9) фотодиод АХУВ-5, (10) калориметр ВЧД-2, (11) входная щель дифракционного спектрографа с дисперсией 2 нм/мм (условно на схеме показан с противоположной стороны от сопла)

Увеличена эффективность источника в области $\lambda < 15$ нм за счет снижения фотопоглощения в периферических областях газовой струи. Струя ксенона истекала через сверхзвуковое (коническое) сопло, распределение плотности в такой струе измерено в Главе 2 и представлено на Рис 3 – это распределение имеет почти постоянное «плато» и достаточно резкие границы. Точка фокусировки лазерного импульса перемещалась вдоль оси 3-5 (см Рис 4) в направлении к зеркалам. Максимальная светимость на длине волны 13,5 нм (максимальный сигнал в канале 3-5-7-9 на Рис 4) – в положении 0,3 мм от оси сопла, что соответствует границе «плато» на Рис 3. В этом случае реализуется компромисс между достаточно большой плотностью в точке фокусировки и малым числом атомов вдоль луча зрения 3-5.

Светимость плазмы составила $2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж/(ср·нм) на длине волны 13,5 нм, а коэффициент конверсии лазерного излучения в области 13,5 нм составляет около 0,22% в телесный угол 2π ср в спектральный интервал 0,5 нм. Длительность импульса мягкого рентгеновского излучения на длине волны 13,5 нм практически совпадает с длительностью лазерного импульса (6 нс).

Получены изображения источника в канале 3-4-6-8 (см Рис 4). Размеры священной области (по половине интенсивности) составляют 1,45 мм вдоль луча лазера и 0,24 мм в перпендикулярном направлении (Рис. 5). Поперечный размер источника соответствует произведению начальной скорости ($\approx 2 \cdot 10^6$ см/с) цилиндрической ударной волны на длительность лазерного импульса.

Зарегистрирован спектр источника в диапазоне 12,5 – 25 нм. На Рис. 5 справа показано, насколько увеличился выход излучения в области $\lambda < 15$ нм.

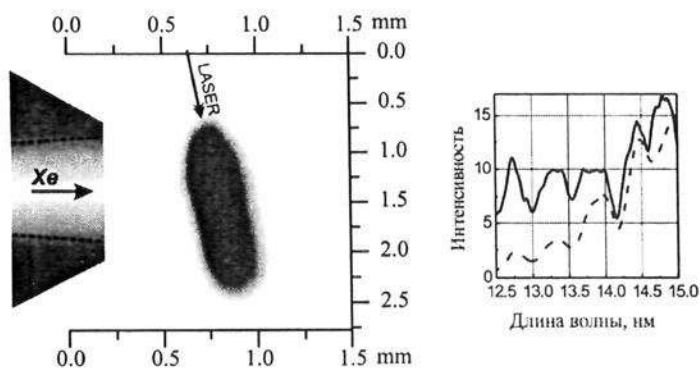


Рис. 5. Слева: рентгеновское изображение ксеноновой плазмы на длине волны 13.5 нм, полученное в канале регистрации 3–4–6–8 (рис. 4); справа: сравнение формы спектра источника в области 12.5–15 нм, возбуждаемого в Хе при его истечении через сверхзвуковое (сплошная линия) и цилиндрическое (пунктир) сопло.

В Главе 4 исследовано взаимодействие струи газа (He, Ne, Xe) с налетающей лазерной плазмой от удаленной (на ~ 1 см) твердотельной мишени (B, $(\text{CH}_2)_n$, CF_4). В области взаимодействия "многозарядные ионы – газ" зарегистрированы линейчатые спектры, возбуждаемые при перезарядке многозарядных ионов плазмы на атомах благородного газа. Схема эксперимента приведена на Рис. 6.

Для регистрации спектров с пространственным разрешением использовался светосильный широкополосный стигматический спектрограф на основе аперидического многослойного Mo/Si зеркала нормального падения и широкоапертурной пропускающей дифракционной решетки (1000 либо 5000 линий/мм). Спектрограф обладал следующей совокупностью свойств: стигматизмом, полем зрения ~ 2 см по вертикали, спектральной разрешающей способностью не ниже ~ 300 , широким спектральным рабочим диапазоном (резкая коротковолновая граница

12.5 нм обусловлена L-краем Si), и рекордно высокой светосилой. Благодаря большой высоте поля зрения (2 см) регистрировалось излучение как из горячей плазмы у поверхности твердотельной мишени, так и в области взаимодействия плазма-газ, что давало пространственную картину взаимодействия. Поле зрения спектрографа показано пунктиром на Рис. 6.

