

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

На правах рукописи

Колесников Алексей Олегович

**Разработка и исследование оптических элементов и спектральных приборов на их основе
для вакуумной ультрафиолетовой области спектра**

Специальность 1.3.6 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
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).

Бушуев Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор Кафедры физики твердого тела Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Москва, г. Троицк

Защита состоится «22» ноября 2021 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53.

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

Автореферат разослан «__»_____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01
доктор физико-математических наук

А.С Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Вакуумная ультрафиолетовая (ВУФ) область спектра лежит в диапазоне длин волн короче 2000 Å и включает в себя Шумановский ВУФ (от 1000 до 2000 Å), далекий ВУФ ($\lambda < 1000 \text{ Å}$) и мягкий рентген ($\lambda < 300 \text{ Å}$) [1]. В этом диапазоне находятся спектры большого количества лабораторных и астрофизических источников излучения, таких как лазерная плазма, солнечная атмосфера, электрические разряды, а также высокие гармоники лазерного излучения. В ВУФ диапазоне отсутствуют прозрачные материалы, поэтому для построения изображений пользуются отражательной и дифракционной фокусирующей оптикой. К элементам отражательной фокусирующей оптики относятся вогнутые зеркала, а к дифракционной – решетки с переменным шагом (varied line-space gratings или, сокращенно, VLS-решетки).

В настоящее время VLS-решетки являются основой большого количества спектральных приборов для ВУФ и мягкой рентгеновской областей спектра. В частности, плоские VLS-решетки используются в качестве главного элемента монохроматора на синхротронных измерительных каналах. Вогнутые VLS-решетки применяются в схемах спектрографа скользящего падения с плоским полем. Поскольку для каждой задачи требуется прибор, обладающий своими особыми характеристиками, учитывающими специфику источника излучения и задачу, например, габариты, разрешающую способность, рабочий спектральный диапазон, то разработка новых приборов такого типа активно ведется и в настоящее время.

Сферические зеркала в схемах нормального падения способны давать хорошее качество изображения при большей, чем в схемах скользящего падения, светосиле. Но коэффициенты отражения большинства материалов при нормальном падении в мягком рентгеновском диапазоне низки. Для того чтобы пользоваться оптикой нормального падения в мягком рентгеновском диапазоне, необходимо наносить на поверхность многослойную структуру. От структуры зависит спектр отражения зеркала, а значит – и рабочий диапазон прибора в целом. Для задач спектроскопии удобно, когда коэффициент отражения зеркала не меняется в широком спектральном диапазоне. Таким спектром отражения обладает аperiодическая многослойная структура. По расчетам, произведенным в ФИАН, на сферических ($R = 1 \text{ м}$) подложках в 2001 г. в Харьковском политехническом институте были синтезированы широкополосные аperiодические Mo/Si зеркала с равномерным отражением $\sim 14\%$ в спектральной области 125 – 250 Å [2]. Однако кремнийсодержащие зеркала работают в области длин волн $\lambda > 125 \text{ Å}$. Для продвижения в более коротковолновый диапазон необходимо вместо кремния использовать другой легкий элемент, например, бериллий. Создание бериллийсодержащих зеркал в нашей стране возможно благодаря институту физики микроструктур (ИФМ) РАН, который на сегодняшний день является одним из мировых

лидеров в этом направлении. Однако синтез аperiodической многослойной структуры представляет собой нетривиальную технологическую задачу, поэтому необходимо сделать расчетные структуры проще с точки зрения их синтеза.

Важной задачей является развитие отечественной технологии изготовления VLS-решеток. Недостатками ранее изготовленных отечественных VLS-решеток методом интерференционной литографии является отличие зависимости частоты штрихов от координаты на апертуре решетки от требуемой. Для повышения точности изготовления VLS-решеток необходимо разработать метод расчета схемы записи, позволяющей получить зависимость частоты интерференционных полос от координаты на апертуре будущей решетки, совпадающую с требуемой зависимостью частоты штрихов.

Цели и задачи

Настоящая работа посвящена разработке новых оптических элементов (сферических VLS-решеток и многослойных рентгеновских зеркал нормального падения) для вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской области спектра, технологии изготовления этих элементов, а также созданию спектральных приборов на их основе для исследования лабораторной плазмы.

Основными задачами работы являлись:

1. Разработка методов решения обратной задачи интерференционной литографии – расчета схемы записи, реализующей требуемое распределение частоты интерференционных полос по апертуре заготовки сферической или плоской VLS-решетки. Создание отечественных VLS-решеток и их применение в спектральных приборах для мягкого рентгеновского диапазона.

2. Исследование влияния параметров сферической VLS-решетки на положение горизонтального и вертикального фокусов дифрагированного пучка при изображении точечного источника и компенсацию меридиональной комы и сферической аберрации.

3. Создание первого отечественного спектрографа скользящего падения с плоским полем для мягкого рентгеновского диапазона ($50 - 275 \text{ \AA}$) и его демонстрация в эксперименте с лазерной плазмой.

4. Анализ возможностей компенсации астигматизма в широком диапазоне длин волн с помощью сферической VLS-решетки в схемах нормального падения, а также с помощью периодической решетки с криволинейными штрихами. Расчет схем широкополосных изображающих спектрографов нормального падения для ВУФ области длин волн $800 - 1600 \text{ \AA}$.

5. Модификация метода расчета широкополосных рентгеновских зеркал на основе аperiodических многослойных структур для уменьшения разброса толщин слоев в структуре. Исследование влияния сглаживания толщин слоев на уровень плато и равномерность

отражения. Оптимизация многослойных аperiodических структур на основе Mo/Be на максимальное равномерное отражение в диапазонах 111 – 138 Å, 111 – 150 Å, 111 – 200 Å и 111 – 222 Å. Создание широкополосных зеркал на основе Mo/Be структур для диапазона 111 – 138 Å.

6. Испытание широкополосных зеркал нормального падения на основе стековой многослойной структуры Mo/Be в схеме изображающего спектрографа с пропускающей решеткой. Получение спектра отражения зеркал в эксперименте с вольфрамовой лазерной плазмой. Оценка толщины мертвого слоя Si матричного ПЗС-детектора. Получение стигматического спектра LiF лазерной плазмы. Оценка пространственного профиля интенсивности спектральной линии FVII 135 Å.

Научная новизна

Впервые найден общий метод решения обратной задачи интерференционной литографии для схемы записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения.

Создана первая отечественная сферическая VLS-решетка методом интерференционной литографии с совпадением зависимости частоты штрихов от координаты с расчетной.

Рассчитан, создан и испытан в эксперименте первый отечественный спектрограф высокого разрешения скользящего падения с плоским полем на основе сферической VLS-решетки.

Впервые произведен исчерпывающий анализ схем широкополосных изображающих спектрографов нормального падения на основе сферической VLS-решетки или на основе периодической сферической решетки с криволинейными штрихами. Составлены карты изображающих характеристик приборов данного класса, описывающие все возможные их схемы.

Впервые произведен расчет широкополосных рентгеновских зеркал нормального падения на основе многослойных структур Mo/Be с применением сглаживания толщин соседних слоев. Исследовано влияние параметров сглаживания толщин соседних слоев на структуру и ее спектр отражения.

Испытаны в эксперименте первые широкополосные рентгеновские зеркала нормального падения на основе многослойной структуры Mo/Be.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработан метод решения обратной задачи интерференционной литографии для схемы записи с одним вспомогательным зеркалом, позволяющий изготавливать VLS-решетки с высокой точностью. Метод успешно испытан при изготовлении в Научно-производственном объединении Государственный институт прикладной оптики (НПО ГИПО, г. Казань) сферической VLS-решетки для спектрографа скользящего падения с плоским полем и в

будущем может быть применен для создания VLS-решеток специализированных спектральных приборов.

Разработан метод расчета спектрографов скользящего падения с плоским полем на основе сферической VLS-решетки, состоящий из аналитического расчета и построения спектральных изображений точечного монохроматического источника методом численной трассировки лучей.

Разработан алгоритм численной трассировки лучей, позволяющий строить изображения источника в схемах, включающих в себя VLS-решетку с криволинейными штрихами. Алгоритм способен моделировать решетки, изготовленные методом интерференционной литографии с применением схемы записи с одним вспомогательным зеркалом.

Был создан и испытан в эксперименте первый отечественный спектрограф скользящего падения с плоским полем. Методы расчета оптической схемы прибора и схемы записи формируют мощный инструмент проектирования приборов такого класса под различные задачи спектроскопии мягкого рентгеновского диапазона. В цикл разработки включены все этапы – расчет схемы прибора, расчет схемы записи для изготовления решетки, сборка и испытание, также учтены возможные обратные связи.

Проанализированы схемы широкополосных изображающих спектрографов нормального падения на основе сферической VLS-решетки или сферической периодической решетки с криволинейными штрихами, в которых детектор размещается на построении Сиркса или круге Роуланда, соответственно. Разработан метод расчета приборов таких классов, основанный на анализе карт изображающих характеристик. Рассчитаны спектрографы таких классов с высоким разрешением в диапазоне шириной около октавы с центром на длине волны $\sim 1200 \text{ \AA}$.

