

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

На правах рукописи

Шатохин Алексей Николаевич

**Разработка и исследование спектральных приборов на основе плоской
апериодической дифракционной решетки для мягкого рентгеновского
диапазона**

Специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Рагозин Евгений Николаевич

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук

Вишняков Евгений Александрович

Официальные оппоненты:

Скобелев Игорь Юрьевич

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

лаборатории №1.1 Диагностики вещества в экстремальном состоянии

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ФГБУН ОИВТ РАН)

Потёмкин Фёдор Викторович

кандидат физико-математических наук, доцент, Руководитель Центра

измерительных технологий и промышленной автоматизации МГУ имени
М.В. Ломоносова.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),

г. Москва, г. Троицк

Защита состоится «5» октября 2020 г. в 11:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.023.03 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН
по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического
Института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан «__»_____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

А.С. Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Мягкий рентгеновский (МР) диапазон является крайне интересной областью спектра для изучения, так как в этом диапазоне лежит излучение многих источников, таких как лазерная плазма [1, 2], быстрые электрические разряды, излучение космических объектов [3]. Также использование МР диапазона позволяет добиться лучшего пространственного разрешения в микроскопии, по сравнению с видимым и ультрафиолетовым диапазонами. Из практического применения излучения МР диапазона необходимо упомянуть рентгеновскую литографию.

В 1893 г. М. Корню пришел к выводу, что равномерное изменение шага отражательной дифракционной решетки по ее апертуре приводит к изменению кривизны волнового фронта дифрагированных пучков и меняет положение спектрального фокуса [4]. В 1970-1980-е годы к этим идеям обратились Ф.М. Герасимов и др., Т. Харада, М. Хеттрик, Дж. Андервуд, и другие. В работе 1970 г. Ф.М. Герасимова и др. [5] сообщалось об изготовлении решёток ($R = 1$ м, $p = 300$ и 600 мм⁻¹) с полным относительным изменением шага на уровне $\sim 10^{-2}$. Такое сравнительно небольшое изменение шага позволяет компенсировать астигматизм в схемах нормального падения. Между тем, для создания МР спектрометров с новыми свойствами требуются отражательные решетки, у которых пространственная частота штрихов меняется на апертуре на десятки процентов или даже вдвое и более раз. В настоящее время решетки с шагом, монотонно изменяющимся на апертуре по заданному закону, получили название VLS-решеток (Varied Line-Space gratings), причем используются как плоские, так и вогнутые VLS-решетки. Задача по созданию VLS-решеток с существенной вариацией шага была решена методами механической гравировки, интерференционной литографии и электроннолучевой литографии. Так Харада разработал механический гравировальный станок, позволяющий нарезать плоские и вогнутые VLS-решетки [6]. В наши дни область применения VLS-решеток в оптике и спектроскопии далекой вакуумной ультрафиолетовой и МР области спектра весьма широка. Они используются в спектроскопии и диагностике лабораторной плазмы [7], астрофизике, микроскопии и рефлектометрии с использованием синхротронного излучения [8] и др. Важная особенность спектрометров на основе VLS-решеток состоит в том, что спектр формируется на плоской поверхности, перпендикулярной (или слабо наклонной)

по отношению к дифрагирующим пучкам. Это делает их совместимыми с современными твердотельными детекторами с электрическим считыванием изображения (в частности, с матричными приборами с зарядовой связью (ПЗС) типа backside-illuminated CCDs) и плоской чувствительной поверхностью. Некоторые схемы с VLS-решетками строят стигматические спектральные изображения в МР диапазоне спектра. Создание и применение VLS-решеток стало частью ренессанса рентгеновской оптики [9].

Задача построения спектральных изображений и, как частный случай, линейчатых спектров с пространственным разрешением в МР диапазоне возникает при исследовании лабораторной и астрофизической плазмы, а также при характеристике лабораторных источников МР излучения. Требования к пространственному разрешению часто бывают довольно высоки: в ряде экспериментов требуется пространственное разрешение на уровне ~ 10 мкм и даже ~ 1 мкм.

Задачу получения спектров с однокоординатным пространственным разрешением и построения спектральных изображений решает изображающий (стигматический) дифракционный спектрометр. Существует несколько вариантов такого спектрометра.

К настоящему времени многослойная рентгеновская оптика нормального падения прочно вошла в эксперименты по регистрации МР излучения и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы [9, 15]. Использование МЗ нормального падения позволяет строить стигматические изображения высокого качества при относительно большом приемном угле, причем спектральное разрешение, как правило, определяется шириной резонансного контура отражения МЗ. В последнее время, получают широкое распространение апериодические многослойные зеркала (АМЗ) нормального падения [15]. В частности, использование АМЗ нормального падения, оптимизированного на равномерное отражение в широком спектральном диапазоне, перспективно для применения в стигматических спектральных приборах.

Работ по совместному применению VLS-решеток и АМЗ нормального падения в мягком рентгеновском диапазоне ранее не проводилось. Одной из целей этой работы является создание МР-спектрометра, который бы совмещал преимущества АМЗ зеркал и VLS-решеток.

Как следует из вышесказанного, в последние годы большинство спектрометрических исследований в МР области спектра происходит с использованием VLS-решеток. Однако после работ Герасимова [5] по созданию

VLS-решеток для видимой области спектра в 70-х годах прошлого века, отечественные работы по созданию и использованию VLS-решеток скользящего падения для МР-области спектра не проводились. Поэтому, наряду с созданием МР-спектрометров с плоской VLS-решеткой, одной из целей настоящей работы было создание отечественных VLS-решеток для МР области спектра.

Цели и задачи

Настоящая работа посвящена разработке новых рентгенооптических элементов (плоских VLS-решеток) и спектральных приборов на их основе для мягкого рентгеновского диапазона спектра (50 – 300 Å) для проведения с их помощью спектральных исследований лабораторной плазмы.

Основными задачами работы являлись:

1. Разработка методов расчета спектрометров МР-диапазона на основе плоских дифракционных решеток с переменной частотой штрихов (плоских VLS-решеток).
2. Анализ поведения фокальных поверхностей рентгенооптической схемы при изменении параметров VLS-решетки. Анализ возможности компенсации меридиональной комы и сферической аберрации при помощи VLS-решетки.
3. Создание первых отечественных VLS-решеток для МР диапазона.
4. Разработка стигматического спектрометра на основе плоской отражательной VLS-решетки скользящего падения и фокусирующего широкополосного (125 – 300 Å) (аперидического) многослойного зеркала нормального падения для достижения одновременно и высокого пространственного, и высокого спектрального разрешения во всем рабочем спектральном диапазоне при высокой светосиле прибора.
5. Разработка сканирующего спектрометра/монохроматора высокого разрешения с неизменным углом отклонения и постоянным фокусным расстоянием (класса Хеттрика-Андервуда) на основе плоской отражательной VLS-решетки скользящего падения и фокусирующего зеркала скользящего падения.
6. Демонстрация возможностей созданных спектрометров для диагностики лабораторной плазмы; измерение электронной плотности в разлетающейся лазерной плазме по штарковскому уширению спектральных линий.

Научная новизна

В работе впервые получены следующие результаты:

1. Показана возможность выполнить условие строгой компенсации астигматизма на двух длинах волн в мягком рентгеновском диапазоне при дифракции слабоастигматического (квазигомоцентрического) пучка на плоской VLS-решетке.

2. Впервые рассчитан, создан и испытан оригинальный изображающий спектрометр на область $125 - 250 \text{ \AA}$ на основе фокусирующего сферического Mo/Si зеркала, оптимизированного на равномерное отражение в области $125 - 250 \text{ \AA}$, и плоской отражательной VLS-решетки. Спектрометр испытан при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в лазерной плазме с пространственным разрешением. Продемонстрирован практический стигматизм прибора во всем широком спектральном диапазоне при высокой светосиле прибора ($(D/f)^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$) и спектральной разрешающей способности ~ 1000 .

3. Рассчитан, создан и испытан первый отечественный спектрометр/монохроматор класса Хеттрика–Андервуда, который может использоваться либо как монохроматор, либо как сканирующий спектрометр с плоским полем, у которого при фиксированном угле поворота решетки ширина рабочего спектрального диапазона составляет несколько десятков ангстрем.

