

На правах рукописи

Гарахин Сергей Александрович

**Широкополосные рентгенооптические элементы на
основе апериодических многослойных структур для
солнечной астрономии и управления
аттосекундными импульсами электромагнитного
излучения**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной
физики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2020г.

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Института прикладной физики Российской академии наук»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Чхало Николай Иванович
ИФМ РАН, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Рагозин Евгений Николаевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физический институт
имени П. Н. Лебедева РАН»
Трушин Владимир Николаевич
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И.
Лобачевского»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук

Защита состоится «17» декабря 2020 г. на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Институте физики микроструктур РАН - филиале ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603087, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте
http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2020_GarahinSA/Diss_GarakhinSA.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

В настоящее время периодические многослойные зеркала (ПМЗ) уже стали признанным классом рентгенооптических элементов, широко используемых как в науке, так и в технике. В частности, значительный объем информации о Солнце и мониторинг его активности осуществляются с помощью мягкой рентгеновской спектроскопии с высоким (порядка 500 км на Солнце) пространственным разрешением [1].

Уникальность ПМЗ по сравнению с другими рентгенооптическими элементами связана со следующим. Во-первых, зеркала с высокими (до 70%) коэффициентами отражения при нормальных углах падения имеют большую числовую апертуру и минимальные аберрации, что обеспечивает высокое пространственное разрешение и эффективное использование излучения из источника. Во-вторых, возможность нанесения высокоотражающих ПМЗ на подложки сложной формы позволяет фокусировать и коллимировать рентгеновские пучки, строить «безаберрационные» изображения. В-третьих, спектральная селективность ПМЗ (отношение резонансной длины волны к спектральной ширине на полувысоте коэффициента отражения) составляет 20-500, что позволяет отстроиться от близко лежащих линий и минимизировать фоновые засветки.

Однако в ряде задач спектральная селективность ПМЗ становится проблемой, препятствующей их применению. В частности, для спектроскопии сверхвысокого разрешения, которое достигается за счет использования дифракционных решеток, с высоким пространственным разрешением (изображение строится многослойным зеркалом нормального падения) наоборот, нужно отражение в широкой спектральной полосе, $\lambda/\Delta\lambda \sim 1$. Эта задача успешно решается за счет аperiodических многослойных зеркал (АМЗ), которые позволяют достичь относительно высокого коэффициента отражения равномерно в широком диапазоне длин волн [1]. Такие зеркала необходимы, например, для космической аппаратуры КОРТЕС [2], включающей три изображающих телескопа для экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) области спектра, два спектрогелиографа, работающих в мягком рентгеновском (МР) диапазоне, и комплексный рентгеновский спектрометр SOLPEX. В данном случае аperiodические многослойные зеркала необходимы для создания эффективных спектрогелиографов в диапазоне длин волн 170–210 и 280–330 Å.

В настоящее время, в связи с развитием мощных лазерных систем тераваттного, а в последнее время петаваттного, уровня резко возрос интерес к получению аттосекундных пучков электромагнитного излучения. Одиночные импульсы с длительностью около 100 аттосекунд уже

получаются с помощью генерации высоких гармоник при взаимодействии лазерного излучения с газовой средой, однако аттосекундных импульсов в мягком и жестком рентгеновском диапазонах к настоящему времени экспериментально получено не было. Тем не менее, имеется большой ряд теоретических работ о возможности получения сверхкоротких, в единицы аттосекунд, импульсов.

Управление (транспортировка, фокусировка, коллимация) такими пучками может осуществляться с помощью АМЗ. Типично спектральная ширина полосы пропускания составляет 0,2-0,5 от резонансной длины волны. Специфика применения многослойных зеркал для аттофизики заключается в том, что, помимо широкой спектральной полосы пропускания, требуется, как минимум, не исказить форму импульса, а лучше сократить его длительность. Физическими предпосылками возможности сокращения длительности отраженных импульсов является то, что разные спектральные компоненты импульса отражаются на различных глубинах структуры. Как правило, поле меньшей частоты проникает вглубь на меньшую глубину. В случае чирпированных импульсов, для которых характерно плавное изменение несущей частоты, можно подобрать такие условия, чтобы задержка между «низкочастотными» и «высокочастотными» компонентами импульса после отражения уменьшилась [1].

Несмотря на потенциально широкую область применения АМЗ, число работ и публикаций на эту тему ограничено. Фактически, характеризуя состояние дел в области АМЗ, можно отметить следующие работы и достижения к настоящему времени.

Первые систематические исследования АМЗ были начаты в конце 1980-х годов с расчетов Pt/Si и Ir/Si АМЗ для диапазонов 10-30 и 30-60 нм [3]. Позднее в [4] было рассчитано АМЗ Mo/Si. На практике в мягком рентгеновском диапазоне, за редким исключением, эта структура остается основной по наши дни [5-8].

Для диапазона длин волн короче 12,4 нм из практически значимых можно упомянуть теоретические исследования структур типа La/B₄C [9] и экспериментальный результат по поляризатору для спектральной области 8,5-11,7 нм на основе Mo/Y АМЗ [10]. Таким образом, освоение новых спектральных диапазонов и расширение номенклатуры АМЗ с учетом последних достижений в области периодических многослойных зеркал является актуальным.

Хорошо развитой областью в рамках тематики АМЗ являются математические алгоритмы расчета рентгенооптических характеристик и оптимизации состава АМЗ. Среди наиболее значимых работ, определивших современные подходы к моделированию АМЗ, включая временные параметры отраженных импульсов, следует отметить [11, 12].

