

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук

Рагозина Евгения Николаевича

на диссертационную работу Гарахина Сергея Александровича

“Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аперiodических 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

Диссертация С.А. Гарахина посвящена разработке и исследованию новых элементов оптики мягкого рентгеновского (МР) диапазона — широкополосных аперiodических многослойных зеркал (АМЗ) нормального падения, предназначенных для солнечной астрономии с борта космического аппарата, спектроскопии лабораторных источников МР излучения, а также для управления пучками МР излучения аттосекундной длительности. Важное место в диссертации занимает проблема синтеза АМЗ и измерения их спектрального коэффициента отражения.

В последние годы в оптике МР диапазона сформировалось новое направление — оптика аперiodических многослойных зеркал (АМЗ). Аперiodические многослойные структуры могут удовлетворять целому ряду критериев, помимо достижения максимального коэффициента отражения на выбранной длине волны. К их числу относятся достижение равномерного коэффициента отражения на заданном спектральном интервале, высокой поляризующей способности в заданной широкой области длин волн при фиксированном угле падения излучения, возможность отражения аттосекундных импульсов излучения с сохранением их формы, а также возможность сжатия чирпированных аттосекундных импульсов. Такие рентгенооптические элементы востребованы в связи с развитием изображающей спектроскопии лабораторных и астрофизических источников МР излучения, с появлением новых источников МР излучения (в том числе, возбуждаемых фемтосекундными лазерами ультрарелятивистской интенсивности в плазме), с потребностями аттосекундной оптики, а также при оснащении станций МР-излучения на синхротронах. Работа С.А. Гарахина отвечает на современные вызовы в области рентгеновской оптики, своевременна и **актуальна**.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и приложение. Диссертация изложена на 152 страницах, список литературы насчитывает 108 наименований, включены 104 рисунка и 9 таблиц.

Глава I посвящена, в основном, существующим методам расчета широкополосных АМЗ, в том числе методу Multifitting, разработанному в ИФМ РАН. Подчеркивается важность учета переходных слоев. **Впервые** исследована зависимость плотности пленок молибдена в структуре Mo/Si от их толщины в широком диапазоне толщин (1,5 – 7 нм). Обсуждаются особенности так называемых стековых структур.

Глава II посвящена проблеме модуль–фаза при синтезе АМЗ, предназначенных для работы с аттосекундными импульсами МР-излучения. Обсуждается устойчивость характеристик отраженного импульса по отношению к структурным дефектам АМЗ и неточностям при их синтезе.

В третьей главе описан и детально исследован лабораторный рефлектометр, предназначенный для характеристики рентгенооптических элементов в области 4...60 нм. Установка включает в себя лазерно-плазменный источник излучения, спектрометр-монохроматор по схеме Черни–Тернера, гониометр и детектор. Спектрометр-монохроматор включает в себя два сферических зеркала–коллиматора скользящего падения и плоскую дифракционную решетку. Предусмотрена возможность замены сферических зеркал на внеосевые параболические цилиндры для полного использования апертуры без ущерба для спектрального разрешения. Особо хочется отметить сильное уменьшение шероховатости решеток при травлении (полировке) пучком ионов аргона. Насколько нам известно, это единственная установка в России, решающая задачу оперативного доступа к метрологическому прибору в указанном диапазоне спектра и позволяющая измерять коэффициенты отражения и пропускания в указанном диапазоне спектра, причем с хорошим спектральным разрешением (0,3 Å с решеткой 900 мм⁻¹).

Глава 4 посвящена широкополосным зеркалам (16,5 – 21 нм и 28 – 33 нм), разработка которых связана с перспективой их использования в спектрогелиографах солнечной обсерватории “КОРТЕС” на борту МКС. Для диапазона 16,5 – 21 нм найдена апериодическая структура Mo/Be/Si с относительно небольшим числом индивидуальных слоев (N = 60) со средним коэффициентом отражения 19% в диапазоне оптимизации. Для диапазона 28 – 33 нм разработана **инновационная**

структура $Mg/Be+Al_{\text{cap}}$ с пассивирующим слоем алюминия, обладающая долговременной стабильностью. Найдена аперидическая структура $Mg/Be+Al_{\text{cap}}$ со средним коэффициентом отражения 26%, более чем вдвое превышающим коэффициент отражения АМЗ на основе традиционной пары Mo/Si. Для диапазона 16,5 – 21 нм синтезированы АМЗ и трех-стековое многослойное зеркало, измерены их спектральные коэффициенты отражения. Автор делает вывод о предпочтительности “стекового” подхода с точки зрения сравнительной технологической простоты, возможности добиться относительно равномерного отражения в заданном интервале за небольшое число итераций.

В Заключение автор приводит основные результаты диссертационной работы.

В Приложении описана юстировка рефлектометра.

Научная новизна состоит в комплексном подходе к проблеме разработки широкополосных многослойных зеркал, в создании широкополосных стековых зеркал в “длинноволновом” МР-диапазоне (до 33 нм), восстановлении их структуры по спектрам отражения $\theta-2\theta$ на длине волны 1,54 Å и по спектральной кривой отражения в МР-диапазоне, в сравнении их с АМЗ, в разработке инновационной структуры $Mg/Be+Al_{\text{cap}}$, в систематическом исследовании влияния структурных дефектов АМЗ и неточностей изготовления на рентгенооптические характеристики зеркал, в том числе на форму и длительность отраженного чирпированного аттосекундного импульса.

Уместен ряд комментариев и замечаний.