4. Проведены аналитические расчеты VLS-решеток для использования в оригинальных схемах спектральных приборов, на основе которых в ЦКП-МФТИ (Долгопрудный) и в НПО ГИПО (Казань) были созданы первые отечественные плоские VLS-решетки для исследований в МР диапазона спектра. При регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов экспериментально показано, что в схеме стигматического спектрометра VLS-решётка, изготовленная методом электронной литографии (ЦКП-МФТИ), обеспечивает разрешающую способность ~ 500 , тогда как VLS-решётки, изготовленные методом интерференционной литографии (НПО ГИПО), обеспечивают разрешающую способность ~ 1000 , причем в последнем случае спектральное разрешение спектрометра определяется размером ячейки ПЗС-детектора (13 мкм).

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработан новый подход к построению стигматических спектральных изображений высокого разрешения в МР диапазоне на основе совместного использования фокусирующей многослойной рентгеновской оптики

нормального падения и плоской аperiodической дифракционной решетки скользящего падения.

Развиты методы расчета, оптимизации и конструирования VLS-спектрометров различных типов с плоской VLS-решеткой, включая аналитические расчеты и построение спектральных изображений методом численной трассировки лучей. Накопленный опыт позволяет разрабатывать специализированные VLS-спектрометры, учитывающие специфику научной задачи и источника МР-излучения.

Работа привела к созданию первых отечественных VLS-решеток для МР диапазона спектра. Решетки изготовлены методом электронной литографии (ЦКП-МФТИ, Долгопрудный) и методом интерференционной литографии (ГИПО, Казань). Положено начало развитию отечественной технологии изготовления VLS-решеток для МР диапазона спектра.

Рассчитана и реализована оригинальная схема стигматического спектрометра высокого разрешения на основе фокусирующего широкополосного ($125 - 250 \text{ \AA}$) (аperiodического) многослойного зеркала нормального падения и плоской VLS-решетки скользящего падения. Прибор обладает высокой спектральной разрешающей способностью (~ 1000) и высоким пространственным разрешением (26 мкм), а также высокой светосилой.

Создан и испытан первый отечественный сканирующий спектрометр/монохроматор высокого разрешения класса Хеттрика–Андервуда с постоянным углом отклонения. Данный прибор подходит для целей метрологии/рефлектрометрии и прекрасно совместим с современными ПЗС-детекторами.

Созданные спектрометры применимы для диагностики плазмы многозарядных ионов с пространственным разрешением.

Накоплен опыт создания действующих образцов VLS-спектрометров для МР диапазона.

Методы исследования

Работа проведена с использованием современного экспериментального оборудования. Эксперименты проводились в модернизированной вакуумной камере ИКАР длиной 3.8 м и диаметром 0.9 м [10], оснащенной системой откачки с остаточным давлением менее $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Для получения лазерной плазмы использовался импульсный наносекундный лазер Nd:YAG фирмы Quantel YG980 с длительностью импульса 9 нс, энергией в импульсе 0.5 Дж и частотой следования импульсов 10 Гц, с возможностью работы в режиме

одионого импульса. Спектры регистрировались при помощи двух детекторов на основе ПЗС-матриц с обратной засветкой (backside-illuminated):

1. ПЗС матрица фирмы e2v, имеющая 2048 x 1024 квадратных ячеек с размером 13 мкм. Длина матрицы 26.6 мм.

2. ПЗС-детектор (2048 x 512 ячеек) Greateyes (Германия). Размер квадратных ячеек: 13.5 мкм.

Для точного позиционирования оптических элементов и ПЗС матриц использовались моторизированные позиционеры фирмы Standa в вакуумном исполнении с компьютерным управлением.

Для расчетов методом трассировки лучей использовалось программное обеспечение: программа XOP (X-ray Oriented Programs) версии 2.3 с расширением SHADOWVUI (находится на сайте ESRF в свободном доступе [11]), а также программы собственной разработки.

Личный вклад автора

Автор участвовал лично во всех описываемых экспериментах, в том числе в планировании, сборке и юстировке оптических схем, работе с вакуумной камерой и лазером, а также регистрации экспериментальных спектров, их анализе и интерпретации. Все расчеты схем спектрометров и параметров VLS-решеток, а также численная трассировка лучей, описанные в диссертации, проведены автором лично.

Автору принадлежит идея использовать слабоастигматический пучок падающий на VLS-решетку для строгой компенсации астигматизма дифрагированного пучка на двух длинах волн.

Положения, выносимые на защиту

1. Схема стигматического спектрометра для мягкого рентгеновского диапазона на основе фокусирующего аперидического многослойного зеркала нормального падения и плоской VLS-решётки скользящего падения позволяет строго скомпенсировать астигматизм на двух длинах волн и обеспечить высокое качество спектральных изображений в широком спектральном диапазоне (более октавы длин волн).

2. Рассчитанный и реализованный спектрометр на основе фокусирующего аперидического многослойного зеркала и плоской VLS-решётки обладает высокой спектральной разрешающей способностью 1000 при одновременном высоком пространственном разрешении 26 мкм и высоким приемным углом $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ ср, продемонстрированными при регистрации линейчатых спектров лазерной плазмы в диапазоне 125 - 250 Å.

3. Проведена диагностика лазерной плазмы с пространственным разрешением ~ 26 мкм с помощью созданного стигматического спектрометра на основе плоской VLS-решетки. Измеренная электронная плотность в лазерной плазме $[\text{CH}_2]_n$ по штарковскому уширению линии H (135 Å) водородоподобного иона C VI составила $4.5 - 0.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от расстояния до мишени (13 - 500 мкм).

4. Рассчитанный и реализованный первый отечественный сканирующий спектрометр/монохроматор класса Хеттрика-Андервуда на основе плоской отражательной VLS-решетки скользящего падения и фокусирующего зеркала скользящего падения обладает высоким спектральным разрешением в области длин волн 50 - 330 Å. Продемонстрированная спектральная разрешающая способность на длине волны 182 Å составляет ~ 1300 .

Степень достоверности

Достоверность аналитических расчетов подтверждается численной трассировкой лучей с использованием различных программ. Кроме того, полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность расчетов и проектирования приборов. Результаты не противоречат ранее известным литературным данным, неоднократно апробированы на международных и российских конференциях, научных семинарах

Апробация результатов

Результаты данной работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах ФИАН, а также на 15 всероссийских и международных конференциях: 55-я и 56-я научная конференция МФТИ (Москва-Долгопрудный-Жуковский, 2012, 2013 гг), The first, the second and the third international workshop MIPT (Moscow, Russia) – UEC (Tokyo, Japan): atomic, molecular and optical physics (Moscow, Tokyo, Japan, 2013, 2014, 2015), V Всероссийская молодёжная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (Москва, 2013), «РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА — 2014» (Черноголовка, 2014), 15th International Conference on X-Ray Lasers (Nara, Japan, 2016), Научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития» (Москва, 2016), XIX – XXIII Международный симпозиум «Нанопластика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2015 – 2019 гг)

Работа была выполнена при поддержке грантов: Программа ОФН РАН «Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения». Участие в 2013 – 2014 гг. Проекты РНФ №14-12-00506, 2014 – 2016 гг. и №14-12-00506-п.,

2017 – 2018 гг. Работа «Стигматический спектрометр с дифракционной решеткой с неэквидистантными штрихами для мягкого рентгеновского диапазона спектра» победила в конкурсе и получила поддержку программы «УМНИК-МФТИ-весна 2013» автор А.Н. Шатохин.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 7 в рецензируемых журналах входящих в базу данных Web of Science, 11 в материалах конференций и глава в монографии. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 97 страниц, в том числе 38 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 62 наименования.

Основное содержание работы

Во введении диссертации дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы. Также сформулированы положения выносимые на защиту, обоснована степень достоверности и апробации результатов. Приведен список публикаций, опубликованных по результатам диссертации.

В первой главе описаны фокусирующие свойства VLS-решеток в зависимости от параметров решетки. Во второй части главы представлены технологии, с помощью которых были изготовлены VLS-решетки.

Раздел 1.1 посвящен технике расчета плоских VLS-решеток.