При практическом использовании оптимизационных методов требуется развитие новых стратегий. А именно – учет переходных слоев и реальных плотностей материалов пленок в самом начале процедуры оптимизации состава и введение дополнительных переменных – ширин переходных слоев и плотностей пленок, как функций толщины. Важность учета шероховатости в самом начале алгоритма поиска структуры АМЗ в жестком рентгеновском диапазоне продемонстрирована в [13], где авторам, несмотря на межслоевую шероховатость, удалось получить кривую отражения, практически совпадающую с расчетной. В работе [14] отмечена важность этого фактора в мягком рентгеновском диапазоне. Таким образом, изучение зависимости переходных слоев и плотностей пленок от их толщины, а также добавление этих переменных в стратегию оптимизации состава АМЗ и, в частности, стековых многослойных зеркал – СМЗ (состоит из нескольких периодических многослойных зеркал-стеков), обладает несомненной новизной и внесет свой вклад в развитие не только аперриодической, но и традиционной периодической многослойной оптики.

Также возникает острая необходимость в создании программного обеспечения, позволяющего оптимизировать АМЗ для аттооптики, т.к. при этом требуется одновременно оптимизировать как амплитуду, так и фазу комплексного коэффициента отражения.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются, во-первых, развитие методов расчета, синтеза и характеристики широкополосных зеркал для МР и ЭУФ диапазона.

Во-вторых, расширение рабочего диапазона широкополосных зеркал в длинноволновую область. Задачи диссертационной работы:

1) Разработка методики оптимизации толщин пленок в широкополосных многослойных зеркалах, обеспечивающей заданный профиль угловых и спектральных зависимостей коэффициента отражения, и позволяющей зеркалам работать с аттосекундными импульсами электромагнитного излучения (ЭМИ).

2) Анализ влияния флуктуаций толщин, плотностей пленок и межслоевой шероховатости на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения зеркала, а также на форму и длительность отраженных от АМЗ аттосекундных chirпированных импульсов ЭМИ.

3) Разработка и изготовление рефлектометра, и экспериментальных методик для измерений спектральных и угловых зависимостей коэффициентов отражения широкополосных зеркал в МР и ЭУФ диапазонах длин волн.

4) Развитие методики реконструкции толщин пленок в стековых широкополосных многослойных зеркалах по данным рентгеновского отражения.

5) Разработка дизайна, синтез и изучение отражательных характеристик широкополосных многослойных зеркал для астрофизического эксперимента КОРТЕС

Научная новизна работы

1) Впервые предложена и реализована на практике методика реконструкции внутреннего строения стековых структур по данным угловой зависимости коэффициента отражения на длине волны 0,154 нм и по спектральной кривой отражения в ЭУФ диапазоне. Предложенная методика в разы ускорила процесс изготовления широкополосного зеркала с близкими к расчетным параметрам.

2) Впервые проведено сравнение рентгенооптических свойств аperiodических и стековых многослойных широкополосных структур с близкими спектральными полосами пропускания. Показано преимущество стековых структур по сравнению с аperiodическими.

3) Созданы широкополосные зеркала стекового типа с рекордно большой, до 33 нм, рабочей длиной волны.

4) Впервые изучено влияние структурных дефектов АМЗ, таких как межслоевая шероховатость, отличие плотности пленок от табличных значений, а также случайного отклонения толщин слоев от расчетных значений на форму и длительность отраженного chirпированного импульса электромагнитного излучения аттосекундной длительности.

5) Впервые изучена в широких пределах зависимость плотности M_0 от толщины слоя. Показана необходимость учета изменения плотности при расчете структуры широкополосного зеркала.

Практическая значимость работы

Экспериментально показано преимущество применения стековых структур по сравнению с аperiodическими для создания широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона. Стековая структура содержит значительно меньше слоев различной толщины, чем аperiodическая, поэтому для калибровки толщин пленок требуется меньше времени. Для стековых зеркал можно решить обратную задачу реконструкции толщин пленок изготовленной структуры по данным рентгеновского отражения. Это позволяет скорректировать технологический процесс и всего за несколько итераций добиться хорошего согласования теории и эксперимента, недоступного для аperiodических зеркал.

Продемонстрирована необходимость учета реальных значений плотности Mo пленок и шероховатости межслоевых границ при расчете конструкции широкополосных Mo/Si зеркал. Использование экспериментальных значений шероховатости и плотности позволило снизить количество оптимизируемых параметров при расчете аperiodических многослойных зеркал и точнее смоделировать профиль полученного зеркала.

Экспериментальное, с использованием методов широкоугольной и малоугольной рентгеновской дифракции, восстановление зависимости плотности Mo от толщины слоя в периодических рентгеновских зеркалах Mo/Si , синтезированных методом магнетронного напыления в атмосфере аргона, позволит в дальнейшем оптимизировать и синтезировать АМЗ и ПМЗ Mo/Si лучшего качества.

Разработанный рефлектометр с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера позволяет исследовать коэффициенты отражения, рассеяния и пропускания практически всех типов рентгенооптических элементов с размерами от единиц до 500 мм в диапазоне длин волн 5-60 нм.

Оценки искажения формы и длительности отраженного от АМЗ чирпированного аттосекундного импульса, связанные с несовершенствами структуры зеркала, позволяют оценивать границы применимости АМЗ как элемента аттооптики.

