

# Конференция «Рентгеновская оптика – 2026»

Черноголовка  
19 – 22 октября 2026 года

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особочистых материалов  
Российской академии наук

# **Конференция «Рентгеновская оптика – 2026»**

**Тезисы докладов**

г. Черноголовка, 19 – 22 октября 2026 года

ББК 22.346.1

К-65

УДК УДК 535-34:061.3

**К-65 Конференция «Рентгеновская оптика – 2026». Тезисы докладов –**  
М., «Гефест», 2026 г. – 68 с.

Развитие современной рентгеновской оптики необходимо для решения целого круга задач. Прежде всего это разработка оптических элементов для управления рентгеновскими пучками на лабораторных и синхротронных источниках рентгеновского излучения. Здесь в качестве оптических элементов выступают монохроматоры, используемые для выделения необходимой энергии рентгеновского излучения на основе кристаллов и многослойных рентгеновских зеркал. Сюда также относятся элементы для фокусировки рентгеновского излучения на основе преломляющих рентгеновских линз и френелевских зонных пластинок скользящего падения. Данные элементы позволяют фокусировать рентгеновских пучки до нанометровых размеров и быть использованными в рентгеновской микроскопии и томографии, микрофлуоресцентной микроскопии. Другое направление рентгеновской оптики связано с развитием современных методов диагностики с использованием рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, рентгеновской топографии, EXAFS и XANES спектроскопии, метода стоячих рентгеновских волн, которые позволяют исследовать тонкопленочные покрытия и низкоразмерные материалы, многослойные структуры, объемные кристаллы, дифракционные оптические элементы. Также развитие рентгеновской оптики необходимо для развития рентгеновской литографии, где для формирования изображения необходимо развитие рентгеновской голографии и использование эффекта Тальбота, создание специальных резистов для рентгеновской литографии.

Комитет по проведению Конференции

Председатель: Рощупкин Д.В., ИПТМ РАН

Учёный секретарь: Иржак Д.В., ИПТМ РАН

Ответственный секретарь: Казьмирук Л.А., ИПТМ РАН

Григорьев М.В., ИПТМ РАН

Программный комитет

Рощупкин Д.В., ИПТМ РАН

Бушуев В.А., МГУ, Москва

Чукалина М.В., ФИЦ ИУ РАН

Иржак Д.В., ИПТМ РАН

## Содержание

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>М.А. Андреева, М.В. Горбунова, Е.Н. Овчинникова</i><br>Кинематическая теория дифракции в анизотропных кристаллах                                                                                                                                                                                                                                                               | 8  |
| <i>Т.С. Аргунова, В.Г. Кон</i><br>Фазово-контрастные изображения дефектов электронной плотности в кристаллах в синхротронном излучении                                                                                                                                                                                                                                            | 9  |
| <i>И.А. Артюков, А.В.Виноградов</i><br>Об однозеркальной рентгеновской литографии                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 10 |
| <i>А.А. Таусенев, Т.А. Семенов, Е.О. Епифанов, В.В. Колдаев, Ю.М. Дымшиц, Н.В. Минаев, Е.И. Мареев, А.М. Тихонов, В.Е. Асадчиков</i><br>Фокусировка рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором                                                                                                                            | 11 |
| <i>А.А. Атаманчук, С.П. Авдеев</i><br>Формирование микролинз на оптическом стекле с помощью электронно-лучевой обработки                                                                                                                                                                                                                                                          | 12 |
| <i>Н.Ш. Ашуров, А.А. Атаханов, Г.Б. Эшонкулов</i><br>Структурные особенности наночастиц серебра в композитах на основе производных целлюлозы: сравнительное исследование методов «сверху-вниз» и «снизу-вверх»                                                                                                                                                                    | 13 |
| <i>Б.Н. Мамадиев, Н.Ш. Ашуров, А.А. Атаханов</i><br>Структурный анализ композитов ZnO/окисленная целлюлоза                                                                                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| <i>Т.М. Бубликова, Т.В. Сеткова, Д. В. Корост, С.Р. Корост, Д.Р. Гафурова</i><br>Сравнительный анализ порового пространства природного и синтетического малахита                                                                                                                                                                                                                  | 15 |
| <i>П.О. Буковский, О.О. Щербакова, Т.И. Муравьева</i><br>Микроскопические исследования изменения поверхности стального контртела в процессе фрикционного взаимодействия с сальниковой набивкой из ТРГ                                                                                                                                                                             | 16 |
| <i>Е.И. Гайворонская, М.И. Гайворонская, И.В. Польшин, Е.С. Керсновский, С.А. Ивков, Я.А. Пешков, А.И. Чукавин, Г.П. Потуданский, Н.В. Пермяков, Н.А. Борщ, А.Е. Никонов, А.В. Ситников, К.А. Барков</i><br>Исследования фазового состава ионно-лучевых пленок Ta-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии                  | 17 |
| <i>М.И. Гайворонская, Е.И. Гайворонская, И.В. Польшин, Е.С. Керсновский, С.А. Ивков, Я.А. Пешков, А.И. Чукавин, Г.П. Потуданский, Н.В. Пермяков, Н.А. Борщ, А.Е. Никонов, А.В. Ситников, К.А. Барков</i><br>Анализ формирования фазы Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> в пленке Mo-Si по данным ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии | 18 |