Свойства аperiодической дифракционной решетки, шаг которой монотонно меняется по заданному закону, или так называемой Varied Line-Space grating (VLS-решетки) определяется пространственной частотой штрихов в зависимости от координаты $p(w) = p_0 + p_1w + p_2w^2 + p_3w^3 + \dots$

В разделе 1.1.1 описаны свойства VLS-решеток исходя из принципа Ферма. Этот подход был применен Т. Намиокой для расчета классических (периодических) решеток [54], и Т. Харадой для VLS-решеток [37], с применением разложения вариации длины оптического пути в ряд Тейлора по координате. Этот подход позволяет получить первые коэффициенты разложения $p(w)$ в ряд Тейлора.

При помощи новых членов, содержащих коэффициенты $p_1, p_2, p_3, \dots$, можно изменять кривизну волнового фронта дифрагированных пучков. А именно, с помощью члена с p_1 можно модифицировать спектральную фокальную кривую, с помощью p_2 можно компенсировать aberrацию меридиональной комы, а с помощью p_3 можно компенсировать сферическую aberrацию. При этом нужно иметь в виду, что полезные свойства приобретаются в ограниченном интервале длин волн и углов. Решетка делается более специализированной, менее универсальной, но при этом позволяет добиться желаемой совокупности свойств прибора в выбранной геометрии для выбранных длин волн.

В разделе 1.1.2 получены свойства VLS-решеток исходя из лучевого приближения. Оригинальный подход решает задачу нахождения местной частоты штрихов, т.е. требуемую зависимость частоты штрихов от координаты для получения заданных геометрических характеристик дифрагированного излучения (расстояние до фокуса и отсутствие aberrаций). Рассматривается схема, в которой на плоскую отражательную дифракционную решётку падает сходящийся пучок (рисунок 1.1).

Решение задачи нахождения такой зависимости частоты штрихов $p(w)$ - от координаты на решётке, чтобы совпали вертикальный и горизонтальный фокусы:

$$mp(w)\lambda = \cos \left[\operatorname{arccctg} \left(\operatorname{ctg}(\varphi) - \frac{w}{L_1 \sin \varphi} \right) \right] - \cos \left[\operatorname{arccctg} \left(\operatorname{ctg}(\psi) - \frac{w}{L_2 \sin \psi} \right) \right]$$

Выбор такой частоты штрихов компенсирует астигматизм и связанные с решёткой aberrации высших порядков. Более того, если на решётку падает не строго гомоцентрический пучок, например, не совпадают вертикальный и горизонтальный фокусы, то подбором параметров L_1 и L_2 это расхождение можно скомпенсировать.

Сформулированный наглядный подход к выбору зависимости частоты штрихов от положения на апертуре $p(w)$ для получения фокуса на требуемом расстоянии от VLS-решетки без aberrаций в главной плоскости позволяет сразу получить аналитическую зависимость $p(w)$, а не первые члены разложения её в ряд Тейлора, как в подходе, рассмотренном в разделе 1.1.1.

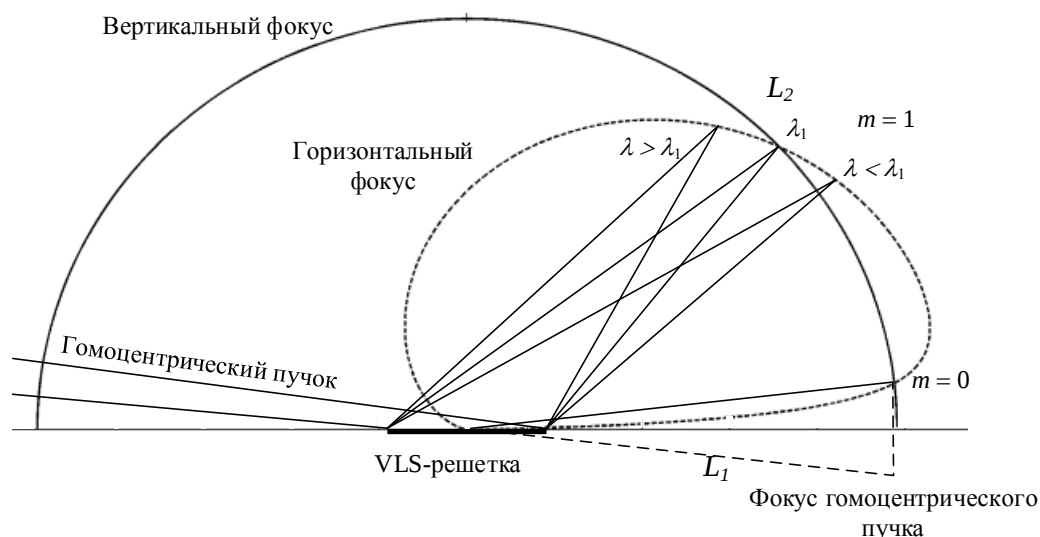


Рисунок 1.1. Компенсация астигматизма на одной ненулевой длине волны (λ_1) при падении сходящегося гомоцентрического пучка на плоскую VLS-решетку (m – порядок дифракции). Вертикальная фокальная кривая изображена дугой окружности с радиусом равным расстоянию до фокуса падающего пучка от центра решетки и центром в центре решетки. В случае, когда длина волны отличается от λ_1 , горизонтальный (спектральный) фокус отличается от вертикального (пунктирная кривая).

В разделе 1.2 описаны особенности доступных методов изготовления плоских VLS-решеток и обсуждаются VLS-решетки, изготовленные по результатам совместной с производителями работы.

В России методом интерференционной литографии изготавливаются классические (периодические) дифракционные решетки во многих, в том числе коммерческих, организациях. В частности, ГИПО, г. Казань. Однако для изготовления VLS-решеток требуется создание новой оптической схемы записи.

Электронно-лучевая литография также широко распространена в России, однако она не используется для создания дифракционных решеток. Основная проблема - это создание большого изображения на подложке с высокой сквозной точностью построения изображения.

Преимущество электронно-лучевой литографии в том, что можно задать любое изображение и точно его воспроизвести, а значит частоту штрихов в заданной точке можно получить с высокой точностью. Однако, из-за возникающих технических проблем, непрерывность изменения частоты штрихов нарушается. Этого недостатка лишена интерференционная литография: получаемая зависимость частоты штрихов от координаты меняется непрерывно.

Однако, по причине сложности выбора оптической схемы записи, полученная зависимость частоты штрихов может несколько отличаться от заложенной.

В разделе 1.2.1 рассмотрена первая отечественная VLS-решетка для мягкой рентгеновской области спектра, изготовленная в ЦКП МФТИ методом электронно-лучевой литографии (рисунок 1.2) по результатам совместной работы. Рассмотрены особенности этой решетки, которые ухудшают качество построенных с её помощью изображений. Использование этой VLS-решетки в схеме стигматического спектрометра показало справедливость оценок – прибор показал разрешающую способность $R \sim 500$ (см. раздел 2.2).

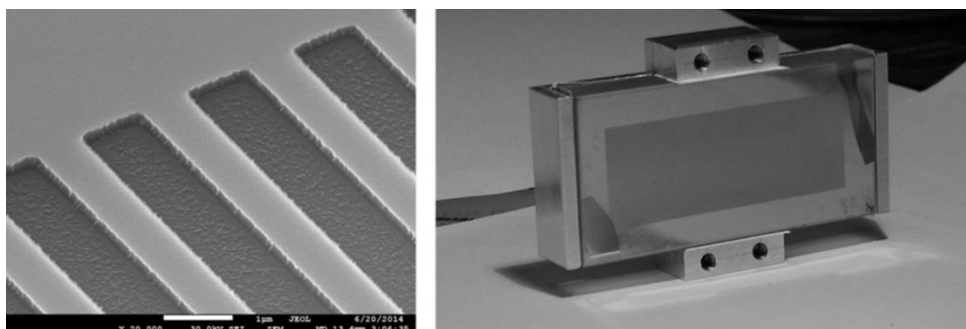
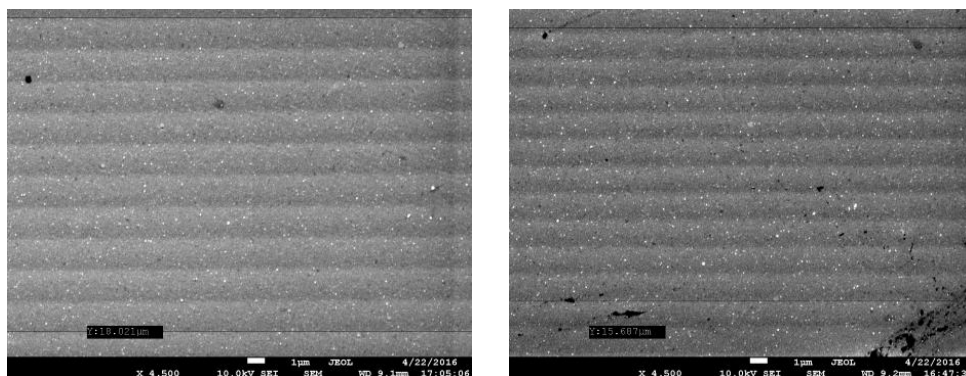


Рисунок 1.2. Изображение, полученное на сканирующем электронном микроскопе, края VLS-решетки, изготовленной методом электронно-лучевой литографией (слева) и фотография этой решетки в оправке (справа).