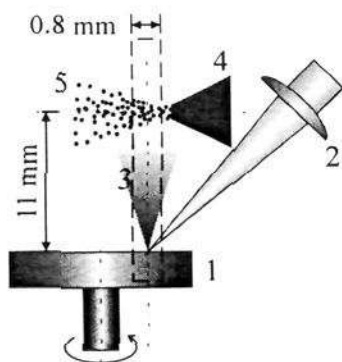


Рис. 6. Взаимное расположение лазерной плазмы (3) и облака газа (5). (1) вращающаяся мишень, (2) линза, фокусирующая лазерное излучение, (4) сопло импульсного газового клапана. Пунктиром показано поле зрения спектрографа.

Спектр плазмы у поверхности мишени содержал линии ионов, соответствующих C IV-VI, B III-V. На расстоянии нескольких миллиметров от мишени спектральные линии многозарядных ионов очень сильно ослабевали по сравнению с их интенсивностью у поверхности твердой мишени и практически не были видны. Однако в области взаимодействия плазма-газ во всех экспериментах наблюдалось возобновление свечения части спектральных линий. Этот экспериментальный факт связан с интенсивным заселением возбужденных состояний ионов плазмы при их перезарядке на нейтральных атомах газа.

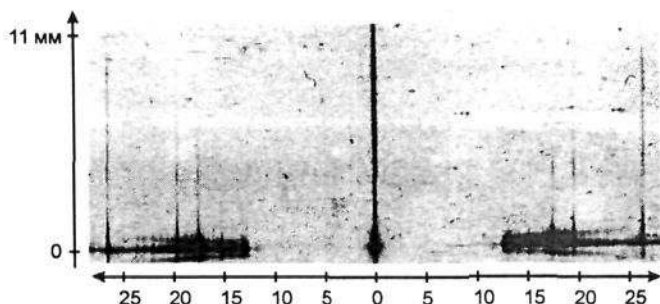


Рис. 7. Обзорный спектр, зарегистрированный при взаимодействии плазмы мишени из бора со сверхзвуковой струей гелия. Линия 17.35 нм в области взаимодействия отсутствует. Для лучшего восприятия изображения контрастность усилена.

На Рис. 7 представлена спектрограмма, зарегистрированная при лазерном облучении мишени из бора, при использовании гелия в качестве атома-донора.

В эксперименте плазма и струя атомов-доноров формируются раздельно. Расстояние между твердотельной мишенью и осью струи выбрано с тем расчетом, чтобы электронная плотность плазменного потока в области взаимодействия плазма-газ не превышала $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом заселяемые уровни H-подобных уровней C VI и B V находятся в "радиационной области" в смысле выполнения условия $N_e < N_e^p = A(p)/c(p, p \mp 1)$, где N_e — электронная плотность, $A(p)$ — полная вероятность радиационного распада уровня p , а $c(p, p \mp 1)$ — скорость столкновительного (де)возбуждения уровня. В случае выполнения сильного неравенства, практически каждый акт заселения уровней с $n \leq p$ сопровождается (каскадными) радиационными переходами вниз, а столкновения не влияют на относительные интенсивности линий, что дает возможность интерпретировать относительные интенсивности линий серии Бальмера в терминах парциальных сечений перезарядки.

В области взаимодействия разреженной лазерной плазмы со струей благородного газа наблюдались линии серии Бальмера (H_α , H_β , H_γ) H-подобных ионов C VI и B V, обусловленные перезарядкой. На перезарядку как основной механизм заселения уровней однозначно указывает ряд качественных особенностей, таких как отсутствие высших членов серии, изменение высшего наблюдаемого члена серии в соответствии с изменением потенциала ионизации атомов газа, а также смещение "центра тяжести серии" вверх по уровням при уменьшении потенциала ионизации атомов газа.