Разработанные и изученные экспериментально конструкции широкополосных стековых структур для ЭУФ диапазона будут использованы при изготовлении оптики для аппаратуры КОРТЕС.

Методология и методы исследований

Объектами для отработки методики оптимизации широкополосных рентгеновских зеркал стали аperiodические структуры Mo/Si , Mo/Be , Mo/Be/Si , Al/Be , Mg/Be и стековые структуры Mo/Si .

Объектами для установления зависимости плотности пленки Mo от толщины стали многослойные периодические отражающие покрытия на основе пары Mo/Si (толщина Si фиксирована, толщина Mo меняется в диапазоне 1,65-7,9 нм). Покрытия наносились на полированные кремниевые подложки, шероховатость $\sim 0,2$ нм, толщина 0,5 мм, размеры от 20×20 мм до 30×30 мм. Зеркала получены методом магнетронного распыления в атмосфере аргона. Для определения межплоскостных расстояний Mo и степени кристалличности его структуры применялась рентгеновская дифракция в области больших углов с использованием дифрактометра Bruker D8 Discover.

Поверхность исследуемых структур характеризовалась методом атомно-силовой микроскопии, внутренняя структура покрытий определялась по

угловым и спектральным зависимостям коэффициентов отражения, измеренным в мягкой и жёсткой рентгеновской областях с помощью лабораторных и синхротронных рефлектометров. В результате обработки данных определялись такие параметры, как плотность и толщина слоёв, а также межслоевая шероховатость.

Расчет рентгенооптических параметров и настройка лабораторного рефлектометра с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера осуществлялась с использованием программы ZEMAX. Тестовыми структурами служили тонкопленочные фильтры Be, Al, MoZrSi₂ и периодические многослойные зеркала Mo/Si и Mo/Be, прошедшие аттестацию на синхротроне BESSY II.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертации были получены при определяющем участии автора. Все теоретические работы, касающиеся оптимизации широкополосных зеркал, а также восстановление их структурных параметров по данным рентгеновской рефлектометрии были выполнены автором самостоятельно. Также самостоятельно были выполнены расчеты по влиянию структурных параметров аperiodического зеркала (межслоевая шероховатость, случайный разброс толщин, отличие плотности материалов от табличных значений) на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения и на форму и длительность отраженного от такой структуры чирпированного импульса субфемтосекундной длительности. Планирование и разработка рефлектометра с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера были выполнены в соавторстве с коллегами, однако эксперименты по юстировке рефлектометра и измерению на нем коэффициентов отражения зеркал были выполнены самостоятельно.

Все работы, связанные с синтезом и аттестацией широкополосных зеркал для обсерватории «КОРТЕС» были выполнены автором самостоятельно.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработанные методы расчета и синтеза стековых структур позволяют добиться близких по величине значений коэффициентов отражения при большей гладкости спектральной зависимости коэффициента отражения по сравнению с аperiodическими зеркалами. При этом процесс синтеза широкополосных стековых зеркал значительно более прост, в силу использования на порядок меньшего набора толщин пленок в структуре и возможности оперативной корректировки параметров технологического процесса по данным рентгеновского отражения.

2) Разработанный рефлектометр на основе лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения и монохроматора Черни-Тернера позволяет аттестовать рентгенооптические элементы (многослойные зеркала, тонкопленочные фильтры, дифракционные решетки и др.) с произвольной формой поверхности, с диаметром от единиц до 500 мм, в диапазоне длин волн 5-60 нм, со спектральным разрешением до 0,03 нм и областью локализации на образце при нормальном падении менее 0,1 мм².

3) Плотности индивидуальных пленок рассеивающего материала, межслойные шероховатости и флуктуации толщин необходимо учитывать на стадии расчета широкополосных зеркал для улучшения их параметров.

4) Разработанные и изученные широкополосные стекловые зеркала Mo/Si обеспечивают средние коэффициенты отражения 16% в спектральном диапазоне 17-21 нм и 12% в диапазоне 28-33 нм и могут быть использованы для спектрогелиографов солнечной обсерватории «КОРТЕС».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, достигается применением нескольких независимых экспериментальных методик, прямо или косвенно подтверждающих сделанные выводы, а также сопоставлением с данными, представленными в литературе.

Все результаты были представлены в реферируемых научных и специализированных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях:

XXI международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 13 – 16 марта 2017 г. – 2 стендовых доклада;

Конференция «Рентгеновская оптика», г. Черноголовка 24 – 27 сентября 2018 г. – устный доклад;

XXII международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 12 – 15 марта 2018 г. – 2 стендовых доклада;

XXIII международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 11 – 14 марта 2019 г. – стендовый и устный доклады;

Международный семинар «VUV and EUV metrology», г. Берлин, 21- 23 октября 2019 г. – устный доклад;

XXIV международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 10 – 13 марта 2020 г. – устный доклад.

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложена на 152 страницах, содержит 108 наименований библиографии, 104 рисунка и 9 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка задачи исследования, излагаются проблемы, с которыми сталкивается рентгеновская оптика при создании широкополосных многослойных зеркал для таких приложений, как рентгеновская и ЭУФ астрофизика и аттооптика. Формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна.