Добавлено сглаживание толщин соседних слоев в программу расчета многослойных структур, что делает расчетные аperiodические структуры удобнее для синтеза. Рассчитаны аperiodические широкополосные многослойные Mo/Be-зеркала с равномерным отражением 15.8%, 12.6%, 10.7% и 10.3% в диапазонах 111 – 138, 111 – 150, 111 – 200 и 111 – 222 \AA .

Синтезированные в ИФМ РАН первые широкополосные сферические Mo/Be-зеркала нормального падения с равномерным отражением $\sim 14\%$ в диапазоне 111 – 138 \AA были испытаны при регистрации стигматических спектров лазерной плазмы. Зеркала могут быть применены в изображающих спектральных приборах высокого разрешения для получения пространственной информации об источнике.

Методы исследования

Расчеты оптических схем основывались на методах геометрической оптики и построении функции оптической длины пути. Для построения изображений методом численной трассировки лучей использовались следующие программы: X-ray Oriented Programs (XOP) v. 2.3

с расширением SHADOWVUI (находится на сайте ESRF в свободном доступе [3]), программа BEAM FOUR (Release 199) [4] (дифракция на сферической решетке в схеме нормального падения и на решетке с криволинейными штрихами) и программный код собственной разработки (трассировка лучей в схеме записи для вычисления распределения частоты штрихов по апертуре, расчет изображения точечного монохроматического источника после дифракции на такой решетке).

Для предварительной оценки изготовленной методом интерференционной литографии VLS-решетки производилось измерение частоты штрихов в нескольких точках ее апертуры по дифракции излучения He-Ne лазера, что позволяет сравнить получившуюся зависимость частоты штрихов от координаты с требуемой. Оценка глубины профиля штрихов производилась по отношению интенсивностей первого и нулевого порядков дифракции He-Ne лазера в модели синусоидального профиля.

Экспериментальная часть исследования проводилась в вакуумной камере ИКАР (длина 3.8 м, диаметр 0.9 м) [5]. Откачка производилась при помощи форвакуумного насоса ABP-150 до давления ~ 70 мТорр, а затем безмасляным турбомолекулярным насосом Turbo-V 3К-Т фирмы VARIAN с сопровождающим безмасляным спиральным насосом ISP-500 ANEST-IWATA. Плазма образовывалась при фокусировке импульса Nd:YAG лазера Quantel YG980 (длительность импульса 9 нс, энергия 0.5 Дж, частота следования импульсов 10 Гц). Спектры регистрировались с помощью ПЗС-матрицы Teledyne e2v с обратной засветкой. Матрица имеет 2048×1024 квадратные ячейки со стороной 13 мкм. Размер матрицы 26.6×13.3 мм. Для окончательной точной юстировки спектрографа во время регистрации спектров оптические элементы устанавливались на моторизированные позиционеры фирмы Standa в вакуумном исполнении, управляемые с компьютера.

Личный вклад автора

Автору принадлежит идея метода решения обратной задачи интерференционной литографии, а также метода измерения частоты штрихов у VLS-решетки. Автором установлено, что построение Сиркса совпадает с осью симметрии сферической VLS-решетки с прямолинейными штрихами. Автором предложен метод анализа изображающих характеристик схемы широкополосного изображающего спектрографа нормального падения на основе сферической VLS-решетки. Расчеты всех интерференционно-литографических схем записи и схем спектрографов были проведены лично автором. Автором был разработан программный код, позволяющий проводить численную трассировку лучей с учетом дифракции на решетках с переменным шагом и криволинейным штрихом, что необходимо для оценки пригодности рассчитанной схемы записи.

Автором произведена модификация программы расчета многослойных структур – добавлено сглаживание толщин соседних слоев и выполнен расчет широкополосных зеркал на основе аperiodических структур Mo/Be.

Автор лично принимал участие во всех экспериментах, приведенных в настоящей работе: в измерении частоты штрихов изготовленных решеток, сборке, юстировке оптических схем, работе с вакуумной камерой и лазером, регистрации спектров и обработке полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный метод решения обратной задачи интерференционной литографии, основанный на аналитическом обращении прямой задачи с последующей численной оптимизацией, позволяет рассчитывать схему записи, состоящую из двух точечных когерентных источников и одного вспомогательного зеркала-аббератора, для изготовления плоской или сферической VLS-решетки. При этом достигается высокая (отклонение $\sim 0.1\%$) точность аппроксимации частоты штрихов частотой интерференционных полос, контролируется ширина и высота решетки, а также радиус кривизны ее штрихов.

2. Рассчитанный и созданный спектрограф скользящего падения с плоским полем в диапазоне $50 - 275 \text{ \AA}$ на основе сферической VLS-решетки, интерференционная схема записи которой получена предложенным методом, обладает высоким спектральным разрешением, ограниченным двумя ячейками детектора ($2 \times 13 \text{ мкм}$).

3. Схема широкополосного изображающего ВУФ спектрографа нормального падения на основе сферической VLS-решетки или сферической периодической решетки с криволинейными штрихами, а также все изображающие характеристики схемы определяются двумя параметрами – β_1 и β_2 – углами дифракции, на которых строго скомпенсирован стигматизм.

4. Широкополосное зеркало нормального падения на основе аperiodической многослойной структуры Mo/Be способно обеспечить равномерное отражение на уровне 10% в октаве длин волн $111 - 222 \text{ \AA}$.

Степень достоверности

Правильность расчетов схем спектральных приборов подтверждается результатами численной трассировки лучей, проведенной с использованием различных программ, а также результатами эксперимента. Правильность найденных схем записи проверена измерением зависимости пространственной частоты штрихов изготовленных VLS-решеток на апертуре по дифракции излучения He-Ne лазера. Корректность расчета зеркал на основе аperiodических структур Mo/Be подтверждается хорошим совпадением спектров отражения найденных структур, рассчитанных в программах Mirgor II и IMD.

Апробация результатов

Результаты настоящей работы были доложены на научных семинарах ФИАН, а также на семи всероссийских и международных конференциях: The third international workshop MIPT (Moscow, Russia) – UEC (Tokyo, Japan): Atomic, molecular and optical physics (1015), «Рентгеновская оптика – 2016, 2018» (Черноголовка, 2016, 2018), XXI, XXII, XXIV международный симпозиум «Наноп физика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 2017, 2018, 2020), SPIE Photonics Europe. Unconventional Optical Imaging (Strasbourg, France, 2018).

Публикации

По теме диссертации опубликовано шесть статей в рецензируемых научных изданиях, учитываемых базой данных Web of Science, а также пять тезисов докладов в сборниках трудов конференций. На основе результатов диссертации был получен патент. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 134 страницы, 54 рисунка, 4 таблицы, список цитируемой литературы содержит 93 наименования.

Основное содержание работы

Во Введении диссертации приводятся краткая характеристика работы, обоснование актуальности темы, научная новизна, цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, обоснование степени достоверности и апробации результатов и список опубликованных по результатам диссертации работ.

В первой главе обсуждается метод решения “обратной” задачи интерференционной литографии для изготовления VLS-решеток с помощью схемы записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения.

Во вводной части главы приводятся основные формулы, связывающие коэффициенты полинома зависимости частоты штрихов VLS-решетки от координаты на ее апертуре с параметрами схемы записи с одним вспомогательным зеркалом. Пусть ось x направлена вдоль центральной нормали сферической (радиуса R) решетки, ось z – по касательной к центральному штриху в начале координат, а ось y – ортогонально центральной нормали и центральному штриху (Рис. 1). В этой системе координат частота штрихов будет зависеть от координаты y . Эту зависимость принято описывать следующим полиномом:

$$p(y) = p_0 + p_1 y + p_2 y^2 + p_3 y^3 + \dots \quad (1)$$

Схема записи с одним вспомогательным зеркалом приведена на Рис. 1. Решение прямой задачи (нахождение коэффициентов p_i при известных расстояниях r_c , p_D и q_D , углах γ , η и δ и радиусе кривизны зеркала R_2 .) описано в работе [6].

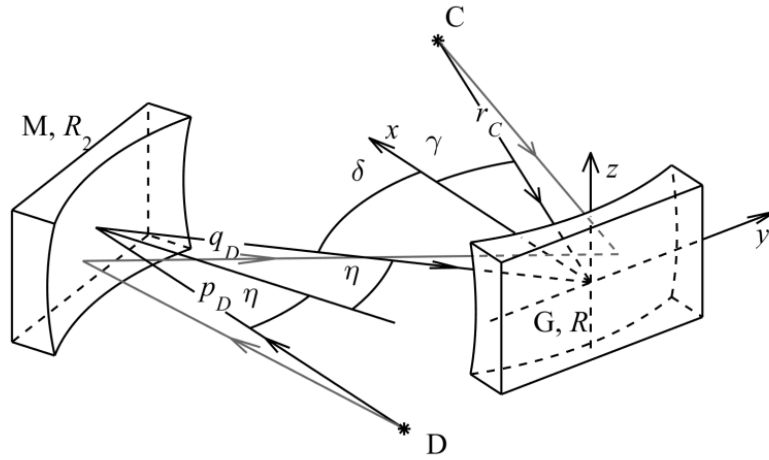


Рис. 1. Схема записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения. С и D – точечные монохроматические источники, M – сферическое зеркало (радиус кривизны R_2), G – подложка решетки с нанесенным слоем фоторезиста, γ и δ – углы падения центральных лучей на заготовку решетки, η – угол падения центрального луча на зеркало, r_c – расстояние от точки С до заготовки, q_D – расстояние “зеркало – заготовка”, p_D – расстояние от точки D до зеркала.

