

Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика - 2025» (Нижний Новгород, 22-25 сентября 2025 г.)

## Организаторы

Институт физики микроструктур РАН

Российский Научный Фонд

ООО «Интероптикс»

## Организационный комитет

Чхало Н.И.

Полковников В.Н.

Пестов А.Е.

Зорина М.В.

Михайленко М.С.

## Школа проводится при поддержке



РФН <https://rscf.ru/>

Многослойная рентгеновская оптика дифракционного качества для перспективных задач физики, нанодиагностики и наноструктурирования конденсированного вещества.

Номер: 21-72-30029П



ИФМ РАН <http://ipmras.ru/>



Xray-optics <http://xray-optics.ru/>



ООО «Интероптикс» <http://www.interoptics.ru/>

Понедельник 22 сентября	
Утреннее заседание <b>Лекции</b> председатель: Н.И. Чхало	
11:00 – 11:05	<b>Н.И. Чхало</b> Открытие школы
11:05 – 11:50	<b>А.В. Бухтияров</b> (ЦКП "СКИФ", Новосибирск) ЦКП "СКИФ": Статус реализации проекта
11:50 – 12:35	<b>О.И. Мешков</b> (Институт ядерной физики СО РАН) Методы контроля параметров пучка частиц в источниках синхротронного излучения
12:35 – 13:45	<i>Обед</i>
Дневное заседание <b>Лекции</b> председатель: А.В. Бузмаков	
13:45 – 14:30	<b>М.А. Андреева</b> (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) Рентгеновская резонансная рефлектометрия
14:30 – 15:15	<b>П.А. Юнин</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) Диффузное рассеяние рентгеновских лучей
15:15 – 15:45	<i>Кофе-брейк</i>
15:45- 17:30	<b>Постерная секция</b> , экскурсия по институту
<i>Велком-пами</i>	

Вторник 23 сентября	
Утреннее заседание <b>Лекции</b> председатель: М.А. Андреева	
9:30 - 10:15	<b>В.А. Бушуев</b> (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) Динамика распространения импульсов нейтронов в процессе их френелевского отражения
10:15 – 11:00	<b>К.Л. Метлов</b> (Донецкий физико-технический институт, Донецк) Микромагнитная теория малоуглового рассеяния нейтронов
11:00 – 11:30	<i>Кофе-брейк</i>
Дневное заседание <b>Лекция – Научные сообщения</b> председатель: В.А. Бушуев	
11:30 – 12:15	<b>А.И. Франк</b> (ОИЯИ, Дубна) Многослойные планарные структуры в нейtronной оптике
12:15 – 12:35	<b>Д.А. Татарский</b> (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород) Отражение тепловых нейтронов на магнитных пружинах в Co/Pt

12:35 – 12:55	<b>П.С. Савченков</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) <i>Нейтронная рефлектометрия на реакторе ИР-8 и современные подходы к анализу данных</i>
12:55 – 13:15	<b>А.Е. Пестов</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Ионно-пучковые методики формирования крупногабаритных подложек для рентгеновских зеркал скользящего падения</i>
13:15 – 14:30	<i>Обед</i>
Дневное заседание <b>Научные сообщения</b> председатель: В.Е. Асадчиков	
14:30 – 15:15	<b>А.А. Снигирев</b> (БФУ им. И. Канта, Калининград) <b>on-line</b> <i>In line когерентная рентгеновская оптика - 30 лет спустя</i>
15:15 – 15:35	<b>В.Д. Жакетов</b> (ОИЯИ, Нейтроны) <b>on-line</b> <i>Нейтронное рассеяние от магнито-сверхпроводящих периодических и квазипериодических слоистых структур</i>
15:35- 15:55	<b>А.А. Баранников</b> (БФУ им. И. Канта, Калининград) <b>on-line</b> <i>Высокоразрешающая рентгеновская микроскопия с использованием преломляющих линз на базе лабораторного рентгеновского источника излучения</i>
15:55 – 16:15	<b>Б.С. Рошин</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) <i>Оценка сцинтилляционных и электрических свойств кристаллических материалов при их облучении жестким рентгеновским излучением</i>
16:15 – 16:40	<i>Кофе-брейк</i>
Вечернее заседание <b>Научные сообщения</b> председатель: С.В. Кузин	
16:40 – 17:00	<b>Р.А. Шапошников</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Cr/Ti, оптимизированные на «окно прозрачности воды»</i>
17:20 – 17:40	<b>Н.В. Загайнов</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Определение оптических констант тонких плёнок на лабораторном источнике мягкого рентгеновского излучения</i>
17:40 – 18:00	<b>А.А. Саяпина</b> (СПбГУ, Санкт-Петербург) <i>Влияние барьерных слоев кремния на формирование межфазных границ в многослойных нейтронных зеркалах [Ti/Ni]</i>
18:00 – 18:20	<b>А.В. Карапаев</b> (СПбГУ, Санкт-Петербург) <b>on-line</b> <i>Влияние барьера слоя углерода на кристаллическую структуру многослойного рентгеновского зеркала Cr/V</i>

18:20 – 18:40	<b>A.В. Бугаев</b> (СПбГУ, Санкт-Петербург) <i>on-line</i> Формирование межфазных границ в наноразмерных многослойных структурах $B4C/(C)/Ru$
18:20 – 19:00	<b>С.М. Минеев</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) Модель для расчёта распределения толщин тонких пленок, полученных методом магнетронного напыления

Среда 24 сентября	
Утреннее заседание <b>Лекции</b> председатель: П.А. Юнин	
9:30 - 10:15	<b>С.Н. Якунин</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Поверхностно-чувствительные синхротронные методы в исследовании тонкопленочных слоистых систем
10:15 – 11:00	<b>А.В. Бузмаков</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Обработка данных рентгеновской микротомографии
11:00 – 11:30	Кофе-брейк
Дневное заседание <b>Научные сообщения</b> председатель: Л.И. Горай	
11:30 – 11:50	<b>И.А. Артиков</b> (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва) Рентгеновская флуоресцентная микроскопия и микроанализ <i>on-line</i>
11:50 – 12:10	<b>В.Е. Асадчиков</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Применение микроканальных стержней и пластин для регистрации и переноса излучений
12:10 – 12:30	<b>Д.Г. Рейнов</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) Трёхзеркальный ЭУФ-микроскоп 345 крат с z-томографией биологических образцов
12:30 – 12:50	<b>Ю.С. Кривоносов</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Комплексное морфолого-химическое исследование желчных камней разного состава с использованием рентгеновских методов
12:50 – 13:10	<b>Ю.О. Волков</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Резонансно-аномальная рефлектометрия пространственного распределения рубидия у поверхности кремнезоля
13:10 – 14:00	Обед
Дневное заседание <b>Научные сообщения</b> председатель: В.Н. Полковников	
14:00 – 14:20	<b>С.В. Кузин</b> (ИКИ РАН, Москва) Перспективные отечественные космические проекты для прогноза космической погоды
14:20 – 14:40	<b>А.В. Скобляков</b> (НИЦ "Курчатовский институт", Москва)

	<i>Разработка полномасштабных моделей дифракционных спектрографов и методов восстановления рентгеновских спектров излучения плазмы</i>
14:40 – 15:00	<b>C.С. Морозов</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Исследование спектров лазерно-плазменных источников при помощи компактного спектрографа на основе VLS-решетки</i>
15:00 – 15:20	<b>A.К. Чернышев.</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Разработка метода двухстадийного ионно-пучкового формирования асферичных неосесимметричных оптических поверхностей</i>
15:20 – 15:40	<b>И.С. Девятайкин.</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Твердотельный лазерно-плазменный источник нового поколения, разработанный в ИФМ РАН</i>
Экскурсия по городу + банкет	

Четверг 25 сентября	
Утреннее заседание <b>Лекции</b> председатель: З.Ф. Красильник	
10:00 – 10:45	<b>B.В. Медведев</b> (ИСАН, Троицк) <i>Высокояркостные источники экстремального ультрафиолетового излучения для задач инспекции фотоматериалов</i>
10:45 – 11:30	<b>Л.И. Горай</b> (Алферовский университет, Санкт-Петербург) <i>От исследования эффективности дифракционных решеток в конической дифракции до метрологии шаблонов и электронных чипов с топологией 1–30 нм</i>
11:30 – 11:50	Кофе-брейк
Дневное заседание <b>Научные сообщения</b> председатель: А.Е.Пестов	
11:50 – 12:10	<b>Н.И. Чхало</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Состояние дел по проекту отечественного рентгеновского литографа</i>
12:10 – 12:30	<b>В. Паульс</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Цифровое прототипирование проекционного рентгеновского литографа</i>
12:30 – 12:50	<b>А.Н. Нечай</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Исследование распределения давления торможения при истечении различных газовых струй в вакуум</i>
12:50 – 13:10	<b>А.А. Перекалов</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Исследование поглощения лазерного излучения плазмой, формируемой в газоструйной мишени Xe</i>
13:10 – 13:30	<b>В.Е. Гусева</b> (ИФМ РАН, Н.Новгород) <i>Угловое распределение ионных токов из лазерной плазмы Xe</i>
Закрытие	

## Постерная секция

- |    |                                 |  |
|----|---------------------------------|--|
| 1  | <b>Ибрагим<br/>Махмуд Ахмед</b> | <i>Electrical Properties of Nanoparticle Contacts in YSZ Under Hydration and X-RAY Conditions</i>  |
| 2  | <b>Коченева А.Г.</b>            | <i>Применение метода рентгеновской рефлектометрии для исследования свойств тонких пленок, полученных при вакуумном напылении</i>   |
| 3  | <b>Мурзина А.В.</b>             | <i>Усовершенствование и применение итеративных алгоритмов восстановления фазы изображения</i>  |
| 4  | <b>Шаблов Ю.С.</b>              | <i>Строение приповерхностного слоя диоксида кремния, облученного ионами аргона, по данным рентгеновской рефлектометрии и рассеяния</i>   |
| 5  | <b>Чернышев<br/>А.К.</b>        | <i>Модернизация ионного источника КЛАН-53М для прецизионной обработки рентгено-оптических поверхностей</i>   |
| 6  | <b>P.C. Плешиков</b>            | <i>Исследование многослойных периодических систем Ni/Ti с прослойками Si для применения их в нейтронных неполяризующих суперзеркалах с <math>m=3</math> и <math>m=5</math></i> |
| 7  | <b>Золотов Д.А.</b>             | <i>Рентгеновская топо-томография в исследовании дефектной структуры крупных синтетических алмазов, выращенных в широком интервале температур и скоростей роста</i>             |
| 8  | <b>Назаров А.А.</b>             | <i>Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния с использованием машинно-обученного потенциала межатомного взаимодействия</i>                |
| 9  | <b>Глушков Е.И.</b>             | <i>Учет систематических ошибок измерений методом сдвига на интерферометре Физо</i>   |
| 10 | <b>Петраков Е.В.</b>            | <i>Метрология асферических зеркал</i>  |
| 11 | <b>Артюхов А.И.</b>             | <i>Изготовление подложек фокусирующего и ориентационного зеркал на диапазон 20-40 кэВ</i>  |
| 12 | <b>Осъкин И.Д.</b>              | <i>Разработка компактного масс-спектрометра для контроля ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов</i>   |
| 13 | <b>Осъкин И.Д.</b>              | <i>Восстановление карты поверхности для тороидальных оптических элементов</i>  |
| 14 | <b>Реунов Д.Г.</b>              | <i>Фокусирующая система Киркпатрика-Баезе для синхротронных применений</i>   |
| 15 | <b>Гарахин С.А.</b>             | <i>Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации оптики в мягком рентгеновском и экстремальном ультра-фиолетовом диапазонах</i>                                  |

# ЦКП «СКИФ»: Текущий статус проекта

А.В. Бухтияров<sup>1</sup>, Е.Б. Левичев<sup>1</sup>, В.И. Бухтияров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЦКП «СКИФ» Институт катализа СО РАН, 630559, Наукоград Кольцово, Новосибирская область, Россия

<sup>2</sup> Институт катализа СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

ЦКП “СКИФ” – источник СИ поколения 4+, создаваемый в наукограде Кольцово под Новосибирском. Ускорительный комплекс ЦКП “СКИФ” состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, синхротрона-бустера на полную энергию и накопительного кольца. Накопитель релятивистских электронов с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и сверхмалым расчетным горизонтальным эмиттансом 73.2 пкм·рад (без учета токовых эффектов, связи бетатронных колебаний и вставных устройств) будет поставлять пучки СИ с предельной яркостью в диапазоне от 10 эВ до 100 кэВ на 30 экспериментальных станций. Для энергии фотонов ~1.5 кэВ эмиттанс источника приближается к волновому (дифракционному) пределу, обеспечивая высокую степень когерентности СИ и расширяя потенциал исследовательского комплекса.

Экспериментальными станциями “СКИФ” первой очереди являются станции 1-1 “Микрофокус”, 1-2 “Структурная диагностика”, 1-3 “Быстропротекающие процессы”, 1-4 “XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм”, 1-5 “Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне” и 1-6 “Электронная структура”.

Основной задачей функционирования ЦКП “СКИФ” станет инфраструктурное обеспечение фундаментальных и прикладных исследований научных и образовательных организаций, а также организаций реального сектора экономики, выступающих в роли пользователей, с целью обеспечения лидерства в приоритетных областях научно-технологического развития Российской Федерации. Инфраструктура ЦКП “СКИФ” будет использована для выполнения исследований мирового уровня в различных областях физики, химии, материаловедения, молекулярной биологии, медицины и других дисциплин с акцентом на наиболее прорывные, экономически и социально-значимые мультидисциплинарные задачи.

В области фундаментальных наук приоритетными направлениями деятельности ЦКП “СКИФ” являются: развитие научных основ создания новых материалов с заданными свойствами (включая композитные и гибридные) на основе знания их структуры; исследование механизмов функционирования живых систем, в том числе развитие бионических подходов к дизайну технических систем; развитие методологии синхротронной диагностики для эффективной реализации инновационных технологических цепочек “от идеи к коммерческому продукту”; развитие экспериментальной аппаратуры и методик обработки больших данных, в том числе для исследования ударно-волновых воздействий на вещества и материалы; структурный дизайн новых лекарственных средств для борьбы с социально значимыми заболеваниями, развитие методов медицинской диагностики и терапии; моделирование геологических и геофизических процессов в недрах Земли и планет; поиск решений глобальных экологических проблем, включая исследования материалов для альтернативной энергетики (водородной, солнечной, термоядерной).

Источник СИ поколения 4+ ЦКП “СКИФ” с эмиттансом, приближающимся к волновому пределу в области мягкого и среднего рентгеновского диапазона (~50–80 пкм·рад в зависимости от тока пучка, бетатронной связи и вставных устройств при энергии пучка электронов 3 ГэВ), успешно сооружается в г. Новосибирске. Реализация проекта позволит проводить передовые исследования в различных областях фундаментальной и прикладной науки.

**Благодарности** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП “СКИФ” Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042).

# Рентгеновская резонансная рефлектометрия

М.А. Андреева

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

Рентгеновская рефлектометрия на современном этапе, с учетом развития синхротронных источников, кардинально трансформировалась. Ранее это был в основном метод изучения распределения электронной плотности по глубине в пленках и многослойных структурах по угловым зависимостям отражения. Спектры рентгеновского отражения (вблизи краев поглощения или в случае ядерного резонанса), измерения которых возможны на различных синхротронных установках, дают уникальную информацию о магнитной и электронной структуре многослойных пленок, раскрывая детали послойного магнитного упорядочения.

Учет магнитного рассеяния превращает восприимчивость среды для рентгеновского диапазона в тензор, при этом теория отражения становится тензорной теорией, которая требует детальной разработки [1]. Лекция знакомит с общей теорией отражения от слоисто-анизотропных структур, представляет тензор рентгеновской восприимчивости для дипольных и квадрупольных переходов, а также методы экспериментального определения компонент этих тензоров, дает описание основных магнитооптических эффектов в рентгеновской оптике. Для спектроскопии отражения важно понимание особенностей формы спектральных линий при измерениях в области полного отражения или в брэгговских максимумах для периодических зеркал. Представлено важное обобщение кинематической теории отражения, базирующееся на концепции стоячих рентгеновских волн, которое существенно упрощает расчеты спектров отражения в случае малости анизотропных добавок к восприимчивости среды.

Лекция имеет целью максимально полно представить возможности синхротронного излучения в исследованиях магнитной и электронной структуры многослойных ультратонких пленок, поэтому кроме вывода базисных математических формул в ней будут представлены иллюстрации наиболее ярких результатов экспериментов, проводимых с использованием синхротронного излучения.

[1] М.А. Андреева Теория отражения рентгеновского излучения от анизотропных структур, о/п физфака МГУ, 2025. 356 с.

# Диффузионное рассеяние рентгеновских лучей

Юнин П.А., Дроздов Ю.Н.

Лекция посвящена рассмотрению диффузного рассеяния рентгеновских лучей (ДРРЛ) как мощного аналитического инструмента для исследования несовершенств структуры кристаллических и наноструктурированных материалов. Основное внимание уделяется фундаментальным принципам разделения полного упругого рассеянного излучения на две принципиально различные компоненты: когерентное (Брэгговское) и диффузное рассеяние. Когерентное рассеяние содержит информацию об идеальной периодической структуре, усреднённой по всему объёму кристалла, в то время как диффузное рассеяние, распределённое в обратном пространстве между и вокруг брэгговских пиков, является прямым следствием отклонений от этой идеальности — всех видов статических дефектов, флуктуаций состава, деформаций и шероховатостей интерфейсов. Ключевым аппаратом для интерпретации данных ДРРЛ (как и когерентного Брэгговского рассеяния) является функция Паттерсона, или автокорреляционная функция, которая устанавливает прямую связь между пространственным распределением дефектов в реальном пространстве и интенсивностью рассеяния в обратном пространстве. Анализ формы и интенсивности диффузных особенностей позволяет восстановить вид этой функции и, следовательно, получить информацию о природе, концентрации, размерах и корреляционных свойствах дефектов.

Обсуждается важность учёта динамических эффектов, которые существенно модифицируют картину диффузного рассеяния в условиях сильного взаимодействия падающего и дифрагированного излучения, то есть вблизи брэгговских рефлексов идеального кристалла. Будет показано, как динамическая теория рассеяния предоставляет более строгий формализм для количественного описания этого явления по сравнению с кинематическим приближением. Для анализа рассеяния на слабых возмущениях, таких как шероховатости поверхности или границы раздела в гетероструктурах в присутствии сильного когерентного рассеяния, рассматривается применение борновского приближения искажённых волн (DWBA – Distorted-Wave Born Approximation), которое является наиболее подходящим инструментом для таких задач.

Рассматриваются два важнейших практических приложения ДРРЛ. Первое — это рассеяние на объёмных дефектах в кристаллах, таких как дислокации, дефекты упаковки, точечные дефекты и их кластеры, где ДРРЛ служит уникальным методом неразрушающей диагностики кристаллической структуры. Второе применение — это анализ рассеяния на шероховатостях границ раздела и нарушениях периодичности в сложных гетероструктурах, с особым фокусом на многослойных рентгеновских зеркалах. Здесь диффузное рассеяние становится незаменимым для определения не только вертикальных, но и латеральных корреляционных свойств шероховатости, их кросс-корреляции между слоями, а также для выявления межслойных деформаций и диффузии, что напрямую определяет функциональные характеристики этих объектов. Таким образом, в лекции демонстрируется, как анализ диффузного рассеяния может быть трансформирован из задачи устранения мешающегося в эксперименте фона в мощный метод структурной диагностики.

# **Динамика распространения импульсов нейтронов в процессе их френелевского отражения**

В.А. Бушуев

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991 ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Москва, Россия  
e-mail: vabushuev@yandex.ru*

Ранее в работах [1, 2] была рассмотрена проблема определения группового времени задержки и глубины формирования отражения при френелевском отражении импульсов нейтронов от однородных и многослойных структур. Анализ проводился на основе сопоставления профилей интенсивностей падающего и отраженного импульсов (волновых пакетов) на входной поверхности среды  $z = 0$  в зависимости от времени  $t$ .

В настоящем докладе сообщаются результаты исследования динамики отраженных и проходящих в среду импульсов в зависимости от расстояния  $z$  до входной поверхности среды при различных фиксированных моментах времени  $t = \text{const}$  (т.н. нейтронное “кино”, т.е. серия моментальных “фотографий” импульсов).

Обнаружено весьма интересное явление, которое заключается в том, что при энергиях падающих нейтронов, сопоставимых с пороговой энергией области полного внешнего отражения (ПВО), проходящий в среду импульс почти неподвижно и очень долго (почти на порядок больше длительности падающего импульса) расположен в тонком приповерхностном слое. С дальнейшим увеличением времени (в десятки раз) этот как бы “замороженный” проходящий импульс постепенно “отрывается” от приповерхностного слоя и очень медленно движется вглубь среды с одновременным увеличением его длительности и уменьшением пиковой интенсивности.

Данное явление связано с весьма нестандартным, по сравнению с электродинамикой, поведением дисперсии нейтронов, т.е. зависимости волнового числа от частоты (энергии). Даже вакуум, в котором показатель преломления равен единице, является для нейтронов существенно диспергирующей средой, что приводит к расплыванию импульсов по мере их распространения. Здесь фазовая скорость равна  $V/2$ , а групповая скорость равна скорости нейронов  $V$ . В среде при приближении энергии падающих нейтронов к пороговой энергии ПВО фазовая скорость и параметр, определяющий расплывание импульса, стремятся к бесконечности, а групповая скорость стремится к нулю, что и приводит к такому медленному продвижению импульса вглубь среды. Помимо величины центральной энергии импульса существенную роль в динамике распространения импульсов играет также и спектральная ширина падающего импульса.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. Автор выражает глубокую признательность А.И. Франку за полезные обсуждения и плодотворные дискуссии.

- [1] Бушуев В.А., Франк А.И. Эффект Гуса-Хенхен в нейтронной оптике и время отражения нейтронных волн // УФН, 2018, Т. 188, № 10, С. 1049-1062.
- [2] Бушуев В.А., Франк А.И. Парадоксы и нерешенные проблемы в теории френелевского отражения // Труды школы молодых ученых “Современная рентгеновская оптика - 2023”, Нижний Новгород, 18-21 сентября 2023 г.), С. 12-17.

# Микромагнитная теория малоуглового рассеяния нейтронов.

К. Л. Метлов

Донецкий Физико-Технический Институт им. А.А. Галкина, ул. Розы Люксембург, д. 72, г. Донецк,  
ДНР, 283048  
[metlov@donfti.ru](mailto:metlov@donfti.ru)

Основной особенностью магнитных (магнитоупорядоченных) материалов является наличие внутри них векторного поля намагниченности (спонтанного магнитного момента). Это значит, что вдобавок к микроструктуре, характеризующей неоднородность материала как такового, в магнитных материалах определена и магнитная текстура — неоднородное распределение локальных магнитных моментов. Наличие спина у нейтронов и отсутствие электрического заряда делает их удобным инструментом, как для изучения микроструктуры, так и для изучения магнитной текстуры в объеме материала. Но нужно отметить, что магнитная текстура не произвольна, а зависит от электронных свойств материала (прежде всего, обменного взаимодействия), его макро- и микроструктуры. Эта связь устанавливается в рамках теории микромагнетизма. Микромагнитная теория рассеяния нейтронов, которой посвящён настоящий доклад, представляет собой комбинацию теории рассеяния нейтронов и микромагнетизма, позволяющую выразить магнитные сечения рассеяния непосредственно в терминах макроскопических магнитных и микроструктурных параметров материала. Начало этой теории можно отсчитывать от работ С.В. Малеева по спиновым спиральям, так же как и введение (начальная часть) этого доклада будет основано на его лекциях. Дальше мы обсудим микромагнитную теорию малоуглового рассеяния нейтронов магнетиком со случайными (и не очень) неоднородностями намагниченности насыщения, обменной жесткости и магнитной анизотропии [1,5,7], влияние взаимодействия Дзялошинского-Мория на сечение рассеяния [2,4], картину малоуглового рассеяния нейтронов топологическими объектами — магнитными вихрями [3] и хопфионами [8]. В конце (хоть это и не напрямую касается нейтронов, но зато ближе к основной тематике школы), посвятим немного времени магнитной рентгеновской нанотомографии и её применению [6].