Начиная с 1998 г., на основе программы, разработанной в Отделе спектроскопии ФИАН им. П.Н.Лебедева, в Отделе проводятся расчеты АМЗ, удовлетворяющих различным критериям оптимизации, в том числе с учетом переходных слоев (силицидов молибдена для структуры Mo/Si) (Н.Н. Колачевский, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин, *Кратк. сообщ. физ.* (12) 55 (1998); *Квантовая электрон.* **30** (5), 428 (2000); В.В. Кондратенко, В.Е. Левашов, и др., *Кратк. сообщ. физ.* (7) 32 (2001)). Начиная с 1999 г., работы этого направления докладывались на Совещаниях по рентгеновской оптике, проводившихся в ИФМ РАН. Было бы уместно упомянуть об отечественной программе оптимизации АМЗ, развиваемой с 1998 г., при обсуждении существующих в мире подходов в разделе 1.2.3.

Проблема модуль–фаза амплитудного коэффициента отражения была сформулирована И.Л. Бейгманом и др. (*Письма в ЖЭТФ*, **74** (3), 167 (2001); *J. Opt. A:*

Pure Appl. Opt. 4, 433 (2002), *Рентгеновская оптика-2001*, *Proc. SPIE* 4782, и др.), где показана возможность отражения рентгеновских импульсов, состоящих из нескольких периодов волны и возможность сжатия chirпированных импульсов с помощью АМЗ, а также получены соответствующие численные решения. Эти работы цитировались около сотни раз и положили начало направлению “Многослойные зеркала как инструменты аттосекундной оптики.” Работы цитируются в диссертации [60, 61], однако без указания их места и роли, причем после работ [55, 57–59], опубликованных в 2005–2012 гг.

На стр.59 есть утверждение, по-видимому, относимое Диссертантом к конкретным работам: “Спектрометры на основе плоских дифракционных решеток с переменным шагом штрихов (речь идет о varied line-space gratings, или VLS-решетках – прим. *Оппонента*) обеспечивают высокое разрешение только в узком спектральном диапазоне длин волн.” Далее на стр. 59, говоря о разборной рентгеновской трубке как источнике рентгеновского излучения, говорится: “Из-за малой массы и габаритов эти источники можно использовать в спектрометре-монохроматоре типа Роуланда со сферической дифракционной решеткой и с подвижной щелью [75,76].” Но работа [75] — это знаменитая работа Хеттрика и Андервуда, где описана схема VLS-спектрометра, обеспечивающего высокое разрешение в широком диапазоне спектра, а работа [76] также посвящена VLS-спектрометрам высокого разрешения.

Имеется ряд неточностей в тексте диссертации и в цитировании.

В формуле (3.5) на стр. 67 шаг решетки D должен стоять в числителе.

Многослойным зеркалам как инструментам аттосекундной оптики посвящены не работы [54–57] (стр. 47), а работы [55, 57–59].

При цитировании работы [1] изменен порядок авторов, а при цитировании работы [100] список авторов оборван.

На стр. 104 говорится: “...в работе [107] функционал модифицирован таким образом, чтобы дополнительно минимизировать отличие между толщинами слоев в соседних периодах аперидической структуры.” Это было сделано в работе [108] (I.V. Kozhevnikov et al. 2015).

На стр. 51 при описании сжатия chirpированного импульса говорится: “При этом плотность мощности возросла более чем в 2 раза.” Это недоразумение, т.к. интенсивность отраженного импульса составила 57% от падающего.

На стр. 48 неточно трактуется подход, примененный в работе [60] при расчете многослойной структуры для сжатия chirpированного импульса: “Поэтому, вслед за авторами [60], для решения этой задачи задавались две целевые функции: профили амплитуды и фазы коэффициента отражения для каждой спектральной компоненты.” В действительности, в работах [60, 61] целевая функция включала в себя одновременно модуль и фазу амплитудного коэффициента отражения.

На стр. 31 Диссертант приводит рисунок из работы Н.Н. Колачевского, А.С. Пирожкова и Е.Н. Рагозина (*Квантовая электроника*, **30** (5), 428–434 (2000)), где дан расчетный график отражения АМЗ с двумя колоколообразными пиками отражения на длинах волн 13,5 и 18,5 нм, причем ссылается при этом на обзор [35], опубликованный в *УФН* в 2015 г. Диссертант называет эту расчетную структуру “простейшим стековым зеркалом.” В действительности – это именно АМЗ, оптимизированное на максимум суммы $R(\lambda_1) + R(\lambda_2)$ с заданием целевой функции в двух точках: 13,5 и 18,5 нм.

Указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, **обоснованны и достоверны**. Основные результаты диссертации представлены на 24 всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в 17 статьях в рецензируемых журналах, входящих в базу данных Web of Science.

Автореферат диссертации полно и объективно отражает её содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Диссертация “Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аперидических многослойных структур для солнечной астрономии и управления аттосекундными импульсами электромагнитного излучения” полностью соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Гарахин Сергей Александрович, без сомнения,

заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник Отдела спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН)

доктор физико-математических наук

Рагозин Евгений Николаевич

119991 Москва, Ленинский проспект, 53, ФИАН

Тел. (499)132-6329; e-mail: enragozin@gmail.com

"18" ноября 2020 г.

Подпись Евгения Николаевича Рагозина заверяю:

Помощник директора ФИАН по научной работе

доктор физико-математических наук

Савинов Сергей Юрьевич

E-mail: savinov@lebedev.ru