В разделе 1.1 строится аналитическое обращение прямой задачи. Оно сводится к решению следующего уравнения относительно A_{10D} :

$$\frac{2\lambda p_2}{3} - \frac{T_C \sin \gamma}{r_c} + \frac{T_D \sin \delta}{r_D} = \frac{2A_{10D}}{R_2} \left(\frac{\cos \delta}{r_D} - \frac{A_{10D}}{R_2} \right) \sqrt{(A_{10D})^2 - \frac{p_D^2}{R_2^2} \left(2A_{10D} - \frac{R_2 \cos \delta}{r_D} \right)^2}, \quad (2)$$

где

$$T_C = \frac{\cos^2 \gamma}{r_c} - \frac{\cos \gamma}{R}, \quad T_D = T_C - \lambda p_1, \quad r_D = \frac{\cos^2 \delta}{T_D + \frac{\cos \delta}{R}}, \quad \delta = \arcsin(\lambda p_0 + \sin \gamma), \quad (3)$$

λ – длина волны литографического лазера, а γ , p_D и r_c – заранее зафиксированные параметры. Из всех решений (2) выбираются те значения A_{10D} , которые соответствуют требуемому значению p_2 , при этом p_0 и p_1 всегда соответствуют требуемым значениям. Оставшиеся параметры схемы записи находятся по формулам:

$$\eta = \arcsin \sqrt{1 - \alpha^2 \left(2 - \frac{R_2 \cos \delta}{r_D A_{10D}} \right)^2}, \quad q_D = r_D - \frac{\alpha R_2 \cos \eta}{(\cos \eta - 2\alpha)}, \quad (4)$$

после чего коэффициент p_3 находится через решение прямой задачи. Если его значение сильно отличается от требуемого, то варьируется расстояние r_c , и для него снова решается уравнение (2). Полезно также контролировать радиус кривизны штриха:

$$R_g \approx = -\frac{\sin \delta - \sin \gamma}{\frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_{Dv}} - \frac{\cos \gamma - \cos \delta}{R}}, r_{Dv} = q_D + \left(\frac{1}{p_D} - \frac{2 \cos \eta}{R_2} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Если не удастся достичь требуемого коэффициента p_3 или приемлемого радиуса кривизны штриха, то необходимо выбрать другой набор значений γ, p_D, R_2 .

Поскольку в [6] описана приближенная связь между VLS-коэффициентами и параметрами схемы записи, то обращение прямой задачи – лишь начальное приближение для поиска точного решения.

Раздел 1.2 посвящен нахождению точного решения “обратной” задачи. Для этого производится оптимизация схемы записи, основанная на минимизации функционала:

$$F = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} (p(y) - p^*(y))^2 \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dy + C_{curve} \exp\left(-\frac{|R_g|}{r}\right) +$$

$$+ \begin{cases} 0, & y_{\max} - y_{\min} > W, \\ C_W \left[\exp\left(\frac{W - (y_{\max} - y_{\min})}{w}\right) - 1 \right], & y_{\max} - y_{\min} < W; \end{cases} +$$

$$+ \begin{cases} 0, & z_{\max} - z_{\min} > H, \\ C_H \left[\exp\left(\frac{H - \Delta z}{h}\right) - 1 \right], & \Delta z < H; \end{cases} \rightarrow \min, \quad (6)$$

который рассчитывается методом численной трассировки лучей. Первое слагаемое отвечает за точность совпадения частоты интерференционных полос и требуемой частоты штрихов, второе – за спрямление штрихов, а третье и четвертое – за увеличение ширины $y_{\max} - y_{\min}$ и высоты Δz решетки, если они меньше, чем требуемые W и H . Параметр оптимизации σ_y задается порядка $W, r \sim 1000$ мм, C_{curve} в пределах 500 – 2000, C_W и $C_H \sim 1, w$ и $h \sim 1$ мм.

После оптимизации с помощью численной трассировки лучей строится зависимость номера штриха решетки N от координат y и z точки ее апертуры на всей апертуре. Эта зависимость с помощью метода наименьших квадратов приводится к двумерному полиному. При окончательной проверке схемы записи решетка, положение штрихов которой моделируется этим полиномом, подставляется в схему спектрального прибора, для которого она изготавливается, и методом численной трассировки лучей проверяется размер спектральных изображений точечного монохроматического источника. Если он не превышает требуемых значений, то расчет схемы записи завершается.

В разделе 1.3 приведен пример расчета схемы записи с помощью описанного метода. Схема записи была рассчитана для решетки спектрографа скользящего падения с плоским полем, обладающей следующими параметрами:

$$R = 6 \text{ м}, p_0 = 1200 \text{ мм}^{-1}, p_1 = 8 \text{ мм}^{-2}, p_2 = 0.044 \text{ мм}^{-3}, p_3 = 2.28 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-4}.$$

Схема была собрана в НПО ГИПО (г. Казань), где и были изготовлены решетки. Зависимость частоты штрихов от координаты y была измерена в ФИАН по дифракции излучения He-Ne лазера (Рис. 2). Измерение показало хорошее совпадение получившейся зависимости с требуемой.

В разделе 1.4 приведены основные результаты главы 1.

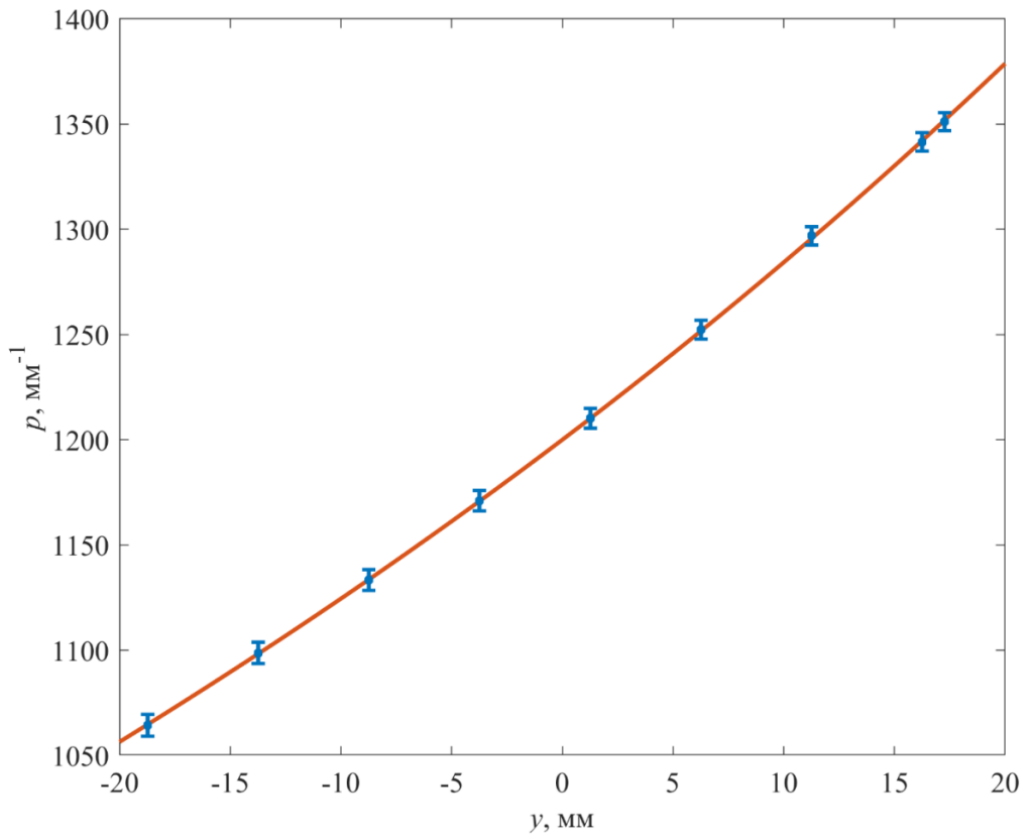


Рис. 2. Зависимость частоты штрихов от координаты y . Оранжевая кривая – требуемая зависимость, синие точки – результаты измерения частоты штрихов и их погрешности.

Вторая глава посвящена расчету и практической реализации спектрографа скользящего падения с плоским полем для мягкой рентгеновской области спектра.

При работе с матричным ПЗС-детектором в мягком рентгеновском диапазоне необходимо, чтобы излучение попадало на его плоскую поверхность почти по нормали. Спектральный прибор, в котором спектр формируется на поверхности, совпадающей с таким расположением детектора, называется спектрографом с плоским полем (Рис. 3).

