

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу ГАРАХИНА Сергея Александровича «Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аperiodических многослойных структур для солнечной астрономии и управления аттосекундными импульсами электромагнитного излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

С момента, когда была впервые реализована идея многослойного рентгеновского зеркала прошло более 30 лет. За это сравнительно небольшое время многое было сделано. Были развиты методы синтеза, исследования и расчета многослойной оптики для широкого диапазона длин волн в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) и рентгеновской областях. При этом акцент делался преимущественно на периодические многослойные структуры, способные обеспечить при фиксированном угле падения излучения достаточно высокий коэффициент отражения в относительно узком интервале длин волн. В настоящее время периодические многослойные зеркала (ПМЗ) уже стали признанным классом рентгенооптических элементов, широко используемых как в науке, так и в технике. В частности, возможность нанесения высокоотражающих ПМЗ на подложки сложной формы позволяет фокусировать и коллимировать рентгеновские пучки.

Однако в ряде задач спектральная селективность ПМЗ становится проблемой, препятствующей их применению, где нужно иметь аperiodические многослойные зеркала (АМЗ), которые позволяют достичь относительно высокого коэффициента отражения в широкой спектральной полосе,  $\lambda/\Delta\lambda \sim 1$ . Такие зеркала необходимы, например, для космической аппаратуры КОРТЕС.

С помощью АМЗ возможно решение ряда других задач, имеющих практическое значение в рентгеновской оптике, в том числе в оптике мягкого рентгеновского (МР) и ЭУФ диапазонов. К таким задачам относится управление пучками указанных диапазонов. Например, в области аттофизики АМЗ могут быть использованы для сокращения длительности импульсов. Физическими предпосылками этому является то, что разные спектральные компоненты импульса отражаются на различных глубинах структуры. Как правило, поле меньшей частоты проникает вглубь на меньшую глубину. В случае chirпированных импульсов, для которых характерно плавное изменение несущей частоты, можно подобрать такие условия, чтобы задержка между «низкочастотными» и «высокочастотными» компонентами импульса после отражения уменьшилась.

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. 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.

Возникает также 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.

Несмотря на потенциально широкую область применения АМЗ, число работ и публикаций на эту тему ограничено. Таким образом, освоение новых спектральных диапазонов и расширение номенклатуры АМЗ с учетом последних достижений в области периодических многослойных зеркал является актуальным.

В рамках диссертации решался ряд задач, позволившие развить методы расчета, синтеза и характеристики широкополосных зеркал для МР и ЭУФ диапазона, а также расширение рабочего диапазона широкополосных зеркал в длинноволновую область. К таким задачам относятся:

- разработка методики оптимизации толщин пленок в широкополосных многослойных зеркалах позволяющей зеркалам работать с аттосекундными импульсами электромагнитного излучения (ЭМИ).

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

- Разработка дизайна, синтез и изучение отражательных характеристик широкополосных многослойных зеркал для астрофизического эксперимента КОРТЕС и др. задачи.

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

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе Гарахин С. А. дает 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  $M_0$ , на амплитуду и фазу комплексного

коэффициента отражения АМЗ, на интенсивность и длительность аттосекундного отраженного импульса.

В третьей главе рассматривается проблема аттестации широкополосных рентгенооптических элементов. Дается подробное описание принципов построения рефлектометра на основе лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского и спектрометра-монокроматора с плоской дифракционной решеткой на основе схемы Черни-Тернера. Обсуждаются теоретические и технические характеристики разработанного в рамках диссертации прибора. Приводятся результаты его тестирования основных технических характеристик, а также сравнение результатов измерений коэффициента отражения многослойных зеркал на разработанном рефлектометре и на синхротроне BESSY II. Показано совпадение результатов измерений на уровне 1%. Также в данной главе Гарахин С. А. подробно описывает методику юстировки рефлектометра, позволяющую достичь высокого спектрального разрешения

Четвертая глава посвящена изучению возможности создания высокоотражающих широкополосных многослойных зеркал для построения на их основе спектрогелиографов солнечной обсерватории «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 стекового многослойного зеркала число восстанавливаемых параметров существенно меньше. Гарахин С. А. показал, что в этом случае обратная задача может быть решена с высокой степенью точности, и проведена соответствующая коррекция технологического процесса.