В разделе 1.2.2 рассмотрена вторая отечественная VLS-решетка изготовленная методом интерференционной литографии в НПО ГИПО (г. Казань) (рисунок 1.3, 1.4) по оптической схеме, подобранной в НПО ГИПО. В качестве отражающей поверхности служит золото.



Местная частота штрихов
1.802 мкм 1.569 мкм

Рисунок 1.3. Изображения поверхности VLS-решетки с двух противоположных концов, изготовленной методом интерференционной литографии, полученные с помощью электронного микроскопа.

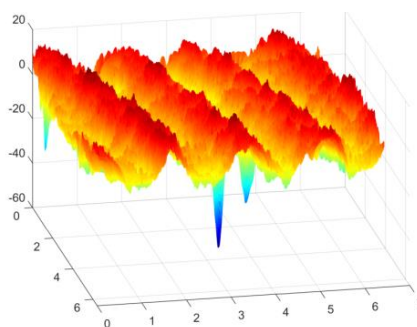
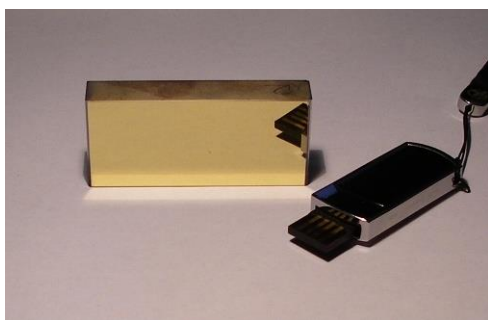


Рисунок 1.4. Фотография VLS-решетки этой решетки (слева). Изображение участка поверхности VLS-решетки изготовленной методом интерференционной литографии, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (справа).

Основная сложность этого метода заключается в создании схемы записи, реализующей требуемый закон частоты штрихов на апертуре. Несмотря на то, что закон изменения частоты штрихов, получившийся методом интерференционной литографии, не точно соответствует расчетному, он остается гладким и непрерывным, в отличие от закона, получившегося методом электронно-лучевой литографии. Так что незначительной модификацией схемы спектрального прибора, в котором будет использоваться полученная решетка, можно скорректировать «требуемый» закон частоты штрихов для лучшего соответствия полученному.

В разделе 1.3 сформулированы основные результаты Главы 1

Во второй главе представлен изображающий спектрометр на основе плоской отражательной дифракционной VLS-решетки скользящего падения и фокусирующего широкополосного ($125 - 300 \text{ \AA}$) (апериодического) многослойного зеркала нормального падения для достижения одновременно и высокого пространственного, и высокого спектрального разрешения при высокой светосиле прибора (рисунок 2.1).

В разделе 2.1 проведен расчет этого спектрометра. В работе речь идёт о возможности создания стигматического спектрографа, обладающего высоким разрешением и сильной дисперсией, характерными для схем скользящего падения, и одновременно относительно высокой светосилой и большим полем зрения за счёт использования VLS-решетки в комбинации с вогнутым многослойным зеркалом нормального падения, которое направляет на нее сходящийся почти гомоцентрический пучок. Рабочий спектральный диапазон такого спектрометра будет определяться спектром отражения многослойного зеркала. В первых расчетах (приводимых в данной работе) мы будем иметь в виду апериодическое многослойное Mo/Si-зеркало, обладающее равномерным отражением ($\sim 15-20\%$) в диапазоне $125-250 \text{ \AA}$ [13].

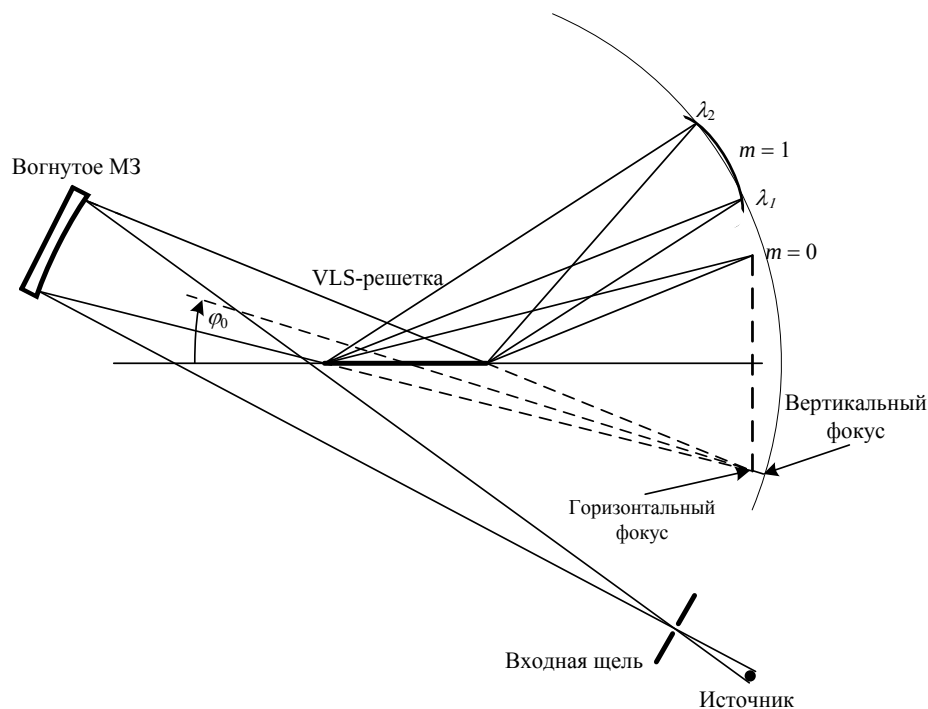


Рисунок 2.1. Схема стигматического спектрометра

При этом полная компенсация астигматизма достигается на двух длинах волн, а практический стигматизм достигается во всем спектральном диапазоне спектрографа. Компенсация aberrаций высших порядков происходит на одной длине волны.

Несмотря на то, что имеется остаточный астигматизм, можно добиться того, что размер изображения на детекторе, вызванный расфокусировкой, составляет менее 13 мкм, что соответствует размеру ячейки современных CCD детекторов. Таким образом, можно говорить о «практическом стигматизме». Это означает, что спектрограф строит двумерные спектральные изображения объекта с хорошим пространственным разрешением вдоль дисперсии и поперёк (рисунок 2.2).

В разделе 2.2 описана практическая реализация прибора (рисунок 2.3) и продемонстрированы полученные экспериментальные данные. Для этого были выбраны параметры спектрометра, представленные в таблице 2.1. Для данного прибора были изготовлены VLS-решетки двумя различными способами: первый вариант — электронно-лучевой литографией и второй вариант — интерференционной литографией. Спектрограф помещался в вакуумную камеру ИКАР [10] размером 3.8×0.9 м, откачиваемую до $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Моторизованные столики управлялись с компьютера, на экран которого выводилось также регистрируемое спектральное изображение.