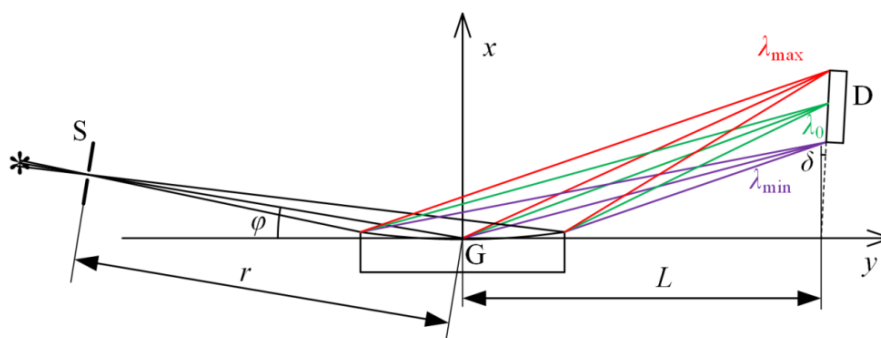


Рис. 3. Спектрограф скользящего падения с плоским полем. S – входная щель, G – сферическая VLS-решетка, D – ПЗС-детектор.

В разделе 2.1 описаны фокусирующие свойства сферических VLS-решеток, приведены основные уравнения (уравнение дифракционной решетки, уравнение на положение горизонтального и вертикального фокусов дифрагированного пучка, условия компенсации меридиональной комы и сферической аберрации) и обсуждаются следствия из них.

В разделе 2.2 описывается метод расчета оптической схемы спектрографа скользящего падения с плоским полем. Для требуемой формы фокальной поверхности подбирается VLS-коэффициент p_1 (Рис. 4) при фиксированных r , φ , R , и p_0 (задаются под спектральный диапазон и линейную дисперсию). Затем поверхность детектора наилучшим образом совмещается с участком плоского поля. Далее, на выбранной длине волны из расчетного диапазона с помощью p_2 и p_3 на ней компенсируются меридиональная кома и сферическая аберрация, а затем проверяются остаточные аберрации методом численной трассировки лучей во всем рабочем спектральном диапазоне. Конечная цель – сделать их меньше, чем две ячейки детектора – 26 мкм.

В разделе 2.3 представлены результаты расчета оптической схемы прибора. Были рассчитаны три варианта спектрографа: вариант 1 – компактный (с длиной < 25 см) прибор для диапазона 90 – 250 Å с разрешающей способностью ~ 400, вариант 2 – полуметровый прибор для диапазона 50 – 275 Å с разрешающей способностью ~ 860, вариант 3 – полуметровый прибор для диапазона 20 – 110 Å с разрешающей способностью ~ 2400.

Раздел 2.4 посвящен экспериментальной реализации спектрографа. Для практической реализации был выбран второй вариант спектрографа. Схема обладает следующими параметрами: $R = 6$ м, $r = 252$ мм, $\varphi = 3^\circ$, $L = 250$ мм, $\delta = 0$. Решетка для прибора была изготовлена в НПО ГИПО методом интерференционной литографии, схема записи для которой была рассчитана в ФИАН описанным в главе 1 методом. Фотография элементов спектрографа, смонтированных на дюралюминиевой оптической плите длиной ~ 0.6 м, приведена на Рис. 5.

Спектрограф был испытан при регистрации спектров лазерной плазмы мишеней из LiF и тефлона. Спектр лазерной плазмы LiF, полученный за один импульс Nd:YAG лазера (1064 нм,

0.5 Дж, 10 нс) приведен на Рис. 6. Из спектра видно, что прибор обладает высокой освещенностью спектральных линий и высоким разрешением.

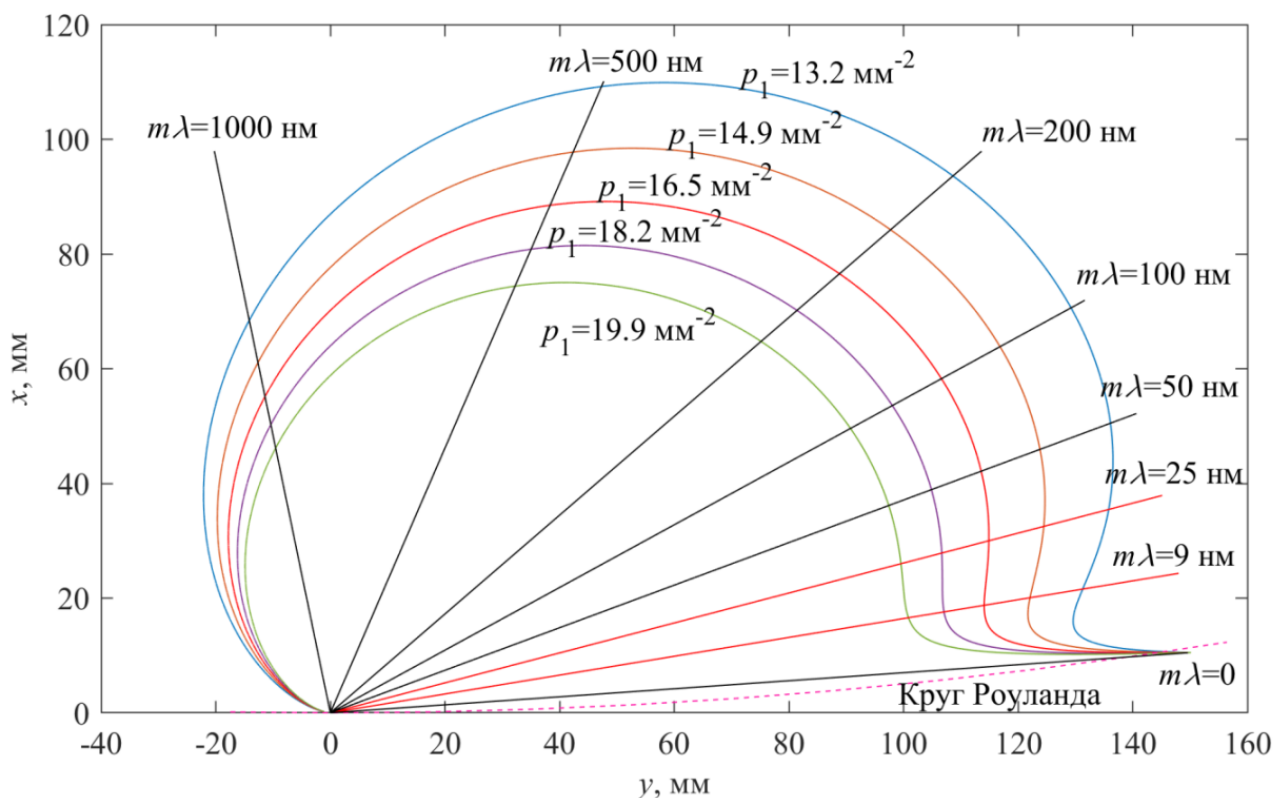


Рис. 4. Поведение спектральных фокальных кривых в зависимости от величины p_1 на примере схемы с $r = 130$ мм, $R = 2$ м, $\varphi = 4^\circ$, $p_0 = 1200$ мм⁻¹. Решетка расположена в начале координат, исходящие из него лучами обозначено направление дифракции излучения с указанным значением $m\lambda$. Видно, что при $p_1 \sim 16.5$ мм⁻² на спектральной фокальной кривой появляется прямолинейный участок, ориентированный под малыми нормальными углами к лучам (участок красной кривой между красными лучами 9 и 25 нм).

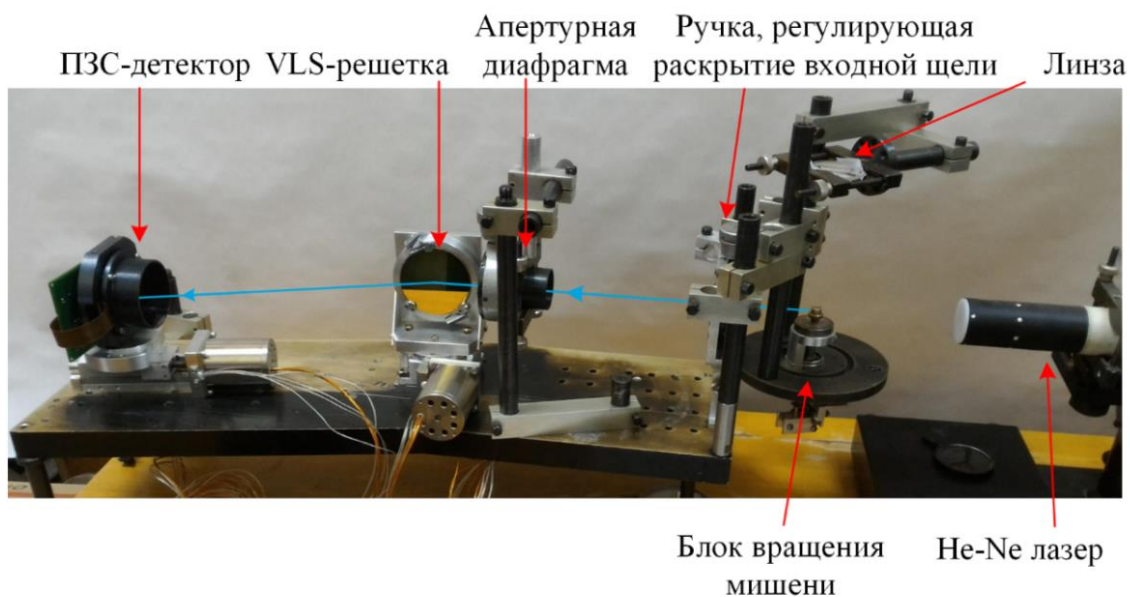


Рис. 5. Размещение элементов спектрографа на оптической плите.