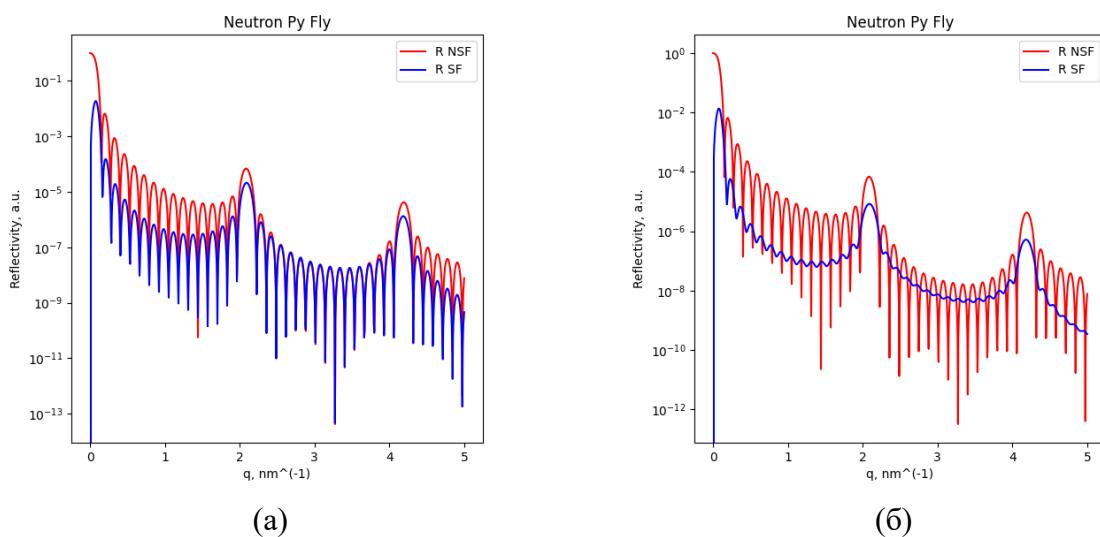
- [1] K.L. Metlov and A. Michels, Third-order effect in magnetic small-angle neutron scattering by a spatially inhomogeneous medium , Phys. Rev. B 91, 054404 (2015).
- [2] A. Michels, D. Mettus, D. Honecker, K. L. Metlov, Effect of Dzyaloshinskii-Moriya interaction on elastic small-angle neutron scattering, Physical Review B 94(5), 054424 (2016).
- [3] K.L. Metlov and A. Michels, Magnetic neutron scattering by magnetic vortices in thin submicron-sized soft ferromagnetic cylinders, Sci. Rep. 6, 25055 (2016).
- [4] A. Michels, D. Mettus, I. S. Titov et al., Microstructural-defect-induced Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Phys. Rev. B 99, 014416 (2019).
- [5] K. L. Metlov, K. Suzuki, D. Honecker, and A. Michels, Experimental observation of third-order effect in magnetic small-angle neutron scattering, Phys. Rev. B 101, 214410 (2020).
- [6] C. Donnelly, K. L. Metlov, V. Scagnoli, et al., Experimental observation of vortex rings in a bulk magnet, Nat. Phys. 17, 316 (2021).
- [7] V. D. Zaporozhets, Y. Oba, A. Michels, and K. L. Metlov, Small-angle neutron scattering by spatially inhomogeneous ferromagnets with a nonzero average uniaxial anisotropy, J. Appl. Cryst. 55, 592 (2022).
- [8] K.L. Metlov and A. Michels, Small-angle neutron scattering signatures of magnetic hopfions, Phys. Rev. B 109, L220408 (2024).

# Отражение тепловых нейтронов на магнитных пружинах в Co/Pt

Д.А. Татарский

ННГУ им. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

В последнее десятилетие возрос интерес к многослойным плёнкам со слоями типа «ферромагнетик» – «тяжёлый металл». Это обусловлено тем, что такие плёнки, имеют одноосную магнитную анизотропию, ось которой направлена вдоль нормали к плёнке. Известно, что увеличением количества повторений в периодических плёнках, снижается величина анизотропии. В случае, если толщина плёнки превышает обменную длину (~4 нм), наличие градиента одноосной анизотропии может приводить к существованию градиента намагниченности по глубине (магнитная пружина). Такие методы исследования, как магнитометрия, магнитно-силовая микроскопия и лоренцева просвечивающая электронная микроскопия, дают лишь интегральное или латеральное представление об особенностях распределения намагниченности. Рефлектометрия поляризованных нейтронов же даёт ответ на вопрос о существовании градиента намагниченности, а, следовательно, и градиента анизотропии в толстых многослойных структурах.



**Рис 1:** Коэффициенты отражения нейтронов от многослойной плёнки Co/Pt без переворота (красные линии) и с переворотом (синие линии) спина. (а) – случай полностью коллинеарной магнитной структуры, (б) – случай магнитной спирали.

На рис.1 приведены расчётные кривые отражения нейтронов с и без переворота спина от структуры  $[Co(0.5 \text{ нм})/Pt(1.0 \text{ нм})] \times 16$ . Коэффициент отражения без переворота спина даёт информацию о структурной составляющей многослойной плёнки, тогда как отражение с переворотом спина несёт информацию о неколлинеарной составляющей намагниченности по отношению ко внешнему магнитному полю. Как видно из расчётов, случай однородной намагниченности в слоях и магнитной спирале существенно отличается не только интенсивностью брэгговских резонансов с переворотом спина, но и глубиной модуляции такого отражения. В экспериментах же предлагается исследовать как периодические плёнка, так и плёнки с дополнительным верхним слоем кобальта большей толщины, в которой ожидается существования магнитной спиралы при любых условиях.

# **Нейтронная рефлектометрия на реакторе ИР-8 и современные подходы к анализу данных**

П.С. Савченков<sup>1</sup>, Р.С. Плешков<sup>2</sup>, Е.О. Серов<sup>1</sup>, А.В. Рогачев<sup>1</sup>, С.Н. Якунин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН

В докладе представлен текущий статус и возможности недавно созданной установки для нейтронной рефлектометрии на реакторе ИР-8. Представлены результаты первых экспериментов, связанных с исследованием тонкоплёночных структур и многослойных нейтронных сверхрешёток, являющихся ключевыми элементами современной нейтронной оптики и созданных в рамках коллаборации с ИФМ РАН.

Особое внимание уделено проблеме низкого соотношения сигнал/шум, которое является фундаментальным ограничением для многих нейтронных экспериментов. Для её решения разработаны и применены новые подходы к анализу данных, основанные на Байесовой статистике, превосходящие стандартный прямой подбор параметров.

В качестве примера будет рассмотрен анализ данных рефлектометрии поляризованных нейтронов от магнитной тонкопленочной структуры TbCo. Будет продемонстрировано, как применение байесовского анализа позволяет не просто восстановить структурные и магнитные параметры, но и исследовать уникальность найденного решения. В частности, для исследованной структуры TbCo указанный подход выявил случай мультимодальности — существование нескольких различных, но одинаково вероятных реконструкций структуры, которые хорошо описывают экспериментальные данные.

# **Ионно-пучковые методики формирования крупногабаритных подложек для рентгеновских зеркал скользящего падения**

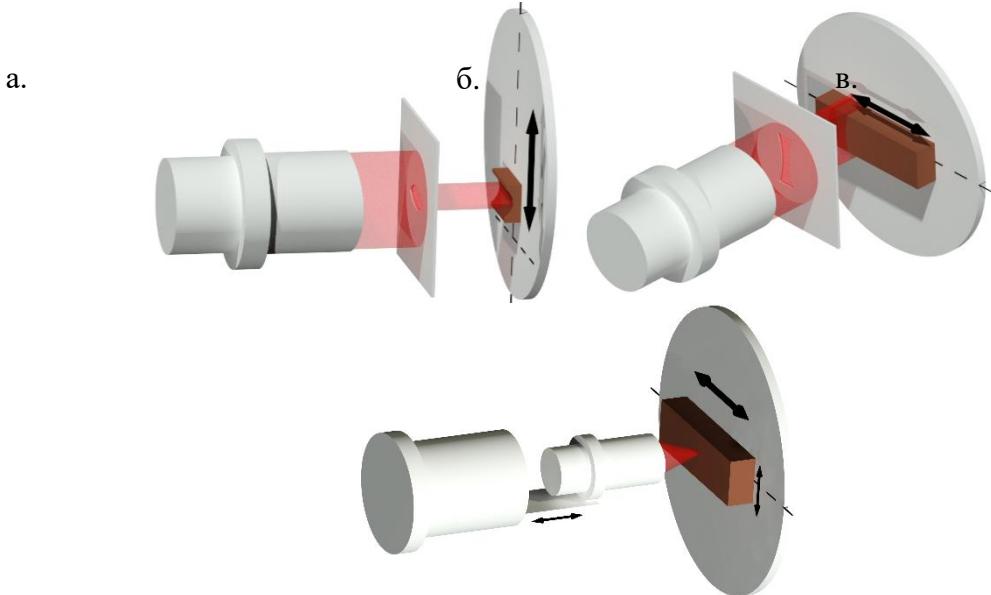
А.Е. Пестов\*, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, Е.И. Глушков, Е.В. Петраков, И.В. Малышев, М.В. Зорина, М.Н. Торопов, А.И. Артюхов, Н.И. Чхало, С.С. Морозов, С.А. Гарахин

*Институт физики микроструктур РАН, 607680, Нижний Новгород, Россия*

\*[aepestov@ipmras.ru](mailto:aepestov@ipmras.ru)

Развитие источников жесткого рентгеновского излучения, в первую очередь на современных синхротронах 3+ и 4 поколения, лазерах на свободных электронах, а также современных лабораторных источников с микронными размерами области излучения, требует существенного повышения качества коллимирующей и фокусирующей оптики с точки зрения формы поверхности зеркал. Современные требования на угловые ошибки, вносимые оптическими элементами должны находиться на уровне единиц и даже долей мкрад [1,2]. В сочетании с асферическими на уровне единиц – десятков мкм отклонениями от базовой геометрии эти требования усложняют изготовление зеркал такого типа, соответствующим проектным требованиям. Таким образом, необходимы усовершенствованная оптическая обработка поверхности с компьютерным управлением. Задача усложняется еще и существенным ростом требованиям к габаритам оптических элементов (десятки см – метр), что также требует развития методик аттестации формы поверхности.

В работе описаны методики обработки поверхности крупногабаритных подложек для рентгеновских зеркал скользящего падения профицированными пучками ускоренных ионов, реализованные на установке [3]. Основное внимание удалено развитию применения сильноточных широкоапertureных ионных источников, позволивших существенно повысить производительность процесса формообразования. Методики основаны на двух подходах, определяющихся соотношением размеров заготовки и ионного пучка. Для образцов, размер которых меньше размера ионного пучка профиль асферизации задается сечением формирующей ионный пучок диафрагмы и формируется при равномерном поступательном движении заготовки позади этой диафрагмы (рис.1а). Для подложек, габариты которых превышают размер ионного пучка, профиль асферизации формируется при использовании “щелевой” диафрагмы, обеспечивающей равномерное удаление материала вдоль короткой стороны подложки, и специально рассчитанным законом движения (скорость перемещения заготовки изменяется в зависимости от координаты) (рис.2б). Для реализации данной методики в установку [3] было добавлена дополнительная степень свободы (горизонтальное перемещение образца), обеспечивающая обработку образцов длиной до 350 мм. Эти два подхода позволяют получать цилиндрические оптические элементы с образующей цилиндра произвольной формы (эллипс, парабола и т.д.) из плоских заготовок или заготовок с исходной формой в виде кругового цилиндра. Для формирования более сложных поверхностей, например, имеющих градиент формы поверхности по двум координатам применяется стандартная методика обработки поверхности при 2D сканировании вдоль поверхности малоразмерным ионным пучком (рис.1в). Данный подход позволяет получать поверхности с произвольной формой.



**Рис. 1.** Схемы методов ионно-пучковой обработки крупногабаритных подложек. а. методика профилирования пучка; б. “щелевой” метод; в. обработка малоразмерным ионным пучком.

Для реализации описанных выше методик необходимо развитие метрологических возможностей, в частности требуется восстановление карты поверхности из отдельных субапертурных интерферометрических измерений. Для этой цели был разработан специализированный измерительный стенд и написано управляющее программное обеспечение. Стенд на основе лазерного интерферометра Zyglo VeriFire 4 с апертурой 100 мм оснащен моторизованным 3D столиком и обеспечивает измерение крупногабаритных элементов скользящего падения (с небольшим отклонением формы поверхности от плоскости) длиной до 1 м в автоматическом режиме. Для восстановления формы поверхности разработана методика сшивки отдельных кадров, учитывающая влияние эталонной поверхности интерферометра на результат измерений. Программное обеспечение производит фильтрацию артефактов и отделение эталона, а затем реализует прогрессивную сшивку отдельных кадров с восстановлением формы поверхности.

Комбинация всех разработанных методов (ионно-пучковая обработка широкоапертурным сильноточным и малоразмерным ионными пучками, высоко когерентная интерферометрия и математическая постобработка с восстановлением формы поверхности из отдельных субапертурных кадров) позволило изготовить ряд крупногабаритных рентгенооптических элементов скользящего падения. В том числе комплект из зеркал (ориентационное и фокусирующее) в форме плоскости и эллиптического цилиндра с габаритами 300x60x50 мм для строящегося синхротрона поколения 4+ “СКИФ”, угловые ошибки результирующих поверхностей составили  $\sim 1,5 \times 10^{-6}$  рад, а также пары зеркал (коллимирующего и фокусирующего) с габаритами 150x60x20 мм для рентгенооптической системы рефлектометра с монохроматором на основе схемы Черни-Тюрнера [4] (радиус кривизны исходной цилиндрической заготовки составлял 36 м), угловые ошибки результирующих поверхностей составили  $\sim 2 \times 10^{-6}$  рад. Фотографии обозначенных выше элементов представлены на рис.2.



**Рис. 2.** Фотографии Параболического цилиндра (размеры: 150x60x20 мм, отклонение от плоскости 82 мкм) (а) и Эллиптического цилиндра (размеры: 300x60x50 мм, отклонение от плоскости 1,2 мкм) (б).

Таким образом, разработана и апробирована комплексная методика формирования крупногабаритных подложек для рентгеновских зеркал скользящего падения, обеспечивающая изготовление элементов до 350 мм в длину и с отклонением от плоскости более 80 мкм, обеспечивающая угловую ошибку на уровне  $1 \times 10^{-6}$  рад.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П и с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН.

- [1] D. Cocco et al. // Phys. Rep. 974, 1-40 (2022).
- [2] T. Wang et al. // Nanomanuf. Metrol. 6, 20 (2023).
- [3] A.E. Пестов и др. // ЖТФ. 95 (9), 1825 (2025).
- [4] S.A. Garakhin et al. // Rev. Sci. Instrum. 91 (6), 063103 (2020).

# НЕЙТРОННОЕ РАССЕЯНИЕ ОТ МАГНИТНО-СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

Жакетов В.Д.<sup>1,2,\*</sup>

*1 Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

*2 Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

*\*zhaketov@nf.jinr.ru*

Низкоразмерные магнитные и сверхпроводящие гетероструктуры, благодаря наличию большого количества интересных явлений активно исследуются в настоящее время. Одним из эффективных методов исследования магнетизма является рефлектометрия поляризованных нейтронов, позволяющая получить изотопные и магнитные профили по глубине с нанометровым разрешением. В докладе будет представлен принцип работы метода. А также продемонстрированы примеры применения нейtronной рефлектометрии на рефлектометре поляризованных нейтронов РЕМУР, расположенному на 8м канале импульсного реактора ИБР-2. Будут рассмотрены низкотемпературные исследования эффектов близости в сверхпроводяще-ферромагнитных системах и редкоземельных пленках с нетривиальным магнитным упорядочением.

Низкоразмерные магнитные и сверхпроводящие гетероструктуры демонстрируют богатый набор явлений, обусловленных взаимодействием конкурирующих параметров порядка. Хотя существует множество исследований периодических сверхпроводящих (S)/ферромагнитных (F) систем, изучение квазипериодических структур представляет собой новую область исследований. Предыдущие работы с использованием рефлектометрии поляризованных нейтронов успешно описали эффекты близости в более простых системах. Настоящее исследование расширяет эти возможности, сосредоточившись на более сложных слоистых архитектурах и изучает возникновение новых свойств в квазипериодических структурах.

# **Высокоразрешающая рентгеновская микроскопия с использованием преломляющих линз на базе лабораторного рентгеновского источника излучения**

А.А. Баранников, Д.А. Зверев, И.И. Лятун, И.Б. Панормов, А.А. Снигирев.

*Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия.*

Просвечивающая рентгеновская микроскопия является неинвазивным методом исследования, позволяющим получить прямое изображение внутренней структуры объектов, непрозрачных для видимого света. Данный метод активно используется для научных исследований, а также для неразрушающего контроля качества изделий на производстве. В лабораторных условиях на сегодняшний день наилучшее пространственное разрешение составляет 1 мкм в проекционной схеме (радиография) [1], а с использованием зонных пластин Френеля в качестве увеличивающей изображение оптики – 25 нм [2].

Преломляющая рентгеновская оптика, широко используемая на синхротронных станциях для фокусировки излучения и передачи изображения [3-4], также может эффективно использоваться на базе лабораторных оптических установок. Данный вид оптики более прост с точки зрения изготовления и эксплуатации и способен эффективно работать в широком энергетическом диапазоне от 5 кэВ до более 200 кэВ.

На базе лабораторного комплекса «SynchrotronLike», оснащенного микрофокусным рентгеновским источником с жидким анодом ( $\text{GaK}\alpha$ ,  $E=9.25$  кэВ) была собрана оптическая схема просвечивающей рентгеновской микроскопии с использованием преломляющих рентгеновских линз, изготовленных в БФУ им. И. Канта [5]. Для фильтрации тормозного излучения с энергией выше 10 кэВ в схему было встроено кремниевое зеркало, установленное под углом полного внешнего отражения. Параметры трубы были установлены таким образом, чтобы получить максимальную интенсивность излучения. При этом поперечный размер источника по вертикали и горизонтали составлял  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> (FWHM). В качестве тестового образца использовалась апериодическая структура, по изображению которой было определено, что собранная оптическая схема обеспечивает пространственное разрешение около 500 нм.

Полученное значение демонстрирует тот факт, что использование оптики практически полностью исключает влияние размера источника на пространственное разрешение по сравнению с безлинзовой геометрией (радиографией). Это позволяет использовать рентгеновские трубы с большей интегральной интенсивностью и энергией генерируемого излучения для исследования сильноглощающих объектов.

1. Eckermann M. et al. Phase-contrast x-ray tomography of neuronal tissue at laboratory sources with submicron resolution // Journal of Medical Imaging. 2020. Vol. 7, № 01. P. 1.
2. von Hofsten O. et al. Sub-25-nm laboratory x-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate // Opt Lett. 2009. Vol. 34, № 17. P. 2631.
3. Snigirev A. et al. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays // Nature. 1996. Vol. 384, № 6604. P. 49–51.
4. Vaughan G.B.M. et al. X-ray transfocators: Focusing devices based on compound refractive lenses // J Synchrotron Radiat. 2011. Vol. 18, № 2. P. 125–133.
5. Barannikov A. A. et al. Testing of X-ray Optics for Synchrotron Studies using a Laboratory Microfocus X-ray Source //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Т. 18. – №. Suppl 1. – С. S24-S33.

# **Оценка сцинтилляционных и электрических свойств кристаллических материалов при их облучении жестким рентгеновским излучением**

Б.С. Рощин<sup>1</sup>, В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>, И.С. Волчков<sup>1</sup>, Ю.М. Дымшиц<sup>1</sup>, В.М. Каневский<sup>1</sup>,  
В.А. Фёдоров<sup>1</sup>, П.Л. Подкур<sup>1</sup>, И.Г. Дьячкова<sup>1</sup>, М.М. Синицына<sup>1</sup>, А.В. Бузмаков<sup>1</sup>,  
Н.А. Башлыков<sup>1,2</sup>, И.О. Кошелев<sup>1</sup>, С.В. Кузин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение «Институт Кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», 119333, Москва, Россия

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский Технологический Университет, 119454, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия

Задача создания рентгеновских детекторов с высоким пространственным и временным разрешением является приоритетной для различных рентгеновских исследований [1–3]. На сегодняшний день в детекторах чаще всего применяются кремниевые матрицы. Однако они малоэффективны для регистрации рентгеновского излучения с энергией более 17 кэВ. По этой причине становится необходимым использование сцинтилляционного элемента, преобразующего рентгеновские фотоны в видимое излучение, регистрируемое матрицей, либо применение для изготовления матрицы полупроводников с более широкой запрещенной зоной.

Преимуществом детекторов со сцинтилляторами является возможность использования проекционной оптики. При этом качество изображения напрямую определяется характеристиками самого сцинтиллятора. На специально сконструированной установке произведён отбор кристаллов следующих типов: фториды тербия, гранаты, вольфрамат кадмия и антрацен. Измерения показали, что кристаллы на основе иттрий-алюминиевого граната, активированные церием и тербием (YAG:Ce,Tb), наиболее перспективны для применения в рентгеновских детекторах. Пластиинки из этих кристаллов были установлены в прототип рентгеновского детектора, которым было измерено рентгеновское изображение структуры золотой сетки с шагом 6 мкм при использовании объектива с увеличением [4]. Другим направлением работы является измерение электрического сопротивления кристаллов Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te. Этот материал по сравнению с другими полупроводниками гораздо эффективнее взаимодействует с рентгеновским излучением благодаря более широкой запрещенной зоне (~1.44 эВ при 300 К) [5]. Для проведения измерений на установке вместо световода был использован кабель, подключенный одним концом к держателю образца, а другим – к источнику-измерителю. Показано, что электросопротивление исследуемых кристаллов резко уменьшается при облучении. Эффект обусловлен генерацией фототока. Результаты измерений полезны для постростового улучшения свойств кристаллов.

## **Благодарности**

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части исследований кристаллов CdZnTe и в рамках Соглашения № 075-15-2025-458 с Министерством науки и высшего образования РФ в части исследований кристаллов-сцинтилляторов.

- [1] Кривоносов Ю.С., Чукалина М.В., Бузмаков А.В. и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 1. С. 26–31.
- [2] Tegze M., Faigel G. // Nature. 1996. V. 380. N 6569. P. 49–51.
- [3] Kapetanakis E., Douvas A.M., Argitis P. et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. V. 5. N 12. P. 5667–5674.
- [4] Асадчиков В.Е., Федоров В.А., Григорьев А.Ю. и др. Приборы и техника эксперимента. 2024. № 6. С. 90–99.
- [5] Oluyamo S.S., Faremi A.A., Olusola O.I.O. et al. // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 28. Pt. 2. P. 558–563.

# **Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Cr/Ti, оптимизированные на «окно прозрачности воды»**

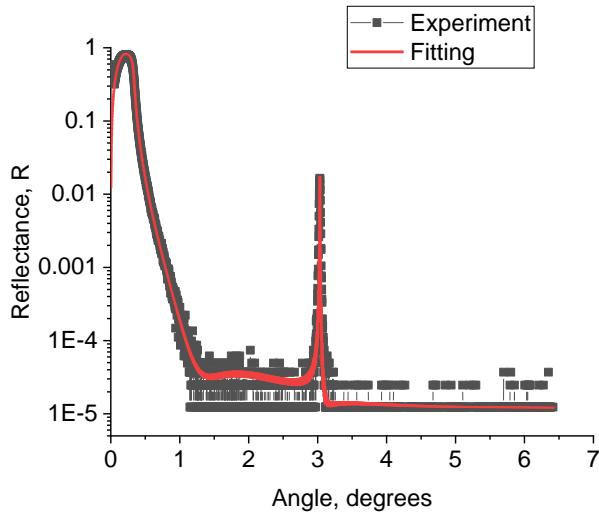
**Шапошников Р. А.\***, Полковников В. Н., Гарахин С. А., Чхало Н. И., Звонков Г. А.

*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087*

*\*shaposhnikov-roma@mail.ru*

Многослойные рентгеновские зеркала находят свое приложение в различных областях науки и техники. Одним из таких практических приложений является рентгеновская микроскопия, направленная на изучение биологических объектов. В частности, большой интерес представляет микроскопия в области «окна прозрачности воды» (диапазон длин волн 27.4 – 44 Å), в котором вода обладает малым поглощением излучения, что позволяет исследовать живые объекты. При этом для эффективного развития рентгеновской микроскопии требуется разработать и создать высокоотражающие зеркала, которые будут применены в качестве отражательных элементов в оптической системе объектива микроскопа. С точки зрения малого поглощения и большого оптического контраста перспективными материалами для синтеза на их основе многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на «окно прозрачности воды», являются хром и титан. Теоретический расчет, проведенный для Cr/Ti многослойных структур показывает, что коэффициент отражения для идеальных (нулевые шероховатости, табличные плотности) зеркал нормального падения достигает 60%. Однако, полученные экспериментально коэффициента отражения сильно уступают теоретическому пределу. Причиной такого несоответствия являются межслоевые интерфейсы, представляющие собой переходные области на границах раздела материалов в структуре, геометрические шероховатости, а также отличие плотностей от их табличных значений. Для борьбы с указанными факторами применяются, так называемые, методики интерфейс-инжиниринга, позволяющие улучшить границы в структуре и, соответственно, повысить коэффициент отражения. Данная работа посвящена исследованию отражательных характеристик и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал Cr/Ti, оптимизированных на рабочую длину волны 27.4 Å. В работе приводится результат исследования влияния прослоек карбида бора, нанесенных на слои хрома и титана, на отражательные характеристики и структурные параметры синтезированных образцов.

На первом этапе данной работы было синтезировано многослойное рентгеновское зеркало Cr/Ti с периодом  $d = 14.65 \text{ \AA}$ , числом периодов  $N = 400$ , а также значением переходной области  $S = 4 \text{ \AA}$  на обеих границах. На рисунке 1 приведен результат измерения данного зеркала в области жесткого рентгеновского диапазона на длине волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  на четырехкристальном высокоразрешающем дифрактометре PANalytical X'pert-PRO, а также подгонка экспериментальных данных, осуществленная в программе Multifitting, на основании которой были восстановлены структурные параметры.



**Рисунок 1.** Зависимость коэффициента отражения от угла скольжения излучения многослойного рентгеновского зеркала Cr/Ti с числом периодов  $N = 400$  и значением периода  $d = 14.65 \text{ \AA}$ . Черная кривая соответствует измерению на длине волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ , красная – подгонке в программе Multifitting.

Далее в рамках данного исследования был синтезирован ряд структур, в которых были нанесены барьерные слои карбида бора разной толщины как на каждую границу в отдельности, так и на обе границы одновременно. Отражательные характеристики данных структур приведены в таблице 1. Измерение на длине волны  $\lambda = 27.4 \text{ \AA}$  проводилось на лабораторном рефлектометре, оснащенном монохроматором РСМ-500.

**Таблица 1.** Структурные параметры и отражательные характеристики многослойных рентгеновских зеркал Cr/Ti без барьерных слоев, а также с барьерными слоями B4C.  $d$  – период структуры в ангстремах,  $d_{B4C}$  – толщина прослойки карбида бора,  $R$  – измеренный коэффициент отражения на длине волны  $\lambda = 27.4 \text{ \AA}$ . Sub – означает подложку.

