

На правах рукописи

ПИКУЗ Татьяна Александровна

РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СПЕКТРОСКОПИИ
С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ДИСПЕРГИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ,
ИЗОГНУТЫМИ ПО СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертаций на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2001 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель:

к.т.н., доцент Карасик В.Е.

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор Шиканов А.С.

к.т.н., доцент Зубарев В.Е.

Ведущая организация (предприятие): Институт общей физики РАН

Защита состоится _____ 2001 г. на заседании диссертационного совета Д-212.141.11 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

госу

в библиотеке Московского
им. Н.Э.Баумана.

1572675
Пикуз Т.А.
Разработка приборное
изображающей спектро
2001
0.00

_____ 2001 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1572675
Пикуз Т.А.
Разработка при

Власов И.Б.

1572675

Библиотека МГТУ им. Н.Э. Баумана

Актуальность Создание импульсных лазеров с длительностью импульса от наносекунд до фемтосекунд открывает новые возможности в развитии исследований по таким фундаментальным проблемам как физика высокотемпературной плазмы, взаимодействие интенсивных световых полей с веществом, создание коротковолновых лазеров на плазме многозарядных ионов, а также для решения важных прикладных задач, связанных с созданием источников мягкого рентгеновского излучения для микролитографии и микроскопии биологических объектов, для исследований в области защиты окружающей среды. В свою очередь это поставило в последние годы новые задачи по созданию аппаратуры, обеспечивающей исследование параметров плазменных сред, находящихся под воздействием высоких температур и давлений, а также сверхсильных магнитных полей и электронных пучков. Экстремальные условия образования плотной высокотемпературной плазмы приводят к тому, что плазма становится пространственно неоднородной, а процессы ее развития и распада характеризуются сложными, в том числе нестационарными, явлениями. Такая плазма характеризуется электронной температурой $T_e > 100$ эВ и состоит, в основном, из многозарядных ионов с кратностью ионизации $z_i > 5$ и потенциалами ионизации $E_i > 0,5$ кэВ, спектры излучения которых лежат в спектральном диапазоне меньше $20 \text{ \AA}$ (линии H-, He-, Ne-, Ni-подобных ионов).

Одним из наиболее эффективных методов диагностики высокотемпературной плазмы является спектроскопия излучения многозарядных ионов. С ростом электронной температуры в плазме происходит образование все более высокоионизованных ионов. Для описания свойств такой плазмы методов классической спектроскопии оптических переходов, традиционно использовавшейся ранее, становится недостаточно. Поэтому в последние годы изучение плазменных сред все в большей степени основываются на исследовании спектров излучения автоионизационных состояний многозарядных ионов плазмы. Основными особенностями спектров излучения переходов, связанных с автоионизационными уровнями, являются необычайно малая разница в длинах волн, слабая интенсивность и локализация в ограниченных областях объема плазменной среды. В результате в настоящее время решение наиболее актуальных задач спектральных исследований высокотемпературной плотной плазмы основано на повышении светосилы и спектрального разрешения диагностической аппаратуры, а также связано с созданием спектральных приборов, обладающих при высокой светосиле, одновременно, не только высоким спектральным, но и пространственным разрешением, и позволяющих получать спектрально

селектированные изображения источников излучения. Такие приборы получили название приборов изображающей спектроскопии.

Из всего многообразия спектральных приборов для диапазона длин волн $1 - 20 \text{ \AA}$ только спектрографы с кристаллическим диспергирующим элементом принципиально могут обеспечить требуемое спектральное разрешение. Тем не менее, наиболее часто использовавшиеся ранее спектрографы с диспергирующими элементами в виде плоских или изогнутых по цилиндрической поверхности кристаллов хотя и обладают удовлетворительным спектральным разрешением, но не обеспечивают достаточной светосилы и пространственного разрешения при получении изображений плазменных источников. Существенными преимуществами по сравнению с указанными выше спектрографами обладают спектрографы на основе кристаллов, изогнутых по сферической поверхности. Благодаря фокусирующим свойствам отражающей поверхности кристалла они не только формируют изображения плазменных объектов в различных спектральных линиях, но и обладают высокой светосилой в сочетании с высоким пространственным разрешением при сохранении предельно возможного для данного диспергирующего элемента спектрального разрешения.

Формирование спектров и спектральных изображений с помощью кристаллических диспергирующих элементов, изогнутых по сферической поверхности, основано на сложном сочетании рентгенооптических свойств кристаллов (дифракции Брегга при взаимодействии коротковолнового излучения с кристаллами) и свойств обычных оптических элементов (фокусировка излучения сферической поверхностью). С одной стороны, это приводит к тому, что строгое описание работы спектрографов на основе сферически изогнутых кристаллов методами волновой оптики, представляет значительные трудности. С другой стороны, как показывается в настоящей работе, для многих практических условий, оказывается достаточным применение методов геометрической оптики. Более того, возможным получения пространственного разрешения с помощью кристаллических элементов, изогнутых по сферической поверхности, делает решающей необходимость исследования изображающих свойств таких приборов прежде всего традиционными геометро-оптическими методами.