В первой главе дается краткий обзор методов расчета отражательных характеристик широкополосных многослойных зеркал, показывается, как подобрать параметры оптимизации для обеспечения необходимого сочетания коэффициента отражения и ширины рабочего диапазона длин волн или углов. Обсуждаются основные причины ухудшения отражательных характеристик синтезированных широкополосных зеркал. Рассматриваются широкополосные МЗ, синтезированные различными группами и предназначенные для рентгеновской и ЭУФ астрофизики и аттооптики. Показано несоответствие достигнутых результатов стоящим задачам.

Во второй главе изучено влияние структурных несовершенств АМЗ, таких как межслоевая шероховатость, флуктуации толщин слоев и отличие от табличной плотности пленок Мо, на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения АМЗ, на интенсивность и длительность аттосекундного отраженного импульса.

Обычно в АМЗ количество слоев может достигать сотен штук, а их толщины даже в одной структуре варьируются в довольно широких пределах (по порядку величины от 1 до 10 нм). Можно ожидать, что микроструктура пленок, в разы или даже на порядок различающихся по толщине, также будет различной. По крайней мере, степень кристаллизации металлических слоев должна существенно зависеть от их толщины, что, в свою очередь, влияет на плотность таких пленок и на состояние их поверхности, т.е. на шероховатость. Эти вопросы рассматриваются применительно к тонким пленкам молибдена в многослойных структурах типа Мо/Si.

Для изучения изменения структурных параметров Мо с толщиной была изготовлена серия ПМЗ Мо/Si с изменяемыми в диапазоне 1,6–6,9 нм толщинами слоя Мо и относительно небольшими (3,3–4,3 нм) вариациями толщин слоя Si. Образцы изготавливались методом магнетронного распыления в атмосфере аргона при давлении 10^{-3} торр. Основные характеристики ПМЗ Мо/Si, такие как период, толщины пленок кремния и молибдена, межслоевые шероховатости на границах изучали методом малоугловой дифракции рентгеновских лучей. Для подгонки кривых отражения использовали программное обеспечение IMD и собственная модель. На рис. 1 (слева) представлена восстановленная зависимость плотности Мо от толщины слоя в ПМЗ Мо/Si. До толщины молибдена 2,9 нм наблюдается резкий рост плотности – до 0,9 от табличного значения, которая затем плавно изменяется и выходит на асимптотику.

Полученная зависимость используется для оценки влияния несоответствия плотности табличным значениям на профиль коэффициента отражения АМЗ, рассчитанного для солнечной астрономии. Рис. 1 (справа) показывает необходимость учета экспериментально установленных плотностей Мо уже на стадии оптимизации структуры.

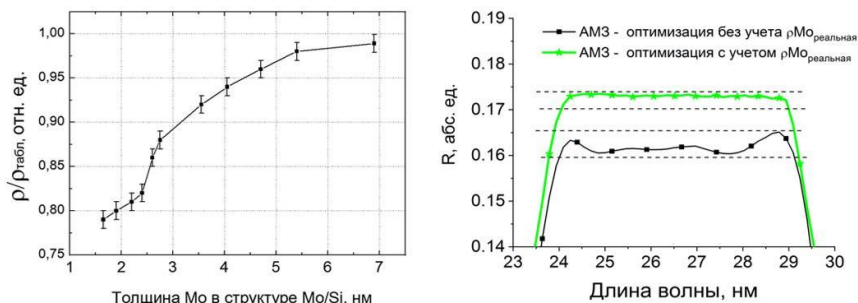


Рис. 1. Слева - зависимость плотности Мо от толщины слоя в ПМЗ Мо/Si; справа - оптимизированные профили коэффициента отражения АМЗ Мо/Si с учетом реальных значений плотности Мо (звездочки) и без (квадраты).

Еще более сильное влияние несовершенства структуры оказывают на зеркала, предназначенные для управления аттосекундными импульсами электромагнитного излучения, в которых оптимизируется не только амплитуда, но и фаза комплексного коэффициента отражения, необходимая для формирования требуемой групповой задержки. Правильно подобранная фаза позволяет уменьшить длительность отраженного импульса. Исследовалось модельное Мо/Si АМЗ, предназначенное для сжатия chirпированного импульса со спектром, лежащем в диапазоне энергий фотонов 50-80 эВ.

Наибольшее влияние на интенсивность и длительность отраженного импульса оказывают отличие плотностей Мо пленок от табличных значений и флуктуации толщин пленок. Межслоевая шероховатость оказывает сопоставимое воздействие на амплитуду коэффициента отражения, однако не столь сильное влияние на длительность импульса, увеличивая ее примерно на 10%. Флуктуации толщин пленок даже на уровне 1% от толщины слоя приводят к сильному падению интенсивности и даже к появлению дополнительных импульсов, задержанных по времени по отношению к основному, рисунок 2.