В приложении описывается процесс юстировки рефлектометра, описанного в 3-й главе. В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

В ходе выполнения работы были получены новые результаты, к числу таких результатов относится методика реконструкции внутреннего строения стековых структур, которая в разы ускорила процесс изготовления широкополосного зеркала с близкими к расчетным параметрам. Созданы широкополосные зеркала стекового типа с рекордно большой, до 33 нм, рабочей длиной волны. Впервые изучено влияние структурных дефектов АМЗ на форму и длительность отраженного чирпированного импульса электромагнитного излучения аттосекундной длительности. Впервые изучена в широких пределах зависимость плотности  $M_0$  от толщины слоя и др. результаты содержащие, в 5 соответствующих пунктах диссертации. Все основные результаты диссертации были получены при определяющем участии автора. Работы,

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

Новизна полученных данных не вызывает сомнения и подтверждается их публикацией в 17 научных статьях в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, включенных в перечень ВАК, а также многочисленными публикациями в сборниках трудов профильных российских и международных конференций.

Достоверность полученных результатов обеспечивается эффективным использованием комплекса взаимодополняющих экспериментальных независимых методик, реализованных на современном аттестованном научно-исследовательском оборудовании, а также использованием современных подходов к обработке и интерпретации экспериментальных результатов и сопоставление их с данными, представленными в литературе.

Апробация содержащихся в диссертационной работе результатов проводилась на 6 научных конференциях.

Основные наиболее существенные результаты диссертационной работы С. А. Гарахина можно сформулировать следующим образом:

1. Экспериментально показано преимущество применения стековых структур по сравнению с апериодическими для создания широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона. Конструкции таких структур будут использованы при изготовлении оптики для аппаратуры КОРТЕС.

2. Показано, что по данным рентгеновского отражения можно решить задачу реконструкции толщин пленок изготовленной структуры стекового зеркала, что позволяет скорректировать технологический процесс и быстро добиться хорошего согласования теории и эксперимента, недоступного для апериодических зеркал.

3. Разработанный рефлектометр с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Гернера позволяет исследовать коэффициенты отражения, рассеяния и пропускания рентгенооптических элементов в диапазоне длин волн 5-60 нм.

Выполненная работа позволила сделать вывод о перспективности дальнейшего развития темы диссертации, что значимо для решения широкого ряда поисковых и прикладных задач в области развития многослойной оптики, и научного приборостроения.

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, внесет свой вклад в развитие не только апериодической, но и традиционной периодической многослойной оптики.

### Замечания по диссертации

1. В работе большое внимание уделено алгоритмам поиска оптимальной структуры широкополосных многослойных рентгеновских зеркал. В подобного рода оптимизационных задачах всегда встает проблема поиска глобального минимума. Однако из изложенного материала так и не удалось понять, насколько продемонстрированные решения близки к глобальному минимуму и как решается проблема попадания в локальные минимумы.
2. Во второй главе проводится оценка размера кристаллитов Mo в зеркалах Mo/Si по методике Вильямсона-Холла и формуле Шеррера. В ряде точек размер кристаллитов оказывается равным или даже превосходит толщину слоя Mo (рисунок 2.6). Не обсуждается, с чем может быть связан данный эффект.
3. В третьей главе приводится оптическая схема рефлектометра. Поскольку известно, что источник достаточно мал, в ряде работ, посвященным лабораторным рефлектометрам, входная щель не используется. Тем самым обеспечивается максимальный сбор фотонов из источника. В данной работе входная щель используется, однако ее назначение не раскрыто, что вызывает вопросы в необходимости входной щели в описываемом рефлектометре.
4. В параграфе 3.3.1.4, посвященном улучшению характеристик дифракционных решеток, на рисунках профили штрихов до и после модификации не приведены в одних осях, что усложняет понимание результатов.
5. Имеется ряд грамматических и речевых ошибок, а также ошибок в построении некоторых предложений, что немного усложняет восприятие диссертации.

Однако, сделанные замечания являются частными и не влияют на высокую положительную оценку диссертации в целом.

### Заключение

Диссертация Гарахина С.А. является законченным научным исследованием, самостоятельно выполненным на высоком уровне. Положения, выносимые на защиту, и результаты работы являются новыми, мотивированными и физически обоснованными. Выводы диссертации основаны на большом количестве экспериментальных результатов и не противоречат основным научным положениям. Содержание диссертации в полной мере соответствует паспорту специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. Соответствие содержания диссертации специальности «Приборы и методы экспериментальной физики», по которой

она представляется к защите, подтверждается публикациями соискателя в соответствующих научных журналах и участием в профильных конференциях.

Диссертационная работа Гарахина Сергея Александровича «ШИРОКОПОЛОСНЫЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ АПЕРИОДИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ АСТРОНОМИИ И УПРАВЛЕНИЯ АТТОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ», полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Гарахин Сергей Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательского  
физико-технического института  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный  
исследовательский Нижегородский  
государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»

Трушин Владимир Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, корпус 3;

Телефон: +7 (903) 603-07-49; E-mail: [trushin@phys.unn.ru](mailto:trushin@phys.unn.ru)

«18» ноября 2020 года

Подпись В. Н. Трушина заверяю:

Ученый секретарь ИИГУ