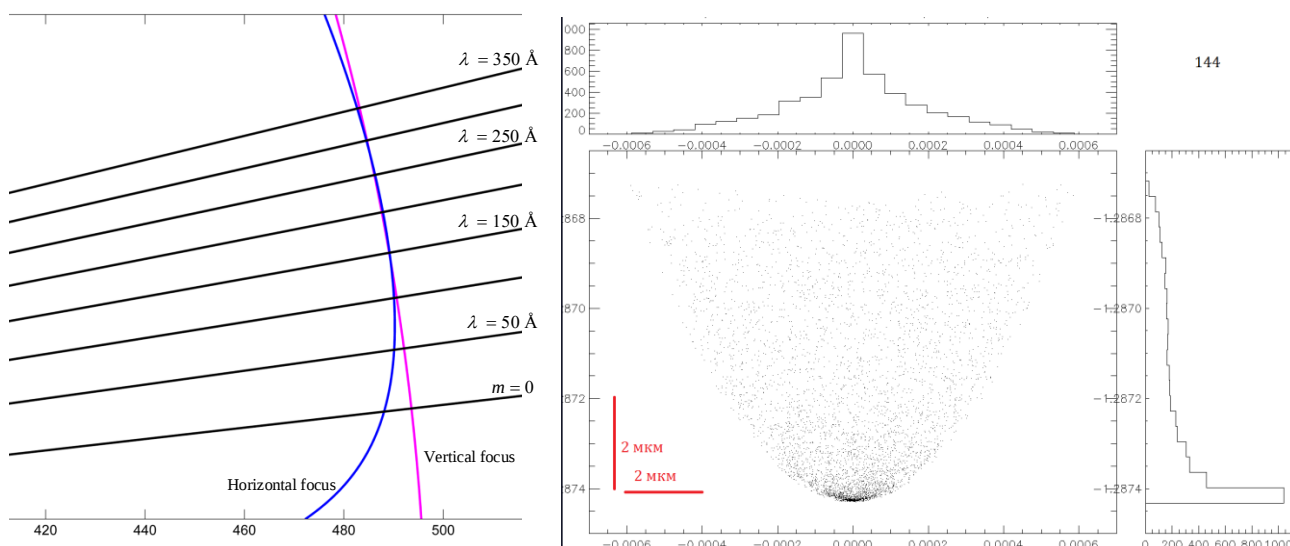


Рисунок 2.2 Пример взаимного расположения кривых спектрального (синий) и пространственного (красный) фокуса (слева) и пример изображения точечного монохроматического источника (144 Å), полученного с помощью численной трассировки лучей (справа). Направление дисперсии – вверх.

Лазерная плазма создавалась при фокусировке импульса излучения неодимового лазера (0.5 Дж на мишени, 10 нс) на плоскую вращающуюся мишень, поверхность которой лежала в главной плоскости спектрометра. Оптическая схема была рассчитана таким образом, что плоскость детектора совпадала с горизонтальным (спектральным) фокусом изображения входной щели и с вертикальным (пространственным) фокусом изображения лазерной плазмы. Благодаря этому прибор обладал как спектральным, так и пространственным разрешением, давая зависимость интенсивности спектральных линий от расстояния до мишени (до границы света и тени).

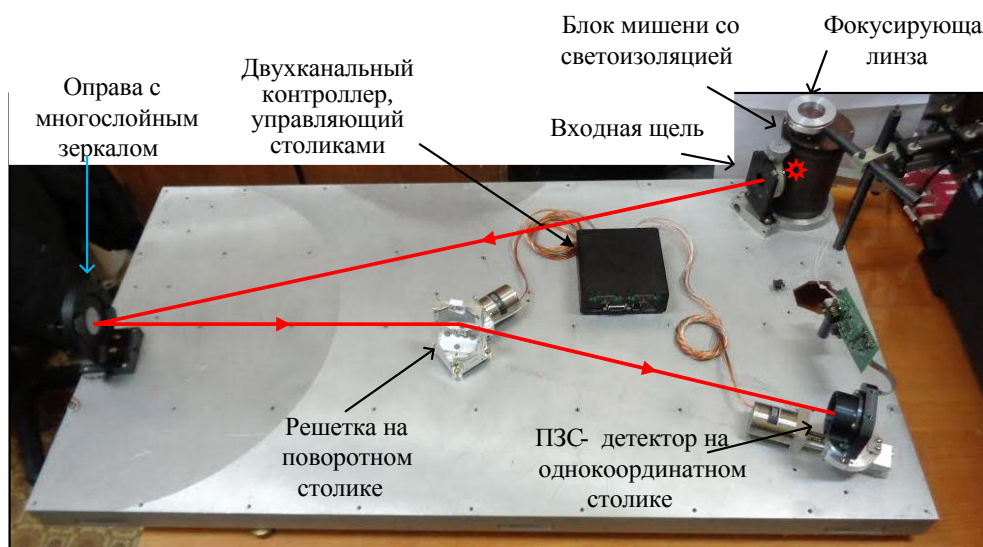


Рисунок 2.3. Фотография реализованного варианта стигматического спектрометра.

Таблица 2.1. Параметры спектрометра, в зависимости от VLS-решетки: 1 – для расчетной VLS-решетки, 2 – для VLS-решетки, изготовленной в ЦКП МФТИ, электронно-лучевая литография, 3 – для VLS-решетки, изготовленной в НПО ГИПО, интерференционная литография

	1	2	3
Угол падения на зеркало, α	7.59 °	7.59 °	7.59 °
Расстояние источник – щель, x	30 мм	24 мм	30 мм
Первая длина волны с точной фокусировкой, λ_1	144 Å	144 Å	144 Å
Вторая длина волны с точной фокусировкой, λ_2	272 Å	272 Å	272 Å
Угол падения на решетку, φ_0	6.44 °	6.44 °	6.44 °
Угол дифракции на длине волны λ_1 , ψ_0	9.92 °	9.92 °	9.92 °
Расстояние зеркало-решетка, L_g	500 мм	500 мм	461.2 мм
Расстояние горизонтальный фокус зеркала - решетка, L_1	496.7 мм	496.7 мм	535.5 мм
Расстояние вертикальный фокус зеркала - решетка, L_2	491.2 мм	491.2 мм	530.0 мм
Расстояние зеркало - щель, L_s	991.2 мм	991.2 мм	991.2 мм
Параметры закона частоты штрихов VLS-решетки, $p(w) = p_0 + p_1 \cdot w + p_2 \cdot w^2 + \dots$	p_0	600 шт/мм	600 шт/мм
	p_1	2.37 шт/мм ²	2.32 шт/мм ²
	p_2	$6.9 \cdot 10^{-3}$ шт/мм ³	$8.3 \cdot 10^{-3}$ шт/мм ³
Средняя обратная линейная дисперсия, $1/D$	5.78 Å/мм	5.5 Å/мм	5.35 Å/мм
Разрешающая способность, R	1500	500	1000

Первый вариант спектрометра с VLS-решеткой, изготовленной методом электронно-лучевой литографии, а второй вариант спектрометра с VLS-решеткой, изготовленной методом интерференционной литографии. Получены спектры LiF плазмы для обоих вариантов (рисунок 2.3).

В первом варианте продемонстрирована спектральная разрешающая способность ~500 (консервативная оценка), а во втором ~900. Пространственное разрешение (по вертикали), оцененное на границе света и тени, отвечает двум ячейкам детектора, что составляет 26 мкм в обоих вариантах.

Проведен анализ и сравнение полученных спектров. Показано, что при переходе от решетки, изготовленной методом электронно-лучевой литографии, к решетке, изготовленной методом интерференционной литографии, происходит сужение линий и спектральное разрешение во втором варианте выше.