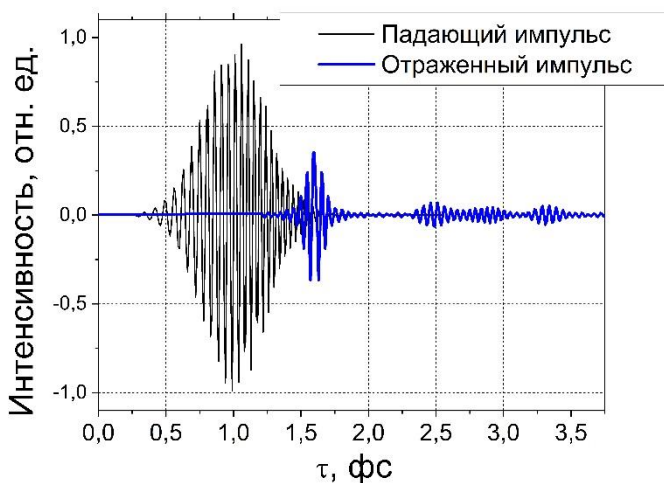


Рис. 2. Сравнение падающего импульса и импульса, отраженного от АМЗ Mo/Si, в котором смоделирован случайный разброс толщин слоев

В третьей главе рассматривается проблема аттестации широкополосных рентгенооптических элементов. Для измерения спектральных зависимостей коэффициента отражения таких структур требуется плавная перестройка по длине волны, что может быть достигнуто в синхротронных центрах. Однако ориентация только на синхротроны сильно ограничивает возможности исследователей. В частности, свойства тонких пленок и наноструктур могут сильно измениться в процессе транспортировки, а при разработке экспериментальных методов и технологий, требуется оперативная информация о физических свойствах созданного объекта. Имеющиеся рефлектометры с рентгеновской трубкой в качестве источника рентгеновского излучения позволяют работать лишь на достаточно узких характеристических линиях. Перечисленные проблемы послужили мотивацией для разработки рефлектометра с лазерно-плазменным источником МР и ЭУФ излучения и монохроматором Черни-Тернера, способного работать в диапазоне длин волн 5-50 нм. В главе обсуждаются теоретические и технические аспекты прибора. Основными системами устройства являются (см. рис. 3): лазерно-плазменный источник (ЛПИ) мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения; спектрометр/монохроматор Черни-Тернера (СМЧТ) с плоской дифракционной решеткой (ПДР); система формирования зондирующего пучка (СФЗП); гониометр (Г).

Работа устройства заключается в следующем. Излучение Nd:YAG-лазера (Expla NL-300, длина волны 1,06 мкм, энергия импульса 0,5 Дж, длительность 4 нс, частота следования импульсов 10 Гц), работающего в режиме с модуляцией

добротности с использованием короткофокусной линзы Л (фокусное расстояние 45 мм) фокусируется на мишени в пятно диаметром около 100 мкм (плотность мощности $\sim 10^{12}$ Вт/см²). Средняя энергия лазерного импульса контролируется с помощью термоэлектрического калориметра (К), который принимает часть излучения, отраженного от разделительной пластины (РП). Призма (П) перенаправляет лазерный луч в целевую камеру. Излучение вводится в камеру источника излучения через оптический ввод (ОВ) в вакуум. Кварцевая пластина (КП) защищает линзу от загрязнения продуктами эрозии мишени.

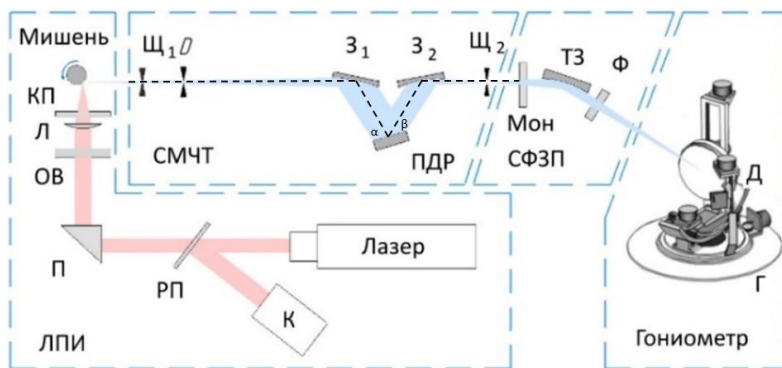


Рис. 3. Оптическая схема рефлектометра

Излучение, исходящее от плазменного факела, попадает на входную щель Щ_1 спектрометра/монохроматора. Монохроматический зондирующий луч поступает в камеру СФЗП для формирования и контроля интенсивности зондирующего луча. Интенсивность зондирующего луча контролируется с помощью детектора-монитора (Мон), установленного между выходной щелью (Щ_2) и тороидальным зеркалом (ТЗ). Тороидальное зеркало формирует зондирующий пучок заданного размера на исследуемом образце. Сагиттальный и меридиональный радиусы ТЗ выбраны таким образом, чтобы ТЗ формировало изображение источника излучения в вертикальной плоскости и выходной щели Щ_2 в горизонтальной плоскости. Поскольку положение щелей и источника излучения не изменяется во время сканирования по спектру, геометрические характеристики зондирующего пучка на образце не зависят от длины волны. Угол падения излучения на ТЗ фиксирован и составляет $1,5^\circ$. Золото было выбрано в качестве покрытия ТЗ со средним коэффициентом отражения во всем рабочем диапазоне 80%.

Тонкопленочный абсорбционный фильтр (Ф) используется для подавления 2-го и, частично, 3-го порядков дифракционной решетки.

Зондирующий пучок, отраженный от ТЗ и прошедший через Ф, фокусируется в центр гониометра, на котором установлен исследуемый образец. Поскольку большинство образцов имеют изогнутую форму отражающей поверхности, а

числовая апертура может достигать $NA = 0,5$, гониометр имеет 7 степеней свободы (пять для образца и две для детектора), обеспечивающие позиционирование любой точки по оси гониометра и ориентацию вдоль оси пучка.