|                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| С.А.Гарахин, С.С. Морозов, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, Р.М. Смертин<br>Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации рентгенооптических элементов                                                                        | 19 |
| Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Н.А. Костромин, Д.В. Мохов, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, Н.Д. Прасолов, А.Д. Буравлев<br>Дифракционная эффективность среднечастотных решеток с малыми углами блеска для нежного рентгена                                  | 20 |
| В.А. Григорьев, Ф.Н. Чуховский, П.В. Конарев<br>Новый алгоритм численного решения уравнений Такаги-Топена для кристаллов с дефектами                                                                                                                  | 21 |
| Т.Г. Довлатян, А.Н. Шахвердян, Р.К. Мирзоян, К.Г. Труни, К.Т. Айрапетян, В.Н. Агабекян, И.А. Бабаян, С.Н. Норейн<br>Спектральное разложение полихроматического рентгеновского излучения в термоупруго изогнутом монокристалле кварца в геометрии Лауэ | 22 |
| В.П. Дорофеев, В.Г. Криштон<br>Неразрушающий анализ наноструктур методом рентгеновской птихографии: состояние и перспективы                                                                                                                           | 23 |
| К.В. Дуров, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, А.Д. Ахсахалян, Д.Г. Реунов, Е.С. Антюшин<br>Многослойные структуры для зеркал гебелевского типа                                                                                                            | 24 |
| И.Г. Дьячкова, М.М. Синицына, В.Е. Асадчиков, А.В. Бузмаков, Д.А. Золотов, Б.С. Роцин, В.А. Федоров<br>Исследование эффективности различных сцинтилляторов для двумерного рентгеновского детектора                                                    | 25 |
| В.К. Егоров, Е.В. Егоров<br>Особенности РИХЕ спектроскопии в условиях применения плоских рентгеновских волноводов-резонаторов                                                                                                                         | 26 |
| В.К. Егоров, Е.В. Егоров<br>О возможности построения сканирующих рентгеновских литографов                                                                                                                                                             | 27 |
| М.Н. Жуликова, А.А. Баранников, Д.А. Зверев, И.И. Лятун, А.А. Снигирев<br>Оптическая диагностика источника рентгеновского излучения                                                                                                                   | 28 |
| Н.В. Загайнов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Д.Г. Реунов, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало<br>Изготовление и исследование волноводных структур на основе Si/Be/SiO <sub>2</sub> для рентгеновского диапазона                                                | 29 |
| Д.А. Золотов, И.Г. Дьячкова, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, С.В. Кузин, А.С. Кириченко<br>Получение рентгенофлуоресцентных изображений объектов с использованием КМОП-камеры с пинхолом                                                               | 30 |
| О.П. Иванова, А.В. Кривандин, С.А. Завьялов<br>Пленочные наноконпозиты поли-п-ксилилен – сульфид кадмия: электропроводность, структура и спектральные свойства                                                                                        | 31 |
| О.П. Иванова, А.В. Кривандин, С.А. Завьялов<br>Структурные изменения компонент в пленках наноконпозитов поли-п-ксилилен – сульфид кадмия                                                                                                              | 32 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>А.И. Ильин, В.К. Егоров, А.А. Иванов</i><br>Профилирование элементного состава по толщине тонких плёнок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ после осаждения импульсным эксимерным лазером из одной мишени                                                              | 33 |
| <i>Д.В. Иржак, С.Е.Куманяев, К.С. Пундигов, Д.В. Роцупкин, Р.Р. Фахртдинов</i><br>Дифракция рентгеновского излучения на изогнутом кристалле ниобата лития, промодулированном поверхностной акустической волной                                                                     | 34 |
| <i>П.С. Завьялов, Д.В. Карпов,</i><br>Моделирование работы двухкристального Лауэ-монокроматора станции 1-5 ЦКП «СКИФ»                                                                                                                                                              | 35 |
| <i>И.В.Клименко</i><br>Рентгенографическое исследование интеркалированных углеродных волокон на основе пека                                                                                                                                                                        | 36 |
| <i>В.Г. Кон</i><br>Новый вариант теории нанофокусировки пучков жесткого синхротронного излучения составной преломляющей линзой                                                                                                                                                     | 37 |
| <i>И.Ж. Бунин, А.Н. Кочанов</i><br>Применение рентгеновской компьютерной микротомографии для анализа объемных микроструктурных свойств горных пород                                                                                                                                | 38 |
| <i>В.Р. Кочарян, В.В. Маргарян, Г. Кубе, С. Строков, С.Н. Нореян, Г.Ф. Хачатрян, Ю.М. Черепенников, Е.А. Мкртчян, А.П. Потылицын, А.Е. Мовсисина</i><br>Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов в монокристалле кварца в присутствии теплового градиента | 39 |
| <i>Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, В.Е. Асадчиков</i><br>Исследование параметров микротрещин в образцах песчаника и гранита при поэтапном нагружении методами рентгеновской микротомографии и компьютерного моделирования                         | 40 |
| <i>М.Н. Левин, С.П. Наговицын, С.Л. Ермаков</i><br>Рентгеновские микролампы с эмиттером на основе наноструктурированного углеродного материала                                                                                                                                     | 41 |
| <i>А.О. Колесников, М.Д. Логачев, А.Н. Шатохин, Е.А. Вишняков, Е.Н. Рагозин</i><br>Спектрограф с плоским полем на область длин волн 1 – 6 нм                                                                                                                                       | 42 |
| <i>И.И. Лятун, А.С. Коротков, С.С. Лятун, А.А. Баранников, Д.А. Зверев, А.А. Снигирев</i><br>Высокоразрешающая преломляющая микрооптика на основе алмаза и диоксида кремния для когерентной рентгеновской визуализации                                                             | 43 |