Структура	$d, \text{\AA}$	$d_{B4C}, \text{\AA}$	$R, \%$
Sub/Cr/Ti	14.65	-	6
Sub/Cr/B4C/Ti	15.00	1.0	8
Sub/Cr/B4C/Ti	14.89	0.5	8
Sub/Cr/Ti/B4C	14.80	1.0	6.9
Sub/Cr/Ti/B4C	14.55	0.5	6.3
Sub/Cr/B4C/Ti/B4C	15.35	1.0	10
Sub/Cr/B4C/Ti/B4C	14.71	0.5	8.6

Исходя из данных, представленных в таблице 1, следует, что наилучшее отражение удалось получить для структуры вида Sub/Cr/B4C/Ti/B4C, в которой прослойки карбида бора с толщиной 1  $\text{\AA}$  наносились на обе границы. Измеренный коэффициент отражения при этом составил  $R = 10\%$ . При этом, стоит отметить, что истинное значение коэффициента отражения должно быть выше приведенного в таблице, так как измеренное значение оказывается заниженным в силу влияния аппаратной функции спектрометра. Стоит отметить, что анализ зеркальной кривой отражения в жестком рентгеновском диапазоне позволяет описать данное зеркало следующей моделью:  $\rho_{Cr} = 0.9\rho_{Cr\_table}$ ,  $\rho_{Ti} = 1.1\rho_{Ti\_table}$ ,  $S = 3.3 \text{ \AA}$ , где  $\rho_{Cr}$  и  $\rho_{Ti}$  – значения плотности хрома и титана относительно табличного значения,  $S$  – значения величины межслоевых интерфейсов, которые в модели одинаковы для обеих границ. Расчетный коэффициент отражения на длине волны  $\lambda = 27.4 \text{ \AA}$  при этом равен  $R = 19.5\%$  при угле скольжения излучения  $\theta = 63.5^\circ$ . Зеркало нормального падения с данными значениями плотностей, межслоевых интерфейсов и числом периодов  $N = 600$  позволяет получить коэффициент отражения  $R = 21\%$ .

# **Определение оптических констант тонких плёнок на лабораторном источнике мягкого рентгеновского излучения**

Автор: Загайнов Николай Владимирович (ИФМ РАН, ННГУ им. Н.И. Лобачевского)  
Научный руководитель: к.ф.-м.н. В.Н. Полковников (ИФМ РАН)

Развитие технологий, работающих в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) и мягком рентгеновском диапазонах (например, литография на длине волны 13.5 нм), предъявляет жёсткие требования к качеству и точности характеристик многослойной оптики и литографических масок. Ключевым элементом для их проектирования и контроля являются точные данные об оптических константах (показатель преломления, коэффициент экстинкции) материалов тонких плёнок, входящих в их состав. Традиционные методы измерения, такие как спектроскопия пропускания на свободно стоящих плёнках, являются крайне сложными в реализации для высокопоглощающих материалов (напр., Ta, TaN, TaBN) в ЭУФ-диапазоне, а использование синхротронного излучения зачастую недоступно из-за высокой загруженности станций.

В данной работе представлена комплексная методика определения оптических констант и внутренней структуры тонких плёнок непосредственно на подложке с использованием исключительно лабораторного оборудования. Метод основан на совместном анализе данных рентгеновской рефлектометрии, полученных на двух типах приборов:

Лабораторный рефлектометр с лазерно-плазменным источником (схема Черни-Тёрнера) для измерений в диапазоне 10–16 нм.

Рентгеновский дифрактометр (Philips X'Pert PRO) для измерений на длине волны 0.154 нм (Cu K $\alpha$ ).

Для решения обратной задачи – восстановления параметров структуры (толщины слоёв, плотности, шероховатости границ, химического состава) – применялся современный программный пакет Multifitting, позволяющий проводить совместную подгонку по множеству рефлектометрических кривых одновременно. Для проверки точности и устойчивости метода был проведён численный эксперимент на модельной многослойной структуре TaBN/TaBO/Ta<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> на кремниевой подложке. Смоделированные «экспериментальные» данные были искажены с учётом реальных погрешностей и ограничений измерительных приборов (шум, ограниченный динамический диапазон).

Результаты показали, что предложенная методика позволяет с высокой точностью (погрешность <1%) восстановить толщины слоёв, плотности и шероховатости. Методика прошла первичную экспериментальную апробацию на серии образцов тантала и нитрида тантала (Ta, TaN) с различным содержанием азота, что привело к улучшение параметров прибора. На данном этапе представлены результаты экспериментов на уже модернизированном приборе.

Таким образом, работа демонстрирует, что комплексный анализ данных лабораторной рефлектометрии является мощной альтернативой синхротронным измерениям для оперативного контроля и определения оптических констант сложных многокомпонентных плёнок, критически важных для современной ЭУФ-литографии и рентгеновской оптики.

# **Влияние барьерных слоев кремния на формирование межфазных границ в многослойных нейтронных зеркалах [Ti/Ni]**

Саяпина А.А., Сахоненков С.С., Филатова Е.О.

*Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д.1, Петродворец, Санкт-Петербург, Россия.*

*sasha.sayapina.03@gmail.com*

Многослойные системы на основе никеля и титана занимают важное место в современных исследованиях и технологических разработках благодаря их уникальным оптическим, механическим и функциональным свойствам. Одним из ключевых применений многослойных структур является нейтронная оптика, в которой нейтронные зеркала играют важную роль, обеспечивая эффективное управление пучками нейтронов, что важно для широкого спектра научных исследований. Создание суперзеркал позволило значительно расширить угловой диапазон отражаемых нейтронов, что открыло новые возможности для экспериментов в физике конденсированного состояния. В частности, на основе многослойных структур Ni/Ti создаются неполяризующие суперзеркала. Никель является элементом с максимальной длиной когерентного рассеяния, а длина когерентного рассеяния титана отрицательна, что усиливает нейтронно-оптический контраст, благодаря чему многослойная структура Ni/Ti оказалась весьма эффективной при разработке монохроматоров, волноводов и фокусирующих устройств.

В то же время, многочисленные исследования показывают, что структуры на основе никеля и титана характеризуются протяженными асимметричными переходными слоями на границах раздела [1-4], что приводит к уменьшению отражения. Также, в процессе осаждения пленок могут накапливаться шероховатости роста. В работе [5] было предложено использование “техники барьерных слоев”, в частности, введение на межфазных границах тонких слоев кремния.

В связи с этим, целью данной работы было комплексное исследование строения переходных слоев, образующихся на межфазных границах Ni и Ti, а также влияния введения тонкого слоя Si на их формирование. Многослойные структуры [Ti/Ni] с периодами 4 и 10 нм (для каждого образца номинальные толщины слоев Ni и Ti одинаковы между собой), а также структуры с барьерными слоями Si (номинальная толщина слоев Si 0.3 и 0.4 нм, соответственно) были получены методом магнетронного распыления на кремниевых подложках Si (100) в институте физики микроструктур РАН. В системах с прослойками кремния, для сохранения периода структуры, номинальная толщина слоя титана была уменьшена на 0.6 и 0.8 нм, соответственно. Совместный анализ измеренных фотоэлектронных спектров многослойных систем указывает на формирование интерметаллидов NixTi на межфазной границе, а также оксидов как никеля, так и титана (скрытого под поверхностным слоем никеля). Введение барьерных слоев кремния, значительно снижает вклады оксидов, при этом образуются силициды Ni и/или Ti. Исходя из анализа фотоэлектронного спектра Si 2s и основываясь на литературных данных [6-7], наиболее вероятным представляется взаимодействие Si и Ti. Важно отметить, что введение барьерных слоев Si значительно уменьшает содержание интерметаллидов NixTi на межфазной границе.

Для получения информации о кристаллической структуре и толщине слоев был проведен анализ рентгеновских дифрактограмм. Были обнаружены пики, соответствующие гексагональному титану ( $\alpha$ -Ti) и fcc-Ni. При этом, самый интенсивный из них является суперпозицией двух пиков: плоскости отражения (111) fcc-Ni, а также (004) hcp-Ni<sub>3</sub>Ti.

Кроме того, присутствует еще один низкоинтенсивный пик, относящийся к плоскости отражения (511) fcc-NiTi<sub>2</sub>. Таким образом, на интерфейсах Ni-Ti преимущественно образуется интерметаллид Ni<sub>3</sub>Ti и незначительно присутствует фаза NiTi<sub>2</sub>. Введение барьерных слоев кремния препятствует образованию кристаллитов Ni<sub>3</sub>Ti и NiTi<sub>2</sub>, что согласуется с данными, полученными из фотоэлектронных спектров.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-72-10107.

- [1] R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama, Development of neutron supermirror with large-scale ion-beam sputtering instrument, Phys. B Condens. Matter 385–386 (2006) 1256–1258, <https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2006.06.024>;
- [2] F. Eriksson, N. Ghafoor, S. Broekhuijsen, G. Greczynski, N. Schell, J. Birch, Morphology control in Ni/Ti multilayer neutron mirrors by ion-assisted interface engineering and B 4 C incorporation, Opt. Mater. Express 13 (2023) 1424, <https://doi.org/10.1364/OME.476713>;
- [3] Y. Yang, R. Qi, Z. Zhang, Y. Yao, H. Ni, Z. Wang, H. Wu, X. Wang, Ni-Ti supermirror coated onto a curved substrate for nested neutron-focusing optics, Nucl Instrum Methods Phys Res A 986 (2021) 164752, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164752>;
- [4] S. Zhao, J. Zhu, Z. Yang, Y. Zhu, H. Sun, L. Zhao, Interface study on the effect of oxygen/nitrogen ratio in Ni/Ti multilayer deposited by reactive sputtering, Mater Res Express 10 (2023) 076402, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ace592>;
- [5] R. Smertin, E. Antyushin, I. Malyshov, M. Zorina, N. Chkhalo, P. Yunin, S. Garakhin, V. Polkovnikov, Y. Vainer, Influence of silicon interlayers on the structural and reflective X-ray characteristics of Ni/Ti multilayer mirrors, J. Appl. Crystallogr. 57 (2024) 1477–1483, <https://doi.org/10.1107/S1600576724007702>;
- [6] P.L. Tam, Y. Cao, L. Nyborg, XRD and XPS characterisation of transition metal silicide thin films, Surf. Sci. 606 (2012) 329–336, <https://doi.org/10.1016/j.susc.2011.10.015>;
- [7] Y. Cao, L. Nyborg, U. Jelvestam, XPS calibration study of thin-film nickel silicides, Surf. Interface Anal. 41 (2009) 471–483, <https://doi.org/10.1002/sia.3050>.

# **Влияние барьера слоя углерода на кристаллическую структуру многослойного рентгеновского зеркала Cr/V**

А.В. Каратаев, Е.О. Филатова

*Институт Физики, Санкт-Петербургский Государственный Университет, ул. Ульяновская 1,  
Петрограф, Санкт-Петербург 198504, Россия*

Рентгеновская микроскопия в спектральном диапазоне «окна прозрачности воды» ( $\lambda = 2.2 - 4.4$  нм) является чрезвычайно перспективным инструментом для наноразмерных исследований в биологии и медицине[1,2]. Диапазон окна прозрачности воды уникален тем, что в данном диапазоне углеродные материалы сильно поглощают, в противоположность кислородной-естественной среде, которая является прозрачной, что позволяет создать контраст между исследуемыми веществами и их естественной средой. Рентгеновская микроскопия в «окне прозрачности воды» позволяет исследовать гидратированные биологические объекты (вирусы, клеточные органеллы, макромолекулы) в их естественном состоянии с высоким пространственным разрешением, недостижимым для традиционной световой микроскопии. Ключевыми оптическими элементами для коллимации и монохроматизации излучения в рентгеновских микроскопах выступают многослойные рентгеновские зеркала Cr/Ti, Cr/Sc, Cr/V. Система хром/ванадий представляет особый интерес, поскольку обладает наименьшей рабочей длиной волны в указанном диапазоне, что напрямую связано с потенциально максимальной разрешающей способностью микроскопа. Основным препятствием для практического применения многослойных зеркал является значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента отражения. Так, для структуры Cr/V на длине волны  $\lambda = 2.4$  нм расчет предсказывает высокий коэффициент отражения до 68%, однако в реальных условиях работы микроскопа измеренное значение не превышает 4.3%[3]. Это указывает на наличие существенных технологических и структурных проблем, ограничивающих эффективность оптики. Установлено, что основной причиной столь значительного падения отражательной способности является формирование выраженной межслоевой шероховатости на границах раздела пленок. Данный дефект структуры преимущественно обусловлен процессом кристаллизации слоев в процессе роста многослойного зеркала[4]. Для подтверждения этой гипотезы был применен комплекс аналитических методов. Методом рентгеновской дифракции (**XRD**) была обнаружена кристаллизация в системе Cr/V с периодами  $d = 1.25$  нм,  $3.12$  нм,  $4.1$  нм. Наиболее интересным является тот факт, что в системе с наименьшим периодом была обнаружена кристаллическая структура с ярко выраженным дифракционным максимумом ванадия, причем размеры этих кристаллитов существенно превышают величину периода структуры (период 1.25 нм, величина кристаллитов ванадия  $\sim 3.5$  нм). Введение барьера слоя углерода в систему с периодом 3.12 нм и 1.25 нм (система Cr/C/V) позволило получить аморфную структуру. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (**XPS**) было выявлено химическое взаимодействие между ванадием и углеродом на границе раздела с образованием соединения  $VC_x$ , что является ключевым показателем, указывающим на причину «аморфизаций» многослойной структуры при введении в нее барьера слоя углерода. Также, при помощи метода рентгеновской рефлектометрии (**XRR**) на основе кривых отражения были определены толщины слоев и межслоевые шероховатости изученных систем. Была рассчитана ожидаемая отражательная способность на рабочей длине волны [5], показано, что введение барьера слоя углерода в систему с периодом 3.12 нм повышает отражательную способность в два раза до 0.04 при рабочей длине волны 8 кэВ, а

при рабочей длине волны 2.42 нм ожидается коэффициент отражения более 0.25.

**Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-72-20125-П.**

**Литература**

1. H. Legall, et al, "Compact x-ray microscope for the water window based on a high brightness laser plasma source," Opt. Express 20, 18362-18369 (2012)
2. Mikael Kördel, et al, "Laboratory water-window x-ray microscopy," Optica 7, 658-674 (2020)
3. Gullikson, E. M., Salmassi, F., Aquila, A. L. & Dollar, F. Progress in short period multilayer coatings for water window applications. Lawrence Berkeley National Laboratory, <http://escholarship.org/uc/item/8hv7q0hj> (2008).
4. Qi, R.; Huang, Q.; Fei, J.; Kozhevnikov, I.V.; Liu, Y.; Li, P.; Zhang, Z.; Wang, Z. Evolution of the Internal Structure of Short-Period Cr/V Multilayers with Different Vanadium Layers Thicknesses. *Materials* 2019, 12, 2936. <https://doi.org/10.3390/ma12182936>
5. Qiushi Huang, Jian Fei, Yang Liu, Pin Li, Mingwu Wen, Chun Xie, Philippe Jonnard, Angelo Giglia, Zhong Zhang, Kun Wang, and Zhanshan Wang, "High reflectance Cr/V multilayer with B<sub>4</sub>C barrier layer for water window wavelength region," Opt. Lett. 41, 701-704 (2016)

# **Формирование межфазных границ в наноразмерных многослойных структурах B<sub>4</sub>C/(C)/Ru**

Бугаев А. В.<sup>1</sup>, Сахоненков С. С.<sup>1</sup>, Гайсин А. У.<sup>1</sup>, Шапошников Р. А.<sup>2</sup>, Полковников В. Н.<sup>2</sup>,  
Филатова Е. О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Физики, Санкт-Петербургский Государственный Университет, ул. Ульяновская 1,  
Петергоф, Санкт-Петербург 198504, Россия

<sup>2</sup>Институт Физики Микроструктур, Российской Академии Наук, Нижний Новгород 603087,  
Россия

Развитие литографии и рентгеновской оптики в области крайнего ультрафиолета на длине волны ~ 6.7 нм требует создания высокоэффективных многослойных зеркал с высокой отражательной способностью. Система B<sub>4</sub>C/Ru является одной из наиболее перспективных для этого спектрального диапазона благодаря оптимальному сочетанию оптических констант. Однако экспериментально достигнутая отражательная способность (~30%) [1, 2] значительно уступает теоретическим предсказаниям (~70%) [3], что связано с химическим взаимодействием на границах раздела слоёв с образованием боридов рутения и ростом шероховатости [4]. Помимо этого, остаётся открытым вопрос о термостойкости многослойных структур B<sub>4</sub>C/Ru в условиях длительного радиационного воздействия, которому подвергаются оптические системы в ходе их использования как на литографических установках, так и в качестве монохроматоров для синхротронов. В то время, как в одних работах [5, 6] показывается термическая стабильность многослойных систем B<sub>4</sub>C/Ru при отжиге вплоть до температуры 550 °C, другие авторы [7] сообщают, что уже при температуре 400 °C начинается деградация многослойной структуры, которая проявляется в росте толщины переходных соединений на интерфейсах. Таким образом, крайне важным представляются дополнительные исследования термической стабильности системы B<sub>4</sub>C/Ru именно при температуре 400 °C.

В данной работе методом магнетронного распыления были синтезированы многослойные структуры [B<sub>4</sub>C/Ru]<sub>50</sub> с различным параметром Г (отношение толщины слоя Ru к периоду структуры), а также с введённым углеродным барьерным слоем ( $d = 0.3$  нм) на интерфейс Ru-на-B<sub>4</sub>C. Для анализа химического состава, кристаллической структуры и морфологии границ раздела использовались такие методы, как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), рентгеновская дифракция (XRD) и рентгеновская рефлектометрия (XRR).

Методами XPS доказано активное образование борида рутения (Ru<sub>x</sub>B<sub>y</sub>) на границах раздела в многослойной системе B<sub>4</sub>C/Ru. Показано, что уменьшение параметра Г (увеличение доли B<sub>4</sub>C) приводит к формированию боридов рутения различной стехиометрии и усиленному окислению бора, что свидетельствует о недостаточной защитной функции тонких слоев Ru. Введение ультратонкого углеродного слоя ( $d = 0.3$  нм) на интерфейс Ru-на-B<sub>4</sub>C приводит к значительному подавлению взаимной диффузии между основными слоями и к уменьшению общей толщины переходной области на 0.22–0.24 нм для обоих материалов (B<sub>4</sub>C и Ru) как показывает анализ рефлектометрических данных (XRR). Исследование термической стабильности при отжиге при 400 °C в течение 1 часа показало, что в системе без барьера слоя происходит значительное усиление взаимной диффузии, дальнейшее формирование борида рутения и сильное окисление. Напротив, система с углеродным барьерным слоем продемонстрировала высокую термическую стабильность: отжиг не приводит к усилиению образования борида рутения. При этом, данные XRD подтвердили, что все исследуемые структуры остаются рентгеноаморфными, что критически важно для минимизации межслоевой шероховатости.

Проведённое комплексное исследование демонстрирует, что химическое взаимодействие на границах раздела представляет собой ключевой фактор, ограничивающий отражательную способность многослойных систем B<sub>4</sub>C/Ru. Введение ультратонкого углеродного барьера слоя на интерфейс Ru-на-B<sub>4</sub>C является эффективным методом для подавления этого взаимодействия и значительного повышения термической стабильности структуры. Полученные результаты имеют важное значение для разработки высокоэффективных и стабильных многослойных зеркал, предназначенных для применения в EUV-литографии и рентгеновской оптике, работающих в условиях интенсивного теплового воздействия.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-72-20125-П. Авторы выражают благодарность сотрудникам ресурсных центров по направлениям «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Физические методы исследования поверхности» научного парка Санкт-Петербургского Государственного Университета за их помощь в проведении рентгеноструктурных и рентгенофазовых измерений. Мы также выражаем признательность Национальному исследовательскому центру «Курчатовский институт» за предоставление доступа к лабораторному оборудованию ESCA и за их ценную техническую поддержку, которая внесла значительный вклад в проведение этого исследования.*

## Литература

- [1] D.G. Stearns, R.S. Rosen, S.P. Vernon, Normal-incidence x-ray mirror for 7 nm, 1991. <https://doi.org/10.1364/ol.16.001283>.
- [2] V. V. Lider, Multilayer X-ray interference structures, Uspekhi Fizicheskikh Nauk 189 (2019) 1137–1171. <https://doi.org/10.3367/ufnr.2018.10.038439>.
- [3] R.A. Shaposhnikov, V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, Study of structural and reflective characteristics of multilayer X-ray mirrors based on a pair of Ru/B materials, Technical Physics Letters 51 (2025). <https://doi.org/10.61011/TPL.2025.01.60138.20075>.
- [4] D. Ksenzov, C. Schlempert, U. Pietsch, Resonant soft x-ray reflectivity of Me/B<sub>4</sub>C multilayers near the boron K edge, 2010. <https://doi.org/10.1364/AO.49.004767>.
- [5] C. Borel, C. Morawe, A. Rommeveaux, C. Huguenot, J.-C. Peffen, Reflectivity and stress responses of multilayers upon isothermal treatment, in: Advances in X-Ray/EUV Optics, Components, and Applications, SPIE, 2006: p. 63170I. <https://doi.org/10.1117/12.678472>.
- [6] C. Borel, C. Morawe, E. Ziegler, T. Bigault, J.-Y. Massonnat, J.-C. Peffen, E. Debourg, In situ study of multilayer reflectivity upon heat treatment under synchrotron radiation, in: Laser-Generated, Synchrotron, and Other Laboratory X-Ray and EUV Sources, Optics, and Applications II, SPIE, 2005: p. 591801. <https://doi.org/10.1117/12.613873>.
- [7] Yang Liu, Qiushi Huang, Runze Qi, Yufei Feng, Zhong Zhang, Guangzhi Yin, Xingmin Zhang, Hui Jiang, Zhanshan Wang, Thermal and temporal stability of the nitridated Ru/B<sub>4</sub>C multilayer for high-flux monochromator application, Appl. Opt. 59 (2020) 48–53. <https://doi.org/10.1364/AO.59.000A48>.

# **Обработка данных рентгеновской микротомографии**

Бузмаков А.В.

*НИЦ «Курчатовский институт»*

Рентгеновская микротомография является неразрушающим методом исследования трёхмерной структуры объектов, непрозрачных в видимом диапазоне излучения. Микротомография используется во многих отраслях науки и техники, от исследования структуры авиационных двигателей и тела человека до нанокомпозитов и отдельных клеток.

Для достижения высокого пространственного разрешения и контрастности томографической реконструкции необходима не только прецизионная рентгено-оптическая система получения проекций, но и математический аппарат для синтеза и анализа трёхмерной модели.

В представляемом докладе будут описаны практические подходы к анализу и обработке рентгеновских изображений, которые применяются на лабораторных и синхротронных микротомографах для повышения информативности и разрешения томографических данных. Будут приведены примеры исследований объектов различной природы, проведённых на разных лабораторных и синхротронных микротомографах.

# **Применения микроканальных стержней и пластин для регистрации и переноса излучений**

В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>, А.В.Андреев<sup>2</sup>, В.В. Берёзкин<sup>1</sup>, А.В. Бузмаков<sup>1</sup>, И.Г. Дьячкова<sup>1</sup>,  
Д.А.Золотов<sup>1</sup>, А.А.Коновко<sup>2</sup>, Ю.С. Кривоносов<sup>1</sup>, Н. М.Р. Криман<sup>2</sup>, Н.В. Минаев<sup>1</sup>,  
Т.А.Семенов<sup>1</sup>, Е.И. Мареев<sup>1</sup>, М. В.Решетова<sup>1</sup>, И.Д.Родионов<sup>3</sup>, А.И. Родионов<sup>3</sup>, А.Э. Родич<sup>4</sup>,  
В.Э. Скворцов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

<sup>3</sup> АО НПЦ «РЕАГЕНТ»

<sup>4</sup>ООО «ВидеоЕлектроника»

Основной областью применения микроканальных пластин принято считать создание двумерных позиционно чувствительных детекторов. Такие детекторы, в частности, используются при создании приборов ночного видения. Отметим, что каждый канал в таких детекторах, по существу, представляет собой фотоэлектронный умножитель. По этой причине детекторы требуют создания достаточно высокого вакуума внутри их объёма. Диаметр каналом составляет 2-12 мкм, а поверхностная плотность каналов порядка от  $0,5 \cdot 10^6$  до  $5 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>, таким образом, шаг каналов составляет 5—25 мкм., число каналов может доходить до нескольких миллионов. В настоящей работе рассматривается возможность применения МКП пластин для создания детекторов рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 5 до 20 кэВ. Представлены первые результаты по эффективности и пространственному разрешению таких детекторов.

С другой стороны, существует проблема регистрации излучения ближнего ИК спектра (1,0-1,5 мкм), где эффективность серийно выпускаемых детекторов чрезвычайно низка. Одна из возможности повышения эффективности связана с переводом названного излучения во вторую гармонику, где эффективность регистрации уже достаточно высока. Для этой цели нами использовались микроканальные стержни с диаметром каналов около 2 мкм, причём в каждом из каналов создавались кристаллы йодноватой кислоты, являющиеся оптически активными. Расчёт и эксперименты показывают, что в этих условиях эффективность перевода излучения во вторую гармонику достигает десятков процентов, а как известно эффективность регистрации такого излучения близка к 100%.

Такие микроканальные стержни были нами использованы для переноса широкополосного рентгеновского излучения от микрофокусного источника с максимумом интенсивности 50 кэВ на значительные расстояния (порядка 20 см). Показано, что на выходе такого стержня создаётся пучок шириной 150 мкм, при этом выигрыш интенсивности в этом пучке примерно в 50 раз больше, чем без применения такого волновода.

Проведение рентгеновских экспериментов было осуществлено в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии (с Минобрнаукой) № 075-15-2025-458" и госзадания НИЦ «Курчатовский институт»

# Трёхзеркальный ЭУФ-микроскоп 345 крат с z-томографией биологических образцов

Д. Г. Реунов\*, И. В. Малышев, А. К. Чернышёв, М. Н. Торопов, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, Р. М. Смертин, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало

*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087*

\*reunov\_dima@ipmras.ru

Зеркальная ЭУФ-микроскопия на длине волны около 13,5 нм широко применяется как для диагностики фотоматриц для нанолитографии, так и для решения биологических задач. Созданный в ИФМ РАН микроскоп, работающий на длине волны 13,84 нм [1], обеспечивал получение трёхмерных изображений с разрешением порядка 140 нм, ограниченным его оптическим увеличением. С целью повышения разрешения было принято решение повысить увеличение микроскопа. Для этого в существующую систему ЭУФ-микроскопа (с увеличением 46×) было добавлено третье (выпуклое) зеркало, а aberrации объектива были скорректированы методом ионного пучкового травления.