По относительным интенсивностям переходов серии Бальмера определены отношения парциальных сечений перезарядки на уровни ионов C VI и B V с $n=3, 4$ и, при взаимодействии ядер бора с Xe, с $n=5$

Производилось сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов. Для реакций перезарядки B V + Ne и C VI + Ne экспериментальные отношения σ_3/σ_4 согласуются с теоретическими данными.

В Главе 5 параграфе 5.1 рассматриваются аperiодические многослойные структуры, приводится метод расчета их параметров и конструирования структур с заданными свойствами.

В параграфе 5.2 рассматривается возможность создания многослойных зеркал нормального падения, имеющих постоянный коэффициент отражения в широком спектральном интервале (т.н. «плато») за L-краем поглощения кремния (125 нм). В качестве материала зеркал выбраны пары U/C и U/B₄C (Речь идет, конечно, об обедненном уране 238).

Разработаны широкополосные многослойные зеркала, обладающие равномерным отражением почти в октаве длин волн при нормальном падении излучения. Коэффициенты отражения представлены на Рис 8.

Пара $^{238}\text{U}/\text{B}_4\text{C}$ предпочтительнее с технологической точки зрения, однако за К-краем поглощения бора ($\lambda < 66 \text{ \AA}$) эффективность зеркал, содержащих бор, низка.



Рис 8 Коэффициент отражения аперидических зеркал U/C и U/B₄C (100 пар слоев), оптимизированных на максимальное равномерное отражение при нормальном падении излучения

Многослойное зеркало U/B₄C обеспечивает равномерное отражение ~7 5% (в среднем на интервале 67–111 Å), зеркало U/C – отражение ~4 % (44 – 70 Å) Интегральный по спектру коэффициент отражения широкополосного аперидического зеркала в несколько раз превосходит эту величину для любого периодического зеркала.

В параграфе 5.3 решается задача восстановления структуры синтезированных многослойных зеркал скользкого падения по данным измерения коэффициентов отражения зеркал от угла скольжения $r(\theta)$ на длине волны 0 154 нм Расчет производился для двух зеркал: образец А (материал W/B₄C, 20 бислоев, рабочий диапазон углов 0 9°–1 2°) и образец Е (материал W/Si, 12 бислоев, рабочий диапазон углов 0 5°–0 9°). Обе структуры были нанесены на кремниевые подложки с известной шероховатостью 2 7 Å в диапазоне пространственных частот от 0 03 до 3 мкм⁻¹

Для обеих структур найденные суммы толщин соседних слоев согласуются с исходными. Найденная в результате восстановления многослойная структура сравнивается с результатами восстановления, полученными независимо группой из ИК РАН.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1 Разработан метод измерения плотности импульсной струи газа в вакууме по поглощению монохроматического МР излучения
- 2 Зарегистрированы абсорбционные рентгенограммы установившегося течения ксеноновой струи для цилиндрического и конического (сверхзвукового) сопел, восстановленное по ним распределение плотности струи хорошо соответствует расчетному
- 3 Исследован чистый «безосколочный» лазерно-плазменный источник МР излучения и существенно увеличена эффективность источника в области длин волн короче 15 нм за счет снижения фотопоглощения. Зарегистрирован спектр источника (12,5–25 нм) и определены его размеры и яркость на длине волны 13,5 нм
- 4 Проведено спектроскопическое исследование взаимодействия разреженной лазерной плазмы со струей благородного газа в вакууме. Зарегистрированы линейчатые спектры взаимодействия и показано, что процесс перезарядки является основным механизмом возбуждения спектральных линий.
- 5 По относительным интенсивностям переходов серии Бальмера определены отношения парциальных сечений перезарядки на уровни ионов C VI и B V
- 6 Выполнены расчеты широкополосных аperiodических многослойных зеркал нормального падения на основе пар материалов

$^{238}\text{U}/\text{C}$ и $^{238}\text{U}/\text{B}_4\text{C}$, обладающих равномерным коэффициентом отражения (7 5% в интервале 6 7-11 1 нм и 4% в интервале 4 4-7 нм).