| <i>И.И. Лятун, А.А. Баранников, А.С. Коротков, Д.А. Зверев, И.Б. Панормов, А.А. Снигирев</i><br>Бериллиевая преломляющая оптика для экспериментальных станций первой очереди ЦКП «СКИФ»                                                                                            | 44 |
| <i>С. Лятун, И.Лятун, Д.Зверев, И. Снигирева, А.Снигирев</i><br>Рентгеновская рефлекто-интерферометрия на основе преломляющих рентгеновских линз                                                                                                                                   | 45 |
| <i>Д.В. Мохов, Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Н.А. Костромин, Е.В. Пирогов, Н.Д. Прасолов, А.Д. Буравлев</i><br>Кремниевая решетка с периодом 1,2 $\mu\text{m}$ и малым углом блеска: изготовление и характеристика                                                    | 46 |
| <i>А.А. Хади, Т.И. Муравьева, П.О. Буковский, О.О. Щербакова</i><br>Изучение изменений поверхности МДО-покрытий, модифицированных УПТФЭ-Forum, в процессе трибологических испытаний                                                                                                | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| А.В. Мурзина,<br>Программный комплекс cdi-kit для обработки данных когерентной дифракционной визуализации                                                                                                                                                                        | 48 |
| А.М. Назаров, Р.М. Садыгов,<br>Особенности роста и структура эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$                                                                                                                                                          | 49 |
| А. Н. Нечай, В. Е. Гусева, Н. И. Чхало<br>Исследования струйных кластеризованных мишеней в составе лазерно-плазменного источника излучения.                                                                                                                                      | 50 |
| Ю.В. Орлова<br>Изучение фертильности спонтанных гибридов пшеницы $\times$ <i>Ae. Cylindrica</i> методом микрофокусной рентгенографии                                                                                                                                             | 51 |
| Я.А. Пешков, К.А. Барков, Е.И. Гайворонская, А.В. Ситников, С.А. Ивков<br>Применение XRR и USXES для анализа тонких пленок Fe-Si                                                                                                                                                 | 52 |
| Е.С.Коваленко, А.А.Калоян, К.М.Подурец, В.В.Серов<br>Детектор с большим полем зрения для синхротронной визуализации                                                                                                                                                              | 53 |
| И.В. Польшин, Е.И. Гайворонская, М.И. Гайворонская, Е.С. Керсновский, А.В. Ситников, Г.П. Потуданский, К.А. Барков<br>Исследование особенностей фазового состава и электронной структуры ионно-лучевых пленок Mo-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии | 54 |
| Е.В. Храмов, В.В. Привезенцев, В.С. Куликаускас<br>Исследование методом XAFS пленки $\text{Si}_3\text{N}_4$ после Zn/O имплантации                                                                                                                                               | 55 |
| В.И. Пунегов<br>Дифракция рентгеновских лучей от упруго изогнутого кристалла, промодулированного поверхностной акустической волной                                                                                                                                               | 56 |
| Д.В. Роцупкин, Д.В. Иржак, Р.Р. Фахртдинов, К.С. Пундинов, С.Е. Куманяев<br>Дифракция рентгеновского излучения на кристалле $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ , промодулированном поверхностной акустической волной                                             | 57 |
| В.М. Скоркин, М.Н. Лифанов<br>Исследование эластомерных композитных материалов с использованием изотопов $^{241}\text{Am}$ и $^{57}\text{Co}$                                                                                                                                    | 58 |
| И.А.Смирнова, Э.В.Суворов<br>Особенности дифракции рентгеновского излучения в геометрии отражения при механическом изгибе кристалла                                                                                                                                              | 59 |
| М.Н. Сороковиков, Д.А. Зверев, И.И. Лятун, А.А. Баранников, М.А. Воеводина, В.А. Юнкин, А.В. Мяконьких, К.В Руденко, А.А. Снизирёв<br>Исследование влияния технологий глубокого анизотропного травления кремния на качество планарной рентгеновской оптики                       | 60 |
| Ю.В. Тертышная, А.В. Кривандин, И.М. Жильцова<br>Применение метода Брэгга - Брентано для исследования кристаллических структур в композициях полилактид-поликапролактон различного состава                                                                                       | 61 |
| В.Ю. Тугаенко,<br>Исследования микро- и наноструктур, образующихся при прохождении космических тел через атмосферу                                                                                                                                                               | 62 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Р.М. Фещенко, А.В. Митрофанов</i><br>Формирование бесселевых пучков наноразмерными порами в трековых мембранах                                                                                                                                                                     | 63 |
| <i>В.В. Хорошко, С.А. Мигалевич, Е.В. Лоско, Т.Н. Осмоловская, И.И. Кузьмар</i><br>Монокристаллы $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$ : выращивание и структурные свойства                                                                                                                     | 64 |
| <i>Д.П. Николаев, М.В. Чукалина, М.И. Гильманов, Д.Д. Казимиров, А.А. Киркича, Л.Ю. Коляскин, О.А. Бугай, А.В. Бузмаков, Д.В. Полевой, Н.Н. Потрахов, В.В. Арлазаров</i><br>X-SLAM: сверхмалоракурсная томография с произвольным позиционированием источника рентгеновского излучения | 65 |
| <i>Ya.L. Shabelnikova, S.I. Zaitsev</i><br>Confocal multi-channel arrays as collimators for X-ray Fluorescence micro-Analysis and Radionuclide diagnostics                                                                                                                            | 66 |
| <i>О.О. Щербакова, Т.И. Муравьева, П.О. Буковский</i><br>Влияние добавления наноалмазов в матрицу ЭПХГ каучука на морфологию поверхности                                                                                                                                              | 67 |