Разрешающая способность была оценена на длине волны $\sim 135 \text{ \AA}$ по двум близким линиям иона F VII – 134.703 \AA и 134.882 \AA в эксперименте с тефлоновой мишенью и составила ≥ 750 , что согласуется с расчетным значением в этой области ~ 880 и подтверждает высокое спектральное разрешение прибора.

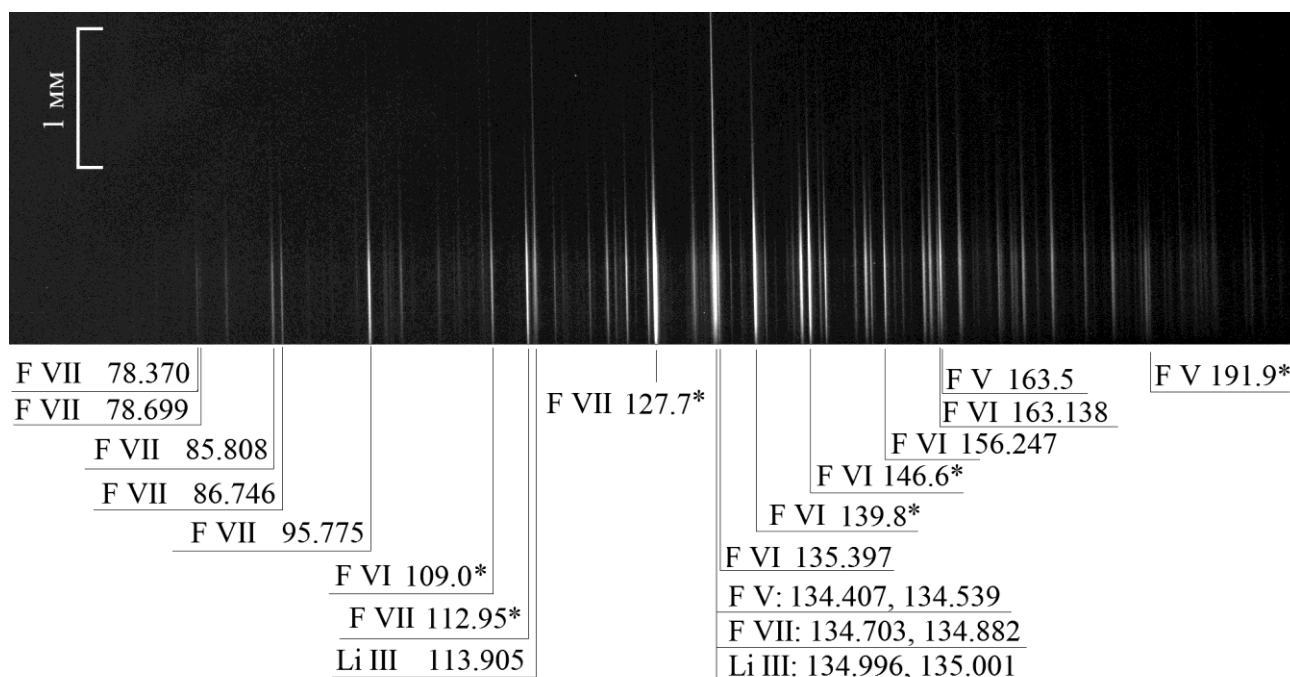


Рис. 6. Спектр лазерной плазмы LiF, полученный за один импульс Nd:YAG лазера (30 нс, 0.5 Дж, $\lambda = 1064 \text{ нм}$). Астериском обозначены неразрешенные группы линий. Плазма разлетается вверх. Уровень мишени соответствует наиболее ярким участкам спектральных линий. Вертикальной скобкой указан пространственный масштаб.

В разделе 2.5 приводятся основные результаты главы 2.

В главе 3 рассмотрены два класса схем широкополосных изображающих спектрографа нормального падения – схема на основе сферической VLS-решетки и схема на основе периодической решетки с криволинейными штрихами, произведен расчет двух пар схем каждого класса (одна схема во внешнем и одна во внутреннем порядке дифракции), произведено сравнение этих схем друг с другом.

В разделе 3.1 рассмотрены сферическая VLS-решетка и сферическая периодическая решетка с криволинейными штрихами в схеме нормального падения и способы компенсации астигматизма с их помощью. Для сферической VLS-решетки с прямолинейными штрихами используется установка решетки и детектора на оси цилиндрической симметрии решетки (касательная к кругу Роуланда, проведенная через центр сферы), что приводит к дифракционному качеству вертикального изображения центральной точки входной щели. Спектральная фокальная кривая с помощью коэффициента p_1 притягивается к оси симметрии так, чтобы пересекать ее в двух точках – на углах дифракции $\beta_{1,2}$ (длинах волн $\lambda_{1,2}$). Тогда в

широком спектральном интервале, включающем в себя диапазон между $\lambda_{1,2}$, астигматическая разность будет достаточно мала. Для сферической периодической решетки с криволинейными штрихами выделена установка детектора и щели на круг Роуланда, а вертикальная фокальная кривая с помощью подбора радиуса кривизны штрихов R_g притягивается к кругу Роуланда так, чтобы дважды пересечь его на углах дифракции $\beta_{1,2}$ (длинах волн $\lambda_{1,2}$).

В разделе 3.2 рассматриваются оба класса схем. Для схемы с VLS-решеткой условие пересечения спектральной фокальной кривой с осью симметрии решетки на углах дифракции $\beta_{1,2}$ (длинах волн $\lambda_{1,2}$) приводит к уравнению:

$$\frac{\cos^3 \alpha - \cos \alpha + \cos^3 \beta_1 - \cos \beta_1}{\sin \alpha + \sin \beta_1} = R \frac{p_1}{p_0} = \frac{\cos^3 \alpha - \cos \alpha + \cos^3 \beta_2 - \cos \beta_2}{\sin \alpha + \sin \beta_2}, \quad (7)$$

которое имеет аналитическое приближенное решение относительно угла падения α .

Угол α однозначно определяется углами дифракции β_1 и β_2 . Все вместе они определяют коэффициент $R p_1/p_0$, задающий форму спектральной фокальной кривой с точностью до масштаба. А форма спектральной фокальной кривой – единственный фактор, влияющий на спектральные aberrации схемы, поэтому углы дифракции β_1 и β_2 полностью определяют изображающие характеристики прибора в целом. Первая важная характеристика схемы – максимальная по спектральному диапазону астигматическая разность, деленная на R . Произведение этой величины и ширины решетки – размер спектральной aberrации. Вторая характеристика – относительная ширина спектрального диапазона. Третья – центральная длина волны, а четвертая – расстояние между щелью и детектором. Оба этих элемента имеют конечные размеры и размещаются на одной прямой, из-за чего схему можно реализовать на практике, только если расстояние между ними больше чем 5 см.

Каждая из этих характеристик является функцией β_1 и $\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta$. В координатах β_1 и $\Delta\beta$ характеристики можно представить в виде карт, приведенных на Рис. 7. Задача расчета схемы спектрографа данного класса с заданными габаритами, разрешающей способностью и рабочим спектральным диапазоном сводится к выбору точки на этих картах.