Кристалл, изогнутый по сферической поверхности является основным функциональным элементом схемы спектрографов. От радиуса кривизны, апертуры, отражательных свойств, качества поверхности в конечном итоге зависит в какой степени будут реализованы аппаратные возможности схемы спектрографа. Получение высокого качества кристаллов, изогнутых по сферической поверхности в любом случае является сложной технологической задачей. Особые проблемы возникают при изгибе кристаллов большой апертуры по малым радиусам кривизны, необходимым

для повышения светосилы спектрографа. С разработкой под руководством автора такой технологии и созданием кристаллов слюды с радиусами кривизны до $R = 80$ мм и кристаллов кварца с $R = 150$ мм при относительном отверстии в плоскости дисперсии $1 : 1,5$ уникальное сочетание свойств фокусирующих спектрографов было реализовано на практике и получило достаточно широкое применение в экспериментальных исследованиях высокотемпературной плазмы.

Цель работы. Целью настоящей работы является создание светосильных приборов изображающей спектроскопии с высоким спектральным (до $\lambda/\Delta\lambda = 10000$) и пространственным (до $\Delta x = 10$ мкм) разрешением на основе диспергирующих элементов в виде кристаллов, изогнутых по сферической поверхности.

Научная новизна.

1. Обоснованы схемы и исследованы оптические свойства фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением (ФСПр) на основе диспергирующих элементов в виде кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, обладающих одновременно высокой светосилой, спектральным и пространственным разрешением и позволяющих получать спектрально селективные изображения источников излучения с длинами волн от 1 до 20 Å.
2. Получены расчетные соотношения для определения основных параметров фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением (ФСПр), основанные на использовании методов геометрической оптики.
3. Разработана технология упругого изгиба кристаллов слюды и кварца по сферическим поверхностям малых радиусов кривизны.
4. Теоретически и экспериментально продемонстрировано, что малогабаритные спектрографы ФСПр, использующие в качестве диспергирующих элементов кристаллы, изогнутые по малым радиусам кривизны, позволяют реализовать при высокой светосиле спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda$ до 10000 и пространственное разрешение Δx до 10 микрон.

Практическая ценность:

1. Впервые получены высококачественные, изогнутые по сферической поверхности кристаллы с радиусами кривизны до $R = 80$ мм для кристаллов слюды и до $R = 150$ мм для кристаллов кварца при относительном отверстии в плоскости дисперсии до $1 : 1,5$.
2. Разработана конструкция и создана серия универсальных малогабаритных фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением (ФСПр), на основе кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, обладающих одновременно высокими светосилой, спектральным ($\lambda/\Delta\lambda$ до 10000) разрешением и

пространственным разрешением (до 10 мкм). Разработанные приборы относятся к классу приборов изображающей спектроскопии и применяются для исследований параметров плотной высокотемпературной плазмы в спектральном диапазоне от 1 до 20 Å.

3. Получены расчетные соотношения для определения основных параметров оптических схем спектрографов ФСПР, удобные для практического использования.
4. Реализованы на практике схема коллимации монохроматического рентгеновского излучения и схема рентгеновского теневого монохроматического микроскопа, основанные на использовании фокусирующих свойств кристаллов, изогнутых по сферической поверхности.
5. Разработанные спектрографы ФСПР использованы для диагностики высокотемпературной лазерной плазмы и прецизионных измерений длин волн излучения многозарядных ионов такой плазмы. Многие экспериментальные результаты получены впервые в мировой практике.

Реализация и внедрение Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении 4 научно-исследовательских работ, проводимых МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Созданные путем изгиба по сферическим поверхностям кристаллы слюды и кварца, а также спектрографы типа ФСПР были использованы в работах по измерениям излучательных характеристик лазерной плазмы в Центре данных по Атомной спектроскопии ГНЦ "ВНИИФТРИ", в Троицком Институте Инновационных и Термоядерных Исследований, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, а также при проведении совместных исследований в Институте Физики Плазмы и Лазерного Микросинтеза (IFPILM, Польша), Политехнической школе (Ecole Polytechnique, Франция); Центре новых энергетических технологий (ENEA, Фраскати, Италия); Хебрю Университете (Hebrew University, Иерусалим, Израиль); Ливерморской и Лос-Аламосской Национальных лабораториях (LLNL и LANL, США), Университете Бордо - 1 (Франция), Национальной лаборатории Сакле (Saclay, Франция), Институте ионных исследований (GSI, Дармштадт, Германия).

Апробация результатов исследований Основные теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований изложены и обсуждены на более, чем 20 Всероссийских и Международных конференциях.