# Кинематическая теория дифракции в анизотропных кристаллах

М.А. Андреева, М.В. Горбунова, Е.Н. Овчинникова

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Анизотропия рассеяния рентгеновского излучения вблизи краев поглощения приводит, как известно, к появлению «запрещенных» рефлексов. В теории дифракции в этом случае амплитуду рассеяния и показатель преломления представляют в виде матрицы в ортах  $\sigma$ - и  $\pi$ - поляризованных волн, поскольку анизотропия приводит к изменению поляризации рассеянного излучения. Вблизи краев поглощения нельзя игнорировать влияние поглощения и преобразования поляризации при распространении излучения. В теории дифракции для мозаичного кристалла до сих пор ограничивались учетом этих эффектов для интенсивности проходящего и рассеянного излучения [1-3].

Мы рассматриваем влияние поглощения и преобразования поляризации на распространение излучения в одном блоке мозаики, то есть пересчитываем функцию Лауэ  $\hat{F}^L$  в матричном виде:

$$\hat{F}^L = (\hat{F} + \hat{A}_2 \hat{F} \hat{A}_1 + \hat{A}_2^2 \hat{F} \hat{A}_1^2 + \dots + \hat{A}_2^{N-1} \hat{F} \hat{A}_1^{N-1}) \quad (1)$$