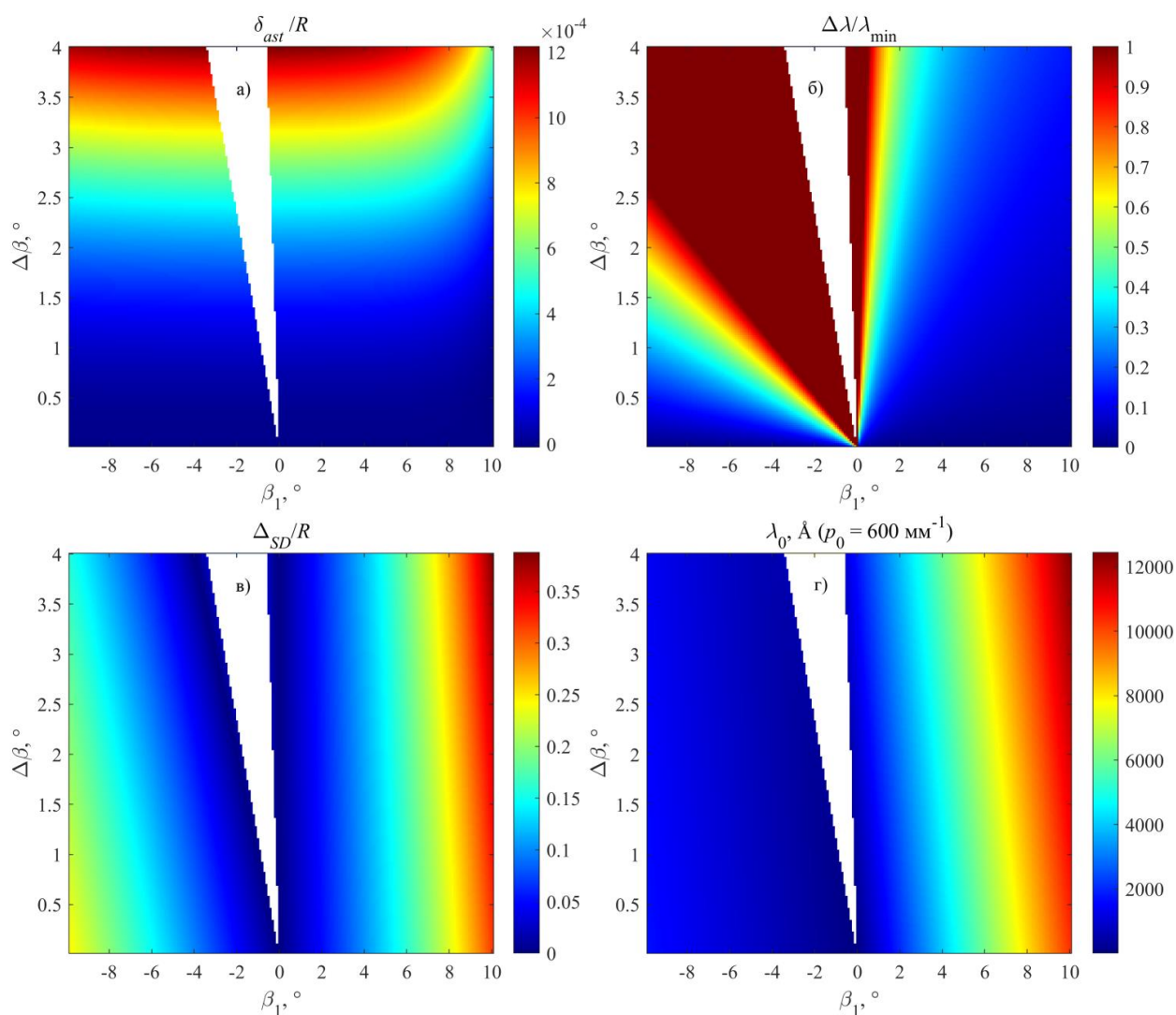


Рис. 7. Карты характеристик схемы изображающего спектрографа нормального падения на основе сферической VLS-решетки. а) – астигматическая разность, деленная на радиус R решетки, б) – относительная ширина спектрального диапазона, в) расстояние “щели – детектор”, деленное на R , г) – центральная длина волны λ_0 при $p_0 = 600 \text{ мм}^{-1}$. Белым цветом обозначена область, в которой невозможны два пересечения спектральной фокальной кривой и оси симметрии. Правее треугольника – схемы, работающие во внутреннем порядке дифракции ($m = 1$), левее – во внешнем порядке ($m = -1$).

Аналогичные результаты и карты характеристик были получены для схемы на основе сферической периодической решетки с криволинейными штрихами.

В разделе 3.3 приведены результаты расчета и проверки методом численной трассировки лучей схем приборов этих классов для рабочего спектрального диапазона с шириной около октавы и центральной длиной волны $\lambda_0 \sim 1250 \text{ \AA}$. Параметры схем приведены в Табл. 1. Схемы, работающие в первом внешнем порядке дифракции, характеризуются $\lambda/\delta\lambda \sim 1500$, относительно компактными габаритами ($\sim 1 \text{ м}$), рабочим спектральным диапазоном с шириной более октавы и линейным полем зрения около 2.5 мм . Схемы в первом внешнем порядке дифракции, громоздки (длина $\sim 5 \text{ м}$), с меньшей шириной спектрального диапазона, но обладают

$\lambda/\delta\lambda \sim 10000$ и линейным полем зрения, ограниченным на практике лишь высотой входной щели.

Табл. 1. Параметры широкополосных изображающих спектрографов нормального падения.

Параметры	Спектрографы на основе сферической VLS-решетки		Спектрографы на основе сферической периодической решетки с криволинейными штрихами	
	-1	1	-1	1
Порядок дифракции m	-1	1	-1	1
Радиус поверхности решетки R , м	1	5	1	5
Частота штрихов решетки p_0 , мм ⁻¹	600	600	600	600
Градиент частоты штрихов p_1 , мм ⁻²	0.149	-0.0054	0	0
Радиус кривизны штрихов R_g , м	∞	∞	4.735	-102.4
Нормальный угол падения на решетку α , °	2.9	3.0	2.44	3.1
Углы дифракции стигматических точек $\beta_1; \beta_2$, °	-8.3; -6.2	0.6; 1.8	-7; -5	0.4; 2.4
Диапазон длин волн, Å	820 – 1690	920 – 1580	570 – 1500	910 – 1640
Обратная линейная дисперсия, Å/мм	16.67	3.33	16.59	3.33
Разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda$	1900	9500	1550	9830
Пространственное разрешение, мкм	26	26	26	26
Линейное поле зрения, мм	2.5	без ограничений	2.5	без ограничений

Схемы на основе сферической VLS-решетки и схемы на основе периодической решетки с криволинейными штрихами обладают похожими изображающими свойствами. Сферическая VLS-решетка позволяет получить лучшее предельное пространственное разрешение, а периодическая решетка с криволинейными штрихами – лучшее предельное спектральное разрешение, однако при использовании ПЗС-детектора эта разница между ними исчезает.

В разделе 3.4 приведены основные результаты главы 3.

В главе 4 описан расчет широкополосных аperiodических зеркал на основе многослойной аperiodической структуры Mo/Be с уменьшенным разбросом толщин слоев в структуре, а также применение первых широкополосных Mo/Be зеркал с равномерным отражением в диапазоне 111 – 138 Å в схеме изображающего дифракционного спектрографа с пропускающей решеткой.

В разделе 4.1 описывается метод оптимизации многослойных аperiodических структур на максимальное равномерное отражение в широком диапазоне длин волн при фиксированном угле падения с минимизацией разности толщин соседних слоев. Из-за зависимости плотности слоя Mo от его толщины, которую во время синтеза косвенно контролируют по массе напыленного слоя, толщины слоев в синтезированной структуре могут сильно отличаться от расчетных, что приводит к искажению спектра отражения структуры. Поэтому, целесообразно

уменьшить разброс толщин слоев в расчетной структуре, что было достигнуто путем модификации функционала оптимизации:

$$F(\mathbf{d}) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (R(\lambda, \mathbf{d}) - R_0)^{2n} d\lambda + c \sum_{k=\Delta k+1}^N (d_{k+\Delta k} - d_k)^{2n}, \quad (8)$$

где интеграл – классическая часть функционала, c – коэффициент сглаживания, Δk – “период” сглаживания. При $\Delta k = 2$ уменьшается разность толщин ближайших слоев из одного и того же материала, а при $\Delta k = 1$ – разность толщин граничащих друг с другом слоев.

Сглаживание уменьшает разброс толщин слоев при относительно узких спектральных диапазонах оптимизации (111 – 138 Å), но с расширением диапазона постепенно теряет свою эффективность – в октаве длин волн 111 – 222 Å отношение максимальной толщины слоя молибдена к минимальной составляет не менее двух. Однако в этом случае из-за более плавной зависимости толщины слоя от порядкового номера пары слоев возможно уменьшить число предварительных калибровок установки магнетронного напыления и пользоваться интерполяцией между калибровочными точками.

После нахождения оптимума коэффициента сглаживания c был произведен расчет структур на максимальное равномерное отражение в диапазонах 111 – 138 Å, 111 – 150 Å, 111 – 200 Å и 111 – 222 Å. Структуры обладают уровнем плато 15.8%, 12.6%, 10.7% и 10.3%, а относительное среднеквадратичное отклонение от него – 3.2%, 5.5%, 7.6% и 5.8%, соответственно (Рис. 8). Количество слоев во всех структурах – 41 пара.

В разделе 4.2 описывается применение первых отечественных широкополосных Мо/Ве зеркал в схеме изображающего дифракционного спектрографа с пропускающей решеткой (Рис. 9). Три зеркала, синтезированные в ИФМ РАН на сферических ($R = 1$ м) подложках, изготовленных в ФИАН, обладали равномерным отражением на уровне ~ 14%, ~ 12% и ~ 14% в диапазоне 111 – 138 Å. Зависимость коэффициентов отражения зеркал от длины волны была измерена в ИФМ РАН на рефлектометре.

Первая серия экспериментов была проведена с вольфрамовой мишенью, дающей квазинепрерывный спектр. Благодаря тому, диапазон зеркал охватывал L-край кремния ($\lambda \sim 125$ Å) с двух сторон, было получено отношение чувствительности детектора перед и после L-края Si, и по нему оценена толщина кремниевого мертвого слоя ПЗС-матрицы, которая составила 54 ± 0.5 нм.