Входная $\mathcal{W}_1$ и выходная $\mathcal{W}_2$ щели располагаются в меридиональных фокусах зеркал Z_1 и Z_2 , соответственно. Вышедший из щели расходящийся пучок излучения зеркалом Z_1 преобразуется в параллельный, падающий под углом α (здесь и в дальнейшем скользящие углы) на плоскую дифракционную решетку. Дифрагированные параллельные монохроматические пучки падают на зеркало Z_2 и фокусируются в его фокальной плоскости. Дифрагированный под углом β пучок фокусируется на выходной щели $\mathcal{W}_2$. Углы падения пучков на зеркала в нашем случае равны. В этом случае оси падающего и вышедшего из монохроматора пучков совпадают, что позволяет изменять рабочий диапазон длин волн без изменения взаимного положения элементов рефлектометра. Сканирование по спектру осуществляется поворотом решетки, в соответствии с уравнением дифракционной решетки:

$$\cos \alpha - \cos \beta = m \cdot \lambda / D$$

где m – порядок дифракции, λ - длина волны и D – период решетки, α и β углы падения и дифракции, соответственно.

В главе описывается конструкция твердотельной и газовой мишеней для ЛПИ, приводятся спектры мишеней Cu, Al, Pb, Sn, нержавеющей стали, а также Kr и Xe. Также в данной главе подробно обсуждается методика юстировки рефлектометра, позволяющая достичь высокого спектрального разрешения, малого размера зондирующего пучка ($0,15 \times 0,3$ мм²) и достоверности результатов измерения коэффициентов отражения (сравнение с синхротронными измерениями).

Спектральное разрешение прибора определялось из измеренных зависимостей поглощения тонкопленочных фильтров Be и Al от длины волны, и составило 0,03 нм для дифракционной решетки 900 шт/мм и 0,06 нм для дифракционной решетки 300 шт/мм. Для данных дифракционных решеток исследуются шероховатость и профиль штрихов, наиболее сильно влияющие на дифракционные свойства решеток в скользящей геометрии, используемой в мягком рентгеновском диапазоне. Демонстрируется возможность существенного влияния на шероховатость и форму штрихов с помощью травления ионным пучком, что позволило повысить эффективность дифракционных решеток.

Четвертая глава посвящена изучению возможности создания высокоотражающих широкополосных многослойных зеркал для построения на их основе спектрогелиографов солнечной обсерватории «КОРТЕС». С использованием генетического алгоритма рассчитаны АМЗ, оптимизированные на равномерное отражение в диапазонах 17-21 нм и 28-33 нм. Приводится сравнительная характеристика АМЗ Mo/Si, Mo/Be, Mo/Be/Si, а также Al/Be и

Mg/Be. Показано, что АМЗ Mg/Be существенно превосходит соответствующие аналоги Mo/Si в диапазоне 28-33 нм.

Также в главе сравниваются аperiodические и стековые широкополосные зеркала для «КОРТЕС». Достоинства стекового подхода определяются, главным образом, технологическим фактором. Фактически, чтобы корректно напылить N различных толщин, необходимо провести порядка N калибровок параметров технологического процесса, что в случае АМЗ с большим (несколько десятков) числом слоев оказывается трудозатратным. Что касается решения обратной задачи, для классического АМЗ она практически нерешаема из-за большого числа параметров и неоднозначности полученного решения.

В случае СМЗ число восстанавливаемых параметров существенно меньше, обратная задача может быть решена с требуемой точностью, на основании чего может быть проведена соответствующая коррекция технологического процесса (рисунок 4).



Рис. 4. Результаты корректировки технологического процесса для получения плато коэффициента отражения в диапазоне 17-21 нм

Незначительно проигрывая аperiodической структуре в величине коэффициента отражения, стековое зеркало оказывается намного более выигрышным с точки зрения скорости изготовления и возможности достижения расчетных параметров.

В приложении описывается процесс юстировки рефлектометра, описанного в 3-й главе.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

Основные результаты работы

К основным результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Разработаны методы расчета, синтеза и реконструкции толщин пленок по данным рентгеновского отражения стековых многослойных структур. Методы позволяют добиться коэффициента отражения и гладкости отражательной кривой, сравнимой с аperiodическими зеркалами. При этом процесс синтеза широкополосного стекового зеркала значительно упрощается в силу использования ограниченного набора периодических структур и возможности оперативной корректировки параметров процесса по данным рентгеновского отражения.

2. На основе лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения и монохроматора, выполненного по схеме Черни-Тернера, разработан лабораторный рефлектометр. Прибор позволяет измерять коэффициенты отражения, рассеяния и пропускания практически всех типов рентгенооптических элементов (многослойные зеркала, тонкопленочные фильтры, дифракционные решетки и другие) с произвольной формой поверхности, с диаметром от единиц до 500 мм, в диапазоне длин волн 5-50 нм, со спектральным разрешением до 0,03 нм и областью локализации на образце при нормальном падении менее 0,1 мм².

3. Показано, что структурные дефекты аperiodических структур (отличие плотности материалов пленок от табличных значений, межслоевые шероховатости, флуктуации толщин пленок) влияют на рентгенооптические характеристики и длительность отраженных от широкополосных зеркал аттосекундных импульсов электромагнитного излучения. Учет этих дефектов на стадии расчета толщин пленок для достижения целевой функции по коэффициенту отражения или длительности импульса улучшает параметры широкополосных зеркал. Наибольшее влияние на интенсивность и длительность отраженного импульса оказывают отличие плотностей пленок Mo от табличных значений и флуктуации толщин пленок. Межслоевая шероховатость оказывает сопоставимое воздействие на амплитуду коэффициента отражения, однако не столь сильное влияние на длительность отраженного импульса. Даже малые флуктуации (порядка 0,1 нм) толщин пленок могут привести к появлению дополнительных отраженных импульсов с заметной интенсивностью, задержанных по времени по отношению к основному.