Публикации Основные результаты работы опубликованы в 64 статьях в российских и зарубежных реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 173 страницах машинописного

текста, содержит 72 рисунка, 18 таблиц и список используемой литературы, включающий 124 наименования, всего 242 страницы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

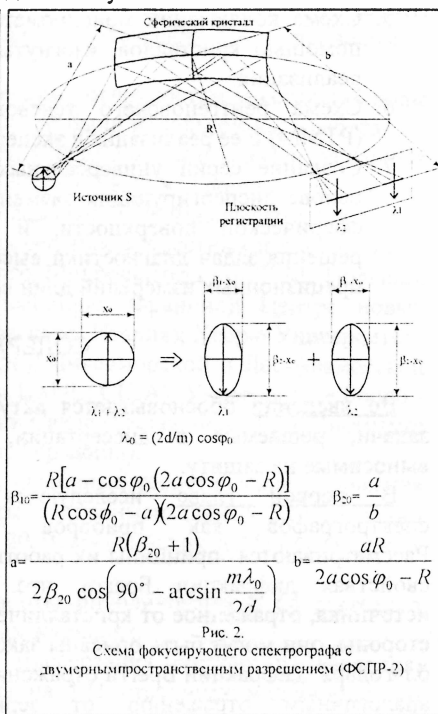
1. Функциональные схемы фокусирующих спектрографов с одномерным пространственным разрешением (ФСР-1) и двумерным пространственным разрешением (ФСР-2) с диспергирующим элементом в виде кристалла, изогнутого по сферической поверхности.
2. Расчетные соотношения для определения основных оптических параметров фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением, основанные на использовании методов геометрической оптики.
3. Технология и практическая реализация упругого изгиба кристаллов слюды и кварца по сферическим поверхностям с радиусами кривизны до $R = 80$ мм для кристаллов слюды и до $R = 150$ мм для кристаллов кварца при относительном отверстии в плоскости дисперсии до $1 : 1,5$.
4. Результаты исследования отражательных свойств кристаллов плоских и изогнутых по сферической поверхности кристаллов слюды
5. Схема коллимации монохроматического рентгеновского излучения с помощью кристаллов, изогнутых по сферической поверхности и ее реализация.
6. Схема рентгеновского теневого монохроматического микроскопа (РТММ) и ее реализация в экспериментах с лазерной плазмой.
7. Создание серии универсальных малогабаритных спектрографов, на основе диспергирующих элементов в виде кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, и результаты их использования для решения задач диагностики высокотемпературной лазерной плазмы и прецизионных измерений длин волн излучения многозарядных ионов.

СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обосновывается актуальность работы, кратко излагаются задачи, решаемые в диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

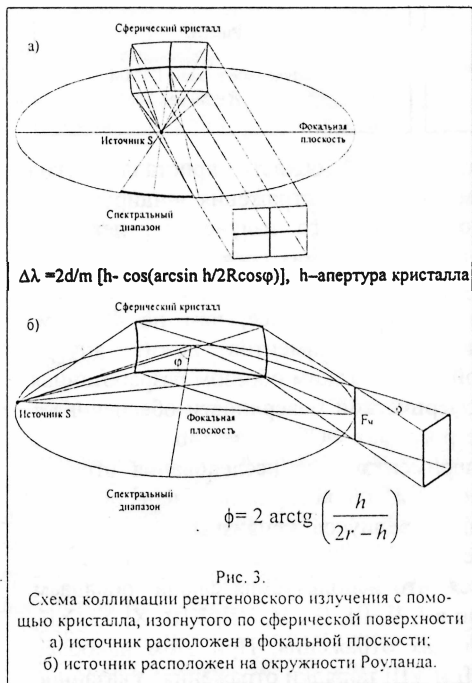
В первой главе исследуются характеристики кристаллических спектрографов как приборов изображающей спектроскопии. Рассматриваются принципы их работы. С одной стороны, они основаны на свойствах дифракции Брегга, что позволяет раскладывать излучение источника, отраженное от кристаллической поверхности, в спектр. С другой стороны, они могут быть описаны законами геометрической оптики, так как благодаря дифракции Брегга отражение излучения от кристалла становится аналогичным отражению от зеркальной поверхности. Проводится сравнительный анализ характеристик кристаллических спектрографов с

Рассматриваются функциональные схемы фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением (ФСРП) на основе кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, в двух модификациях: с одномерным пространственным разрешением (ФСРП-1) (рис. 1) и двумерным пространственным разрешением (ФСРП-2) (рис. 2). Показывается, что для практической реализации преимуществ использования кристаллических диспергирующих элементов, изогнутых по сферической поверхности необходимо уменьшать радиус кривизны кристалла, увеличивать размер отражающей поверхности кристалла (апертуру) и обеспечить постоянство апертуры по рабочему спектральному диапазону.



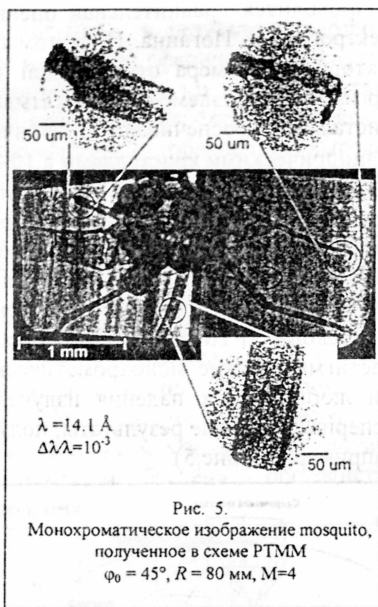
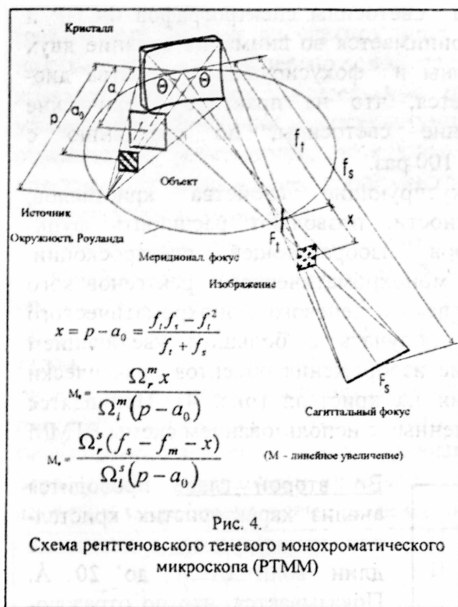
Проводится сравнительная оценка светосилы спектрографов ФСРП и спектрографов Иоганна. При этом принимается во внимание влияние двух факторов – размера отражающей зоны и фокусирующие свойства диспергирующего элемента. Показывается, что на практике сферические кристаллы обеспечивают увеличение светосилы, по сравнению с цилиндрическими кристаллами в $10 \div 100$ раз.