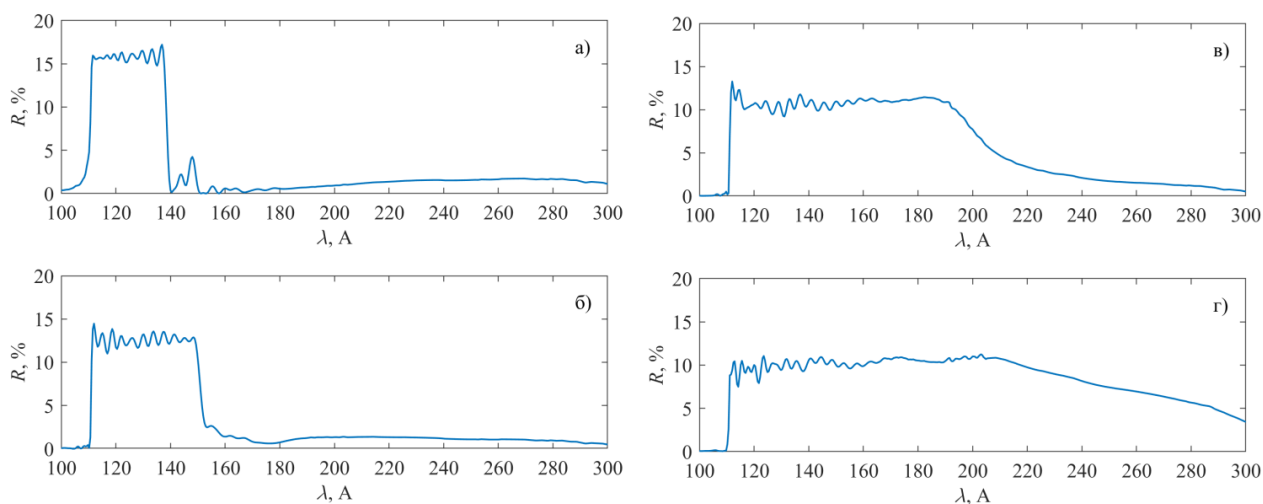


Рис. 8. Расчетные спектры отражения аperiodических Mo/Be структур, оптимизированных на максимальное равномерное отражение в широком спектральном диапазоне. а) – 111 – 138 Å; б) – 111 – 150 Å; в) – 111 – 200 Å; г) – 111 – 222 Å.

Вторая серия экспериментов была проведена с использованием линейчатых спектров мишеней LiF (Рис. 10) и Mg. Из-за скрещенной с рабочими штрихами поддерживающей структуры (с периодом ~ 20 мкм, скважностью ~ 0.55 , измеренными по дифракции излучения He-Ne лазера) три порядка дифракции на ней накладывались друг на друга, поэтому для получения пространственного профиля распределения интенсивности спектральной линии иона F VII 127.7 Å методом градиентного спуска была решена задача разделения этих порядков дифракции. Результат ее решения приведен на Рис. 11.

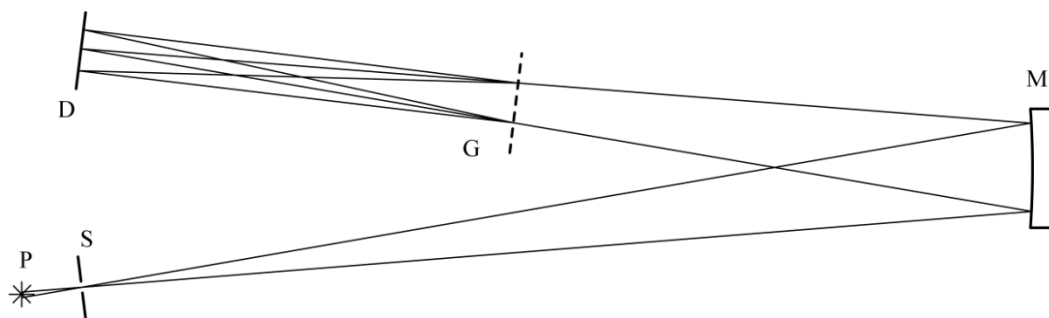


Рис. 9. Схема спектрографа с пропускающей решеткой. P – лазерно-плазменный источник, S – входная щель, M – широкополосное многослойное стековое Mo/Be зеркало, G – пропускающая дифракционная решетка, D – ПЗС-детектор. На поверхности детектора совмещалось горизонтальное изображение входной щели и вертикальное изображение источника.

Величина размытия границы света и тени, соответствующей уровню мишени, говорит о пространственном разрешении прибора. Она составила около четырех ячеек детектора, что соответствует ~ 50 мкм. Спектральная разрешающая способность соответствовала

произведению обратной линейной дисперсии и удвоенному размеру ячейки детектора и составила ~ 160 на длине волны 125 \AA .

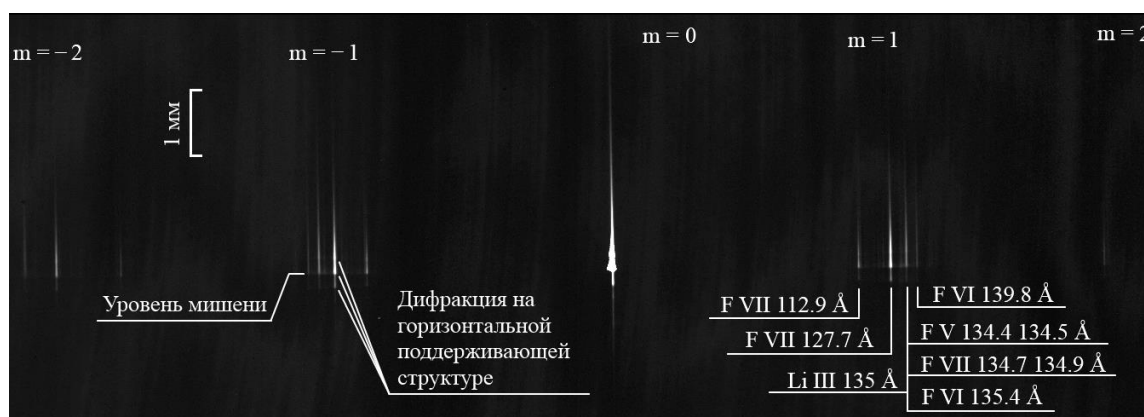


Рис. 10. Стигматический спектр лазерной плазмы LiF. Горизонтальное направление соответствует направлению дисперсии, вертикальное – пространственное направление. Белой скобкой указан пространственный масштаб. Видны накладывающиеся друг на друга нулевой, первый и минус первый порядки дифракции на скрещенной с рабочими штрихами поддерживающей структуре решетки.

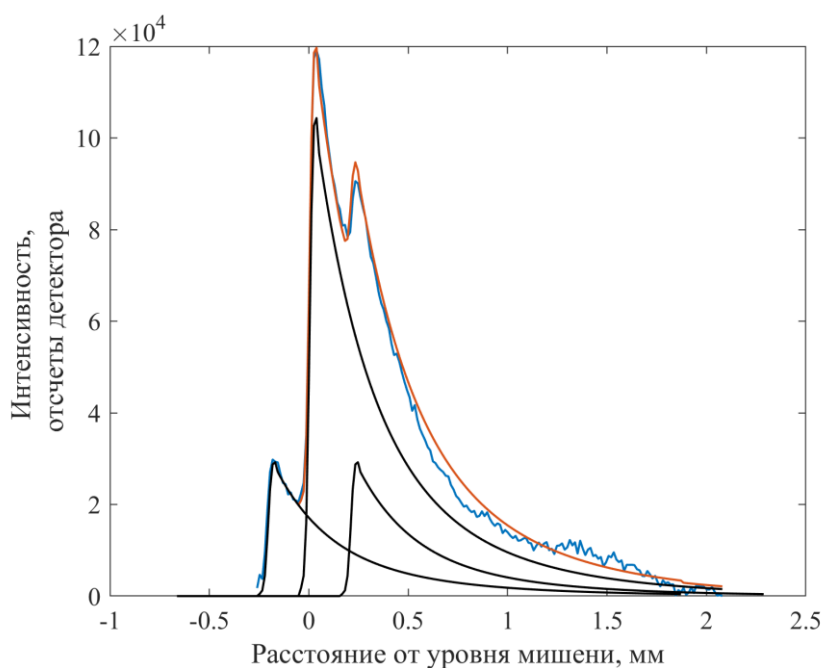


Рис. 11. Результат восстановления профиля спектральной линии 127.7 \AA F VII. Синим цветом обозначены считанные в эксперименте отсчеты детектора, черным цветом – вклад нулевого, первого и минус первого порядков дифракции в изображение на детекторе – восстановленный пространственный профиль линии, оранжевым цветом – сумма черных линий, находится в хорошем согласии с экспериментальным результатом.

В разделе 4.3 приведены основные результаты главы 4.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении приводятся метод измерения зависимости частоты штрихов VLS-решетки от координаты на ее апертуре и метод измерения глубины профиля штриха (или скважности для пропускающей решетки) по дифракции излучения He-Ne лазера.

Заключение

Все поставленные в работе цели были достигнуты и привели к следующим основным результатам:

1. Разработан метод решения “обратной” задачи интерференционной литографии, основанный на аналитическом обращении прямой задачи с последующей оптимизацией схемы записи в лучевом приближении. Метод был успешно применен при изготовлении сферической VLS-решетки спектрографа скользящего падения с плоским полем с помощью технологии интерференционной литографии в НПО ГИПО. Совпадение измеренной зависимости частоты штрихов у изготовленной решетки с расчетной ($p/\Delta p \sim 1000$) подтверждает правильность расчета схемы записи.