где  $\hat{F}$  - матрица структурной амплитуды в  $\sigma$ - и  $\pi$ - ортах,  $N$  - число отражающих плоскостей, а матричные экспоненциалы  $\hat{A}_1 = e^{i\hat{\eta}_1 kz}$ ,  $\hat{A}_2 = e^{i\hat{\eta}_2 kz}$ , описывают набег фазы, а также преобразование поляризации и поглощение для проходящей и рассеянной волн соответственно,

$$\hat{\eta}_i = \sqrt{\sin^2 \theta_i + 2(\hat{\eta}_i - 1)} \approx \sin \theta_i + \frac{\hat{\eta}_i - 1}{\sin \theta_i}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

$\theta_i$  - углы с поверхностью для проходящей и дифрагированной волн,  $\hat{\eta}_i$  - матричный показатель преломления для этих направлений. Существенно, что  $\hat{F}$  нельзя вынести из суммы, как это обычно делается для применения формулы геометрической прогрессии, ввиду смешивания компонент при перемножении трех матриц. Однако, вычисление (1) достаточно быстрое по принципу мультипликативного интеграла.

Спектральные зависимости компонент матриц  $\hat{F}$  и  $\hat{\eta}_i$  для вычисления спектров отражения получены с использованием FDMNS комплекса [4]. Результат расчета  $|\hat{F}^L|^2 / N^2$  при фиксированном угле

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2D}\right) = 57.224^\circ \quad (D=0.1037 \text{ нм для отражения (105)}, \lambda = \frac{12.398}{E_{ph}^{res}}, E_{ph}^{res} = 7.112 \text{ keV} - \text{энергия К-края поглощения атомов Fe})$$

представлен на Рис. 1. На графиках также представлено изменение формы спектра при некогерентном сложении волн (модули в квадрате в сумме (1)) для толщины 424.65 нм, со-

ответствующей 4048 периодам (кривая обозначена «Mosaic»).

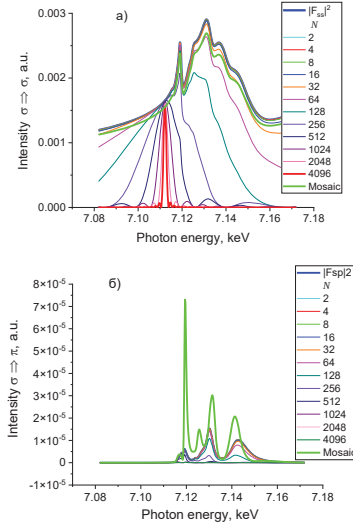


**Рис. 1.** Спектры (105) симметричного  $\sigma \rightarrow \sigma'$  (а) и  $\sigma \rightarrow \pi'$  (б) разрешенного отражения от кристалла  $\text{Ba}_3\text{TaFe}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{14}$ , рассчитанные с использованием (1) для разного числа элементарных ячеек  $N$  в одном блоке мозаики.

Расчет показывает, что поглощение и преобразование поляризации при когерентном сложении волн (по формуле (1)) существенно даже для небольших толщин блока мозаики, что не учитывалось в предшествующих работах, рассматривающих только преобразование интенсивности при распространении волн [1-3]. Для  $|F_{\sigma\sigma}^L|^2 / N^2$  (Рис. 1а) при увеличении  $N$  возникает примечательный эффект: преобразование спектра фактически в функцию Лауэ (фазовый множитель  $e^{i4\pi \sin \theta D / \lambda}$  побеждает слабую спектральную зависимость). Интенсивность рассеяния с «повернутой поляризацией» при некогерентном сложении волн (Рис. 1б) существенно усиливается за счет преобразования поляризации при распространении волн. Этот эффект описан в [5].

Нами обнаружен также интересный эффект [6] совпадения форм спектров для случая некогерентного и интегрального по углу когерентного сложения волн.

Нами обнаружен также интересный эффект [6] совпадения форм спектров для случая некогерентного и интегрального по углу когерентного сложения волн.

1. M.A. Andreeva, R.N. Kuz'min. Phys. Stat. Sol. (b), 1975, 71, K201-204.
2. V.E. Dmitrienko, V.A. Belyakov. Acta Cryst., 1980, A36, 1044-1050.
3. S.P. Collins, I. Dolbnya, B.A. Palmer et al. Journal of Physics: Conf. Ser., 2013, 425, 132015-1-5.
4. www.neel.cnrs.fr/fdmnes
5. Е.Н. Овчинникова, М.И. Горбунова, Кристаллография, 2026, в печати
6. M.A. Andreeva, E.N. Ovchinnikova, M.V. Gorbunova, J. Appl. Cryst., in press.