7. Выполнено “восстановление” структуры широкополосного зеркала скользящего падения по измеренной зависимости коэффициента отражения на длине волны 0 154 нм от угла скольжения. Найденные суммы толщин соседних слоев согласуются с исходными. Найденная в результате восстановления многослойная структура сравнивается с результатами восстановления, полученными независимо другой научной группой.

Материалы диссертации неоднократно докладывались на отечественных и международных конференциях и опубликованы в 11 работах

- 1 В Е Левашов, К Н Медников, А С Пирожков, Е Н Рагозин, П В Сасоров «Взаимодействие импульсной газовой мишени с лазерной плазмой и лазерным излучением» - Рентгеновская оптика-2002 (Материалы совещания, Н Новгород, ИФМ РАН, 18-21 марта 2002 г), с 45 - 51
- 2 Е N Ragoza, V E Levashov, K N Mednikov, A S Pirozhkov, P V Sasorov «Interaction of a pulsed gas target with Nd-laser radiation and laser-produced plasma» - Proc SPIE vol 4781, pp 17 - 25 (2002)
- 3 В Е Левашов, К Н Медников, А С Пирожков, Л П Пресняков, Е Н Рагозин «Перезарядка многозарядных ионов лазерной плазмы на нейтральных атомах струи газа» - Рентгеновская оптика-2003 (Материалы совещания, Н Новгород, ИФМ РАН, 11-14 марта 2003 г), стр 333 - 338

- 4 В Е Левашов, К Н Медников, А С Пирожков, Е Н Рагозин «Взаимодействие лазерной плазмы с инертным газом» – Физика плазмы, 2004, том 30 №2 с 169-174
- 5 А С Болдарев, В А Гасилов, В Е Левашов, К Н Медников, А С Пирожков, М С Пирожкова, Е Н Рагозин «Измерение плотности ксенона в импульсной струе по поглощению монохроматического мягкого рентгеновского излучения» - Рентгеновская оптика-2004 (Материалы совещания, Н Новгород, 2-5 мая 2004 г), стр 13-18
- 6 А С Болдарев, В А Гасилов, В Е Левашов, К Н Медников, А С. Пирожков, М С Пирожкова, Е Н Рагозин «Измерение плотности ксенона в импульсной струе по поглощению монохроматического мягкого рентгеновского излучения» – Квантовая Электроника, том 34 №7, стр 679 - 684, 2004г
7. К Н Медников В Е Левашов А С Пирожков Е Н Рагозин «Излучательные характеристики лазерно-плазменного источника на сверхзвуковой струе ксенона» - IX Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника» (Материалы симпозиума, Н Новгород, 25-29 марта 2005 г), том 2, с 499-500
- 8 V E Levashov K N Mednikov A S Pirozhkov E N Ragozin «Aperiodic X-ray multilayer mirrors and their application in plasma spectroscopy» - Radiat Phys Chem 75 (11), p 1819-1823, 2006
- 9 В. Е Левашов К Н Медников А С Пирожков Е Н Рагозин «Оптимизация лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемого в импульсной струе ксенона» - Квантовая электроника, 36 (6), стр 549-552, 2006 г
- 10 И В Кожевников, А С Воронов, Б С Рошин, В Е Асадчиков, К Н Медников, А С. Пирожков, Е Н Рагозин, Джансян Ванг,

Джанг Джонг, Фенгли Ванг «Конструирование, изготовление и исследование многослойных широкополосных зеркал рентгеновского диапазона» - Кристаллография, 51 (6), стр 1146-1152, 2006 г

- 11 Г М Живлюк, К Н Медников, А С Пирожков, Е Н Рагозин «Широкополосные зеркала нормального падения в области $\lambda < 11$ нм» - XI Международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника» (Материалы симпозиума, Н Новгород, 10-14 марта 2007 г), том 2, стр 361 - 362

Медников Константин Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУН БЛАГОРОДНОГО
ГАЗА В ВАКУУМЕ С ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ И ЛАЗЕРНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ МР ДИАПАЗОНА**

Подписано в печать 21 09 2007 Формат 60×84 ¹/₁₆ Печать офсетная

Усл печ л 1,0 Уч - изд Л 1,0 Тираж 60 экз Заказ № ф 371

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Отдел автоматизированных издательских систем "ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ"

141700, Моск обл, г Долгопрудный, Институтский пер, 9