Продемонстрировано, что фокусирующие свойства кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, позволяют расширить функциональные возможности приборов изображающей спектроскопии. Предложены схема коллимации монохроматического рентгеновского излучения (рис. 3) и схема рентгеновского теневого монохроматического микроскопа (РТММ), позволяющая получать с большим увеличением анастигматические монохроматические изображения объектов практически при любых углах падения излучения на кристалл (рис. 4). Приводятся экспериментальные результаты, полученные с использованием схемы РТММ (например, см. рис.5).



Во второй главе проводится анализ характеристик кристаллов, используемых в диапазоне длин волн от 1 до 20 Å. Показывается, что по отражающим свойствам, с учетом специфических условий, связанных с необходимостью изгиба кристаллов по малым радиусам кривизны, в наибольшей степени соответствуют предъявляемым требованиям кристаллы слюды и кварца. Излагаются основные этапы технологического процесса изгиба кристаллов по малым радиусам кривизны, разработанного в диссертации. Приводятся параметры образцов кристаллов, изготовленных в работе методом упругого изгиба при сплошном прижатии и приклеивании кристаллов к подложкам заданного радиуса кривизны (см. таблицу).

Приводятся результаты контроля качества изготовленных кристаллов слюды оптическими и рентгенооптическими методами. С помощью последних по-



лучено, что на значительной части рабочей области кристаллов угол рассогласования между направлением идеального отражения зондирующего излучения и направлением реально отраженного излучения лежит в интервале, не превышающем ± 2 угл. мин. В схемах спектрографов ФСПР такие углы рассогласования могут привести к смещению центров спектральных линии в плоскости анализа не более, чем на 40 мкм, величину, которая в большинстве экспериментов лежит внутри регистрируемой ширины спектральной линии. Таким образом разработанная технология изгиба кристаллов по сферической поверхности обеспечивает необходимое для использования в спектрографах ФСПР качество.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования отражательных свойств той разновидности слюды, для которой получены образцы со сферическими поверхностями малых радиусов кривизны (совместно с группами "Рентгеновая оптика" Йенского университета и Европейского синхротрона в Генобле). Показывается, что используемая слюда обладает хорошей отражательной способностью в I, II, III, IV, V, VII, VIII, X, XI, XII, XIII и даже в XV и XVIII порядках отражения. При этом наиболее интенсивными являются I, II, III, V, VII и VIII порядки отражения. Указанное свойство является уникальным для кристаллов, используемых в рассматриваемом спектральном диапазоне и позволяет существенно расширить рабочий спектральный диапазон спектрографов и возможности

для оптимизации параметров схемы в конкретных экспериментальных условиях.

Обосновывается возможность замены дорогостоящих рентгеновских методов контроля качества сферически изогнутых кристаллов неконтактными оптическими методами контроля. Рассматривается методика оптического контроля по схеме, основанной на теневом методе. Вырабатываются критерии, по которым может быть проведена селекция годных образцов кристаллов.

В третьей главе методами геометрической оптики обосновываются принципы формирования спектрально селектированных изображений источников рентгеновского излучения в схемах спектрографов ФСПР и определяются основные расчетные соотношения для определения основных параметров оптических схем спектрографов.

Таблица.

Параметры изготовленных в настоящей работе кристаллов, изогнутых по сферической поверхности

Тип Кристалла	2d, нм	Размер рабочей поверхности, мм x мм	Радиус кривизны, мм	Примечания
Слюда	1,994	10 x 30 12 x 50 15 x 30 15 x 50 15 x 70	100 150 186 250 443	могут быть использованы в I, II, III, IV, V, VII, VIII, XI, XII, XIII порядках отражения
Кварц 10 $\bar{1}$ 1	0,666	15 x 50 7 x 12 20 x 50	186 200 250	
Кварц 10 $\bar{1}$ 0	0,85	15 x 50 7 x 12	150 200	

Показывается, что в спектрографах ФСПР наилучшее пространственное разрешение для любого рабочего спектрального диапазона обеспечивается в плоскости, которая проходит через прямую, соединяющую источник с центром кривизны сферического кристалла, и расположенной перпендикулярно плоскости дисперсии. Указанная плоскость является плоскостью установки.