## Фазово-контрастные изображения дефектов электронной плотности в кристаллах в синхротронном излучении

Т.С. Аргунова<sup>1</sup>, В.Г. Кон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Россия, г. С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, г. Москва, пл. Курчатова, 1

Изображения микро-неоднородностей в кристаллах получают в когерентном синхротронном излучении (СИ) методом фазово-контрастного изображения (ФКИ) [1]. При этом локальное изменение фазы, связанное с изменением электронной плотности в кристалле, преобразуется в распределение интенсивности на некотором расстоянии от образца. Интенсивность измеряется высоко-разрешающим детектором. Однако неоднородность пучка СИ и малая величина отношения полезного сигнала к статистическому шуму снижают качество экспериментальных результатов. Кроме того, детекторы имеют темновой шум и битые пиксели. Аномально яркие пиксели на изображениях могут быть также вызваны прямым попаданием СИ на ПЗС-матрицу в процессе рассеяния.

Для устранения из экспериментальных данных нежелательных эффектов, которые возникают в процессе сбора данных, разрабатываются специальные компьютерные программы. В частности, известна коммерческая программа, оптимизирующая качество изображений, измеренных на малом расстоянии от образца методом томографии [2]. Метод томографии хорошо подходит для объектов с относительно большими размерами, когда за счет быстрого изменения фазы осцилляции интенсивности имеют малый период и легко усредняются, а изменение модуля волновой функции обусловлено поглощением.

Напротив, ФКИ слабопоглощающих объектов с малыми размерами: микропор, включений, и т.д., содержат осцилляции интенсивности с большим периодом, связанные с измерением фазы. В этом случае для получения информации о реальном изменении толщины кристалла необходимо решать обратную задачу. Соответственно оптимизация качества ФКИ остается актуальной проблемой.

В настоящей работе предложен оригинальный подход к обработке ФКИ, полученных на источнике СИ 3-го поколения «Pohang Light Source», Республика Корея. Интенсивность измерялась детектором Orca-Fusion (Hamamatsu Photonics, Japan) на матрице 2304×2304 пикселей с эффективным размером пикселя  $\leq 1$  мкм. Детектор записывал данные измерений в файлы формата tiff, 16 бит. Обработка данных выполнялась по авторским программам, написанным на языке программирования VKACL. Интерпретатор этого языка, комплекс программ и документацию для работы можно бесплатно получить в интернете [3].

Программа преобразует 16-битные числа tiff-файла в стандартную числовую матрицу и проводит подготовительный анализ. Обработка изображения выполняется с помощью математических операций с матрицами. К ним относятся: деление матрицы изображения на матрицу фона, и усреднение элементов полученной матрицы с целью снижения статистического шума и выравнивания фона. Также возможно выделение одномерного массива из двумерного; усиление контраста и т.д. Программа выполняет 16 операций, но это число может быть увеличено в будущем при возникновении новых идей для разработки.

Следует отметить, что в результате применения операции деления матриц к изображению кристалла, не содержащего структурных неоднородностей, должен получиться однородный фон. На самом деле фон получается неровным из-за статистического шума пучка. Шум удается резко уменьшить по амплитуде при усреднении экспериментальной матрицы методом расчета свертки с локализованной функцией разного типа. Функция Гаусса и функция, отличная от нуля в квадрате заданного размера, позволяют уменьшить амплитуду коротковолнового шума, но длинноволновый шум остается.

Принципиально новой является операция выравнивания фона и снижения шума, основанная на свойстве ФКИ не изменять интегральную интенсивность. Она хорошо работает в тех случаях, когда контраст от объектов существенно больше шума, а размеры объектов малы по сравнению с размерами, на которых падающий пучок изменяется заметным образом. При этом все изображение разделяется на блоки, и в каждом из них проводится нормировка на единичное среднее значение.

В докладе представлены примеры применения программы к экспериментальным данным, полученным при изучении реальных кристаллов. В частности, рассмотрены микронеоднородности в CVD-алмазах и структурные характеристики биосенсоров на основе композиций графен/SiC. Проведено сравнение результатов обработки ФКИ с данными методов, использующих электронное и ионное излучение.

1. Т.С. Аргунова, В.Г. Кон. УФН, (2019), 189, 643–658.
2. J. Vlassenbroeck, M. Dierick, B. Masschaele, *et al.* NIM A, (2007), 580, 442–445.
3. В.Г. Кон. Сайт компьютерной программы VKACL. 2026. <https://kohnvict.ucoz.ru/vkac/ACLnews.htm>

## Об однозеркальной рентгеновской литографии

И.А. Артюков<sup>1</sup>, А.В.Виноградов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр., 53, Москва

Необходимость использования 6-7 зеркал в проекционной оптической системе рентгеновского (ЭУФ) литографа приводит к суммарному пропусканию системы всего в 2-3 %. С учётом относительно невысокой интенсивности ондуляторов синхротронных источников излучения в ЭУФ диапазоне по сравнению с более коротковолновым спектром возникает вопрос о принципиальной возможности перехода в более жёсткий рентгеновский диапазон с соответствующим уменьшением числовой апертуры и сокращением количества зеркал.