4. Экспериментально изучена зависимость микроструктуры и плотности молибденовых слоев от толщины в составе многослойных Mo/Si структур. Наблюдается рост плотности до толщин около 5 нм с последующей стабилизацией на уровне 0,97 от табличных значений. Прослеживается резкий рост плотности в диапазоне толщин 2,5-2,8 нм, который коррелирует с началом кристаллизации слоев Mo . Использование этой зависимости при

расчете толщин пленок широкополосных зеркал существенно улучшает рентгенооптические характеристики разрабатываемых элементов.

5. Разработаны и изучены широкополосные стекловые зеркала Mo/Si, обеспечивающие средний коэффициент отражения 16% в спектральном диапазоне 17-21 нм и 12% в диапазоне 28-33 нм. По своим рентгенооптическим характеристикам эти структуры могут использоваться при разработке зеркал для спектрогелиографов солнечной обсерватории «КОРТЕС».

Список публикаций автора

A1. Гарахин, С.А. Влияние структурных дефектов аperiодических многослойных зеркал на свойства отраженных (суб)фемтосекундных импульсов / С.А. Гарахин, Е.Н. Мельчаков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Квантовая электроника. - 2017. Т.47, № 4, С. 378-384.

A2. Гарахин, С.А. Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 5 – 50 нм: описание и результаты тестирования / С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Квантовая электроника. - 2017. Т.47, № 4, С.385-392.

A3. Chkhalo, N.I. A double-stream Xe:He jet plasma emission in the vicinity of 6.7 nm wavelength / N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, S.V. Golubev, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, A.V. Vodopyanov, S. Yulin // Applied Physics Letters. - 2018. Vol.112, Issue 22, P.221101

A4. Nechay, A.N. Study of oxidation processes in Mo/Be multilayers / A.N. Nechay, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, Yu.A. Vainer, E. Meltchakov, F. Delmotte // AIP Advances. - 2018. No.8, P.075202.

A5. Chkhalo, N.I. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm / N.I. Chkhalo, S. A. Garakhin, A. Ya. Lopatin, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. N. Tsybin, and S. Yu. Zuev // AIP Advances. - 2018. No.8, P.105003.

A6. Барышева, М.М. Сравнение подходов в изготовлении широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона: аperiодические и стекловые структуры / М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, С. Юлин // Квант. Электроника. - 2019. Т.49, № 4, С. 380-385.

A7. Вайнер, Ю.А. Микроструктура и плотность пленок Мо в многослойных зеркалах Мо/Si / Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, П.А. Юнин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2019. № 1, С. 21-27.

A8. Гарахин, С.А. Возможности многослойных зеркал для измерения концентрации примесей бора в алмазе / С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования - 2019. № 3, С. 10-13.

A9. Гарахин, С.А. Аperiодические зеркала на основе бериллиевых многослойных систем / С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, Р.С. Плешков, В.Н.

Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2019. № 4, С. 3-8.

A10. Ахсахалян, А.А. Комплект многослойных рентгеновских зеркал для двухзеркального монохроматора в диапазоне длин волн 0.41-15.5 нм / А.А. Ахсахалян, Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, К.А. Елина, П.С. Заверткин, С.Ю. Зуев, Д.В. Ивлюшкин, А.Н. Нечай, А.Д. Николенко, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. №1. С. 14–20.

A11. Смертин, Р.М. Влияние термического отжига на свойства многослойных зеркал Mo/Be /Р.М. Смертин, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, А.Н. Нечай, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, М.Г. Sertsu, A. Sokolov, Н.И. Чхало, F. Schafers, П.А. Юнин. // Журнал технической физики. - 2019, том 89, вып. 11, С. 1783-1788.

A12. Ахсахалян, А.А. Изготовление и исследование свойств вогнутого кристаллического зеркала для проекта КОРТЕС / А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, С.А. Гарахин, Н.Ф. Ерхова, А.С. Кириченко, С.В. Кузин, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Журнал технической физики. - 2019, том 89, вып. 11, С. 1770-1773.

A13. М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало, Е. Meltchakov. Оптимизация состава, синтез и изучение широкополостных многослойных зеркал для ЭУФ диапазона. Журнал технической физики. 2019, том 89, вып. 11, С. 1763-1769.

A14. Нечай, А.Н. Эффективность генерации излучения в полосе 8–14 нм ионами криптона при импульсном лазерном возбуждении/ А. Н. Нечай, С. А. Гарахин, А. Я. Лопатин, В. Н. Полковников, Д. Г. Реунов, Н. Н. Салащенко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало, Н. Н. Цыбин // Квантовая электроника, 2020, том 50, номер 4, с. 408–413.

A15. Вайнер, Ю. А. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Ю. А. Вайнер, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, А. Н. Нечай, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, М. Г. Сертсу, Р. М. Смертин, А. Соколов, Н. И. Чхало, Ф. Шаферс //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2020, №2, С. 3- 14.