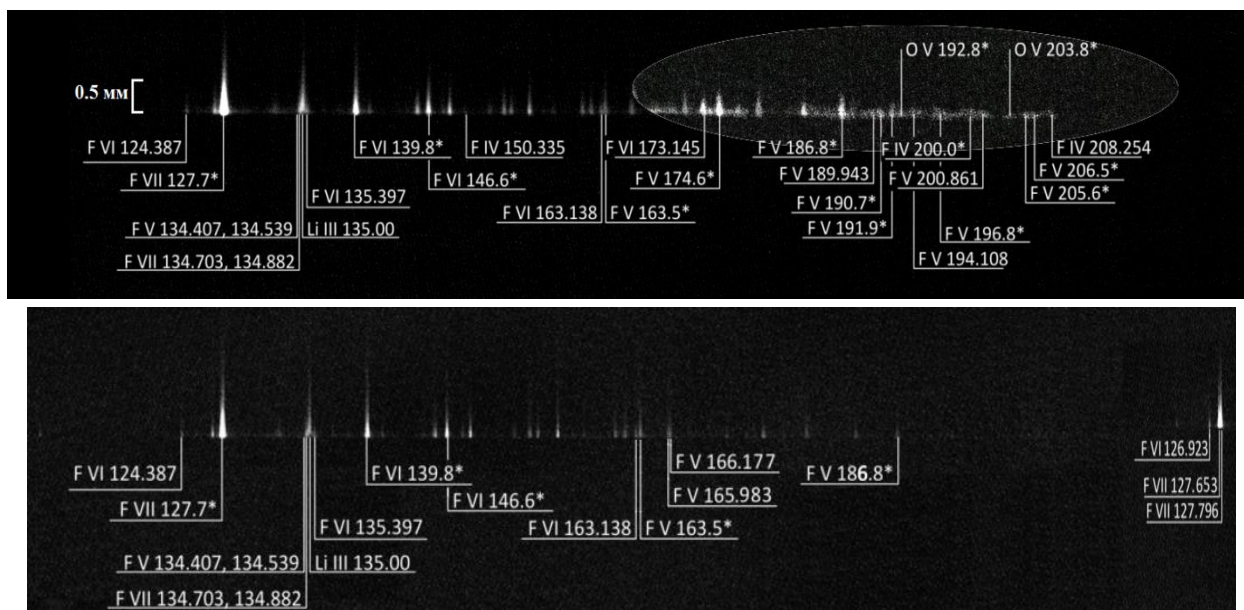


Рисунок 2.3. Участок спектра LiF плазмы зарегистрированный с помощью разработанного стигматического спектрометра с использованием VLS-решетки изготовленной методом электронно-лучевой литографии (сверху) и методом интерференционной литографии (снизу).

Для консервативной оценки разрешающей способности второго варианта спектрометра был получен спектр Mg плазмы (рисунок 2.4).

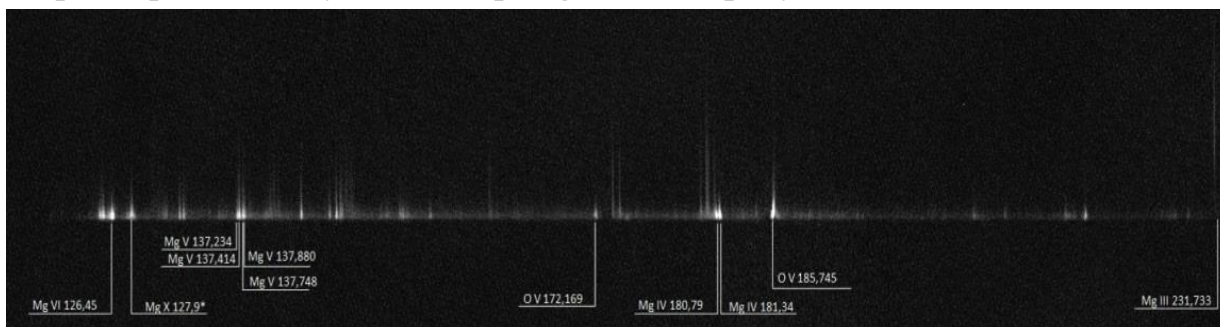


Рисунок 2.4. Участок спектра Mg плазмы зарегистрированный с помощью разработанного стигматического спектрометра с использованием VLS-решетки изготовленной методом интерференционной литографии.

Ширина входной щели также составляла 30 мкм. При этом полуширины линий (FWHM) приходятся на две ячейки детектора (26 мкм). Ближайшие линии, уверенно разрешаемые в первом порядке дифракции, это линия 137.234 Å иона Mg V и линия 137.414 Å иона Mg V, что дает $\lambda/\delta\lambda \sim 760$. При этом пара линий 137.748 Å и 137.880 Å иона Mg V не разрешаются в первом порядке (Рисунок 2.4), но разрешаются во втором порядке дифракции, что демонстрирует разрешающую способность 1000.

В разделе 2.3 продемонстрировано применение спектрометра для диагностики лабораторной плазмы. При измерении штарковского уширения

линий серии Бальмера водородоподного углерода сделана оценка электронной плотности в плазме. Обсуждены границы применимости данного метода для измерения электронной плотности (рисунок 2.6).

Используя разработанный прибор и полиэтиленовую мишень, получен спектр $[C_2H_2]_n$ плазмы. На рисунке 2.5 представлен участок полученного спектра, содержащий линии ионов C IV, C V, C VI. Интерес представляет линия перехода C VI $4s \rightarrow 2p$ 134,912 Å.

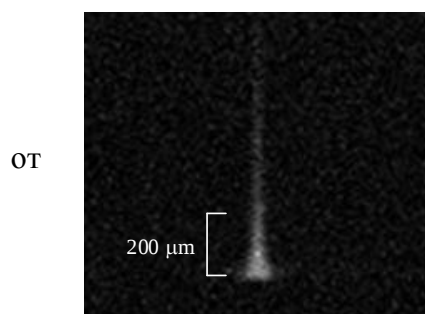


Рисунок 2.5. Уширение линии перехода H_β водородоподобного иона C VI (135 Å, $4 \rightarrow 2$) в зависимости расстояния до мишени.

Согласно [14], ширина Штарковского уширения в зависимости от ионной плотности N_i плазмы описывается соотношением:

$$\delta\omega_H = 12.5 \cdot (n_1^2 - n_0^2) \cdot N_i^{2/3}$$

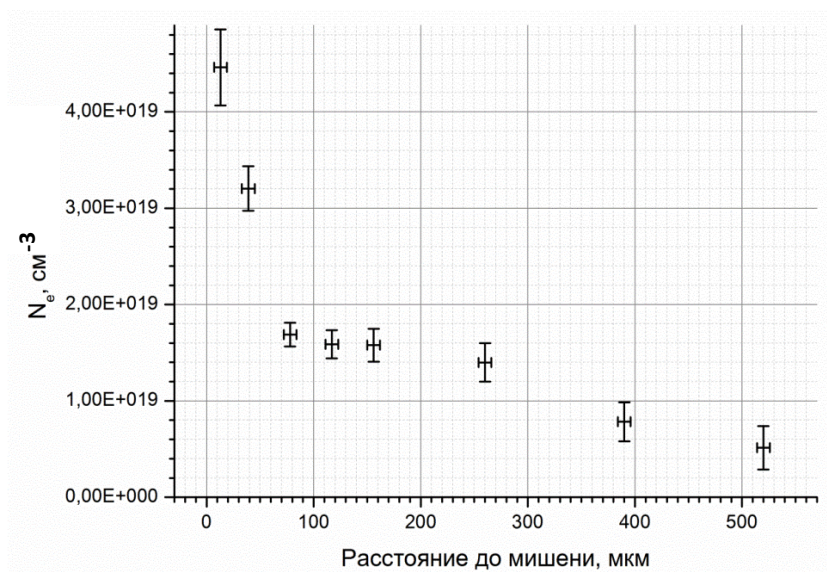


Рисунок 2.6. Зависимость электронной плотности $[C_2H_2]_n$ плазмы от расстояния до мишени.

В разделе 2.4 сформулированы основные результаты Главы 2

В третьей главе описан рассчитанный и реализованный сканирующий спектрометр/монохроматор с плоским полем класса Хеттрика–Андервуда на область длин волн $\lambda \sim 50 - 330 \text{ Å}$.

В разделе 3.1. проведен расчет схемы спектрометра (рисунок 3.1). Оптическая схема спектрометра включает в себя фокусирующее сферическое ($R = 6000$ мм) зеркало, установленное под скользящим углом 8.34° , и плоскую VLS-решетку скользящего падения, работающую с постоянным углом отклонения 16.68° . Входная щель неподвижна, фокусное расстояние изменяется незначительно в рабочем спектральном диапазоне.