Для реализации трёхмерной визуализации микроскоп оснащён функцией перемещения образца вдоль оптической оси с помощью пьезокерамического актуатора на величину до 40 мкм с шагом до 10 нм. Благодаря высокой числовой апертуре объектива ( $NA = 0,27$ ) срез образца в предметной плоскости проецируется на матричный детектор, что позволяет выполнять аксиальную z-томографию. В результате перемещения образца вдоль оптической оси формируется серия XY-срезов на различных глубинах, которые затем объединяются для построения 3D-изображений. Для минимизации вклада внефокусных срезов применяется деконволюционная (решение обратной задачи) с учётом трёхмерной передаточной функции микроскопа (ФРТ). Это особенно важно, поскольку даже ошибка формы зеркал на уровне 1 нм (среднеквадратическое отклонение) при столь короткой длине волны существенно влияет на ФРТ. На зарегистрированных изображениях это проявляется как размытие, однако после решения обратной задачи эффект контраст значительно улучшается.

После установки третьего зеркала была проведена настройка и аттестация оптической системы с использованием интерферометра с дифракционной волной сравнения. По результатам настройки была получена карта ошибок формы оптической системы на зеркале M1, которые устранились методом ионно-пучковой коррекции. После нескольких итераций среднеквадратическое отклонение aberrаций объектива достигло 2,8 нм, что соответствует  $\lambda/5$  при  $\lambda = 13,84$  нм и, согласно расчётам программы трассировки лучей Zemax, эквивалентно разрешению в предметной плоскости объектива 18,5–38 нм.

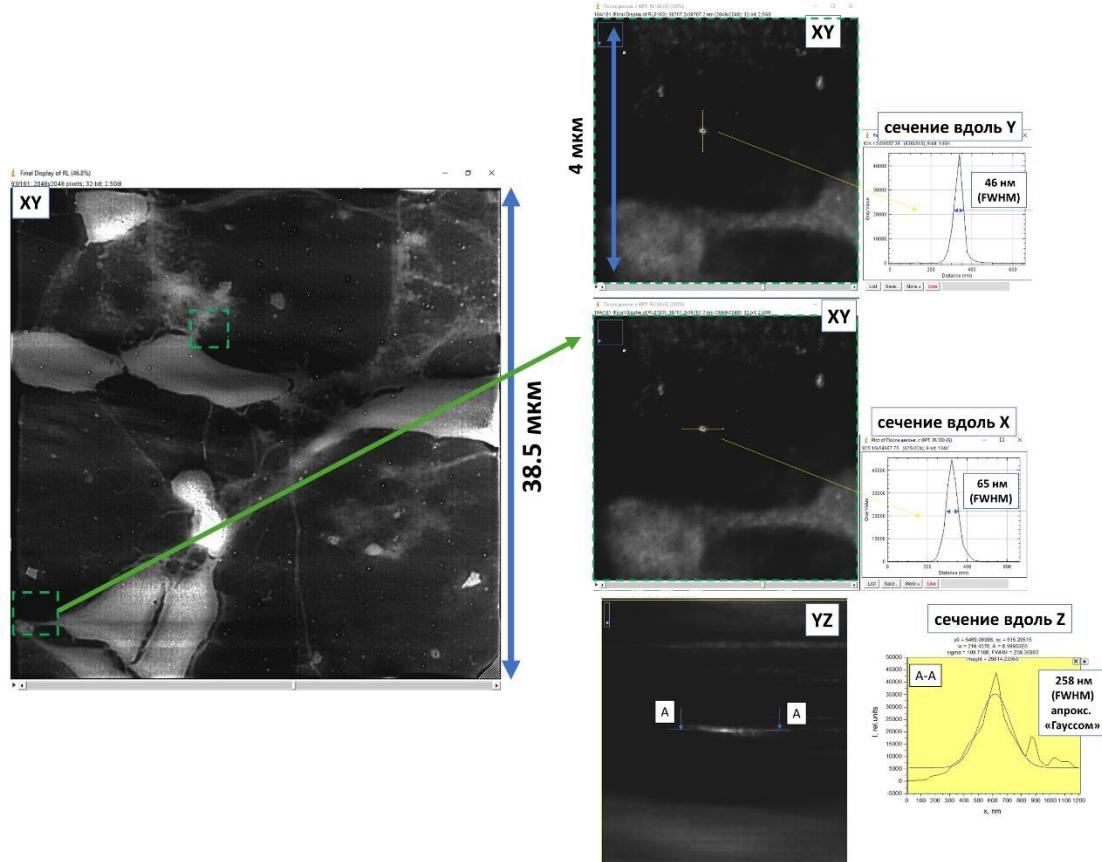


Рисунок 1. – Нейриты клеток-зёрен на ЭУФ-микроскопе 345 крат на 13.84 нм после деконволюции с ФРТ, по алгоритму Ричардсона-Люси со 100.

На рис. 1 показано фокальное сечение из серии изображений вдоль оптической оси после деконволюции с учётом ФРТ микроскопа. На нём выявлен объект с вертикальным размером 46 нм и горизонтальным 65 нм. Сечение YZ, выполненное вдоль оптической оси, демонстрирует FWHM = 260 нм, при этом теоретическая глубина фокуса микроскопа составляет  $DOF = \lambda/NA^2 \approx 190$  нм.

Работа велась при поддержке гранта РНФ № 22-62-00068.

[1] I. V. Malyshev, D. G. Reunov, N. I. Chkhalo, et al.// Opt. Express. V. 30(26). 47567 (2022).

# **Комплексное морфолого-химическое исследование желчных камней разного состава с использованием рентгеновских методов**

И.Г. Дьячкова<sup>1</sup>, А.Г. Иванова<sup>1</sup>, Ю.С. Кривоносов<sup>1</sup>, В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>, В.В. Пантишов<sup>2</sup>, Р.Г. Сайфутдинов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский Институт», 119333 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский многопрофильный клинический центр Коммунарка, 108814 Москва, Россия

<sup>3</sup> Кафедра госпитальной и поликлинической терапии КГМА – филиала ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 420012 Казань, Россия

В настоящей работе представлены результаты комплексного исследования редкого клинического случая – разных типов камней желчного пузыря (холестериновых и пигментных), обнаруженных у одного пациента с сахарным диабетом 2-го типа (СД2) – методами рентгеновской микротомографии (РМТ), рентгенофазового анализа (РФА) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФЛА). В результате анализа полученных результатов были выделены три типа веществ, определяющих фазовый состав и радиологические характеристики исследованных камней желчного пузыря: органические соединения (преимущественно холестерин и билирубин) с низкими коэффициентами поглощения  $\mu = 0.058\text{--}0.095 \text{ mm}^{-1}$ ; кальцифицированные органические соединения (главным образом билирубинат кальция) с промежуточными значениями  $\mu \approx 0.110\text{--}0.172 \text{ mm}^{-1}$ ; и неорганические кальцификаты (фосфат кальция) с высокими коэффициентами поглощения до  $\mu = 0.172\text{--}0.212 \text{ mm}^{-1}$ . Было выделено три морфотипа камней: 1 – смешанные, преимущественно холестериновые, содержащие муциновое ядро с аморфными органическими и неорганическими кальцификатами; 2 – черные пигментные с преобладанием аморфного билирубината кальция и кристаллического фосфата кальция; 3 – черные пигментные камни с выраженной кристаллизацией фосфата кальция. По данным РФА, концентрические слои состоят из холестерина в двух кристаллических модификациях –  $C_{27}H_{48}O_2$  и  $C_{27}H_{46}O_2$ . Отсутствие дифракционных рефлексов неорганических кальцификатов на рентгенограммах свидетельствует об аморфном состоянии кальцифицированных включений в их пигментированных ядрах. РФЛА выявил в пигментных билирубиновых камнях высокое содержание кальция, фосфора и серы. РФА зафиксировал диффузные максимумы аморфных билирубинсодержащих фаз и кристаллический трикальций фосфат  $Ca_3(PO_4)_2$  со структурой типа витлокита, который чётко проявляется на изображениях РМТ в виде выраженных массивных и слоистых отложений с высокой рентгеновской плотностью. Высокие содержания билирубината кальция, кристаллического фосфата кальция и серосодержащих органических соединений в пигментных камнях позволяют отнести их скорее к типу черных камней [1].

Выявленные особенности состава и структуры смешанных/холестериновых и пигментных/черных камней позволяют предположить, что их формирование у одного пациента стало возможным вследствие локальных и временных колебаний физико-химических параметров желчи, в частности pH среды, отражающих разнообразие патогенетических механизмов. Такой результат весьма затруднительно получить с использованием лишь одного диагностического метода, что подчёркивает важность комплексного подхода к анализу желчных камней при атипичном течении холелитиаза.

## **Благодарности**

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ "Курчатовский институт". Рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы выполнены с использованием оборудования ЦКП "Структурная диагностика материалов" КККиФ НИЦ "Курчатовский институт".

[1] Vítek L. et al. Clin. Res. Hepatol. Gastroenterol. 2012;36(2): 122–129. doi:10.1016/j.clinre.2011.08.010

# Резонансно-аномальная рефлектометрия пространственного распределения рубидия у поверхности кремнезоля

Ю.О. Волков<sup>1,3</sup>, А.М. Тихонов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт физики твердого тела им. Ю.А.Осипьяна РАН, Черноголовка, Россия

В работе по данным резонансно-аномальной рентгеновской рефлектометрии с использованием синхротронного излучения в окрестности К-края поглощения атома рубидия ( $\approx 15.21$  кэВ) изучено распределение ионов  $Rb^+$  в приповерхностном слое кремнеземного гидрозоля (коллоидного водного раствора наночастиц  $SiO_2$  с характерным размером 27 нм). Экспериментальные кривые были измерены на станции X19C синхротрона NSLS (Брукхэвен, США) [1] при энергиях фотонов 15.0 кэВ ( $\lambda \approx 0.825$  Å) и 15.3 кэВ ( $\lambda \approx 0.810$  Å).

Метод резонансно-аномальной рефлектометрии [2] основан на зависимости фактора атомного рассеяния от энергии зондирующего излучения:  $f(q,E) = f_0(q) + f'(q,E) + if''(q,E)$ . При этом нерезонансная часть структурного фактора  $F_0(q)$  (пропорциональная распределению электронной плотности  $\rho_e(z)$  на межфазной границе) может быть рассчитана путем решения обратной задачи рефлектометрии для опорной кривой отражения  $R_0(q)$  [3], тогда как резонансная часть  $\delta F(q,E)$  (и распределение резонирующего элемента  $C_v(z)$  по глубине) рассчитывается соотношению кривых отражения  $R(q,E)/R_0(q)$ , измеренных под и над краем поглощения искомого атома.

Оценочная поверхностная концентрация ионов  $Rb^+$  в приповерхностном слое составила  $\approx 4 \times 10^{18}$  м<sup>-2</sup>, при толщине обогащённого слоя  $\approx 20$  Å, что согласуется с оценками избыточной концентрации рубидия в изученной системе, полученным в предыдущих работах [4]. Также предложена качественная модель распределения ионов  $Rb^+$  по глубине.

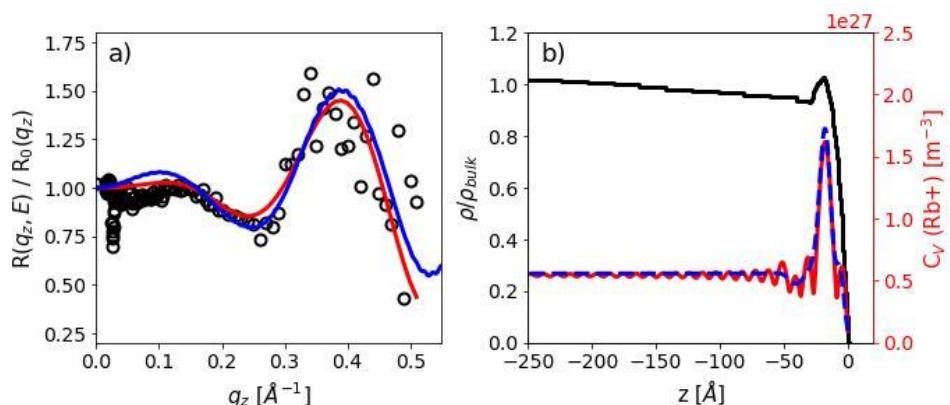


Рис 1: а) Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) распределения  $R(q,E)/R_0(q)$ . б) Расчетные профили  $\rho_e(z)$  кремнезоля (черная линия) и концентрации  $Rb^+$  (цветные линии).

## Благодарности

Расчетно-методическая часть работы выполнена в рамках Соглашения № 075-15-2025-458 с Министерством науки и высшего образования РФ. Теоретическая часть работы выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-00200).

[1] M.L. Schlossman, D. Synal, Y. Guan, M. Meron et al., Rev. Sci. Instrum. **68**, 4372 (1997).

[2] P. Fenter, C. Park, K.L. Nagy, and N.C. Sturchio, Thin Solid Films **515**, 5654 (2007).

[3] I.V. Kozhevnikov, NIMA **508**, 519 (2003).

# **Перспективные отечественные космические проекты для прогноза космической погоды.**

С.В.Кузин

*ИКИ РАН*

В настоящее время сильно выросли требования к повышению достоверности прогнозирования состояния космической погоды (КП). Это связано с несколькими факторами: развитием космической группировки, миниатюризацией космической техники и обусловленной этим снижение ее радиационной стойкости, интенсификацией межпланетных перелетов, повышением надежности работы и точности работы систем спутниковой навигации и т.п.

Поскольку в основном КП определяется активными процессами, происходящими в верхних слоях Солнца, то результаты мониторинга этих процессов являются основой для практических всех типов прогноза – от краткосрочного до долгосрочного. Поскольку в разные типы прогноза дают вклад разные проявления активности Солнца, то для полноценных прогнозов необходим комплексный мониторинг. Необходимо отметить, что солнечная активность наиболее заметно проявляется в короне, наблюдения которой проводятся в основном в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах спектра. Ввиду поглощения коротковолнового излучения атмосферой Земли, такие наблюдения возможны только с борта космических аппаратов.

В настоящее время в мире отсутствуют специализированные обсерватории для наблюдения Солнца как источника КП. Требуемые данные получают с комплекса аппаратуры, установленных на метеорологических космических аппаратах (например, GOES, США, ЭЛЕКТРО-Л, Россия) или с научных обсерваторий (SOHO, ЕС/США, SDO, США).

В настоящее время сейчас в России прорабатываются 2 специализированных солнечных обсерватории для прогноза КП – «Зонд» и «Геофизика-Либрация», и платформа с солнечной ориентацией на метеорологическом космическом аппарате «Электро-М».

Все три солнечных комплекса имеют набор аппаратуры, обеспечивающий получение данных для краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогноза КП. В состав аппаратуры входят: телескопы ВУФ диапазона, коронографы ВУФ, УФ и оптического диапазона, рентгеновский телескоп и рентгеновский спектрофотометр. В комплекс аппаратуры «Геофизика-Либрация» дополнительно входят 2 оптических прибора – оптический радиометр для измерения солнечной постоянной и магнитограф для построения карты магнитного поля на фотосфере.

Эти 3 КА имеют разные орбиты, которые диктуют специфику работы комплекса для оперативного получения данных. Предложено так же повысить эффективность работы этих комплексов за счет установки миниатюрных копий этих приборов на малые космические аппараты типа «кубсат».

В докладе представлен предварительный приборный состав солнечных комплексов, их устройство и характеристики, а также специфика работы в зависимости от космического аппарата, на который они установлены.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-72-30002).

# Компактный светосильный спектрограф на основе дифракционной VLS-решетки для диапазона 3-20 нм

С. С. Морозов<sup>1\*</sup>, С. А. Гарахин<sup>1</sup>, М. В. Зорина<sup>1</sup>, Б. А. Уласевич<sup>1</sup>, Н. И. Чхало<sup>1</sup>, Д. Г. Рейнов<sup>1</sup>, М. Ю. Знаменский<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

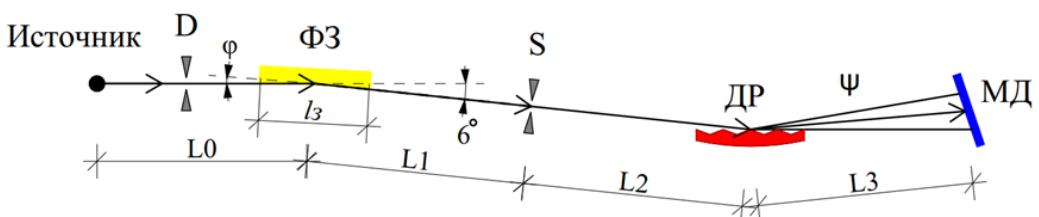
<sup>2</sup>АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», ул. Липатова, д. 2, г. Казань, Татарстан, 420075

\*morozov\_sv@ipmras.ru

Компактный спектрограф высокого разрешения позволяет решать широкий круг научных задач, связанных со спектрометрией в мягком рентгеновском (МР) и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах длин волн, как в лабораториях, так и на установках класса Мега-сайнс. Наиболее широким классом задач, решаемых с помощью таких приборов, является диагностика плазмы, в части измерения спектров излучения из плазмы, получаемой как при лазерном, так и электрическом пробое [1]. Так же такой класс приборов может применяться, в том числе и на синхротронах для анализа неупругих процессов при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом. В этом случае, например для изучения процессов, связанных с возбуждением фононов энергетическое разрешение должно быть на уровне 0,01 эВ, для рассеяния на магнонах – 0,1 эВ, межзонные переходы – 1 эВ и плазмоны – 10 эВ. В окрестности 100 эВ соответствующее спектральное разрешение прибора лежит в диапазоне  $10^{-4}$ - $10^{-1}$ . Для спектроскопии плазмы, где требуется надежно идентифицировать линии ионов различной кратности ионизации, или определить материал иона достаточно разрешение на уровне нескольких единиц на  $10^{-3}$ .

В данной статье описывается оптическая схема, характеристики и конструкция разрабатываемого в настоящее время в ИФМ РАН спектрографа. Также в работе приведены результаты измерений спектров созданных в лабораториях ИФМ РАН лазерно-плазменных источников мягкого рентгеновского излучения. Особенностями данного спектрографа, по сравнению с одним из наиболее совершенных представителей такого класса приборов [2], являются:

- единая платформа, на которой собраны все рентгенооптические элементы, и малые габаритные размеры, что позволяет его встроить внутрь прибора, например, установить на плече гoniометра вместо детектора в рефлектометр, описанный в, для анализа спектра отраженного от образца излучения;
- наличие на входе фокусирующего зеркала, кратно увеличивающего приемную апертуру спектрографа, зеркало и прибор целиком могут настраиваться в широком диапазоне расстояний до исследуемого объекта;
- для автономного использования спектрограф собран внутри одной вакуумной камеры, с фланцем с проходным диаметром 100 мм для откачки турбомолекулярным насосом, что



крайне актуально при исследовании ионов тяжелых газов, где поглощение в газе может кардинально повлиять на интенсивность линий и форму спектра в целом.

#### Рис. 1. Оптическая схема спектрографа

D – диафрагма,  $\phi$  – угол падения излучения на зеркало,  $l_3$  – фокусирующее зеркало,  $L_0$  – расстояние от источника излучения до зеркала,  $L_1$  – расстояние фокусировки зеркала  $l_3$ , S – щель,  $L_2$  – расстояние от щели до дифракционной решетки,  $L_3$  – расстояние от решетки до детектора,  $\psi$  – угол дифракции, МД – плоскость матрицы детектора.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках гос. задания № FFUF-2024-0022.

- [1] Rev. Sci. Instrum. 91, 063103 (2020); <https://doi.org/10.1063/1.5144489> Submitted: 30 December 2019 . Accepted: 05 June 2020 . Published Online: 23 June 2020
- [2] М. В. Зорина, С. А. Гарахин, А. О. Колесников, Е. Н. Рагозин, А. А. Соловьев, А. Н. Шатохин, “Транспортабельный спектрограф с плоским полем для мягкого рентгеновского диапазона”, Квантовая электроника, 54:1 (2024), 58–62 [Bull. Lebedev Physics Institute, 51:suppl. 4 (2024), S337–S344]

# Разработка метода двухстадийного ионно-пучкового формирования асферичных неосесимметричных оптических поверхностей

Чернышев А.К.<sup>1,\*</sup>, Пестов А.Е.<sup>1</sup>, Михайленко М.С.<sup>1</sup>, Чхало Н.И.<sup>1</sup>, Артюхов А. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул.Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680

[\\*chernyshev@ipmras.ru](mailto:*chernyshev@ipmras.ru)

В настоящее время активно развиваются методы высокоточного формообразования оптических поверхностей для МР (мягкого рентгеновского) и ЭУФ (экстремального ультрафиолетового) диапазонов длин волн. Одним из наиболее перспективных методов прецизионного изготовления оптических элементов является ионно-пучковая обработка, основанная на физическом распылении атомов подложки под действием ионной бомбардировки. Этот метод позволяет формировать оптическую поверхность практически любой формы с точностью формы и шероховатостью, достигающими единиц ангстрем. Ионно-пучковую обработку условно можно разделить на два класса: коррекция локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком и осесимметричная обработка широкоапертурным ионным пучком.

Коррекция локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком находит широкое применение в качестве финишной процедуры при изготовлении высокоточной оптики. Однако, как было показано в работе [1], в ходе локальной коррекции малоразмерным ионным пучком на поверхности могут оставаться детерминированные структуры с латеральным размером  $d \approx D/2$ , где  $D$  — характерный размер пучка. Для повышения точности обработки необходим метод, обеспечивающий непрерывное и однородное воздействие на всю обрабатываемую деталь, что позволило бы исключить возникновение подобных детерминированных структур.

Оссесимметричная обработка широкоапертурным ионным источником позволяет обрабатывать всю заготовку. Благодаря непрерывному и равномерному вращению заготовки, а также использованию гладкой формирующей диафрагмы, данный процесс не приводит к формированию высокочастотных детерминированных структур на поверхности. Однако, область применения данного метода ограничена созданием осесимметричных поверхностей.

В данной работе предлагается возможная модификация метода обработки широкоапертурным ионными источником для формирования поверхностей произвольной формы, в том числе неосесимметричных.

Рассмотрим подробнее процедуру осесимметричной обработки поверхности широкоапертурным источником. В процессе обработки заготовка вращается за диафрагмой, которая перекрывает часть ионного пучка; это позволяет получить требуемое осесимметричное распределение глубины травления по поверхности — профиль травления  $H(r)$ . Профиль травления может быть описан следующим выражением (1):

$$H(r) = \frac{N}{2\pi r \omega} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{etching}(r, \varphi) r d\varphi \quad (1)$$

Где,  $H(r)$  — радиальное распределение глубины травления;  $v_{etching}(r, \varphi)$  — распределение скорости травления;  $2\pi r$  — полная длина дуги на радиусе  $r$ ;  $\alpha(r)$  и  $\beta(r)$  — углы, ограничивающие дугу открытой части диафрагмы на радиусе  $r$ ;  $N = \text{const}$  — число оборотов

заготовки, необходимое для достижения требуемого  $H(r)$  (одинаково для всех  $r$ );  $\omega$  — постоянная угловая скорость вращения. Функции  $\alpha(r)$  и  $\beta(r)$  задают форму диафрагмы в полярных координатах. Функции, задающие открытую часть диафрагмы,  $\alpha(r)$  и  $\beta(r)$ , могут быть симметричными, т.е.  $\alpha(r) = -\beta(r)$ . Установка диафрагмы, перекрывающей часть ионного пучка, приводит к тому, что ионы из заблокированных областей не достигают обрабатываемой детали, что позволяет независимо регулировать глубину травления для каждого радиуса. Таким образом, расчет диафрагмы сводится к нахождению пределов интегрирования  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых значение интеграла (1) совпадает с требуемой для данного радиуса глубиной травления. Благодаря такому подходу можно рассчитать форму диафрагмы для любого заранее заданного осесимметричного профиля травления.

Принципиальное ограничение стандартного метода — возможность формирования только осесимметричных профилей — может быть снято за счёт перехода от равномерного вращения заготовки к управляемому неравномерному. В этом случае распределение глубины травления описывается более сложным интегральным выражением, учитывающим зависимость угловой скорости от угла  $\phi$ :

$$H(r, \varphi) = \frac{N}{2\pi r} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} \frac{v_{etching}(r, \varphi')r}{\omega(\varphi - \varphi')} d\varphi' \quad (2)$$

Анализ показывает, что при выполнении условий медленности изменения  $\omega(\varphi)$  на угловом размере открытой дуги диафрагмы, выражение (2) может быть представлено в виде произведения радиальной и азимутальной компонент:

$$H(r, \varphi) = \frac{N}{2\pi r} \cdot \frac{1}{\omega(\varphi)} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{etching}(r, \varphi')rd\varphi' = G(\varphi) \cdot F(r) \quad (3)$$

В выражении (3) радиальная компонента определяется исключительно формой диафрагмы, а азимутальная компонента определяется только законом изменения скорости вращения. Данное приближение является центральным для предлагаемого метода, поскольку прямое разделение переменных позволяет независимо формировать радиальную и азимутальную зависимости профиля. Это, в частности, открывает путь к формированию полного базиса полиномов Цернике, которые по определению факторизуются аналогичным образом (4).

$$Z_n^m = \begin{cases} R_n^m(\rho) \cdot \cos(m\varphi) \\ R_n^m(\rho) \cdot \sin(m\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом переход к управляемому неравномерному вращению позволяет получить факторизованное распределение травления (3), что является физической основой для расширения метода на формирование неосесимметричных поверхностей, включая полный базис полиномов Цернике для компенсации aberrаций.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-62-00068)

## Литература

- [1] Zhou L. et al. //Key Engineering Materials, v.364, pp. 470-475 (2008).