2. Разработан метод расчета спектрографа скользящего падения с плоским полем на основе сферической VLS-решетки, опирающийся на аналитические следствия принципа Ферма и последующую численную трассировку лучей. Произведен расчет семейства таких приборов – компактный (длина ~ 25 см) спектрограф для диапазона $90 - 250 \text{ \AA}$ с разрешающей способностью ~ 400 , полуметровый прибор для диапазона $50 - 275 \text{ \AA}$ с разрешающей способностью ~ 850 и длиннофокусный (длина ~ 1.5 м) коротковолновый прибор с разрешающей способностью ~ 2400 . На основе этих расчетов был создан и успешно испытан при регистрации спектров лазерной плазмы первый отечественный прибор такого класса – полуметровый прибор для диапазона $50 - 275 \text{ \AA}$ с высокой разрешающей способностью ~ 800 .

3. Создан мощный инструмент разработки спектрографов скользящего падения с плоским полем. В цикл разработки включены все этапы, начиная от расчета оптической схемы прибора и заканчивая его испытанием в эксперименте. Цикл учитывает возможные обратные связи – например, модификацию схемы спектрографа под изготовленную VLS-решетку в том случае, когда зависимость частоты штрихов от координаты отличается от расчетного закона.

4. В координатах β_1 и $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ (β_1 и β_2 – углы дифракции, на которых дифрагированные пучки стигматичны) составлены карты характеристик (астигматической разности, относительной ширины спектрального диапазона, расстояния между щелью и детектором и центральной длины волны) двух классов схем изображающего широкополосного спектрографа нормального падения 1) на основе сферической VLS-решетки с размещением входной щели и детектора на оси симметрии решетки, 2) на основе сферической периодической

решетки с криволинейными штрихами с размещением входной щели и детектора на круге Роуланда. Проведен анализ этих карт.

5. Рассчитаны два широкополосных изображающих ВУФ-спектрографа нормального падения с VLS-решеткой и два спектрографа с периодической решеткой с криволинейными штрихами. Первые два прибора обладают габаритами 1 м и 5 м, диапазоном 820 – 1690 Å и 980 – 1520 Å, разрешающей способностью 1900 и 9500, пространственным разрешением 26 мкм, линейным полем зрения 2.5 мм и полем зрения, ограниченным физическим размером входной щели, работают в первом внешнем и первом внутреннем порядке дифракции, соответственно. Два других прибора имеют следующие характеристики: габариты 1 м и 5 м, диапазон 570 – 1500 Å и 910 – 1640 Å, разрешающая способность 1550 и 9800, пространственное разрешение 26 мкм, линейное поле зрения 2.5 мм и поле зрения, ограниченное физическим размером входной щели, также работают в первом внешнем и первом внутреннем порядке дифракции, соответственно.

6. Рассмотрена возможность создания широкополосных зеркал нормального падения на основе многослойной аперидической структуры Mo/Be в диапазоне длин волн $\lambda > 111$ Å. Рассчитаны многослойные аперидические структуры обладающие равномерным отражением в диапазонах 111 – 138, 111 – 150, 111 – 200 и 111 – 222 Å на уровне 15.8%, 12.6%, 10.7% и 10.3%, а относительное среднеквадратичное отклонение коэффициента отражения от среднего составило 3,2%, 5,5%, 7,6% и 5,8%, соответственно. При расчете структур с относительно небольшой шириной спектра равномерного отражения сглаживание толщин слоев позволяет уменьшить их разброс, практически не понижая уровень плато и не ухудшая равномерность, но упрощая синтез таких структур.

7. Синтезированные в ИФМ РАН сферические широкополосные зеркала нормального падения с равномерным отражением на уровне 14% в диапазоне 111 – 138 Å на основе стековой структуры Mo/Be были применены в качестве фокусирующего оптического элемента в схеме изображающего дифракционного спектрографа со свободностоящей пропускающей решеткой (1000 мм^{-1}). При испытании спектрографа была оценена толщина мертвого кремниевого слоя ПЗС-матрицы, составившая (54 ± 0.5) нм, получены линейчатые спектры лазерной плазмы LiF и Mg, и восстановлено пространственное распределение интенсивности спектральной линии 127.7 Å иона F VII, искаженное поддерживающей структурой решетки. Спектральная разрешающая способность прибора составила ~ 160 , пространственное разрешение ~ 50 мкм.

Список цитируемой литературы.

1. Samson J.A.R., Techniques of vacuum ultraviolet spectroscopy. // New York: Wiley – 1967.
2. Кондратенко В.В., Левашов В.Е., Першин Ю.П. и др. Аперриодические широкополосные многослойные зеркала на область 125 - 250 Å. // Кратк. Сообщ. Физ. ФИАН. – 2001 – №7. – С 32.
3. ESRF Anonymous FTP Server– <http://ftp.esrf.fr/pub/scisoft/xop2.3/> – 2019.
4. Stellar Software – <https://www.stellarsoftware.com/>.
5. 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 – № 186 – 1989.
6. Namioka T., Koike M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings. // Appl. Opt. – 1995 – Т. 34. – №13. – С. 2180.

Список публикаций автора по теме диссертации

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

- A1. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. VLS-спектрографы с плоским полем для мягкого рентгеновского излучения. // Квантовая электроника – 2016. Т 46. – №10. – С. 953–960; [переводная версия: Quantum Electronics – 2016. – V. 46. – no 10. – P. 953–960. – DOI: 10.1070/QEL16106].
- A2. Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин. «Изображающий спектрограф нормального падения на основе аперриодической сферической решетки для вакуумной области спектра». // Оптика и спектроскопия – 2018 – Т. 125. – №5. – С 687 – 698. DOI 10.21883/OS.2018.11.46845.14-18; [переводная версия: Optics and Spectroscopy –2018. – V. 125. – P. 783–794. DOI: 10.1134/S0030400X18110346].
- A3. Vishnyakov E.A., Kolesnikov A.O., Shatokhin A.N., Ragozin E.N. Imaging VLS grating spectrographs. // Proc. SPIE. – 2018 – Т. 10677. – С. 106770E. DOI: 10.1117/12.2305918.
- A4. Колесников А.О., Вишняков Е.А., Шатохин А.Н., Рагозин Е.Н. VLS-спектрометр с плоским полем на область длин волн 50–275 Å. // Квантовая электроника – 2019 – Т. 49. – №11. – С. 1054–1058; [переводная версия: Quantum Electronics – 2019. – V. 49. – no 11. – P. 1054–1058. – DOI: 10.1070/QEL17074].
- A5. Ragozin E.N., Kolesnikov A.O., Pirozhkov A.S., Sasorov P.V., Shatokhin A.N., Vishnyakov E.A. High Spectral and Spatial Resolution Soft X-ray/XUV VLS Spectrographs. // X-Ray Lasers 2018. ICXRL 2018. Springer Proceedings in Physics Т. 241. – С. 169–174.
- A6. Колесников А.О., Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. Изображающий широкополосный спектрограф для мягкого рентгеновского диапазона ($\lambda > 111 \text{ \AA}$) с пропускающей дифракционной решеткой. // Квантовая электроника – 2020 – Т. 50. – №10. – С. 967–975; [переводная версия: Quantum Electronics –2020. – V. 50. – no 10. – 967–975. DOI: 10.1070/QEL17350].

Б. Публикация в монографии:

Б1. Рагозин. Е. Н., Вишняков Е. А., Колесников А. О., Пирожков А. С., Шатохин А. Н. Аperiodические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона. // Москва: ФИЗМАТЛИТ – 2018. Глава 7 с. 80 – 93, Глава 10 раздел 10.3 с. 124 – 128.

В. Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

В1. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Спектрографы на основе VLS-решётки. // Черногоровка: Конференция «Рентгеновская оптика – 2016» – 26–29 сентября 2016 г. – С. 34-36 (2016).

В2. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Расчёт схемы записи для изготовления VLS-решётки методом интерференционной литографии. // Нижний Новгород: Труды XXI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» – 13–16 марта 2017 г. – Т 1. – С. 375-376.

В3. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А. Н. Широкополосные стигматические VLS-спектрометры для ВУФ диапазона. // Нижний Новгород: Труды XXII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» – 12-15 марта 2018 г. – Т. 1. – С. 420-421.

В4. Вишняков Е. А., Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Шатохин А. Н. Спектрографы на основе сферической VLS-решётки. // Черногоровка: Конференция Рентгеновская оптика – 2018 – 24–27 сентября 2018 г., – С. 119-123.

В5. Колесников А.О., Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. VLS-спектрограф с плоским полем для области длин волн 50 – 275 Å. // Нижний Новгород: Труды XXIV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» – 10–13 марта 2020 г. – С. 877–878.

Г. Другие публикации

Г1. Шатохин А.Н., Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Колесников А.О. Способ изготовления дифракционной решетки. – Патент РФ 2659875 МПК G 02 В 5/18. Заявл. 26.07.2017. – Оpubл. 04.07.2018. – Бюл. № 19.

Подписано в печать: 15.09.2021
Заказ №18448. Тираж - 100 экз.
Бумага офсетная. Формат 60x90/16.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(977) 518-13-77 (499) 788-78-56
www.avtoreferat.ru riso@mail.ru