Переход к более коротковолновому диапазону практически может решить две задачи: позволить использовать существенно меньшие числовые апертуры оптики и обеспечить более эффективное использование уже разработанных синхротронных

источников и рентгеновских лазеров на свободных электронах.

В этой связи необходимо также отметить новую концепцию развития рентгеновской литографии с переходом к более коротким длинам волн  $\ll 13$  нм, получившую название Blue-X [1, 2].

В докладе представлен расчёт и анализ разрешающей способности и поля зрения малоапертурной однозеркальной рентгенооптической системы, разработанной для получения уменьшенных изображений шаблона, а также рассмотрена возможность её применения с источником синхротронного излучения.

1. V. Bakshi. EE Times, 2018, <https://www.eetimes.com/euv-roadmap-needs-extension/>
2. R.R. Dammel. Proc. SPIE, 2026, 13983, 1398311.

# Фокусировка рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором

А.А. Таусенев<sup>1</sup>, Т.А. Семенов<sup>1</sup>, Е.О. Елифанов<sup>1</sup>, В.В. Колдаев<sup>1</sup>, Ю.М. Дымшиц<sup>1</sup>,  
Н.В. Минаев<sup>1</sup>, Е.И. Мареев<sup>1</sup>, А.М. Тихонов<sup>2</sup>, В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский Институт», 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

<sup>2</sup> Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, 119334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д.2, стр. 1

Продemonстрирована фокусировка излучения лазерно-плазменного рентгеновского микрофокусного источника с помощью эллиптического концентратора в пятно  $\sim 20$  мкм (увеличение 1:2) на расстоянии 42 см. Достигнутый поток рентгеновских фотонов в фокусе концентратора составил  $10^9$  фот/с/см<sup>2</sup>. Показано, что концентратор не искажает спектр передаваемого излучения. В работе использован лазерно-плазменный микрофокусный источник на основе медной мишени: выход  $\text{Cu K}\alpha \sim 10^8$  фот/ср·с составил 30% в регистрируемом спектре 3–12 кэВ, размер источника  $\sim 10$  мкм.

Микрорентгенофлуоресцентная спектроскопия позволяет осуществлять неразрушающий анализ элементного состава образца [1]. Фокусировку на исследуемые объект моно- или полихроматического рентгеновского излучения удобно осуществлять с помощью эллиптических концентраторов [2]. В настоящей работе мы демонстрируем возможность фокусировки рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором

Для создания плазменного рентгеновского источника использовалось лазерное излучение иттербиевый фемтосекундной системы ANTAUS-10W-40u/250K (длина волны излучения 1030 нм, энергия в импульсе 10 мкДж, длительность импульса 280 фс, частота следования 2 МГц). Лазерное излучение фокусировалось на мишень с помощью микрообъектива ( $\text{NA} = 0.2$ ) в пятно диаметром  $\approx 4$  мкм (по уровню 1/е), что позволяло достигать интенсивности  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Мишень представляла собой медный цилиндр, вращающийся с частотой 5000 об/мин, скорость ее вертикального перемещения составляла  $\approx 3$  см/мин. Интегральный выход рентгеновского излучения из плазмы регистрировался с помощью рентгеновского сцинтилляционного детектора SCSD-4 Радикон. Также в работе использовался спектрометр рентгеновского излучения X-123 (Amptek, USA). Фокусировка излучения рентгеновского микрофокусного источника осуществлялась с помощью эллиптического концентратора длиной 38 см (фокусы находятся на расстоянии 2 см от входа и выхода). Угловая юстировка концентратора на источник выполнялась с помощью лазерного трассера. Так, тонкий (диаметр 0.5 мм) пучок трассера проводился через концентратор и плазменную искру, зажигаемую на воздухе. Измерения размера рентгеновского

пятна фокусировки производилось с помощью двумерных детекторов собственной разработки.

## Результаты

Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> и частотой 2 МГц на поверхность медной мишени приводит к зажиганию горячей плазмы, излучающей жесткое рентгеновское излучение вплоть до 12 кэВ с температурой спектра около 2 кэВ. Установлено, что выход характеристического рентгеновского излучения  $\text{Cu K}\alpha$  (8 кэВ) находился на уровне  $\approx 10^8$  фотонов/[ср·с]. При этом доля  $\text{K}\alpha$  излучения в рентгеновском спектре (3 – 12 кэВ) составила 30%. Размер микрофокусного источника (по уровню 1/2) равен примерно 10 мкм, который был измерен методом края.