# **Твердотельный лазерно-плазменный источник нового поколения, разработанный в ИФМ РАН**

Девятайкин И.С.<sup>\*</sup>, Гарахин С.А., Морозов С.С., Чхало Н.И

Институт физики микроструктур РАН. ГСП-105, г. Нижний Новгород

*\*aliariand@a-alicorn.ru*

Актуальность лабораторных источников XEUV-излучения обусловлена их значимостью для развития науки, техники и технологий. Эти источники находят применение в различных областях, включая рефлектометрию элементов рентгеновской оптики, что важно для улучшения характеристик рентгеновских оптических систем.

В спектр задач рентгеновской рефлектометрии входят исследования ультратонких слоев и наноструктур, направленные на определение их толщины, шероховатости и плотности. Для обеспечения высокой точности измерений, которая должна составлять не менее 0,1-0,2% по абсолютной величине коэффициента отражения необходима высокая стабильность и яркость источника.

Для выполнения задач рефлектометрии в ИФМ РАН ранее уже был разработан твердотельный ЛПИ [1]. Однако, растущие требования к точности рефлектометрических измерений создали необходимость в источнике с большей яркостью и стабильностью.

Изначальная система оптического ввода представляла из себя Nd:YAG лазер ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ), делитель пучка, призму и короткофокусную линзу внутри вакуумного объема камеры источника. Данная схема обеспечивала высокую стабильность сигнала (амплитуда шероховатости мишени была на уровне 30 мкм) и приемлемую продолжительность работы одной мишени (400 минут). Однако эта схема требовала входной щели размером 50 мкм для достижения высокой точности измерений. Это связано с минимальным размером пятна фокусировки (~100 мкм) для достижения качества 0.3 Å, однако использование щели уменьшало общую эффективность источника. Кроме того, немобильность фокусирующей линзы, ввиду ее нахождения в вакуумном объеме, а также наличие вероятности повреждения оптических элементов системы обратным излучением делали процесс настройки и калибровки прибора время затратным.

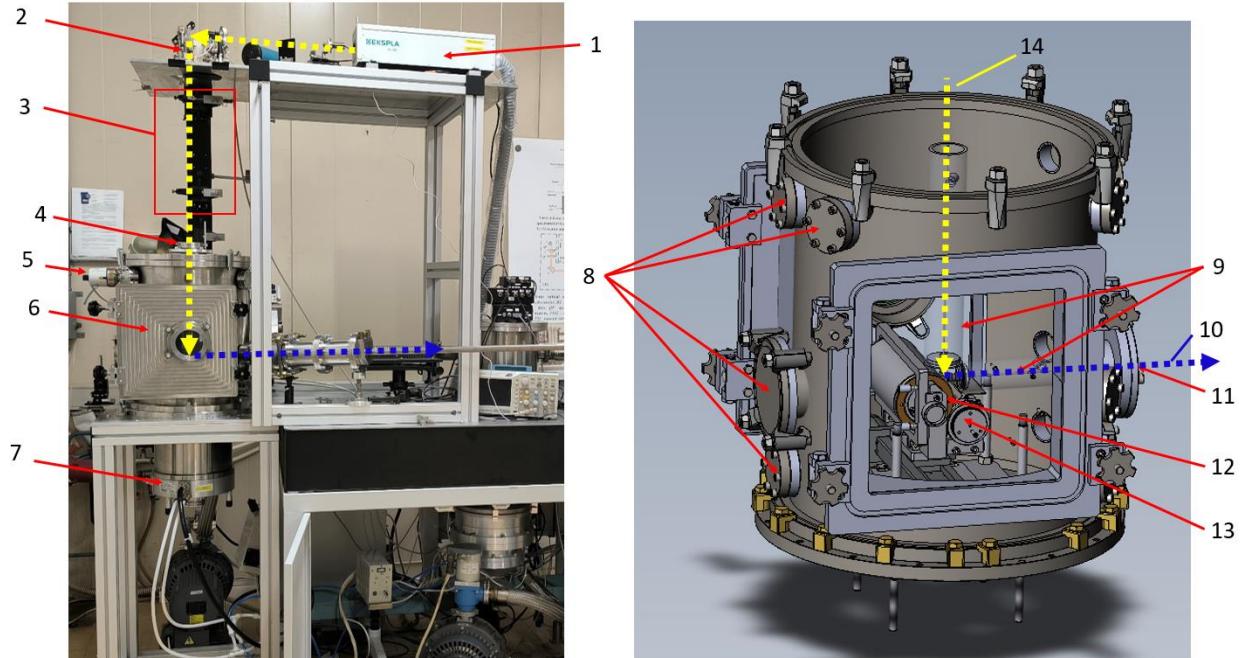
Модернизированный лазерно-плазменный источник должен быть простым в настройке и обслуживании, размер рентгеновского источника не более 60 мкм, обеспечивать высокую производительность и узкополосное монохроматическое излучение с интенсивностью более  $10^6$  фотонов в секунду на выходе монохроматора. Относительная величина флуктуаций должна составлять не более 0,1%. Эти характеристики позволят отказаться от использования входной щели для ограничений размеров источника и повышения разрешения и стабильности. Отказ от входной щели позволит увеличить поток фотонов, попадающих в монохроматор, что положительно скажется на точности измерений.

Для выполнения данной работы были поставлены следующие задачи: разработка фокусирующей системы, создание системы вращения и геометрии мишени, разработка нового вакуумного объема с системой защиты от эрозии мишени.

Фокусирующая система позволила уменьшить размер пятна фокусировки до 25 мкм, исключить возможность повреждения оптических элементов обратным излучением.

Новая планетарная система вращения и увеличенные размеры мишени позволили увеличить время выработки мишени с 14 до 170 часов. Амплитуда колебания при вращении мишени составляет 5 мкм, что увеличит стабильность источника. Кроме того, удобный механизм замены мишени, не требующий юстировки, позволил уменьшить настройку прибора с трех дней до пары часов.

Разработанный вакуумный объем представляет собой цилиндрическую камеру (рис.1) с диаметром 40 см, оснащенную собственной системой откачки и имеющую 8 фланцев для проведения экспериментов по исследованию свойств ЛПИ. Для обеспечения долговечности и стабильности источника, система оснащена защитой от осаждения продуктов эрозии мишени на оптические элементы. Защита состоит из неодимовых магнитов и газовых потоков, которые совместно отклоняют и рассеивают потоки плазмы, предотвращая её оседание на критически важные компоненты.



**Рис 1.** Изображение ЛПИ. 1 - Nd:YAG лазер ( $\lambda = 1064$  nm); 2 - призма; 3 - расширитель пучка; 4 - длиннофокусная линза; 5 - датчик давления; 6 - вакуумная камера; 7 - система откачки (турбомолекулярный и форвакуумный насосы); 8 - дополнительные фланцы; 9 - защитные кожухи; 10 - траектория рентгеновского излучения; 11 - оптический вывод; 12 - твердотельная цилиндрическая мишень; 13 - механизм движения мишени; 14 - направление лазерного импульса

Были проведены исследования по изучению свойств ЛПИ. Получили, что спектральная интенсивность составляет свыше  $10^7$  фотон в импульсе в 0,1 нм в рабочей апертуре на длине волны 13,5 нм. Изучены спектры. Стабильность источника по среднеквадратичному отклонению (RMS) составляет 0,32% на временном диапазоне 50 минут. Размер рентгеновского источника был исследован с помощью микроскопа Шварцшильда с пятикратным увеличением на длине волны 11,2 нм и составил 50 мкм.

ЛПИ активно применялся в рефлектометрии на основе рефлектометра Черни-Тернера. Таким образом, были сняты спектральные зависимости коэффициентов отражения по угловой характеристике и по длинам волн. Исследованы угловые зависимости отражения пленки в широком диапазоне (5-50°).

В настоящее время разработанный ЛПИ активно используется в рефлектометрии.

Работа выполнена в рамках РНФ 21-72-20108 П

### Литература

- [1] С.А.Гарахин, И.Г.Забродин, С.Ю.Зуев, А.Я.Лопатин, А.Н.Нечай, А.Е.Пестов, А.А.Перекалов, Р.С.Плещков, В.Н.Полковников, Н.Н.Салащенко, Р.М.Смертин, Н.Н.Цыбин, Н.И.Чхало, “Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6.6–32 нм мишени из нержавеющей стали при импульсном лазерном возбуждении”, ЖТФ, **91**:10 (2021), 1448–1453

# **От исследования эффективности дифракционных решеток в конической дифракции до метрологии шаблонов и электронных чипов с топологией 1–30 нм**

*Л.И. Горай*

Развитие технологий полупроводниковой промышленности следующего поколения обуславливает необходимость применения современных методов контроля параметров топологии электронных схем, в т.ч. критических размеров (CD), однородности материалов и шероховатости. Особенно эти проблемы становятся актуальными при изготовлении шаблонов для высокоапертурной проекционной литографии экстремального УФ (ЭУФ) диапазона и за его пределами (EUVL, BEUVL) и экспресс-контроле поверхности и слоев миллионов чипов памяти, записываемых с уменьшением и сдвигом изображений.

По сравнению с любыми микроскопическими методами, коротковолновая оптическая скаттерометрия (КОС) может одновременно иметь высокое пространственное разрешение (0.1–10 нм) и большие поля обзора (0.1–10 мм), что позволяет достаточно быстро и надежно отслеживать CD и анализировать их однородность. Анализ интенсивности рентгеновского рассеяния в условиях нормального и скользящего падения с использованием синхротронных или лабораторных, в т.ч. плазменно-лазерных источников когерентного или частично-когерентного излучения и решение обратной задачи рассеяния позволяет определять морфологию анализируемых структур и состав их материалов с высокой точностью, а также субсекундным времененным разрешением. КОС представляет собой метод интегральной метрологии, обеспечивающий усреднение значения электронной плотности, CD и шероховатости по большому размеру пятна наблюдения в определенной проекции. К КОС относится и один из самых используемых сегодня метрологических методов – скользящее малоугловое рентгеновское рассеяние (GISAXS) [1, 2].

В общепринятом подходе для характеризации чипов с различной 3D топологией элементов используются записанные в техпроцессе одно- и би-периодические дифракционные решетки с трапециодальной формой профиля штрихов, в т.ч. многослойные, обладающие соответствующими линейными и угловыми размерами и различной шероховатостью. Для анализа однопериодических решеток используются, в основном, схемы падения зондирующего излучения вдоль штрихов (коническая дифракция [2–5]), а для би-периодических – общая схема 3D дифракции, описываемая двумя углами падения и двумя углами поляризации. С помощью точного или приближенного решения сложных обратных задач на решетках методом КОС оценивается пригодность маски или чипа (фрагмента) для дальнейшего процессинга, а также возможности уменьшения CD и улучшения качества литографии. Существенные 3D-эффекты маски в ЭУФ-литографии снижают точность изображения и вызывают смещение шаблона относительно фокуса. В частности, сложное взаимодействие между электромагнитными волнами и 3D-структурами маски значительно влияет на комплексную амплитуду дифракционного поля маски в ближней зоне. Другие эффекты, такие как aberrация и блики, также могут повлиять на качество литографического изображения.

1. W. Wu, R. J. Kline, R. L. Jones, H.-J. Lee, E. K. Lin, D. F. Sunday, C. Wang, T. Hu, C. L. Soles "Review of the key milestones in the development of critical dimension small angle x-ray scattering at National Institute of Standards and Technology," *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology* 22(3), 031206 (3 April 2023).
2. K.V. Nikolaev, L.I. Goray, P.S. Savchenkov, A.V. Rogachev, A.A. Chouprik, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, A.D. Buravlev, S.N. Yakunin, "Conical diffraction of the synchrotron beam to probe the efficiency and morphology of blazed gratings," <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.23513>.
3. L. Goray, W. Jark, and D. Eichert, "Rigorous calculations and synchrotron radiation measurements of diffraction efficiencies for tender X-ray lamellar gratings: conical versus classical diffraction," *J. Synchrotron Radiation*, vol. 25, no. 6, p. 1683–1693, 2018.
4. H. Marlowe, R. L. McEntaffer, C. T. Deroo, D. M. Miles, J. H. Tutt, L. I. Goray, F. Scholze, A. Herrero, F. C. Laubis, and V. Soltwisch, "Modeling and empirical characterization of the polarization response of off-plane reflection gratings," *Applied Optics*, vol. 55, no. 21, p. 5549–5553, 2016.
5. J. F. Seely, L. I. Goray, B. Kjornrattanawanich, J. M. Laming, G. E. Holland, K. A. Flanagan, R. K. Heilmann, C.-H. Chang, M. L. Schattenburg, and A. Rasmussen, "Efficiency of a grazing incidence off-plane grating in the soft X-ray region," *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 8, p. 1680–1687, 2006.

# РАЗРАБОТКА ПОЛНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОГРАФОВ И МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

<sup>1</sup>\*Скобляков А.В., <sup>1</sup>Колесников Д.С., <sup>1</sup>Канцырев А.В., <sup>1</sup>Голубев А.А.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва  
[\\*dinAlt220@yandex.ru](mailto:dinAlt220@yandex.ru)

В работе разработаны уникальные многофакторные Монте-Карло модели дифракционных спектрографов скользящего падения GIS, GIS-3D, VUV-QFF и кристаллического спектрографа JA-1, использующиеся на мега-амперной установке Ангара 5-1 (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк), позволяющие на принципиально новом уровне проводить численное моделирование работы спектрографов с отражательной дифракционной решеткой (ДР) и кристаллом слюды. На основе моделей спектрографов разработаны методы восстановления исходных спектров экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) и мягкого рентгеновского излучения (МР) [1,2,3] плазмы.

Основными проблемами, препятствующими достоверному качественному и количественному восстановлению ЭУФ и МР спектров излучения плазмы Z-пинча, является наложение сигналов от разных порядков дифракции и зависимость распределения интенсивности излучения в различные порядки дифракции от длины волны после взаимодействия излучения с ДР и кристаллом слюды. В разработанных моделях спектрографов, для учета процессов взаимодействия ЭУФ с ДР и МР с кристаллом спектрографа используются дифференциальный метод и динамическая теория дифракции.

Разработаны два оригинальных метода восстановления исходных спектров излучения плазмы мега-амперного Z-пинча установки Ангара 5-1:

1) Быстрый однопроходный метод восстановления исходных спектров ЭУФ излучения плазмы учитывающий вклад различных порядков дифракции в сигнал спектрограмм и основанный на дифференциальном методе решения задач дифракции на периодических структурах [2].

2) Метод восстановления исходных спектров излучения плазмы с использованием рассчитанной аппаратной функции спектрографа, учитывающий уширение спектральных линий [1] в плоскости регистрации спектрографа.

С использованием разработанных методов выполнено восстановление спектров плазмы Z-пинч на установке Ангара 5-1:

1) Восстановлены спектры излучения плазмы Z-пинча с цилиндрическими W нагрузками. Показано, что максимум излучения лежит в диапазоне 5-6 нм, что соответствует массиву не разрешаемых переходов 4d-4f в ионах W [1,2].

2) Определены коэффициенты пропускания ЭУФ излучения Al и In в диапазоне 2-30 нм [2].

3) Разработана методика определения формы профилей штрихов дифракционных решеток на основе информации из экспериментально зарегистрированных спектрограмм ЭУФ излучения [2].

4) Восстановлен спектр МР излучения плазмы Z-пинча в диапазоне длин волн меньше 10 Å, полученного с помощью кристаллического спектрографа JA-1 в экспериментах с нагрузкой состоящей из Al проводников с вложенными W проводниками [3].

## Литература

- [1]. A.V. Skobliakov, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, I.V. Rudskoi, A.N. Gritsuk, E.V. Grabovskii, K.N. Mitrofanov, G.M. Oleinik, 2023, Plasma Phys. Rep. 49(6), 700-717.
- [2]. A.V. Skobliakov, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, M.V. Ilyicheva, A.N. Gritsuk, E.V. Grabovskii, The Review of scientific instruments, 2023, 94(11), 113102
- [3]. A.V. Skobliakov, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, A.N. Gritsuk, G.S. Volkov, E.V. Grabovskii, Reconstruction of Z-pinch emission spectra in the wavelength range of less than 10 Å using a crystal X-ray spectrograph, Rev. Sci. Instrum., 1 July 2024, 95 (7), 073101, <https://doi.org/10.1063/5.0212101>

## **Состояние дел по проекту отечественного рентгеновского литографа**

Чхало Н.И.<sup>1,\*</sup>, Паульс В.В.<sup>1</sup>, Барышева М.М.<sup>1</sup>, Малышев И.В.<sup>1</sup>, Нечай А.Н.<sup>1</sup>, Полковников В.Н.<sup>1</sup>, Абрамов И.С.<sup>2</sup>, Дружин В.В.<sup>3</sup>, Петрова Д.В.<sup>4</sup>, Терентьев А.А.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, г. Н. Новгород, ул. Академическая, д. 7

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Н. Новгород, ул. Ульянова , д.46

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1

<sup>4</sup> ООО «Поликетон», г. Н. Новгород, ул. Батумская, д. 7а

<sup>5</sup> ООО «Скоростные системы связи», г. Н. Новгород, ул. Нартова, д. 6 корп. 6

\*chkhalo@ipmras.ru

В предыдущих работах, например [1], сообщалось о преимуществах и перспективах литографии на новой длине волны 11.2 нм. Приводились данные об имеющихся в России научно-технологических заделах для успешной разработки такого литографа, отмечалось практически полное отсутствие заделов в области высокоточных столиков, работающих на принципах магнитной левитации. Приводилась Дорожная карта развития проекта рентгеновского литографа на этой длине волны.

В данной работе сообщается об основных результатах, полученных за последний год рядом организаций в рамках реализации совместного проекта, посвященного разработке технического облика и ключевых элементов отечественного литографа с рабочей длиной волны 11.2 нм. Был получен ряд новых результатов. Выполненные теоретические расчеты и проведенные эксперименты указывают на хорошие перспективы получения высоких коэффициентов конверсии лазерного излучения в рентгеновское при возбуждении сверхзвуковой струи ксенона. Были созданы научные заделы по магнито-левитирующими столикам, указывающие на готовность коллектива авторов к созданию макета столика. Разработанная математическая модель функционирования рентгеновского литографа позволила установить взаимосвязь параметров ключевых элементов литографа с его основными характеристиками: разрешением и производительностью литографического процесса. Подтверждена долговременная стабильность рентгенооптических характеристик Ru/Be многослойных зеркал, являющихся основой проекта. Одним из важнейших результатов этой работы стало новое понимание потенциальной роли разрабатываемого литографа для развития литографии в целом. Это понимание привело к существенному изменению ранее представленной Дорожной карты.

[1]. Н. И. Чхало. Новая концепция развития высокопроизводительной рентгеновской литографии. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, 2024, том 53, № 5, с. 375–388.

# **Цифровое прототипирование проекционного рентгеновского литографа**

В.Паульс

*Институт физики микроструктур РАН, 603950, г. Н. Новгород, ГСП-105  
walter.pauls@gmail.com*

Современные проекционные литографы представляют собой технологически сложные установки с большим количеством разнородных компонентов, таких, как рентгенооптическая схема, состоящая из коллектора, осветительной системы и объектива, высокогенераторный лазер, лазерно-плазменный источник, координатные столы для пластин и фотошаблона, системы виброзащиты и другие. Ввиду высокой степени взаимосвязанности между этими компонентами, сложности их разработки, изготовления и сведения в единую систему целесообразно начинать прототипирование системы [1] уже на самом раннем этапе работы. В данной работе использовался подход, основанный на цифровом прототипировании, получивший, благодаря своей гибкости и доступности, широкое распространение.

В самом общем виде создание цифрового прототипа литографа подразумевает создание некоей математической модели, позволяющей (а) оценивать его базовые контрольные характеристики, такие как разрешение и производительность, в зависимости от выбранной конфигурации системы и ее качественных и количественных параметров; (б) обеспечивать ее целостность и облегчать согласование требований, налагаемых на всю систему и ее отдельные компоненты. В более сложном своем изводе, цифровой прототип позволяет также получить некоторое представление о процессном окне литографа в зависимости от технологических параметров процесса.

Построение цифрового прототипа рентгеновского литографа требует наличия, в том или ином виде, некоторой системной модели, которая представляет собой его структурированное представление, сконцентрированное на описании требований, предъявляемых к системе, ее поведения, структуры, свойств и взаимосвязей. На нынешнем этапе разработке цифрового прототипа прежде всего были приняты во внимание структурная и функциональная стороны системной модели литографа. При этом, задание системной архитектуры литографа, то есть, его разделения на отдельные компоненты и иерархии между этими компонентами, осуществляется в программе в основном через конфигурации, определяемые из файлов на языке разметки XML.

Что касается создания функциональной модели литографа, следует отметить, что полноценное моделирование его отдельных компонент, таких, как осветительная схема, объектив или фотошаблон может потребовать весьма сложных и трудоемких вычислений с использованием высокоспециализированных, дорогостоящих, а иногда и просто недоступных программных пакетов. Поэтому на данный момент в цифровом прототипе с разной степенью детализации прописаны математические модели, описывающие процессы, непосредственно влияющие на производительность литографа, тогда как функционал отдельных компонентов часто описывается путем изолирования одного выбранного варианта реализации компоненты или представления работы отдельной взятой компоненты с помощью мета-функции, которая не определяет ее конкретной реализации [1].

Разработанный цифровой прототип рентгеновского литографа позволил установить взаимосвязь параметров ключевых элементов литографа с его основными характеристиками: разрешением и производительностью литографического процесса.

[1] B.A. Camburn et al. // 21st International Conference on Engineering Design, ICED17, pp.211–220 (2017).

# Исследование поглощения лазерного излучения плазмой, формируемой в газоструйной мишени Xe

## «Современная рентгеновская и нейтронная оптика - 2025»

В.Е. Гусева, В. И. Лучин, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов\*, Н. И. Чхало

*Институт физики микроструктур РАН, 603087, Нижний Новгород, Россия*

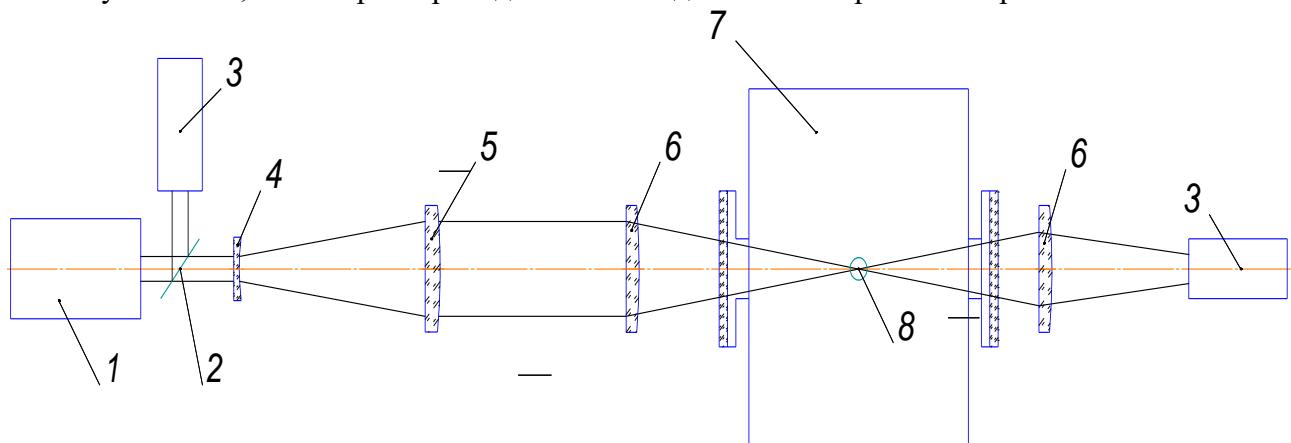
\*[perekalov@ipmras.ru](mailto:perekalov@ipmras.ru)

### Введение

Лазерно-плазменный источник ЭУФ излучения с газоструйной мишенью Xe предполагается использовать в разрабатываемых ЭУФ литографах нового поколения, работающих в окрестности 11,2 нм [1]. В проведенных к настоящему времени исследованиях большое внимание уделялось эмиссионным спектрам и эффективности конверсии энергии лазерного излучения в энергию ЭУФ излучения. Исследования показали возможность получения коэффициента конверсии на длине волны 11,2 нм на уровне нескольких процентов [2]. Для разработки и оптимизации источника ЭУФ излучения высокой мощности важно изучить зависимость доли поглощаемой энергии лазерного излучения от параметров газовой струи, оценить оптическую толщину плазменного облака, поглощающего лазерное излучение, время и порог формирования пробоя мишени.

### Описание эксперимента

Схема установки, на которой проводились исследования изображена на рис. 1.



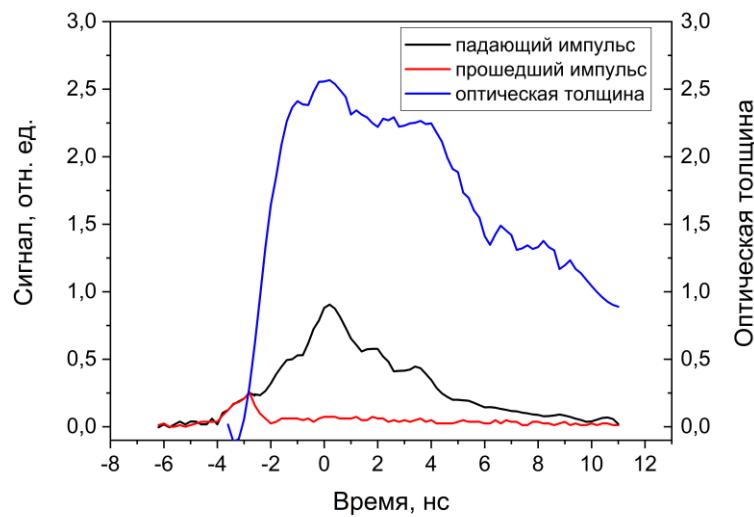
**Рис. 1.** Схема исследовательской установки. 1 – лазер, 2 – делительная пластина, 3 – p-i-n диод, 4 -рассевающая линза, 5 – собирающая линза, 6 – фокусирующая линза, 7 – вакуумная камера, 8 – лазерная искра.