Проводится оценка геометрических aberrаций, присущих оптическим схемам спектрографов ФСПР. При этом используется понятие отражающей зоны как участка отражающей поверхности кристалла, на которой для падающего излучения заданной длины волны выполняется условие Брегга и эквивалентной ширины кривой отражения, которое учитывает естественное уширение спектральной линии и ширину кривой отражения кристалла.

Показывается, что для точечного источника, меридиональная составляющая аберраций в большинстве случаев лежит в пределах ширины спектральных линий, а сагиттальная составляющая отсутствует и это обуславливает в спектрографах ФСПР высокое пространственное разрешение в сагиттальном направлении.

Исследуется пространственное и спектральное разрешение в плоскости дисперсии. Полученные соотношения позволяют проводить оценку спектрального и пространственного разрешения в зависимости от размера источника и параметров схемы. Показывается, что даже для кристаллов с радиусом кривизны, равным 100 мм, практически для любых углов падения может быть получено спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda$ лучше 1000 и существует широкий диапазон углов падения, при которых можно получить спектральное разрешение вплоть до 10000. Показывается также, что пространственное разрешение в плоскости дисперсии составляет примерно $(40 + 60)$ мкм, что характеризует существенное различие между плоскостью дисперсии и сагиттальной плоскостью, в которой пространственное разрешение может составлять единицы микрон. Доказывается, что в схеме ФСПР-1 спектральное разрешение не зависит от размера источника.

Продемонстрировано, что в плоскости установки, линейное увеличение в сагиттальном направлении в пределах рабочего спектрального диапазона не является величиной постоянной. Указанная особенность схем спектрографов ФСПР должна учитываться при исследовании протяженных источников. Находится зависимость линейного увеличения от угла падения и расстояния между источником и кристаллом.

Топографическим методом исследуется влияние погрешностей установки элементов схемы спектрографов ФСПР на пространственное разрешение в сагиттальном направлении. Проводится несколько серий расчетов, моделирующих работу схем ФСПР в различных условиях. Показывается, что для схем с диспергирующими элементами с радиусами кривизны от 100 до 250 мм погрешности установки источника относительно кристалла, лежащие в пределах $\pm 0,1$ мм вызывают размытие изображений в сагиттальном направлении не более $(6 - 10)$ мкм, а погрешности в пределах ± 1 мм – не более $(40 - 60)$ мкм.

В четвертой главе представлены основные результаты, полученные с участием автора в экспериментах по исследованию лазерной плазмы с помощью разработанных в диссертации спектрографов ФСПР, целью которых являлась проверка теоретических положений и расчетных соотношений, полученных в работе. Приводится внешний вид разработанных образцов спектрографов ФСПР с кристаллами различного радиуса кривизны и детекторами различных типов (фотографическая пленка, ПЗС камеры, МКП с флюоресцирующим экраном). Спектрографы имеют предельно малые размеры, очень удобны при юстировке и могут быть

установлены практически в любой вакуумной камере. Например, на рис. 6 показан спектрограф ($R = 100$ мм) с ПЗС камерой в качестве детектора.

Спектрографы ФСПР были использованы для прецизионных измерений длин волн и идентификации ридберговских спектральных линий излучения многозарядных ионов высокотемпературной плазмы, для измерения длин волн и идентификации сателлитных структур в К-, L и M-спектрах многозарядных ионов, для измерения разности длин волн близлежащих

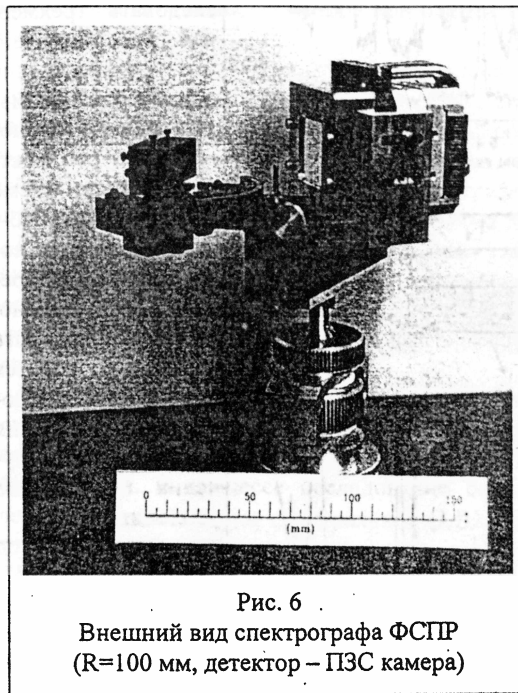
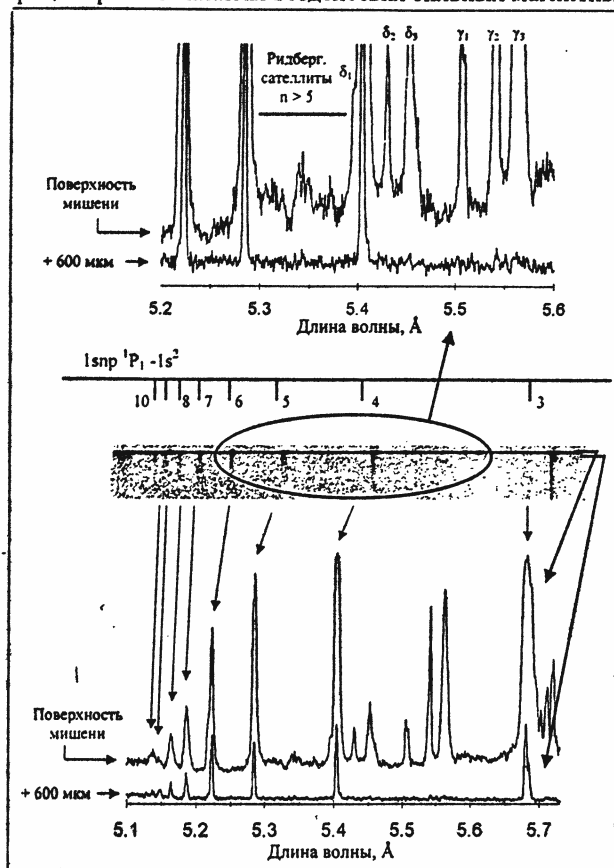