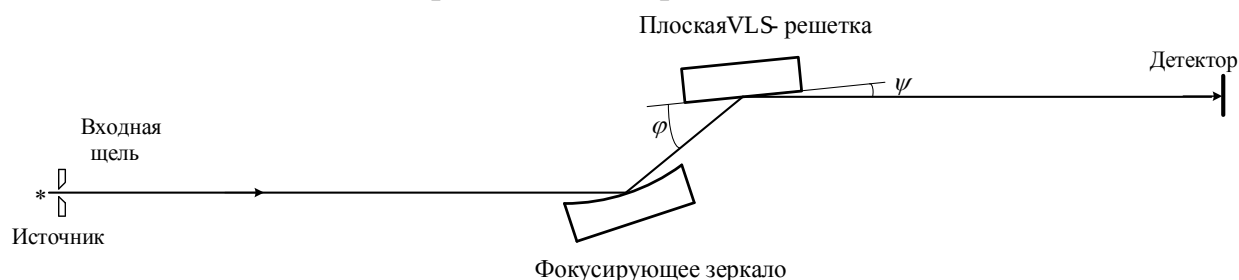


Рисунок 3.1. Схема спектрометра. Входная щель находится на круге Роуланда, связанном с зеркалом.

В разделе 3.2. описана практическая реализация сканирующего спектрометра. Зарегистрированы спектры лазерной плазмы, возбуждаемой сфокусированным пучком лазера (0.5 Дж, 8 нс, 1.06 мкм). Продемонстрирована спектральная разрешающая способность $\lambda / \delta\lambda = 1300$ на длине волны 182 Å. Схема данного типа подходит для рефлектometрии и метрологии в мягком рентгеновском диапазоне спектра с использованием лазерно-плазменного и синхротронного источников излучения, а также идеально совместима с современными ПЗС-детекторами.

Качество фокусировки проверялось методом численной трассировки лучей путем построения спектральных изображений точечного источника на различных длинах волн (Рисунок 3.2). Правильность аналитических расчетов при этом была подтверждена.

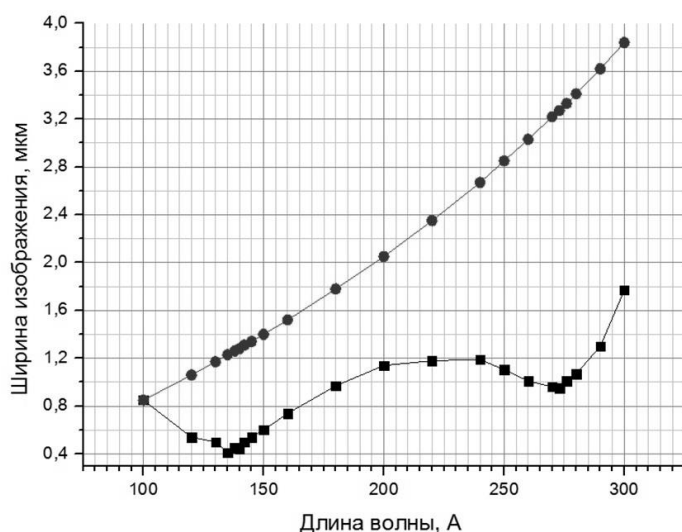


Рисунок 3.2. Ширина изображения точечного источника, полученная с помощью трассировки лучей (черные квадраты). Видно, что ширина этих изображений не превосходит дифракционной ширины (серые кружки).

Спектрометр был испытан при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в Mg, LiF и $[\text{C}_2\text{H}_2]_n$ плазме, возбуждаемых импульсами неодимового лазера (0.5 Дж, 8 нс, 1.06 мкм) (рисунки 3.3 и 3.4).

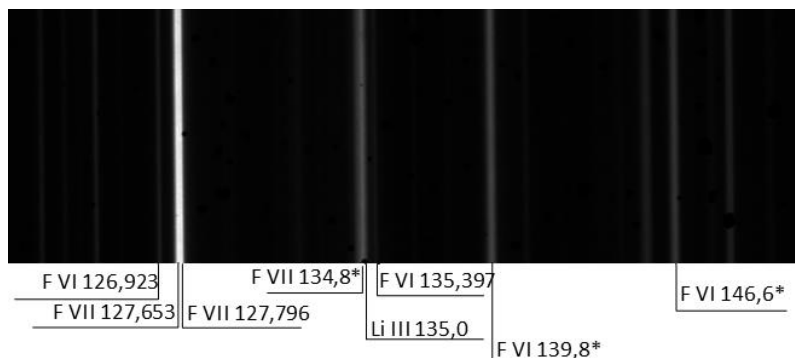


Рисунок 3.3. Участок спектра плазмы, полученный при облучении мишени LiF. Астериском (*) обозначены неразрешенные группы линий.

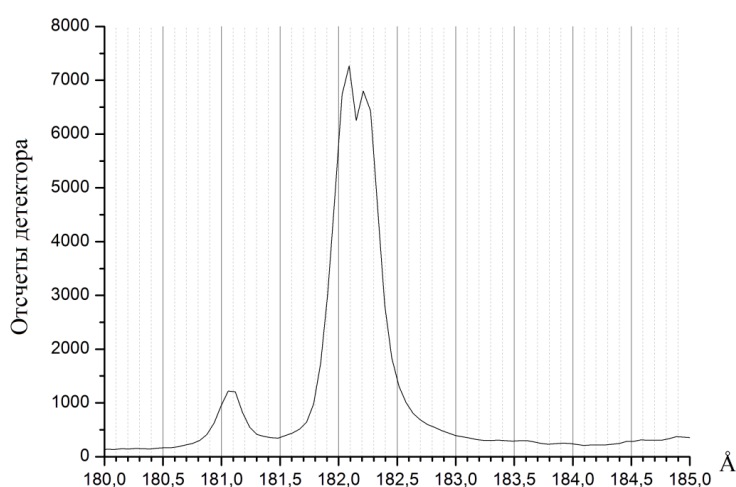


Рисунок 3.4. Контур бальмеровской линии H_α иона C VI. Удастся разрешить тонкую структуру линии (0.14 Å), что свидетельствует о разрешающей способности 1300 в данной области спектра. Ширина входной щели составляла 10 мкм. В районе 181 Å находится неразрешенная группа линий ионов кислорода.

В разделе 3.3 сформулированы основные результаты Главы 3

В заключении приведены основные результаты работы: все поставленные задачи были успешно решены и привели к следующим результатам:

1. В диссертации описаны теоретические расчеты, проведенные автором, а также выполненные им экспериментальные измерения, которые привели к созданию нового типа стигматических спектрометров для МР области спектра на основе плоской отражательной VLS-решетки скользящего падения и вогнутого аperiodического многослойного зеркала нормального падения, оптимизированного на равномерное отражение. Разработанный спектрометр продемонстрировал высокое спектральное разрешение ~ 1000 и пространственное разрешение на уровне 26 мкм в рабочем спектральном диапазоне и высокой светосиле (приемный угол на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ ср) в области 125 – 250 Å.

2. Разработан и создан первый отечественный сканирующий спектрометр/монокроматор класса Хеттрика-Андервуда на основе плоской отражательной VLS-решетки. Прибор продемонстрировал высокое спектральное

разрешение ~ 1300 . Основное преимущество схемы заключается в постоянном фокусном расстоянии и неизменном направлении входного/выходного излучения при перестройке длины волны.

3. Разработанные спектрометры были испытаны при регистрации линейчатых спектров лазерной плазмы. Были получены и расшифрованы линейчатые спектры плазмы Mg, LiF, $[\text{C}_2\text{H}_2]_n$.

4. С помощью разработанного стигматического спектрометра проведено измерение плотности электронов в разлетающейся лазерной плазме по штарковскому уширению линии H_β ($135 \text{ \AA}$) водородоподобного иона C VI в лазерной плазме $[\text{CH}_2]_n$. Полученная электронная плотность составляет $4.5 - 0.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, в зависимости от расстояния до мишени (20 – 500 мкм).

5. Выполнен анализ поведения фокальных поверхностей МР-спектрометров при изменении параметров оптической схемы и VLS-решетки. Проанализированы возможности для компенсации меридиональной комы и сферической аберрации. В основе этого анализа стоит представление функции частоты штрихов от координаты $p(w)$ в виде $p(w) = p_0 + p_1 w + p_2 w^2 + p_3 w^3 + \dots$, где коэффициент p_0 отвечает за направление дифракции, коэффициент p_1 за фокусировку и коэффициенты p_2 и p_3 за компенсацию аберраций.