Эксперименты проводились следующим образом. Излучение Nd:YAG лазера (1) с длительностью импульса 5,2 нс, энергией импульса 0.7 Дж проходит делительную пластинку 2, отклоняющую часть излучения в p-i-n диод 3, регистрирующий импульс лазерного излучения до области взаимодействия с мишенью. Прошедшее через делительную пластину излучение фокусируется в газовую струю – мишень с помощью трехлинзового объектива. Объектив состоит из рассеивающей линзы 4, собирающей линзы 5 и длиннофокусной фокусирующей линзы 6. В области взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с мишенью образуется лазерная искра 8. Излучение прошедшее через область взаимодействия с мишенью представляет собой расходящийся пучок, поэтому осуществляется его фокусировка с помощью дополнительной линзы 6 на p-i-n диод, регистрирующий импульс лазерного излучения после взаимодействия с мишенью.

Формирование газовой струи осуществлялось с помощью конического сверхзвукового сопла ( $d_{kp}=500$  мкм, угол раскрытия конуса  $9^\circ$ ). Сопло оснащено импульсным клапаном, работа которого синхронизирована с работой лазера. Для экспериментов использовался Хе, давление газа на входе в сопло изменялось от 3 до 12 бар. Р-і-п диоды подключались с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом к входу осциллографа с полосой пропускания 2 ГГц, сопротивление входа 50 Ом. Для каждого р-і-п диода дополнительно подбирались оптические фильтры, ослабляющие интенсивность попадающего на диод лазерного излучения таким образом, чтобы амплитуда сигнала с фотодиода была в диапазоне 0.1-1.5 В. Это необходимо для того, чтобы избежать искажений формы и длительности сигнала, связанных с выходом диода в нелинейный режим работы.

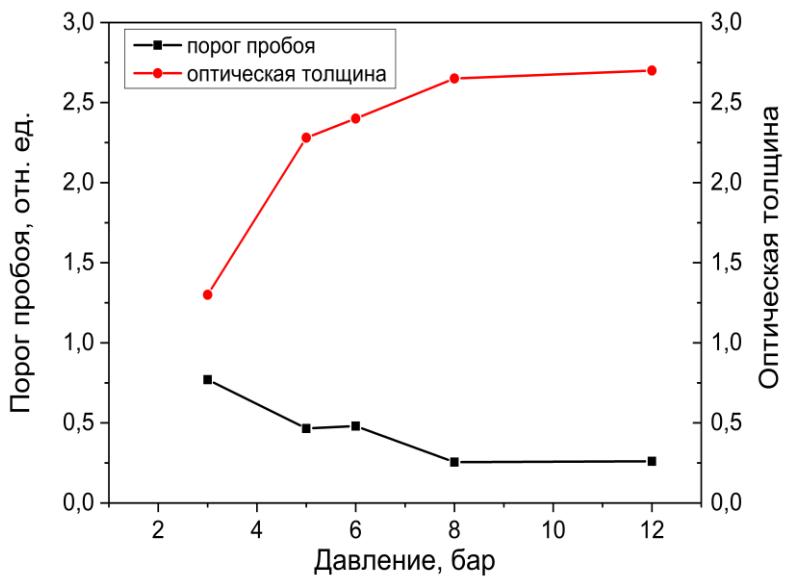
### Экспериментальные результаты

Для определения времени и порога образования плазменного облака совмещались импульсы падающего на газовую мишень и прошедшего лазерного излучения. Совмещение сигналов производилось по начальной стадии в предположении, что до пробоя газа форма прошедшего импульса не изменяется. Это предположение проверялось в отсутствии пробоя при допороговой интенсивности падающего излучения. На рис. 2 показаны импульсы, нормированные на максимальное значение лазерного сигнала. Здесь же приведена временная зависимость оптической толщины  $\eta$ , определенная по отношению интенсивностей прошедшего  $q$  и падающего излучения  $q_0$ :  $\eta = -\ln(q/q_0)$ . Время возрастания оптической толщины от начала пробоя до достижения величины, близкой к максимальной, составляет 0.8 нс. Заметим, что скорость роста  $\eta$  определяется как увеличением коэффициента поглощения  $k$ , так и изменением геометрической толщины  $d$  плазменного слоя: ( $\eta = k \cdot d$ ).



**Рис. 2.** Падающий и прошедший сквозь плазму лазерные импульсы и зависимость оптической толщины плазменного облака от времени.

Измерения порога пробоя и оптической толщины газовой мишени проведены при различном давлении газа на входе в сопло (3-12 бар). Под порогом пробоя в данном случае мы понимаем отношение сигнала р-і-п диода в момент, когда пробой сформирован I (в этот момент появляются существенные отличия между осциллограммами падающего и прошедшего лазерных импульсов) к сигналу в максимуме для падающего лазерного импульса ( $I_{max}$ ). Зависимости указанных величин от давления газа приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимости оптической толщины и порога пробоя от давления газа.

Как видно из представленных на рис. 3 зависимостей – при увеличении давления ксенона с 3 до 12 бар значение пороговой интенсивности пробоя уменьшается от  $0,8*I_{max}$  до  $0,3*I_{max}$ . При этом оптическая толщина плазменного облака, взаимодействующего с лазерным излучением, существенно увеличивается.

#### Заключение

В результате проведенных экспериментов определены время и порог образования плазменного облака в зависимости от давления газа на входе в сопло, а также временные зависимости оптической толщины плазмы на лазерной длине волн (1064 нм). Полученные данные могут быть полезны при построении моделей лазерно-плазменного источника ЭУФ излучения на длине волны 11,2 нм.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

[1] Чхало Н. И. // Микроэлектроника. Т. 53(5), С. 375-388 (2024).

[2] S. G. Kalmykov et al. //Journal of Applied Physics. V. 126(10), p. 103301 (2019).

# Угловое распределение ионных токов из лазерной плазмы Xe

В. Е. Гусева\*, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н. И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород

\*valeriegus@ipmras.ru

Лазерно-плазменные источники (ЛПИ) могут быть использованы в качестве источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения для различных применений, например, микроскопия или литография. Однако кроме генерации фотонов МР и ЭУФ диапазона лазерная плазма является источником ионов, электронов, нейтральных горячих частиц и фотонов других диапазонов. Для сбора МР и ЭУФ излучения используются многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ). Ионы, вылетающие из плазменного облака в направлении МРЗ, могут ухудшать их отражательную способность. Заряженные и нейтральные частицы из лазерной плазмы могут осаждаться на поверхности МРЗ, загрязняя их, или разрушать их многослойную структуру.

В докладе представлены результаты измерения тока заряженных частиц из лазерно-плазменного источника с газоструйной мишенью из ксенона. Для возбуждения использовался Nd:YAG лазер с длительностью импульса  $\tau = 7.8$  нс, энергией импульса  $E = 0.8$  Дж. Излучение лазера фокусировалось в пятно диаметром  $\sim 60$  мкм. Плотность мощности в области фокуса составила порядка  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для регистрации ионного тока использовались цилиндры Фарадея, расположенные на расстоянии 10 см от области лазерной искры под углами  $30^\circ - 130^\circ$  относительно оси лазерного луча и  $90^\circ - 135^\circ$  относительно оси сопла (см. рис. 1).

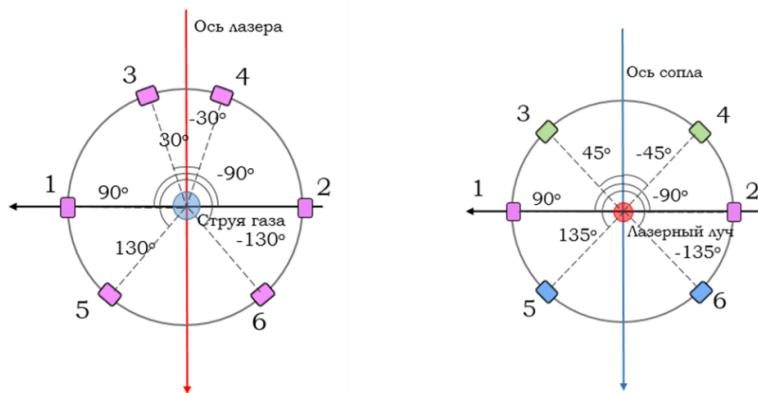


Рис. 1. Расположение цилиндров Фарадея.

С помощью цилиндров Фарадея удалось зарегистрировать энергетическое распределение заряженных частиц, вылетающих из лазерной искры в различных направлениях. Энергия ионов в различных направлениях составила порядка 50-100 эВ, что значительно меньше по сравнению с энергией ионов, регистрируемых при возбуждении капельных или твердотельных оловянных мишеней [1, 2]. Данный эффект можно объяснить тем, что периферийные части газовой струи-мишени являются также защитой от летящих ионов, замедляя их, аналогично буферному газу в капельных оловянных источниках.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

[1] Coons R. W. et al. Analysis of atomic and ion debris features of laser-produced Sn and Li plasmas //Journal of Applied Physics. – 2010. – Т. 108. – №. 6.

[2] Chen H. et al. Angular distribution of ions and extreme ultraviolet emission in laser-produced tin droplet plasma //Journal of Applied Physics. – 2015. – Т. 117. – №. 19.

# **Electrical Properties of Nanoparticle Contacts in YSZ Under Hydration and X-RAY Conditions**

***Ibrahim M.A<sup>1</sup>, Mezentseva Zh.V.<sup>1,2</sup>, Doroshkevich A.S.<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup> Institute of Materials Science, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

E-mail: [ibragim@jinr.ru](mailto:ibragim@jinr.ru)

With the progress in nanotechnology, it is essential to understand the properties of nanoscale materials for their use in modern electronics. A significant focus of this research is on the interactions between nanoparticles of the same chemical composition but different sizes, as variations in their electronic properties and surface potential influence the formation of contact barriers.

This study investigates the electrical properties of contacts formed between ZrO<sub>2</sub> nanoparticles (400-500°C) stabilized with 8 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8YSZ) under hydration and x-ray conditions. Thin films were created using monodisperse Nano powders with particle sizes of 7.5, 10, 11, and 14 nm. The electrical behavior of these films was examined using DC voltammetry, with measurements taken within a voltage range of -2 V to +2 V, and electrochemical impedance spectroscopy, covering frequencies from 1 MHz to 1 Hz. To ensure electrical continuity, the films were subjected to hydration and x-ray at 20kev for eight hours under controlled humidity levels ranging from 65% to 85%.

## **Key Findings:**

**Rectifying Behavior:** This study marks the first exploration of the rectifying properties of hydrated contacts formed between nanoparticles of the same composition (ZrO<sub>2</sub> – 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) but differing in size (7.5, 10, 11, and 14 nm) [1].

**Distinct Electrical Responses:** Notable differences were observed in the current-voltage (I-V) characteristics and electrochemical impedance between hydrated and x-ray systems.

**Humidity-Dependent Dispersion:** Variations in electrical properties became more pronounced at humidity levels between 65% and 85% under both hydration and x-ray conditions.

**Role of the Hydration Shell:** The observed dispersion in electrical properties was linked to charge transport processes occurring within the hydration shell. The electrical response varied depending on the ionic species present, indicating that charge transport at the nanoparticle interface is influenced by these ions. A clear hysteresis effect was observed, suggesting nonlinear electrical behavior, likely due to charge accumulation or diffusion processes within the hydration layer.

Additionally, differences in current magnitude across various electrolytes highlight specific ion interactions with the YSZ surface, which impact overall conductivity. The nonlinear response in both positive and negative voltage regions points to rectifying behavior, likely driven by hydration dynamics with radiation and ion exchange mechanisms. A comparison of the electrical properties of 8YSZ (400-500°C) samples in H<sub>2</sub>O and x-ray under varying humidity conditions reveals distinct effects of hydration and x-ray. In the H<sub>2</sub>O environment, a stronger nonlinear response and greater current fluctuations suggest enhanced ion interactions and charge transport within the hydration layer. The presence of different electrolytes further influenced conductivity due to specific ion-surface interactions.

## **References:**

1. Mezentseva Zh.V., Doroshkevich A.S., Oksengendler B.L., Kirillov A.K., Didenko E.A., Nikiforova N.N., Carmen Mita, Diana Mardare, Nicoleta Cornei, Suleimanov S.H., Parpiev O.R. The Electrical Properties of a Contact of Hydrated Nano-Powders of Different Sizes YSZ for Homogenic Electronics, Proceedings of the Conference Physics 2024, April 23-25, 2024, Samarkand, Uzbekistan.

# **Применение метода рентгеновской рефлектометрии для исследования свойств тонких пленок, полученных при вакуумном напылении**

**Коченева А.Г.<sup>1</sup>, Шарафутдинов М.Р.<sup>1,2</sup>, Лемзяков А.Г.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> ЦКП "СКИФ", Кольцово, Россия

[anna.kocheneva@gmail.com](mailto:anna.kocheneva@gmail.com)

Основная цель проделанной работы - выявить взаимосвязь между режимом вакуумного напыления и свойствами получаемых покрытий, такими как плотность и шероховатость. В дальнейшем полученные зависимости планируется применять для напыления покрытий с заданными свойствами для решения разных научных задач, например, для проведения экспериментов в области терагерцовой оптики или создания многослойных рентгеновских зеркал.

В связи с этим была поставлена задача научиться определять свойства покрытий с помощью различных методов неразрушающего контроля. Основным методом исследования покрытий был выбран метод рентгеновской рефлектометрии с использованием синхротронного излучения. Он позволяет производить неразрушающий анализ покрытий и определять их параметры, такие как толщина, плотность, а также шероховатость поверхности и интерфейса.

Исследование производилось на экспериментальной станции "Дифракционное кино" на накопителе ВЭПП-3. В качестве экспериментальных образцов исследовались золотые покрытия на стеклянных и кремниевых подложках. Металл на подложки наносился методом магнетронного напыления, в ходе которого изменялись давление газа и температура подложки.

Сравнение результатов рентгеновской рефлектометрии производилось с результатами измерений шероховатости поверхности образцов, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии.

Полученные результаты демонстрируют влияние параметров режима напыления на свойства получаемых покрытий, а именно на шероховатость поверхности.

Благодарности: Исследования проведены с применением оборудования ИФМ РАН (Н. Новгород), а также ЦКП ВТАН НГУ и ЦКП СЦСТИ (Новосибирск).

# **Усовершенствование и применение итеративных алгоритмов восстановления фазы изображения**

Мурзина А.В.<sup>1,2</sup>, Попов Н.Л.<sup>2</sup>, Виноградов А.В.<sup>2</sup>, Артюков И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Развитие вычислительных мощностей способствовало активной разработке и внедрению безлинзовых методов восстановления изображения, таких как метод когерентной дифракционной визуализации (Coherent Diffraction Imaging, CDI). Данный метод, исключая оптические аберрации, по регистрируемой дифракционной картине некристаллического объекта позволяет восстановить как амплитуду, так и фазу рассеянного поля, достигая высокого пространственного разрешения, ограниченного длиной волны излучения и разрешением детектора [1].

Хотя классический подход к CDI, основанный на преобразовании Фурье, применим при расположении детектора в дальней зоне [2], нередко практические эксперименты вынужденно проводятся в ближней зоне. Это существенно усложняет расчеты, поскольку в ближней зоне необходимо применение волнового пропагатора, что фактически удваивает количество необходимых преобразований Фурье на итерацию по сравнению с классическим случаем [3]. Дополнительные трудности возникают при отсутствии априорной информации о точном размере домена объекта, а также при использовании частично когерентного излучения.

В данной работе предложены адаптированные алгоритмические решения, повышающие эффективность метода CDI в вышеописанных условиях без увеличения объёма и сложности вычислительной работы. Отдельно рассмотрен вопрос оценки точности восстановления изображений. Работоспособность разработанного подхода была продемонстрирована в экспериментальной установке с использованием гелий-неонового лазера в качестве источника когерентного излучения.

- [1] Miao, Jianwei. "Computational microscopy with coherent diffractive imaging and ptychography." *Nature* 637.8045 (2025): 281-295.
- [2] Fienup, James R. "Phase retrieval algorithms: a comparison." *Applied optics* 21.15 (1982): 2758-2769.
- [3] Артюков, И. А., и др. "МЕТОД ВИРТУАЛЬНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ." Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 50.10 (2023): 11-19.

# **Строение приповерхностного слоя диоксида кремния, облученного ионами аргона, по данным рентгеновской рефлектометрии и рассеяния**

Шаблов Ю.С., Пестов А.Е., Рощин Б.С., Нуждин А.Д., Волков Ю.О., Асадчиков В.Е.

*НИЦ «Курчатовский институт»*

В работе исследуется изменение структуры приповерхностного слоя и шероховатости поверхности диоксида кремния после ионного облучения ( $10^{17}$ ,  $10^{18}$  и  $10^{19} \frac{\text{ион}}{\text{см}^2}$ ) методом рентгеновской рефлектометрии и рассеяния в условиях скользящего падения. Данный подход основан на измерении отраженного от образца рентгеновского излучения и анализе его угловой зависимости  $R(\theta)$ . Очевидно, что изменения структуры, сопоставимые по размерам с длиной волны падающего излучения, будут вносить изменения в зависимость  $R(\theta)$ . При помощи сравнения теоретически рассчитанной кривой отражения и экспериментальной можно восстановить структуру исследуемого образца. Для решения обратной задачи существует несколько подходов, при этом в данной работе использовался модельно-независимый подход.

Экспериментальная работа проводилась на установке ДРШ с подвижной системой источник-детектор, оснащённым рентгеновской трубкой с медным анодом, монохроматором Si(111) (энергия излучения 8048 эВ, длина волны  $\lambda = 1.5405 \pm 0.1 \text{ \AA}$ ), трёхщелевой системой коллимации, угловыми датчиками, сцинтилляционным детектором SCSD-4 (Radicon) и линейным детектором Mythen2 (Dectris).

# **Модернизация ионного источника КЛАН-53М для прецизионной обработки рентгено-оптических поверхностей**

Чернышев А.К.<sup>1,\*</sup>, Пестов А.Е.<sup>1</sup>, Михайленко М.С.<sup>1,\*</sup>, Чхало Н.И.<sup>1</sup>, Артюхов А. И.<sup>1</sup>,  
Гончаров Л.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН

<sup>2</sup> НТК "Платар"

\*chernyshev@ipmras.ru

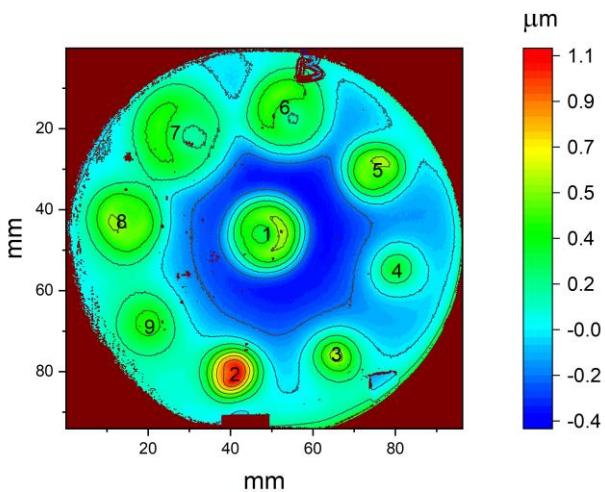
В настоящее время активно развиваются методы формирования прецизионных оптических элементов мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазонов, способных обеспечить дифракционное качество изображения в оптике нормального падения и низкую угловую расходимость в случае оптики скользящего падения. Ключевой технологией для изготовления таких поверхностей является ионно-пучковая обработка.

В ходе изготовления оптических поверхностей ионно-пучковыми методами производится итерационная обработка с последовательным уменьшением размера ионного пучка. На начальном этапе требуется высокопроизводительное удаление большого количества материала, что предъявляет высокие требования к величине ионного тока, в то время как на завершающем этапе коррекции формы необходимы малый размер пучка и низкий ток для обеспечения контролируемого и высокоточного воздействия.

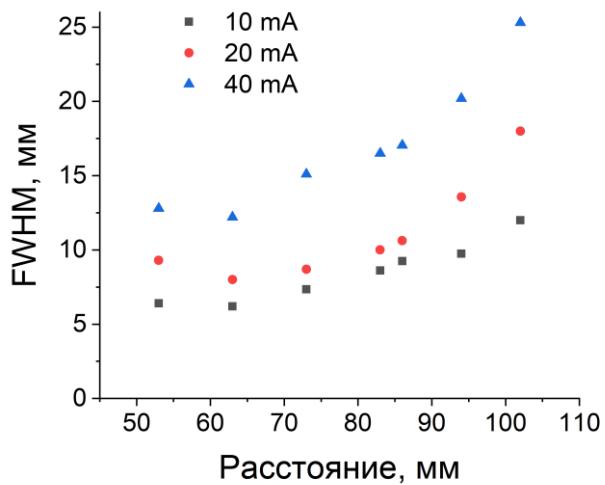
Ранее в работе [1] были представлены результаты модернизации ионного источника КЛАН-10М. Удалось получить ионный пучок с плотностью тока до 95 мА/см<sup>2</sup> и латеральными размерами 1 – 10 мм, что позволяет применять его для финишной высокоточной коррекции формы.

Модернизация ионно-оптической системы (ИОС) источника КЛАН-53М для обеспечения возможности формирования сильноточного малоразмерного пучка ионов, необходимого для высокопроизводительной начальной коррекции поверхности оптических элементов.

По аналогии с ранее модернизированным источником КЛАН-10М, плоская трехэлектродная ИОС источника КЛАН-53М, формирующую квазипараллельный пучок, была заменена на фокусирующую систему, состоящую из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны 60 мм. Для нейтрализации заряда пучка используется накальный нейтрализатор. Для определения пространственного распределения скорости травления, что необходимо для контролируемого формообразования, были проведены эксперименты по формированию кратеров травления. Серия кратеров была сформирована на пластине из монокристаллического кремния <100> при фиксированной энергии ионов 1250 эВ и токах 10, 20 и 40 мА на различных расстояниях «источник–образец» рисунок 1. Кратеры травления измерялись на интерферометре Zyglo VeriFire 4, методика анализа кратеров подробнее описана в работе [2].



**Рис. 1.** Кратеры травления для источника КЛАН-53М ( $I_{\text{ион}}=20$  мА,  $E_{\text{ион}}=1250$  эВ).



**Рис. 2.** Зависимость ширины кратера травления на полувысоте от расстояния “источник-образец”. Источник КЛАН-53М ( $E_{\text{ион}}=1250$  эВ,  $I_{\text{ион}}=10$  мА;  $I_{\text{ион}}=20$  мА и  $I_{\text{ион}}=30$  мА).

Проведен анализ размеров и форм кратеров травления. Установлено, что минимальный размер пучка (ширина на полувысоте) для модернизированного источника КЛАН-53М при энергии 1250 эВ и токе 10 мА составляет 6,2 мм. Полученные данные перекрываются с характеристиками источника КЛАН-12М [1], что важно для проведения итерационной обработки.

Таким образом модернизированный источник КЛАН-53М позволяет формировать сильноточные (до 40 мА) ионные пучки с регулируемым размером от 6,2 мм и выше. Такая характеристика обеспечивает возможность итерационной обработки с уменьшением размера пучка и позволяет проводить коррекцию поверхностей произвольной формы с латеральными размерами неоднородностей до  $9,5 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>-1</sup>.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30029-П)

### Литература

- [1] M.S. Mikhailenko et al. // Applied Optics v. 61, pp. 2825-2833 (2022).
- [2] N.I. Chkhalo et al. // Precision Engineering, v.48, pp.338–346 (2017).

# **Исследование многослойных периодических систем Ni/Ti с прослойками Si для применения их в нейтронных неполяризующих суперзеркалах с $m=3$ и $m=5$ .**

Р.С. Плешков<sup>1</sup>, В.Н. Полковников<sup>1</sup>, П.С. Савченков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики микроструктур РАН*

<sup>2</sup>*НИЦ «Курчатовский институт»*

В докладе представлены исследования многослойных периодических систем (МПС) Ni/Ti без прослоек и с прослойками Si на разных границах. Данные системы интересны с точки зрения использования их в нейтронных неполяризующих суперзеркалах. В частности, речь идет о суперзеркалах с параметрами  $m=3$  и  $m=5$ . Исследование включает в себя анализ рентгеновской отражательной способности и структурных параметров, восстановленных по данным рентгеновской рефлектометрии, МПС Ni/Ti с прослойкой Si на одной и на двух границах, а также без прослойки. Полученные данные в совокупности с данными, которые может дать метод нейтронной рефлектометрии, помогут в решении таких проблем нейтронной оптики, как повышение отражательной способности нейтронных зеркал и снижение диффузного рассеяния нейtronов.

# **Рентгеновская топо-томография в исследовании дефектной структуры крупных синтетических алмазов, выращенных в широком интервале температур и скоростей роста**

Золотов Д. А.<sup>1</sup>, Бузмаков А. В.<sup>1</sup>, Дьячкова И. Г.<sup>1</sup>, Асадчиков В. Е.<sup>1</sup>,  
Хохряков А. Ф.<sup>2</sup>, Борзов Ю. М.<sup>2</sup>, Пальянов Ю. Н.<sup>2</sup>, Ягудин Л. Д.<sup>3</sup>, Ширяев А. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение “Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова” Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

На сегодняшний день достигнут значительный прогресс в выращивании кристаллов синтетического алмаза как при высоком давлении и температуре HPHT (High Pressures – High Temperatures), так и для газофазного синтеза CVD (Chemical Vapour Deposition). Однако до сих пор не решён вопрос реализации устойчивого роста малодефектных монокристаллов алмаза большого размера, что является одним из основных препятствий на пути к широкому использованию их в ряде высокотехнологических применений, например, в рентгеновской оптике. Большинство исследований реального строения кристаллов алмаза приведено без связи с условиями роста. Для поиска путей получения высококачественных алмазов необходимо исследование реальной структуры кристаллов и ее сопоставление с условиями роста.