Рис. 6
Внешний вид спектрографа ФСПР
($R=100$ мм, детектор – ПЗС камера)

спектральных линий различных ионов. Сочетание высокого спектрального разрешения, пространственного разрешения и светосилы спектрографов ФСПР позволили повысить точность измерения длин волн рентгеновских спектральных линий до 5 раз (главным образом, за счет регистрации эмиссионных спектров из сравнительно разреженных областей плазмы, где уширение линий достаточно мало) и исследовать не наблюдавшиеся ранее малоинтенсивные спектральные переходы. Пример зарегистрированного спектра излучения He-подобных ионов Si XIII приведен на рис. 7. Впервые в мировой практике удалось получить, измерить длины волн и провести идентификацию сателлитных структур вблизи не только резонансной линии He_{α} , но и чрезвычайно малоинтенсивных сателлитов вблизи более высоких членов ридберговской серии He-подобного иона Si XIII.

Использование спектрографов ФСПР при решении задач диагностики высокотемпературной плазмы позволило получить информацию о пространственном распределении (одно- и двухмерном) параметров как неоднородных плазменных микрообъектов с линейными размерами < 100 мкм, так и протяженных плазменных источников в областях их низкой светимости (разлетающаяся лазерная плазма на больших расстояниях от

мишени), а также исследовать в отдельных спектральных линиях влияние на процесс разлета плазмы воздействия сильных магнитных полей.



Одновременное использование трех идентичных спектрографов ФСПР позволило впервые исследовать трехмерное пространственное распределение параметров активной среды рентгеновских лазеров, построенных по схеме нестационарно-столкновительного возбуждения. В результате показано, что однородность среды не является необходимым условием возникновения генерации и получения высокого усиления.

Рис. 7.
Спектр He-подобного Al, полученный помощью спектрографа ФСПР: слюда, R = 150 мм (Неодимовый лазер, 45 Дж, 8 нс, один импульс)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы:

1. Обоснованы принципы и технические пути построения аппаратуры, реализующей метод изображающей спектроскопии, с высокими светосилой, спектральным и пространственным разрешением, предназначенной для исследований оптических характеристик плотной высокотемпературной плазмы.
2. Обоснованы функциональные схемы фокусирующих спектрографов с одномерным пространственным разрешением (ФСПР-1) и двумерным пространственным разрешением (ФСПР-2) с диспергирующим элементом в

виде кристалла, изогнутого по сферической поверхности. На основе методов геометрической оптики получены расчетные соотношения для определения их основных параметров.

3. Разработана технология упругого изгиба кристаллов слюды и кварца по поверхностям малых радиусов кривизны. Впервые изготовлены высококачественные, сферически изогнутые, прямоугольной апертуры кристаллы с радиусами кривизны до $R=80$ мм для кристаллов слюды и до $R=150$ мм для кристаллов кварца при относительном отверствии в плоскости дисперсии до $1 : 1,5$.

4. Проведены исследования отражательных свойств кристаллов слюды. Теоретически и экспериментально показано, что выбранный оптический материал – слюда обладает хорошей отражательной способностью во многих порядках отражения, вплоть до XVIII-го, что позволяет существенно расширить рабочий спектральный диапазон спектрографов ФСПР и возможности для оптимизации параметров схемы в конкретных экспериментальных условиях.

5. Разработана конструкция и создана серия универсальных малогабаритных фокусирующих спектрографов с пространственным разрешением (ФСПР), на основе кристаллов, изогнутых по сферической поверхности, обладающих одновременно высокими спектральным и пространственным разрешением и высокой светосилой.

6. Экспериментальные исследования высокотемпературной плазмы, проведенные с помощью макетных образцов фокусирующих спектрографов, подтвердили правильность основных теоретических положений и расчетных соотношений. В процессе исследований были подтверждены их высокая светосила и достигнуты спектральное ($\lambda/\Delta\lambda$ до 10000) и пространственное (до 10 мкм) разрешение.