A16. Garakhin, S.A. High-resolution laboratory reflectometer for the study of x-ray optical elements in the soft and extreme ultraviolet wavelength ranges / S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov, A. Ya. Lopatin, I. V. Malyshev, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, N. N. Tsybin, I. G. Zabrodin, and S. Yu. Zuev // Rev. Sci. Instrum. - 2020. Vol.91, Issue 6, 063103.

A17. Kumar, N. Phase-microstructure of Mo/Si nanoscale multilayer and intermetallic compound formation in interfaces / N. Kumar, A.V. Nezhdanov, R.M.Smertin, V.N. Polkovnikov, P.A. Yunin, S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, A.I. Mashin, M.A. Kudryashov, D.A. Usanov // Intermetallics – 2020. Vol.125, 106872.

Список литературы

1. Вишняков, Е.А. Аперiodические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона / Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин // М.: Физматлит, 2018, - 136 с.

2. Shestov, S. V. Complex of instrumentation KORTES for the EUV and x-ray imaging and spectroscopy of the solar corona / S. V. Shestov, A. S. Ulyanov, E. A. Vishnyakov, A. A. Pertsov, S. V. Kuzin // *Proceedings of the SPIE*. – 2014. – Vol. 9144. – P.91443G 8.
3. Meekins, J.F. Optimization of layered synthetic microstructures for broadband reflectivity at soft x-ray and EUV wavelengths / J.F. Meekins, R.G. Cruddace, H. Gursky // *Appl. Opt.* – 1987. – Vol. 26. – №6. – P.990.
4. Loevezijn, P. Numerical and experimental study of disordered multilayers for broadband x-ray reflection / P. van Loevezijn, R. Schlattmann, J. Verhoeven, B.A. van Tiggelen, E.M. Gullikson // *Appl. Opt.* – 1996. – Vol. 35. – №19. – P. 3614.
5. Ragozin, E.N. Broadband normal-incidence aperiodic multilayer mirrors for soft x-ray dispersive spectroscopy: theory and implementation/ E. N. Ragozin, V. V. Kondratenko, V. E. Levashov, Y. P. Pershin, A. S. Pirozhkov // *Proc. SPIE*. – 2002. Vol. 4782, P.176.
6. Kondo, M. Enhancement of Photon Number Reflected by the Relativistic Flying Mirror / M. Kando, A. S. Pirozhkov, K. Kawase, T. Zh. Esirkepov, Y. Fukuda, H. Kiriyama, H. Okada, I. Daito, T. Kameshima, Y. Hayashi, H. Kotaki, M. Mori, J. K. Koga, H. Daido, A. Ya. Faenov, T. Pikuz, J. Ma, L.-M. Chen, E. N. Ragozin, T. Kawachi, Y. Kato, T. Tajima, and S. V. Bulanov // *Phys. Rev. Lett.* - 2009. - Vol. 103 - P. 235003.
7. Pirozhkov, A.S. Coherent x-ray generation in relativistic laser/gas jet interactions / A. S. Pirozhkov, M. Kondo, T. Zh. Esirkepov, P. Gallegos, H. Ahmed, E. N. Ragozin, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, J. K. Koga, H. Kiriyama, P. McKenna, M. Borghesi, K. Kondo, H. Daido, Y. Kato, D. Neely, S. V. Bulanov// *Proc. SPIE*. - 2011. - Vol. 8140. - P. 81400A.
8. Diveki, Z. Theoretical and experimental studies of broadband phase-controlled attosecond mirrors/ Z. Diveki, C. Bourassin-Bouchet, S. de Rossi, E. English, E. Meltchakov, O. Gobert, D. Guénot, B. Carré, P. Salières, T. Ruchon F. Delmotte // *Mod. Opt.* - 2014. - Vol. 61. - P.122.
9. Vishnyakov, E.A. Aperiodic multilayer structures in soft X-ray radiation optics/ E.A. Vishnyakov, F. F. Kamenets, V. V. Kondratenko, M. S. Lugin, A. V. Panchenko, Yu. P. Pershin., A. S. Pirozhkov and E. N. Ragozin// *Quantum Electron.* - 2012. - Vol. 42, P.143.
10. Wang, Z. 30-nm-wide aluminum nanowire grid for ultrahigh contrast and transmittance polarizers made by UV-nanoimprint lithography/ J. Wanga, L. Chen, X. Liu, P. Sciortino, F. Liu, F. Walters, X. Deng // *Appl. Opt. Lett.* - 2006. - Vol. 89, P.241120.
11. Kozhevnikov, I. V. Design of x-ray supermirrors / I.V. Kozhevnikov, I.N. Bukreeva, E. Ziegler // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2001. - Vol.160. - №2. – P.424–443.
12. Guggenmos, A. Attosecond Pulse Shaping by Multilayer Mirrors / A. Guggenmos, H. Cui, S. Heinrich, U. Kleineberg // *Appl. Sci.* - 2018. - Vol. 8. - P. 2503.
13. Aquila, A.L. Developments in realistic design for aperiodic Mo/Si multilayer mirrors/ A.L. Aquila, F. Salmassi, F. Dollar, Y. Liu, and E.M. Gullikson // *Opt. Express*. - 2006. - Vol. 14. - P.10073-10078.
14. Kozhevnikov, I.V. Physical analysis of the inverse problem of X-ray reflectometry / I.V. Kozhevnikov // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. -2003. - Vol. 508, №3. - P. 519–541.

Подписано к печати 09.10. 2020 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской академии наук — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино,
ул. Академическая, д. 7.