В работе методами оптической микроскопии и рентгеновской топо-томографии на лабораторном источнике были изучены протяженные дефекты в крупных синтетических алмазах, полученных методом термического градиента при высоких статических давлениях и температурах [1]. Синтез при высоких температурах и низких скоростях роста позволяет получать монокристаллы с низкой плотностью дислокаций, ошибок упаковки и двойниковых прослоек.

Исследование методом топо-томографии позволило провести количественное изучение аннигиляции дефектов упаковки в процессе отжига при высоких давлениях. Сравнительно быстрая кинетика исчезновения этих дефектов свидетельствует об определяющем вкладе диффузии вакансий. Показано, что аннигиляция дефектов упаковки может приводить к появлению дислокаций.

## **Благодарности**

Работы по исследованию методом оптической микроскопии выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 125012200626-9); работы по росту, отжигу при высоких РТ-параметрах и селективному травлению кристаллов синтетического алмаза выполнены по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400159-3); работы по исследованию методом топо-томографии выполнены в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

[1] Золотов Д.А., Бузмаков А.В., Хохряков А.Ф., Борзов Ю.М., Ягудин Л.Д., Пальянов Ю.Н., Дьячкова И.Г., Асадчиков В.Е., Ширяев А.А. Рентгеновская топо-томография крупных синтетических алмазов, выращенных при высоких статических РТ-параметрах // Кристаллография. 2025. Т. 70. №4. С. 565–576. DOI: 10.31857/S0023476125040042

# **Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния с использованием машинно-обученного потенциала межатомного взаимодействия**

А.А. Назаров, П.А. Юнин, М.С. Михайленко

*ИФМ РАН, Н. Новгород, Россия*

Ионно-пучковая обработка является ключевым методом модификации поверхности материалов, где точное прогнозирование процессов на атомарном уровне критически важно. Для моделирования таких процессов традиционно используются классические потенциалы межатомного взаимодействия (Stillinger-Webber, Lennard-Jones), которые, однако, могут нести в себе ограничения в точности описания сложных межатомных взаимодействий, особенно в условиях сильных неравновесных возмущений, вызванных ионной бомбардировкой.

В данной работе представлены результаты молекулярно-динамического (МД) моделирования распыления монокристаллического кремния ионами аргона с низкими энергиями (0.1 – 1 кэВ) с применением машинно-обученного потенциала (Machine-Learned Interatomic Potential, MLIP) [1]. MLIP, обученный на ab initio DFT-данных, сочетает в себе точность, близкую к квантово-механическим расчетам, и вычислительную эффективность, позволяющую моделировать процессы в масштабах, необходимых для анализа распыления и образования дефектов.

Проведенное МД-моделирование с использованием MLIP позволило с хорошей точностью воспроизвести зависимость коэффициента распыления от энергии ионов. Показано, что использование машинно-обученного потенциала обеспечивает более точное описание процессов распыления, по сравнению с классическими потенциалами, полученные результаты показывают хорошую качественную и количественную корреляцию с результатами эксперимента. Результаты работы демонстрируют перспективность применения MLIP для фундаментального изучения механизмов ионно-пучкового распыления и оптимизации технологических параметров обработки.

## **Благодарности**

[1] Novikov, I.S., Gubaev, K., Podryabinkin, E.V., Shapeev, A.V.: The MLIP package: moment tensor potentials with MPI and active learning. *Mach. Learn.: Sci. Technol.* 2, 025002 (2021).

# Учет систематических ошибок измерений методом сдвига на интерферометре Физо

Глушков Е.И\*, Чхало Н.И.

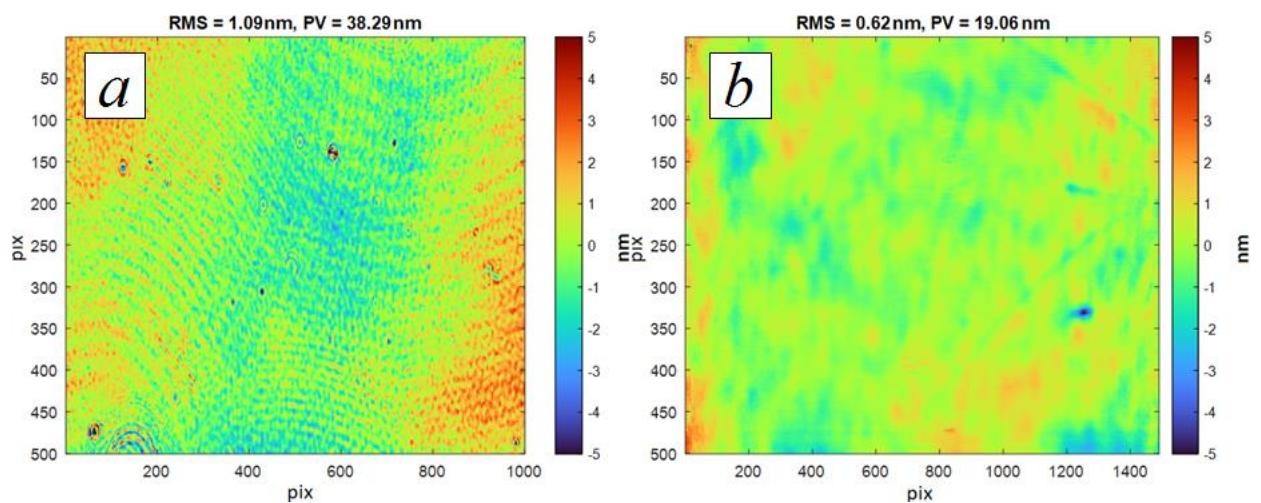
Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

\*e-mail: eglushkov@ipmras.ru

Учет систематической ошибки измерений с использованием интерферометра Физо (абсолютное измерение), в частности, ошибки эталона, необходим для измерения оптических поверхностей с точностью на уровне единиц нанометров и менее. Высокоточные эталонные зеркала для интерферометра Физо очень дороги, и их форма обычно имеет меньшую точность ( $\lambda/20$ ,  $\lambda/50$  по размаху высот профиля PV (peak-to-valley) – 30—10 nm), чем у высокоточных измеряемых плоскостей (единицы nm по параметру PV).

Традиционные методы абсолютного измерения включают метод жидкой плоскости, метод псевдосдвига, метод трех плоскостей и его варианты. Традиционный метод трех плоскостей основан на взаимных измерениях трех плоскостей с использованием определенных приближений и аппроксимаций полиномами с заранее определенной максимальной степенью для получения абсолютной формы измеряемой поверхности. Недостатком такого подхода является невозможность учета ошибок формы с пространственной частотой выше выбранной и сингулярных ошибок формы. Существенным недостатком метода трех плоскостей является необходимость использования трех дорогостоящих эталонных плоскостей. Современные методы проведения абсолютных измерений основаны на анализе информации, содержащейся в каждом пикселе, и не используют аппроксимацию поверхности полиномами, что обеспечивает высокое пространственное разрешение измерений.

В докладе будет представлена реализация метода одностороннего многократного сдвига, который позволяет определить систематическую ошибку измерений на интерферометре Физо с использованием лишь двух плоских отражающих поверхностей (эталонной и исследуемой). В результате одностороннего многократного сдвига получается избыточный набор данных об измеряемой поверхности, позволяющий составить переопределенную систему линейных уравнений, решение которой дает информацию о систематической ошибке измерений. Кроме того, такой подход позволяет исключить влияние высокочастотных артефактов, например, интерференционных колец, возникающих из-за дифракции рабочего и эталонного фронтов на дефектах (пылинках) эталона, на результаты измерений.



Результат эксперимента по определению систематической ошибки сдвигом, 1 пиксель равен  $40 \mu\text{m}$ :  $a$  – систематическая ошибка;  $b$  – измеряемое зеркало.

## Метрология асферических зеркал

Е. В. Петраков, Н.И. Чхало, Е.И. Глушков

*Институт физики микроструктур РАН, 607680, Нижний Новгород, Россия*

Асферические оптические поверхности давно известны, и проблема их метрологии является почти классической. Классическая сферическая интерферометрия с использованием сферических эталонных поверхностей не подходит для асфериков, так как для каждого типа асферической поверхности нужен уникальный эталон (null-компенсатор), изготовление и калибровка которого сложны и трудоемки. Поэтому в ходе работы мы предлагаем иной метод метрологии асферических зеркал. Асферическая поверхность может быть понята как оболочка семейства сфер с разными радиусами (рисунок 1), поэтому сканируя вдоль оси симметрии, мы можем собирать интерферометрические измерения со всей поверхности. Но это само по себе не решает проблему измерения асферической поверхности: теперь у нас есть набор кольцевых областей, измеренных на данной поверхности, но этот набор еще не описывает отклонения поверхности от конструкции.

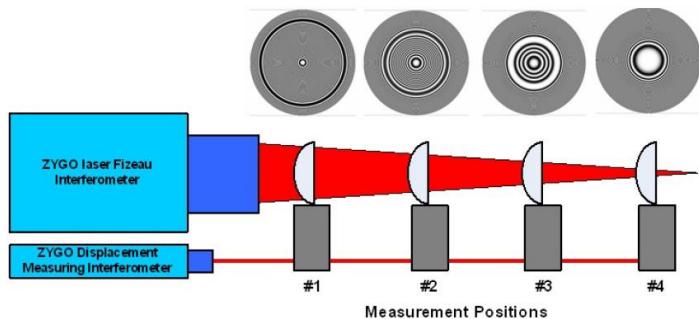


Рисунок 1 - Схема измерения асферической поверхности

В качестве альтернативы классическим методам с null-компенсаторами под каждую асферику предложен метод поэтапного измерения асферической поверхности с помощью сканирования вдоль оси симметрии и последующего анализа набора кольцевых областей. Такой подход позволяет обойти ограничения классической интерферометрии и предоставляет возможность проводить измерения без необходимости создания сложных эталонов. Математическая модель асферической поверхности, основанная на цилиндрической системе координат и использовании асферических полиномов, обеспечивает точное описание профиля и отклонений поверхности.

Таким образом, применение современных методов метрологии, использующих сканирующие и аналитические подходы, позволяет существенно повысить точность и эффективность измерения асферических зеркал, что особенно актуально для массового производства и внедрения асферических оптических элементов в промышленные и научные приложения.

# Изготовление подложек фокусирующего и ориентационного зеркал на диапазон 20-40 кэВ

А.И. Артюхов\*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, И.В. Малышев,  
Е.И. Глушков, Е.В. Петраков, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород,  
607680, Россия

\* artuhov@ipmras.ru

Для решения задач на секции 1-3-1 станции 1-3 синхротрона СКИФ требуется излучение в диапазоне 20-40 кэВ [1]. Фокусирующее зеркало является первым элементом по ходу распространения пучка СИ, направление которого далее корректируется вторым (ориентационным) зеркалом. Рентгенооптическая схема системы представлена на рис.1.

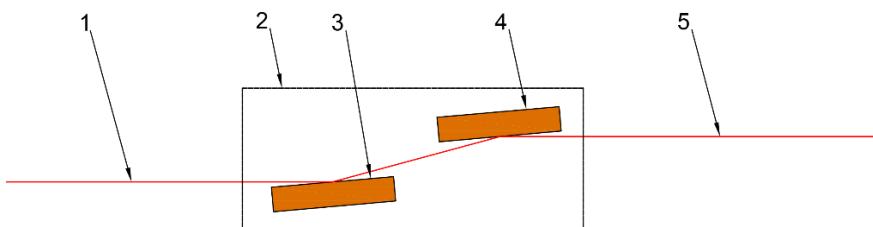


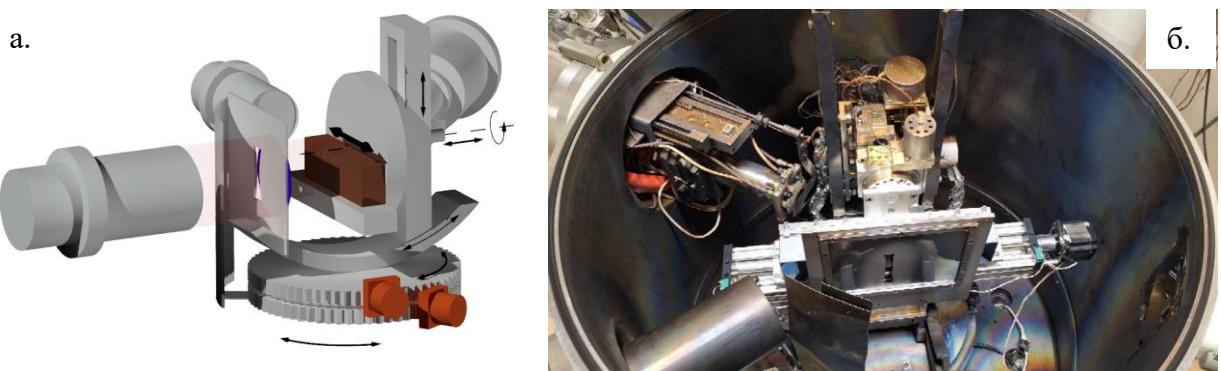
Рис. 1. Рентгенооптическая схема комплекта зеркал для станции 1-3 синхротрона СКИФ.

1. Входящий пучок СИ;
2. Вакуумный бокс;
3. Фокусирующее зеркало;
4. Ориентационное зеркало;
5. Выходящий пучок СИ.

Форма поверхности фокусирующего зеркала – сегмент эллиптического цилиндра, обеспечивающего фокусировку пучка СИ из источника на расстоянии до зеркала  $34 \pm 1$  м на образце на расстоянии от источника 122,1 м, а форма ориентационного зеркала – плоскость. Качество поверхностей зеркал должно быть таким, чтобы не происходило ухудшение угловой расходимости в сагиттальном направлении более чем на 10%, т.е. угловая ошибка поверхностей не должна превышать  $\pm 0,09$  мрад.

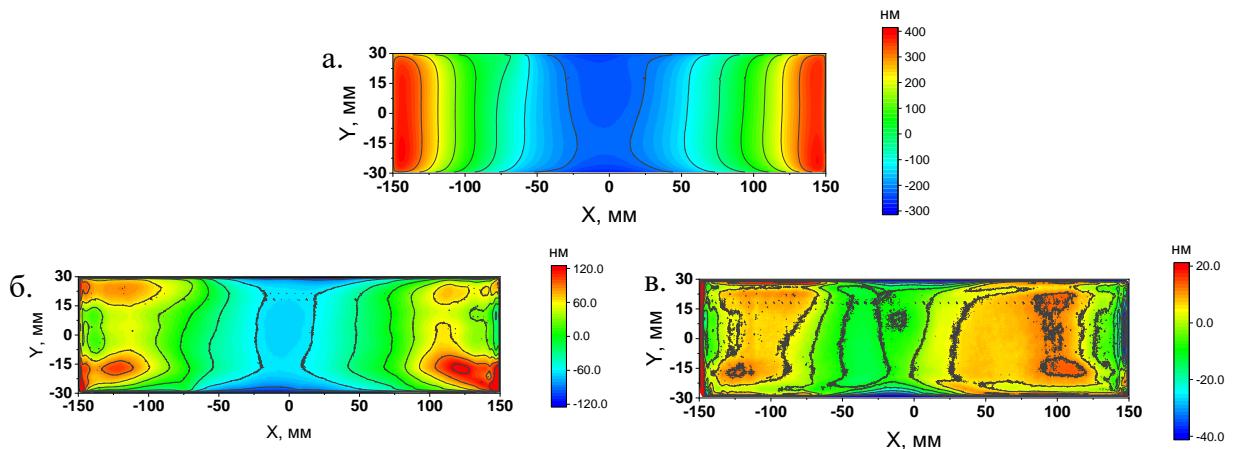
Для формирования поверхностей с такой и лучшей точностью и обеспечением минимальной шероховатости (для обеспечения высоких коэффициентов отражения рентгеновского излучения) используется методика на основе ионного распыления [2,3]. В частности, в работе [3] была предложена методика формирования цилиндрических элементов скользящего падения по “щелевой” методике – использовался широкоапертурный сильноточный ионный источник из пучка которого щелью вырезалась часть, обеспечивающая равномерное удаление материала вдоль короткой стороны заготовки, а профиль отклонения формы от плоскости вдоль длинной стороны заготовки задавался за счет изменяемой по требуемому закону скорости движения заготовки. Финишная коррекция формы (доведение сформированного профиля до требуемых значений точности формы) производилась по методике коррекции локальных ошибок формы малоразмерным сфокусированным ионным пучком.

Для изготовления элементов схемы, представленной на рис.1 было принято решение использовать аналогичный подход. Однако, геометрические размеры элементов ( $Д \times Ш \times В$ ) составляют -  $300 \times 60 \times 50$  мм, что значительно превышает габариты, которые возможно было обрабатывать в исследовательской установке ионного травления (УИП-300) [4], поэтому была осуществлена модернизация установки по средствам добавления линейного транслятора с ходом движения 350 мм вдоль оси Y (см. рис.2).



**Рис. 2.** Модернизация установки УИП-300. а. Схема; б. Фотография.

За 10 часов травления по схеме из рис.2 форма поверхности подложки плоского зеркала была улучшена более почти в 4 раза по параметру RMS с исходной RMS=201 нм до RMS=55,0 нм. Финишная коррекция формы проводилась по методике коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком. Карты исходной поверхности и после коррекций формы представлены на рис.3.



**Рис. 3.** Карты поверхности ориентационного зеркала. а. Исходная (PV=700 нм, RMS=201 нм); б. После “щелевой” коррекции (PV=240 нм, RMS=55,0 нм); в. После коррекции локальных ошибок формы (PV=60 нм, RMS=12,0 нм).

Таким образом, была разработана методика расчета времен травления, проведена модернизация установки, которые позволили реализовать “щелевую” методику коррекции и асферизацию формы для образцов длиной до 350 мм. Возможности методики продемонстрированы при изготовлении комплекта зеркал (фокусирующее и ориентационное) для секции 1-3-1 станции 1-3 синхротрона СКИФ. “Щелевая” методика с последующей финишной коррекцией локальных ошибок формы позволили сформировать элементы с угловой ошибкой менее 1 мкрад, что позволяет добиться качества поверхности зеркал с ухудшением угловой расходимости в сагиттальном направлении не более чем  $\alpha=\pm 0,09$  мрад. В меридиональном направлении качество поверхности не приводит к размытию изображения источника более, чем на 10%, при доверительном интервале 95%.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П и с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН.

- [1] И.А. Рубцов и др. // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”, т.1: Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс, с.115-135 (2022).
- [2] T. Wang et al. // Nanomanuf. Metrol. 6, 20 (2023).
- [3] A.E. Pestov et al. // Appl. Opt. 64 (4), p. 837-844 (2025).
- [4] А.Е. Пестов и др. // ЖТФ. 95 (9). с.1825-1935 (2025).

# **Разработка компактного масс-спектрометра для контроля ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов**

**И.Д. Оськин, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, И.Г. Забродин, Д.С. Дмитриев, Н.И. Чхало**

*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.*

*\*mikhaylenko@ipmras.ru*

Развитие современной оптики, в первую очередь коротковолнового (рентгеновский и экстремальный ультрафиолетовый) диапазона, требуют существенного повышения качества элементов, это касается как формы поверхности, которая определяет качество изображения и минимизацию aberrаций, так и шероховатости, наличие которой приводит к рассеянию излучения, а как следствие, также к размытию изображения и снижению интенсивности на выходе оптической системы. Основной методикой, использующейся для финишной доводки оптических поверхностей до расчетной точности, является ионно-пучковое травление [1-2]. На финишных стадиях коррекции формы поверхности глубины травления уже  $\sim 1$  нм, что приводит к уменьшению и времени воздействия ионного пучка в каждой точке поверхности  $\approx 0,001$  секунды. Следствием этого является увеличение вклада в процесс ионного травления различных технологических особенностей, в первую очередь, это наличие на поверхности загрязнений либо окислов, скорость удаления которых, как правило, значительно отличается от скорости травления основного материала обрабатываемой детали. Другим немаловажным фактором является быстродействие процессов включения/выключения ускоряющего напряжения в процессе обработки, поскольку процедура коррекции производится при поточечной обработке поверхности, причем при перемещении от точки к точке происходит выключение ускоряющего напряжения ионного источника. Таким образом, уменьшение времени обработки в точке приводит к существенному влиянию фронтов нарастания и спада значения ускоряющего напряжения на реальную длительность обработки поверхности в точке. Следствием этих особенностей технологического процесса является увеличение ошибок процедуры коррекции от расчетной карты травления. Решением данных проблем может стать контроль количества удаляемого материала в процессе обработки посредством масс-спектрометрии.

В рамках работы предложена схема масс-спектрометра, которая включает в себя пять блоков (рис.1а): Коллиматор частиц, отвечающий за отбор частиц, движущихся исключительно от центра гониометра; Ионизатор частиц, производящий ионизацию пролетающих сквозь него атомов; Сепаратор скоростей, отсекающий частицы, движущиеся со скоростью, соответствующей максимуму энергетического распределения распыленных атомов Si при бомбардировке ионами Ar с энергией  $\sim 1000$  эВ; Масс-анализатор, производящий непосредственно сепарацию частиц по атомной массе; Регистрирующий элемент (детектор) элемент, регистрирующий количество ионов  $^{28}\text{Si}$  прошедших через выходную апертуру масс-спектрометра. При загрузке детектора на уровне 30000 имп./сек. контролируемые значения временных интервалов будут до 1/3000 сек. Контроль интервалов времени включения источника на уровне 0,001 сек. с запасом удовлетворяет при характерных временах включения источника КЛАН-12М.

Основным и принципиальным отличием теоретических расчетов от реальной конструкции является неоднородность, связанная с конечными размерами магнитов и электродов. В связи с этим, важно убедиться в том, что неоднородности либо будут давать

малую погрешность в траектории частицы, либо окажутся вне рабочей области. Для электрического поля решением может быть профилирование электродов по модели Ченга, который позволяет добиться однородности в центральной области между электродами, используя пластины меньших размеров. От неоднородности магнитного поля избавиться будет сложнее, предполагается использовать дополнительные пластины из магнит мягкого материала (Супермаллоя).

Были проведены расчёты пространственного распределения электромагнитных полей методом конечных элементов в пакете FEMM (рис.1б) с целью уточнения габаритов и материалов конструкции. Полученное пространственное распределение полей было использовано для расчёта траектории ионов  $^{28}\text{Si}$  сквозь всю конструкцию прибора. Рассчитанные траектории позволили оценить точность прибора и его разрешение. На рисунке 1в приведена траектория распыленного иона основного изотопа кремния со скоростью 4690 м/с (3 эВ), откуда видно, что небольшие неоднородности поля не приводят к заметным изменениям в траектории движения.

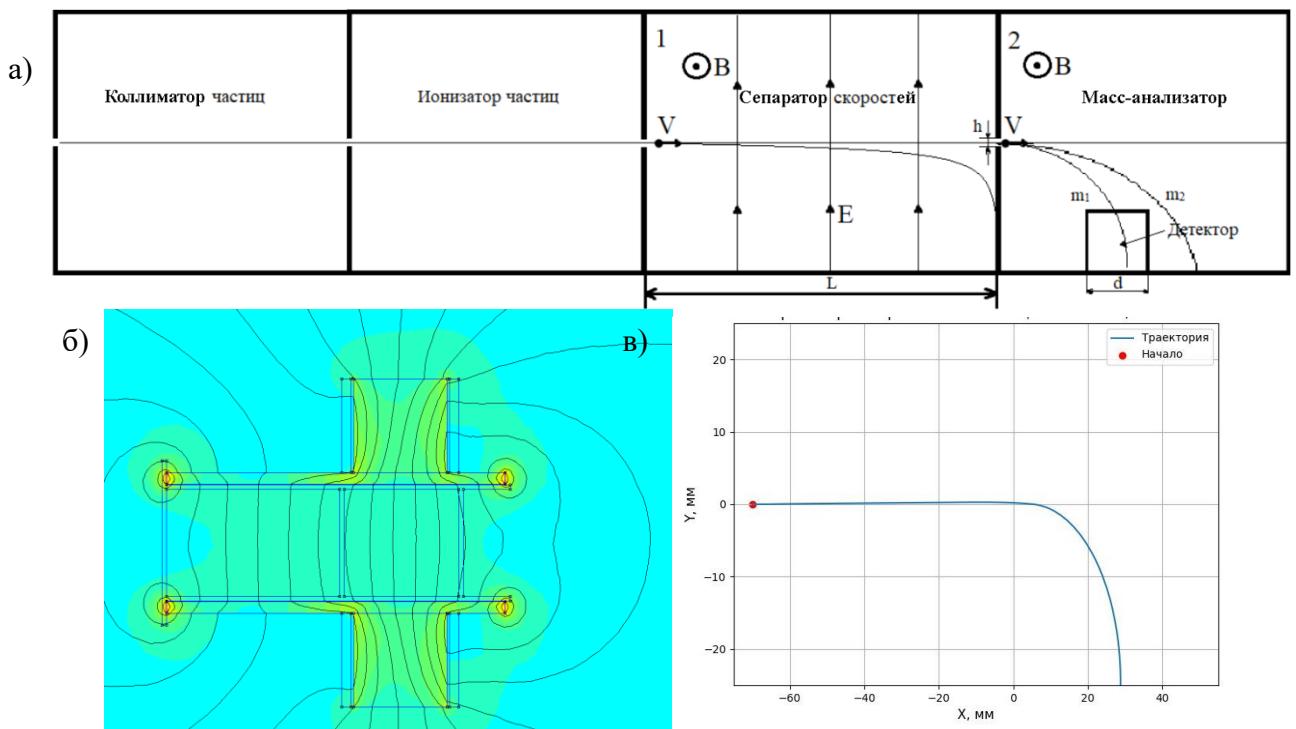


Рис. 1. Подпись к рисунку

Разработанный масс-спектрометр позволяет контролировать интенсивность потока распыленных частиц с атомной массой  $m=28$  а.е.м. (основной изотоп кремния –  $^{28}\text{Si}$ ). Кремний является основным компонентом материалов, применяемых в современной оптике. При разработке прибора был проведен анализ количества распыляемого материала при рабочих параметрах источника КЛАН-12М, применяемого для финишной коррекции локальных ошибок формы в установке УИП-300 [3], с учетом оценочных данных разработан облик, произведен расчет параметров составных частей и ЭКД прибора.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №21-72-30029П.