7. Предложены и реализованы схемы коллимации монохроматического рентгеновского излучения и схема рентгеновского теневого монохроматического микроскопа, основанные на использовании фокусирующих свойств кристаллов, изогнутых по сферической поверхности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Creation of Bragg X-ray optics for imaging spectroscopy of plasma microsources / T.A. Pikuz., B.A. Bryunetkin., A.Ya.Faenov et al. // SPIE. - 1994. - V. 2279. - P. 244-256.
2. Measurement of the Ly-L Mg resonance with 2s-3p Ne-like Ge line / J. Nilsen, P. Beiersdorfer, S.R. Elliott et al. // Phys.Rev.A. - 1994. - V.50, №3, P.2143-2149.
3. Получение двумерных монохроматических изображений лазерного факела с помощью сферического изогнутого кристалла слюды / Б.А. Брюнеткин, В.М. Дякин, Т.А.Пикуз и др. //Квантовая электроника. – 1994. - Т.21, №3, С.1 - 4.

4. Формирование струи многозарядных ионов в плазме, взаимодействующей с внешним магнитным полем / В.М. Дякин, Т.А.Пикуз, И.Ю. Скобелев и др. // Квантовая электроника. – 1994. - Т. 21, №12. – С.1186-1188.
5. Исследование радиационных свойств плазменных объектов методами рентгеновской изображающей спектроскопии / И.Ю. Скобелев, А.Я.Фаенов, Б.А. Брюнеткин и др. // ЖЭТФ. – 1995. - Т.81, № 5. - С. 692-718.
6. High resolution measurements of Mg XI and Cu XX resonance and satellite transition and resonance defect in the Mg-pumped Cu X-Ray scheme / A. Faenov, B. Bryunetkin, V.Dyakin et al.// Phys.Rev.A. – 1995. - V.52, №4. - P.3644-3649.
7. Bragg X-ray optics for imaging spectroscopy of plasma microsources / T.A. Pikuz, A.Ya. Faenov, S.A. Pikuz et al. // Journal of X-ray Science and Technology, – 1995. - V.5, №2. - P. 323-340.
8. Measurements and calculations of flat and spherically bent mica crystals reflectivity and using them for different applications in the spectral range 1-19 Å / T.A. Pikuz, A.Ya. Faenov, E. Foerster et al.// SPIE. – 1995. - V.2515. - P. 468-486.
9. Measurements of the ground-state ionization energy and wavelengths for the $1s^2\ ^1S_0 - 1snp\ ^1P_1$ ($n=6-12$) lines of Al XII / A.Osterheld, A.I. Magunov, V.M. Dyakin et al. // Phys. Rev. A.- 1996. – V. 54, №3 . - P. 3971-3976.
10. Прецизионные измерения энергии ионизации основного состояния и длин волн спектральных линий $nl-2l'$ ($n = 4-15$) Ne-подобного иона Ni XIX / А.И. Магунов, В.М.Дякин, А.Я.Фаенов и др. // ЖЭТФ. – 1996. - Т.110, вып. 2(8). -С.499-509.
- 11.Using X-ray spectroheliograph technique for investigations of laser-produced plasma under interaction with strong magnetic field / A. Faenov, V. Dyakin, A. Magunov et al. // Physica Scripta. – 1996. - V.53, №6. – P. 591-596.
12. FSSR mica spherical crystal spectrometer with CCD detector for high-resolution X-ray spectroscopy of femtosecond laser-produced plasma / J.P. Geindre, P. Audebert, A. Rousse et al. // Physica Scripta. – 1996. - V.53, №6. - P.645-647.
13. Доминирующая роль диэлектронных сателлитов в спектрах излучения лазерной плазмы вблизи поверхности мишени / Ф. Розмей, А. Фаенов, Т. Пикуз и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1997. - Т.65, № 9. - С. 679 - 684.
14. X-ray spectral images of high-repetition 120 fs laser-produced plasma / T.A. Pikuz, A.Ya. Faenov, M. Fraenkel et al. // SPIE. - 1997. - V. 3157. - P. 262-273.
15. Spectrally resolved image of 120 fs laser-produced plasma / A.Ya. Faenov, T.A. Pikuz, A.A. Firsov et al.// Physica Scripta. – 1997. - V.55, №2. - P. 167-169.