6. Рассмотрены возможные технологии для изготовления первых отечественных VLS-решеток МР-диапазона: электронно-лучевая литография и интерференционная литография. Созданы первые отечественные VLS-решетки для МР диапазона спектра. Решетки изготовлены методом электронной литографии (ЦКП-МФТИ, Долгопрудный) и методом интерференционной литографии (ГИПО, Казань). Технологии изготовления имеют свои особенности, которые необходимо учитывать. В случае с интерференционной литографией, закон изменения частоты штрихов может отличаться от расчетного. В этом случае приходится модифицировать схему спектрометра, в которой предполагается её использование. В случае с VLS-решеткой, изготовленной методом электронно-лучевой литографии, разрешение, которое обеспечивает решетка в схеме спектрометров, ниже в 1.5 – 2 раза. Развитие данных технологий может уменьшить влияние этих особенностей.

7. Развита методы расчета, оптимизации и конструирования VLS спектрометров различных типов с плоской VLS-решеткой, включая аналитические расчеты и построение спектральных изображений методом численной трассировки лучей, а также юстировку в видимом диапазоне и окончательную юстировку при регистрации линейчатых МР-спектров многозарядных ионов в плазме. Накопленный опыт позволяет разрабатывать специализированные VLS-спектрометры, учитывающие специфику научной задачи и источника излучения.

Список цитируемой литературы

1. Costello J. T. et al. X-UV absorption spectroscopy with laser-produced plasmas: a review //Physica Scripta. – 1991. – Т. 1991. – №. Т34. – С. 77.
2. Козырев А. П., Шарков Б. Ю. Введение в физику лазерной плазмы. – Москва: МИФИ, 1980.
3. Bowyer S. et al. The second extreme-ultraviolet explorer source catalog //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 1996. – Т. 102. – С. 129.
4. Cornu A. Verifications numeriques relatives aux proprietes focales des reseaux diffringents plans. – 1893.
5. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А., Пейсахсон И.В., Кошелев Б.В. Вогнутые дифракционные решетки с переменным шагом //Оптика и спектроскопия – 1970. – Т.28. – Вып.4. – С.790-795.
6. Harada T., Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings //Applied Optics. – 1980. – Т. 19. – №. 23. – С. 3987-3993.
7. Dunn J. et al. High resolution soft x-ray spectroscopy of low Z K-shell emission from laser-produced plasmas //Review of Scientific Instruments. – 2008. – Т. 79. – №. 10. – С. 10E314.
8. Underwood J. H. et al. Experimental comparison of mechanically ruled and holographically recorded plane varied-line-spacing gratings //Gratings and Grating Monochromators for Synchrotron Radiation. – International Society for Optics and Photonics. – 1997. – Т. 3150. – С. 40-46.
9. Underwood J. H., Attwood D. T. Renaissance of x-ray optics //Physics Today. – 1984. – Т. 37. – №. 4. – С. 44-61.
10. Митропольский М. М., Слемзин В. А., Суходрев Н. К. Автоматизированная установка «ИКАР» для исследования рентгеновской оптики и детекторов излучения в области спектра 0.5 – 120 нм. //Москва: Препринт ФИАН, – 1989 – № 186.
11. ESRF Anonymous FTP Server– <http://ftp.esrf.fr/pub/scisoft/xop2.3/> – 2019
12. Namioka T. Theory of the concave grating. I //Josa. – 1959. – Т. 49. – №. 5. – С. 446-460.
13. Кондратенко В. В. и др. Аперiodические широкополосные многослойные зеркала на область 125-250 а //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2001. – №. 7.
14. Вайнштейн Л. А. Собельман И.И., Юков Е. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – Москва: Наука, 1979.

Список публикаций автора по теме диссертации

А. Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в базу данных Web of Science:

- A1. Вишняков Е. А., Шатохин А. Н., Рагозин Е. Н. Концепция широкополосных стигматических спектрометров высокого разрешения для мягкой рентгеновской области спектра //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 4. – С. 371-376.
- A2. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Кузин А. А., Негров Д. В., Рагозин Е. Н., Сасоров П. В., Шатохин А. Н. Изображающий дифракционный VLS-спектрометр для области длин волн $\lambda > 120 \text{ \AA}$ //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 1. – С. 54-57.
- A3. Ragozin E. N., Belokopytov A. A., Kolesnikov A. O., Muslimov E. R., Shatokhin A.N., Vishnyakov E. A. Flat-field VLS spectrometers for laboratory applications // Proceedings of SPIE, 2017. – Т. 10235. – С. 102350L.
- A4. Kolesnikov A. O., Kuzin A. A., Negrov D. V., Ragozin E. N., Sasorov P. V., Shatokhin A. N., Vishnyakov E. A. Broadband High-Resolution Imaging Spectrometers for the Soft X-Ray Range// Springer Proceedings in Physics, 2018. – Т. 202. – С.389–393
- A5. Shatokhin A. N., Kolesnikov A. O., Sasorov P. V., Vishnyakov E. A., Ragozin E.N. High-resolution stigmatic spectrograph for a wavelength range of 12.5–30 nm //Optics express. – 2018. – Т. 26. – №. 15. – С. 19009-19019.
- A6. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Пирожков А. С., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Аперiodические отражательные дифракционные решетки для мягкого рентгеновского излучения и их применение //Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 10. – С. 916-929.
- A7. Шатохин А. Н., Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н. Сканирующий спектрометр/монокроматор на область длин волн 50–330 $\text{\AA}$ //Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 8. – С. 779-783.

Б. Публикация в монографии:

- B1. Рагозин. Е. Н., Вишняков Е. А., Колесников А. О., Пирожков А. С., Шатохин А. Н. Аперiodические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона.//Москва: ФИЗМАТЛИТ – 2018. Глава 8 «Приборы на основе плоской VLS-решетки», С. 94-112.

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

- B1. Вишняков Е. А., Лугинин М. С., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Концепция стигматического спектрометра на область длин волн 10–30 нм. //Москва-Долгопрудный-Жуковский: Труды 55-й научной конференции МФТИ – 19-25 ноября 2012 г. – Т. ФОПФ – С. 68-69
- B2. Вишняков Е. А., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Концепция стигматического спектрометра высокого разрешения на область длин волн 11–30 нм. //Нижний Новгород: Труды XVII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 11-15 марта 2013 г. – Т. 1 – С. 308-309.
- B3. Шатохин А. Н., Вишняков Е. А., Рагозин Е. Н. Концепция стигматического спектрометра высокого разрешения. //Москва,ФИАН: V Всероссийская молодёжная

конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» – 10-15 ноября 2013 г. – С. 146-147.

В4. Вишняков Е. А., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Расчёт стигматического спектрометра высокого разрешения для мягкого рентгеновского диапазона. // Москва-Долгопрудный-Жуковский: Труды Всероссийской научной конференции «56-я научная конференция МФТИ» – 25-30 ноября 2013 г. – Т. 2 – С. 71-72.

В5. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. VLS-решётки в спектроскопии и метрологии мягкого рентгеновского диапазона // *г. Нижний Новгород: Труды XIX Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 10-14 марта 2015 г. – Т. 1 – С. 366-367.*

В6. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Спектрометры на основе VLS-решёток и их реализация. // *Нижний Новгород: Труды XX Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 14-18 марта 2016 г. – Т. 1 – С. 368-369.*

В7. Kolesnikov A. O., Shatokhin A. N., Vishnyakov E. A., Ragozin E. N. Broadband high-resolution imaging spectrometers for the soft X-ray range. // *Nara, Japan: 15th International Conference on X-Ray Lasers – 22-27 May 2016 – Т. 16 – С. 74.*

В8. Рагозин Е. Н., Вишняков Е. А., Колесников А. О., Шатохин А. Н. Спектральные приборы для мягкой рентгеновской области спектра, использующие отражательные решётки с неэквидистантными штрихами (VLS-решётки) и многослойные рентгеновские зеркала. // *Москва: Научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития» – 15-16 ноября 2016 г. – С. 94-96.*

В9. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Стигматический спектрометр высокого разрешения для диапазона 120 – 250 Å на основе многослойного зеркала и плоской VLS-решётки. // *Нижний Новгород: Труды XXI Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 13-16 марта 2017 г. – Т. 1 – С. 377 – 378.*

В10. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Широкополосные VLS-спектрометры высокого разрешения. // *Нижний Новгород: Труды XXII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 12-15 марта 2018 г. – Т. 1 – С. 422-423.*

В11. Шатохин А.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. Аперриодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона. // *Нижний Новгород: Труды XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» – 11-14 марта 2019 г. – Т. 1 – С. 533-534.*