[1] T. Wang, L. Huang, Y. Zhu et al., “Ion Beam Figuring System for Synchrotron X-Ray Mirrors Achieving Sub-0.2- $\mu\text{rad}$  and Sub-0.5-nm Root Mean Square,” Nanomanuf. Metrol. 6, 20 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41871-023-00200-x>

[2] R. Shurinton, H. Wang, P. Pradhan et al., “Ion beam figuring for X-ray mirrors: history, state-of-the-art and future prospects,” J. Synchrotron Rad. 31, 655 (2024).

<https://doi.org/10.1107/S1600577524002935>

[3] А.Е. Пестов и др. // ЖТФ. 95 (9). с.1825-1935(2025).

# Восстановление карты поверхности для тороидальных оптических элементов

И.Д. Оськин<sup>1</sup>, М.С. Михайленко<sup>1,\*</sup>, А.Е. Пестов<sup>1</sup>, А.К. Чернышев<sup>1</sup>, М.Н. Торопов<sup>1</sup>, И.В. Малышев<sup>1</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*mikhaylenko@ipmras.ru

В рентгеновских спектрометрах для одновременной фокусировки и коллимации расходящегося рентгеновского излучения от точечного источника применяются тороидальные оптические элементы. Поверхность такого зеркала имеет два радиуса кривизны. В горизонтальной плоскости (меридиональная кривизна) цель — сфокусировать расходящийся пучок от источника в точку на выходной щели или на детекторе. В вертикальной плоскости (сагиттальная кривизна) задача — сколимировать пучок, то есть сделать лучи параллельными в этой плоскости.

Когда поверхность оптического элемента имеет малые радиусы кривизны ( $R < 1$  м) или форма поверхности сильно отличается от плоскости или от сферы (более 20 мкм) становится затруднительным получить истинную карту поверхности из классической интерферометрии «в лоб». В таком случае применяют схему, в которой в фокус оптического элемента устанавливается источник сферической волны таким образом, чтобы на некотором расстоянии получить интерференционную картину. Полученная интерферограмма отображает деформацию волнового фронта от идеального, которую вносит исследуемая поверхность. Как видно из рисунка 1 полученная интерферограмма имеет форму отличную от прямоугольной, что связано с особенностью измерений. При восстановлении карты поверхности из полученной интерферограммы возникает неоднозначность в сопоставлении точек интерферограммы и точек поверхности исследуемого элемента.

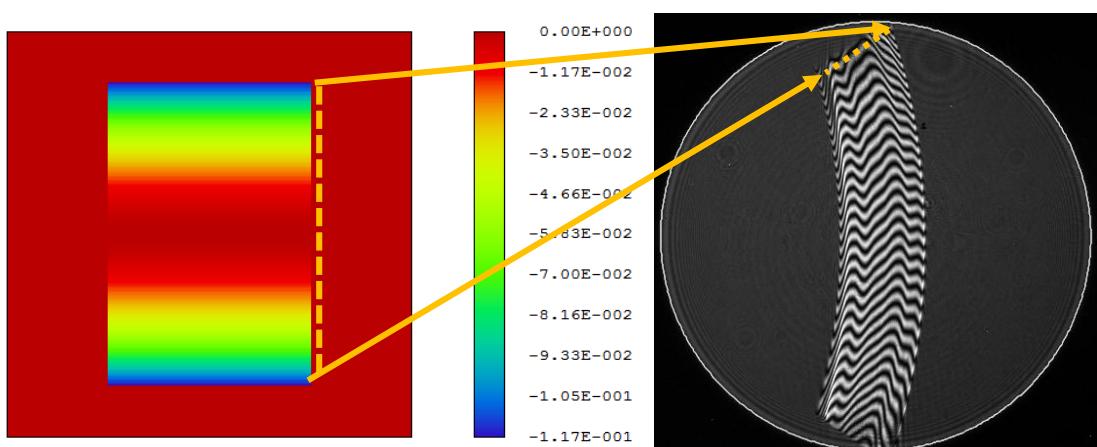


Рис. 1. Подпись к рисунку.

В данной работе предложено решение задачи пересчета координат через трассировку лучей.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №21-72-30029П.

# Фокусирующая система Киркпатрика-Баеза для синхротронных применений

Д. Г. Реунов<sup>1,\*</sup>, А. Д. Ахсалян<sup>1</sup>, Е. И. Глушков, И.П. Долбня<sup>2</sup>, И. Г. Забродин<sup>1</sup>, И.А. Каськов<sup>1</sup>, И. В. Малышев<sup>1</sup>, М. С. Михайленко<sup>1</sup>, Е. В. Петраков<sup>1</sup>, А.Е. Пестов<sup>1</sup>, В.Н. Полковников<sup>1</sup>, А. К. Чернышев<sup>1</sup>, Н. И. Чхало<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

<sup>2</sup>Diamond Light Source, United Kingdom, OX11 0DE, Oxfordshire, Didcot, Harwell Science and Innovation Campus

[\\*reunov\\_dima@ipmras.ru](mailto:reunov_dima@ipmras.ru)

В последние годы во всём мире, включая Россию, наблюдается интенсивное развитие источников синхротронного излучения нового поколения. В ближайшей перспективе произойдет ввод в эксплуатацию Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) поколения 4+. На одном из его каналов будет реализована станция 1-1 «Микрофокус», предназначенная для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач с использованием высокоинтенсивного рентгеновского пучка с субмикронной фокусировкой [1–2].

Фокусировка рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне осуществляется с применением рентгеновской оптики скользящего падения в конфигурации Кирпатрика–Баеза (КБ), включающей два взаимно перпендикулярно расположенных зеркала с профилем в виде эллиптического цилиндра. Платиновое покрытие зеркал обеспечивает эффективную работу системы в диапазоне энергий 10–30 кэВ.

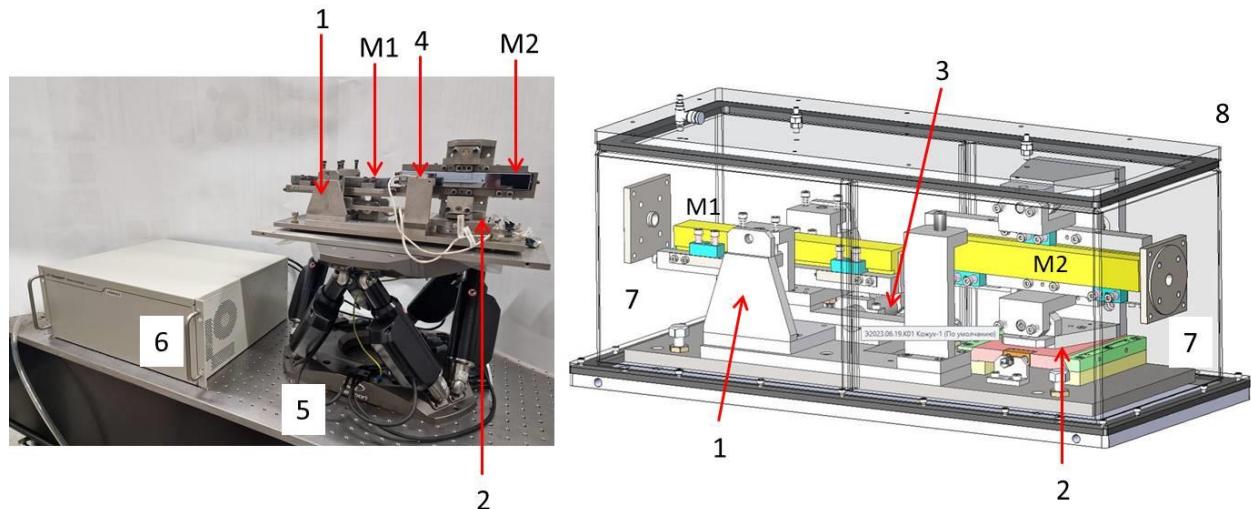


Рис.1. Фотография со снятым корпусом (слева) и 3D модель фокусирующей системы в корпусе (справа).M1,M2 – первое и второе зеркало фокусирующей КБ системы; 1,2 - 4Д механические юстировочные устройства первого и второго зеркала соответственно; 3, 4 - пьезоактуаторы для точной подстройки углов первого и второго зеркала соответственно; 5 - гексапод Newport HXP200S-MECA; 6 – блок управления гексапода; 7 - вакуумно-плотные окна; 8 - корпус .

При изготовлении фокусирующей системы можно выделить наиболее существенные технологические задачи:

1. Метрологию крупногабаритных зеркал. Длина зеркал составляет 200 мм, что обусловлено необходимостью захвата значительной части синхротронного пучка в геометрии скользящего падения. Размеры зеркал, как правило, превышают апертуру интерферометров, что усложняет контроль их формы.

2. Интерпретацию интерферометрических данных. Из-за большой кривизны поверхности интерференция наблюдается только на ограниченных участках. Для решения этой задачи применяется технология сшивки малых интерферограмм, снятых с различных областей зеркала, с последующей реконструкцией полной карты поверхности.

3. Формирование требуемого профиля с нанометровыми отклонениями. Достигается за счёт использования ионно-пучкового метода съёма материала. Апертурная маска формирует равномерный профиль съема вдоль короткой стороны зеркала, тогда как профиль вдоль длинной стороны обеспечивается неравномерным возвратно-поступательным движением заготовки. На заключительном этапе выполняется коррекция локальных дефектов формы с применением малоразмерного ионного пучка.

4. Финальная юстировка и аттестацию зеркал. Эти процедуры проводятся как для отдельных элементов, так и для всей системы на рабочей или близкой к ней длине волны. На данном этапе решаются задачи минимизации размера фокусного пятна, его измерения, калибровки пьезоактуаторов и настройки управляющего программного обеспечения. Для этих целей используется разработанный ранее рентгенооптический лабораторный стенд [3].

В докладе будут представлены концепция, реализация и аттестация фокусирующей системы КБ.

Работа была выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН FFUF-2024-0022, РНФ 21-72-30029-П в части тестирования фокусирующих свойств системы и изображения ножа получены при помощи оборудования ЦКП ИФМ РАН.

[1] Chernov V. A., Bataev I. A., Rakshun Y. V., Khomyakov Y. V., Gorbachev M. V., Trebushinin A. E., Chkhalo N. I., Krasnorutskiy D. A., Naumkin V. S., Sklyarov A. N., Mezentsev N. A., Korsunsky A. M., Dolbnya I. P. A concept of “materials” diffraction and imaging beamline for SKIF: Siberian circular photon source // Rev. Sci. Instrum. – 2023. – Vol. 94. – P. 013305. – DOI: 10.1063/5.0103481.

[2] Ракшун Я. В. и др. «Микрофокус» – первая станция в России для сочетания рентгеновских когерентных и некогерентных методов в геологии и геохимии // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122.

[3] Reunov D. G. et al. Stand for Certification of X-ray Optical Elements and Systems // J. Surf. Invest. – 2025. – Vol. 18(S1). – P. S38–S44. – DOI: 10.1134/S1027451024701842

# Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации оптики в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах

С. А. Гарахин\*, С. С. Морозов, И. С. Девятайкин, М. В. Зорина, М. С. Михайленко, А. Е. Пестов, А. К. Чернышев, Р. А. Шапошников, И. Г. Забродин, И. В. Малышев, Н. И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

\*garahins@ipmras.ru

Описывается модифицированный в ИФМ РАН лабораторный рефлектометр для прецизионных измерений спектральных и угловых зависимостей коэффициентов отражения и пропускания оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм. При разработке спектрометра-монохроматора рентгеновского излучения использована схема Черни-Тюрнера с двумя коллимирующими зеркалами и плоской дифракционной решеткой. Такая схема, в отличие от традиционно применяемых спектрометров-монохроматоров роулондовского типа, обеспечивает характерное для них высокое спектральное разрешение и широкий рабочий диапазон, но при этом источник и выходная щель остаются неподвижными. Это снимает практически полностью ограничения на массогабаритные характеристики источника излучения и рефлектометра. Фокусировка зондового монохроматического пучка на исследуемом образце производится с помощью тороидального зеркала. Источником рентгеновского излучения является высокоионизованная плазма, генерируемая при взаимодействии мощного лазерного пучка на твердотельную мишень. Для стабилизации эмиссионных характеристик твердотельная мишень совершает поступательное линейное и вращательное движение таким образом, чтобы каждый импульс приходился на новое место. Чтобы максимизировать интенсивность регистрируемого излучения и минимизировать размер изображения источника, была разработана и собрана новая рентгенооптическая схема. Модель монохроматора в программе Zemax представлена ниже (рис. 1):

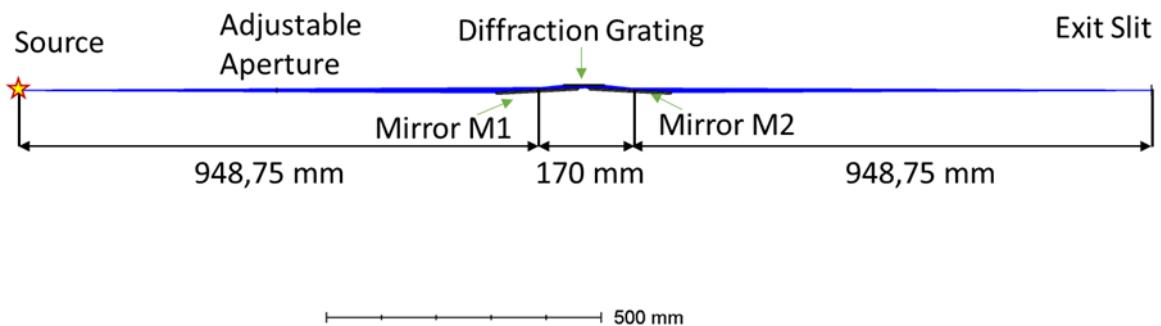
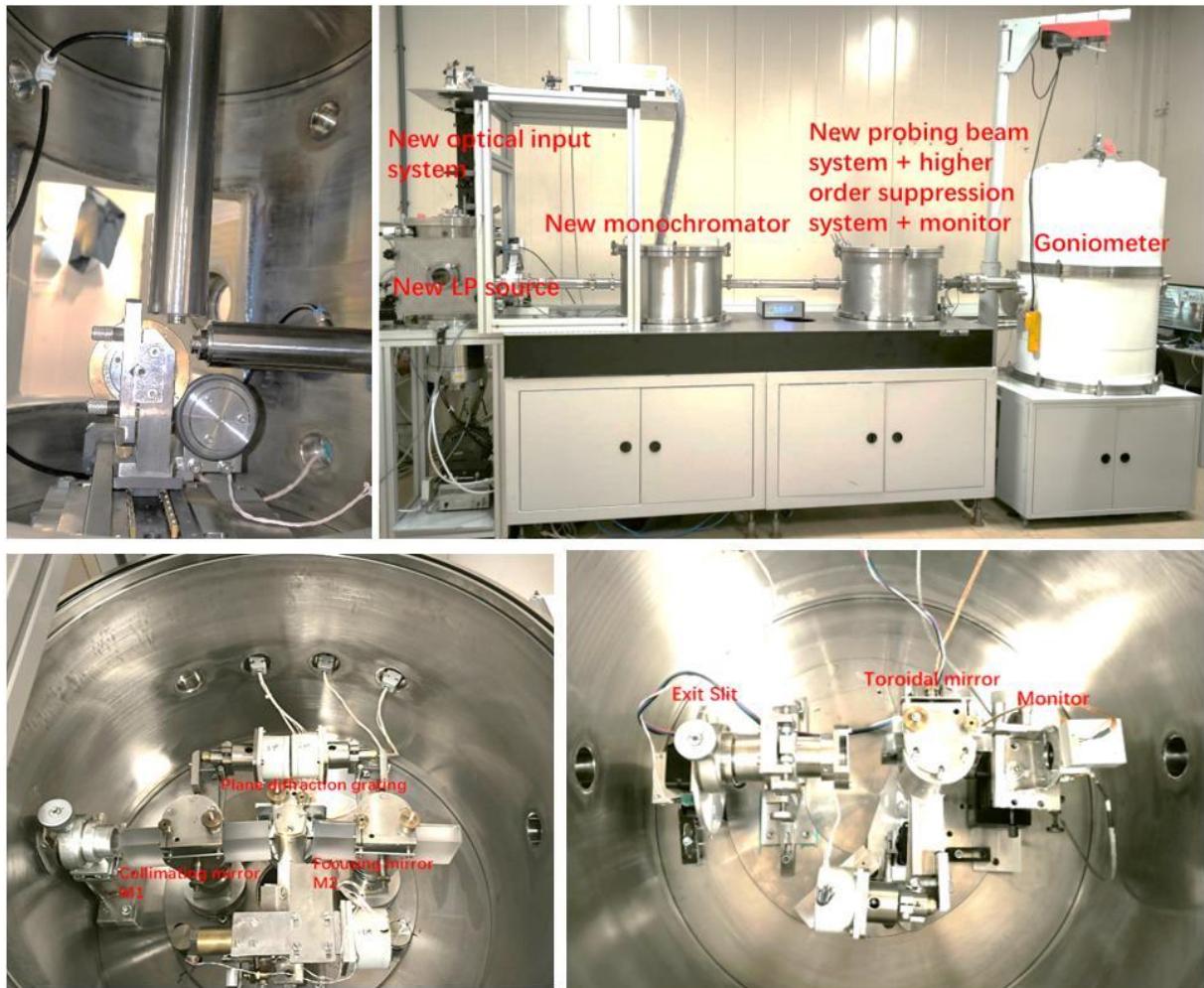


Рис. 1. Схема модернизированного монохроматора в Zemax

Общая длина монохроматора составляет около 2 метров, что даёт значительный оптический рычаг, положительно влияющий на монохроматизирующие свойства прибора. В данной схеме оба оптических рычага имеют одинаковую длину, поэтому изображение источника не имеет увеличения. Эта схема также позволяет работать без входной щели, что означает, что больше фотонов попадёт в систему монохроматора и на детектор. Спектральное разрешение прибора измерялось в нулевом порядке и по разрешению ( крутизне

коэффициента пропускания фильтров) в области краев поглощения материалов фильтров (Al, Si, Be). Описывается новая камера лазерно-плазменного источника, фильтр высших порядков, новые зеркала и усовершенствованный гониометр с датчиками углового и линейного положения.



**Рис. 2.** Фотографии узлов модернизированного рефлектометра

Данный рефлектометр уже обеспечивает точность измерения коэффициента отражения менее 0.5% и спектральное разрешение лучше 0.02 нм. Была проведена обширная модернизация элементов рефлектометра: оптимизирована конструкция мишени лазерно-плазменного источника и системы защиты оптических элементов от продуктов мишени; модернизация детектора интенсивности зондирующего пучка, что позволило повысить точность измерений и спектральную селективность. Оснащение 7-координатного гониометра координатными датчиками значительно повысила точность локализации измерений и упростила саму процедуру измерений, переведя её из полуавтоматического в автоматический режим.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН FFUF-2024-0022.

- [1] S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov et al.// Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 063103.
- [2] С.Ю. Зуев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало и др. // Поверхность. 2015. V. 7. P. 77.

## Содержание

А.В. Бухтияров (ЦКП "СКИФ", Новосибирск) ЦКП "СКИФ": Статус реализации проекта	6
М.А. Андреева (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) Рентгеновская резонансная рефлектометрия	7
П.А. Юнин (ИФМ РАН, Н.Новгород) Диффузное рассеяние рентгеновских лучей	8
В.А. Бушуев (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) Динамика распространения импульсов нейтронов в процессе их френелевского отражения	9
К.Л. Метлов (Донецкий физико-технический институт, Донецк) Микромагнитная теория малоуглового рассеяния нейтронов	10
Д.А. Татарский (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород) Отражение тепловых нейтронов на магнитных пружинах в Co/Pt	11
П.С. Савченков (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Нейtronная рефлектометрия на реакторе ИР-8 и современные подходы к анализу данных	12
А.Е. Пестов (ИФМ РАН, Н.Новгород) Ионно-пучковые методики формирования крупногабаритных подложек для рентгеновских зеркал скользящего падения	13
В.Д. Жакетов (ОИЯИ, Нейтроны) Нейtronное рассеяние от магнито-сверхпроводящих периодических и квазипериодических слоистых структур	16
А.А. Баранников (БФУ им. И. Канта, Калининград) Высокоразрешающая рентгеновская микроскопия с использованием преломляющих линз на базе лабораторного рентгеновского источника излучения	17
Б.С. Рошин (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Оценка сцинтилляционных и электрических свойств кристаллических материалов при их облучении жестким рентгеновским излучением	18
Р.А. Шапошников (ИФМ РАН, Н.Новгород) Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Cr/Ti, оптимизированные на «окно прозрачности воды	19
Н.В. Загайнов (ИФМ РАН, Н.Новгород) Определение оптических констант тонких плёнок на лабораторном источнике мягкого рентгеновского излучения	21
А.А. Саяпина (СПбГУ, Санкт-Петербург) Влияние барьераных слоев кремния на формирование межфазных границ в многослойных нейтронных зеркалах [Ti/Ni]	22
А.В. Карагаев (СПбГУ, Санкт-Петербург) on-line Влияние барьераного слоя углерода на кристаллическую структуру многослойного рентгеновского зеркала Cr/V	24

А.В. Бугаев (СПбГУ, Санкт-Петербург) Формирование межфазных границ в наноразмерных многослойных структурах B4C/(C)/Ru	26
А.В. Бузмаков (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Обработка данных рентгеновской микротомографии	28
В.Е. Асадчиков (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Применения микроканальных стержней и пластин для регистрации и переноса излучений	29
Д.Г. Реунов (ИФМ РАН, Н.Новгород) Трёхзеркальный ЭУФ-микроскоп 345 крат с z-томографией биологических образцов	30
Ю.С. Кривоносов (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Комплексное морфолого-химическое исследование желчных камней разного состава с использованием рентгеновских методов	32
Ю.О. Волков (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Резонансно-аномальная рефлектометрия пространственного распределения рубидия у поверхности кремнезоля	33
С.В. Кузин (ИКИ РАН, Москва) Перспективные отечественные космические проекты для прогноза космической погоды	34
С.С. Морозов (ИФМ РАН, Н.Новгород) Исследование спектров лазерно-плазменных источников при помощи компактного спектрографа на основе VLS-решетки	35
А.К. Чернышев. (ИФМ РАН, Н.Новгород) Разработка метода двухстадийного ионно-пучкового формирования асферичных неосесимметричных оптических поверхностей	37
И.С. Девятайкин. (ИФМ РАН, Н.Новгород) Твердотельный лазерно-плазменный источник нового поколения, разработанный в ИФМ РАН	39
Л.И. Горай (Алферовский университет, Санкт-Петербург) От исследования эффективности дифракционных решеток в конической дифракции до метрологии шаблонов и электронных чипов с топологией 1–30 нм	41
А.В. Скобляков (НИЦ "Курчатовский институт", Москва) Разработка полномасштабных моделей дифракционных спектрографов и методов восстановления рентгеновских спектров излучения плазмы	42
Н.И. Чхало (ИФМ РАН, Н.Новгород) Состояние дел по проекту отечественного рентгеновского литографа	43
В. Паульс (ИФМ РАН, Н.Новгород) Цифровое прототипирование проекционного рентгеновского литографа	44
А.А. Перекалов (ИФМ РАН, Н.Новгород) Исследование поглощения лазерного излучения плазмой, формируемой в газоструйной мишени Хе	45
В.Е. Гусева (ИФМ РАН, Н.Новгород)	48

Угловое распределение ионных токов из лазерной плазмы Xe	
Ибрагим Махмуд Ахмед	49
Electrical Properties of Nanoparticle Contacts in YSZ Under Hydration and X-RAY Conditions	
Коченева А.Г.	50
Применение метода рентгеновской рефлектометрии для исследования свойств тонких пленок, полученных при вакуумном напылении	
Мурзина А.В.	51
Усовершенствование и применение итеративных алгоритмов восстановления фазы изображения	
Шаблов Ю.С.	52
Строение приповерхностного слоя диоксида кремния, облученного ионами аргона, по данным рентгеновской рефлектометрии и рассеяния	
Чернышев А.К.	53
Модернизация ионного источника КЛАН-53М для прецизионной обработки рентгено-оптических поверхностей	
Р.С. Плешков	55
Исследование многослойных периодических систем Ni/Ti с прослойками Si для применения их в нейтронных неполяризующих суперзеркалах с $m=3$ и $m=5$	
Золотов Д.А.	56
Рентгеновская топо-томография в исследовании дефектной структуры крупных синтетических алмазов, выращенных в широком интервале температур и скоростей роста	
Назаров А.А.	57
Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния с использованием машинно-обученного потенциала межатомного взаимодействия	
Глушков Е.И.	58
Учет систематических ошибок измерений методом сдвига на интерферометре Физо	
Петраков Е.В.	59
Метрология асферических зеркал	
Артюхов А.И.	60
Изготовление подложек фокусирующего и ориентационного зеркал на диапазон 20-40 кэВ	
Оськин И.Д.	62
Разработка компактного масс-спектрометра для контроля ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов	
Оськин И.Д.	64
Восстановление карты поверхности для тороидальных оптических элементов	
Реунов Д.Г.	65
Фокусирующая система Киркпатрика-Баезе для синхротронных применений	
Гарахин С.А.	67
Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации оптики в мягком рентгеновском и экстремальном ультра-фиолетовом диапазонах	