16. Generation of intense collimated monochromatic X-ray beam using femtosecond table-top laser / M. Fraenkel, A. Zigler, T.A. Pikuz et al. // *Physica Scripta*. – 1997. – V.56, №6. – P.571-574.
17. Монохроматическая рентгенография разлетающейся лазерной плазмы с высоким спектральным и пространственным разрешением / В.М. Дякин, А. И. Магунов, Т.А. Пикуз и др. // *Квантовая электроника*. – 1997. – Т.24, №1. – С. 75-78.
18. Наблюдение особенностей разлета лазерной плазмы в сильном поперечном магнитном поле по спектрам рентгеновского излучения / В.М. Дякин, А. И. Магунов, Т.А. Пикуз и др. // *Квантовая электроника*. – 1997. – Т.24, №11. – С. 1017-1020.
19. High-resolution X-ray spectrum of laser-produced barium plasma in the 9.10 + 9.36 Å wavelength range / R. Doron, E. Behar, M. Fraenkel et al. // *Phys. Rev. A*. – 1998. – V. 58, №2. – P. 1859–1866.
20. Особенности рентгеновских спектров плазмы, образующейся при нагреве CO₂ кластеров высокоинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами с $\lambda=0.8$ и 0.4 мкм / С. Добош, М. Шмидт, М. Педрикс и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т.68, № 6. – С. 454-459.
21. Не адиабатический нагрев плазмы, создаваемой ионизацией газа коротким, мощным лазерным импульсом / Н.Е. Андреев, М.В. Чеготов, М.Е. Вейсман и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т.68, № 8. – С. 566-571.
22. Рентгеновские спектры полых многозарядных ионов, излучаемые фемтосекундной лазерной плазмой / А.М. Урнов, Д. Дюбо, Т.А. Пикуз и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т.67, №7. – Р. 489-494.
23. Line formation of high intensity HeB Rydberg dielectronic satellites 1s3lnl' in dense laser-produced plasmas/ F.B. Rosmej, A. Ya. Faenov, T.A. Pikuz et al. // *J. Phys. B. Letters*. – 1998. – V. 31, № 6. – P. L921-931.
24. High-resolution X-Ray spectrometer based on spherically bent crystals for investigations of femtosecond laser plasmas / B.K.F. Young, A.L. Osterheld, D.F. Price et al. // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V.69, №8. – P. 4049-4053.
25. Flat and spherically bent muscovite (mica) crystals for X-Ray spectroscopy / G. Hoelzer, O. Wehrhan, J. Heinisch et al. // *Physica Scripta*, 1998, v.57, №2. – P.301-309.
26. Пикуз Т.А., Барышников Н.В. Приборы рентгеновской изображающей спектроскопии для контроля параметров плазменных источников // *Приборы и системы управления*. – 1998. – №3. – С. 27-29.
27. Direct spectroscopic observation of multiple charged ion acceleration by intense femtosecond pulse laser/ A.G. Zhidkov, A. Sasaki, T. Tajima et al. // *Phys. Rev. E*. – 1999. – V.60, №4. – P. 3273 - 3279 .
28. Наблюдение МэВ-ионов в лазерной плазме большого объема, создаваемой импульсами большой длительности / Ф.Б. Розмей, Д.

Хофманн, В. Сюсс и др. // Письма в ЖЭТФ. - 1999. - Т. 70, №4. - С. 262-267.

29. Наблюдение ионов с энергиями свыше 100 кэВ, образующихся при взаимодействии 60 фс лазерного импульса с кластерами / С. Добош, М. Шмидт, М. Педрикс и др. // ЖЭТФ. - 1999. - Т. 115, № 6. - С. 2051-2066.
30. Hot electron effects on the satellite spectrum of laser-produced plasmas / J., Abdallah Jr., A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz et al. // JQSRT. - 1999. - V. 62, №1. - P. 1-11.
31. Collimation of plasma produced X-Rays by spherical crystals: ray-tracing simulations and experimental results / M. Sanchez del Rio, M. Fraenkel, A. Zigler et al. // Rev. Sci. Instrum. - 1999. - V. 70, №3. - P. 1614-1620.
32. Large-field high resolution X-ray monochromatic microscope, based on spherical crystal and high-repetition-rate laser-produced plasmas / T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, M. Fraenkel et al. // SPIE. - 1999. - V. 3767. - P. 67-79.
33. M. Fraenkel, A. Zigler, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz. Large-field high-resolution X-Ray monochromatic microscope, based on spherical crystal and high-repetition-rate femtosecond laser-produced plasma // Physica Scripta. - 1999. - V. 59, №3. - P. 246.
34. Analysis of X-ray spectrum emitted by laser-produced plasma in 7.5 to 12 Å wavelengths range / R. Doron, E. Behar, M. Fraenkel et al. // Phys. Rev. A. - 2000. - V. 62. - P. 052508-12.
35. Исследование ионного состава плазмы магния, создаваемой излучением CO₂ лазера вблизи мишени и при разлете на большое расстояние / К.Н. Макаров, С.Г. Нишук, В.К. Перих и др. // Письма в ЖЭТФ. - 2000. - Т. 72, №1. - С. 13-18.
36. Measurements of the ground state ionization energy and wavelengths for the 2l - n^l transitions of Ni XIX (n=4-15) and Ge XXIII (n=7-9) / E. Biemont, A. I. Magunov, V. M. Dyakin et al. // J. Phys. B. - 2000. - V. 33, № 4. - P. 2153-2162.
36. Роль предимпульса при нагреве кластерных мишеней высокоинтенсивными лазерными импульсами фемтосекундной длительности / Т. Аугусте, П. Д'Оливейра, С. Хулин и др. // Письма в ЖЭТФ. - 2000. - Т. 72, № 2. - С. 55-60.
37. Portable, tunable, high-luminosity spherical crystal spectrometer with X-Ray charged couple device for high-resolution X-ray spectromicroscopy of clusters, heated by femtosecond laser pulses. / F. Blasco, C. Stenz, F. Salin et al. // Rev. Sci. Instrum. - 2001. - V. 72, №4. - P. 1956-1962.
38. Спектры рентгеновского излучения плазмы, создаваемой сверхкоротким лазерным импульсом в кластерных мишенях / К. Стенц, В. Багнуд, Ф. Бласко и др. // Квантовая электроника. - 2000. - Т. 27, №8. - С. 721-725.