Показана фокусировка рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором в пятно  $\approx 20$  мкм (перенос с увеличением 1:2) на расстояние 42 см. Выявлено, что эллиптический концентратор не изменяет спектр передаваемого излучения. Обнаружено, что в фокальном пятне концентратора создается поток квантов  $10^9$  фот/с/см<sup>2</sup> в диапазоне 3 – 12 кэВ.

Достигнута стабильная генерация  $>3$  часов микрофокусного источника с помощью установки локальной откачки аблированных частиц из области между объективом и мишенью, которая нивелирует негативные эффекты от их накопления. В докладе обсуждается использование созданной системы генерации и фокусировки рентгеновского излучения для картирования образцов методом рентгеновской флуоресценции.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” в части оптимизации микрофокусного рентгеновского источника и по Соглашению с Минобрнауки № 075-15-2025-458 в части регистрации рентгеновских изображений.

1. Heimler, K., Gottschalk, C., & Vogt, C. (2023). Confocal micro X-ray fluorescence analysis for the non-destructive investigation of structured and inhomogeneous samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(21), 5083.
2. Yakimchuk, I. V., Kozhevnikov, I. V., Politov, V. Y., & Asadchikov, V. E. (2013). Ellipsoidal concentrators for laboratory X-ray sources: Analytical approach for optimization. *Crystallography Reports*, 58(2), 355-364.

# Формирование микролинз на оптическом стекле с помощью электронно-лучевой обработки

А.А. Атаманчук<sup>1</sup>, С.П. Авдеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42.

В настоящее время разработано множество методов изготовления микрооптических структур и компонентов. Среди популярных подходов можно выделить оплавление, горячее прессование, струйную печать, жидкостное и сухое травление, двухфотонную полимеризацию, микромеханическую резку [1–3]. Большая часть известных подходов изготовления микрооптических структур нацелена на изготовление микролинз и массивов микролинз преимущественно из полимерных материалов, например полидиметилсилоксан. Однако, изготовление из не-полимерных материалов является важной областью в микрооптике космической и лазерной техники.

Не-полимерные материалы представляют из себя как традиционные для оптики вещества, так и более перспективные. К традиционным в первую очередь относятся различного состава и структуры стекла: кроны, флинт, кварц, кремний и германий (оптика инфракрасного излучения), алмаз (оптика рентгеновского излучения) и др. Среди перспективных материалов выделяются различного рода керамические соединения: карбид кремния, лейкосапфиры и др. Необходимость в использовании не-полимерных материалов обусловлена особыми требованиями, предъявляемыми к оптическим изделиям, изготавливаемым из них. В тех приложениях, где необходима стойкость к внешним факторам и стабильная работа в агрессивных средах, например в гомогенизаторах лазерного излучения, работающих в условиях высоко интенсивных потоков излучения, кристаллические оптические материалы имеют решающее преимущество перед полимерными матрицами.

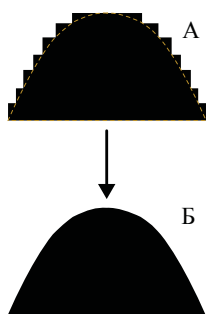


**Рис. 1.** Оплавление ступенчатой структуры линзы А в результате электронно-лучевой обработки с целью формирования линзы Б.

Химическая и механическая стойкости кристаллических оптических материалов вызывают трудности в их обработке и обуславливают специфику методов изготовления изделий из них. К основным методам производства можно отнести жидкостное и сухое травление, микромеханическое резание и лазерную

обработку (абляцию) [3–5]. В зависимости от выбранного метода изготовления микролинз их поверхность нуждается в последующей полировке для удаления дефектов, внесённых в процессе изготовления. К тому же для изготовления асферических микролинз методом лазерной абляции или жидкостного/сухого травления форму линз необходимо приближать с помощью ступенчатого профиля (рис. 1), который после его формирования необходимо сгладить для достижения требуемого качества поверхности. Как правило, за надлежащее качество поверхности считают поверхность с шероховатостью  $Ra \leq \lambda/20$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения [6]. Одним из возможных подходов как для улучшения качества поверхности, так и для профилирования поверхности является электронно-лучевая обработка (ЭЛО).

ЭЛО заключается в локальном тепловом поверхностном воздействии на стеклянные микролинзы. В зависимости от мощности облучения электронами ЭЛО может привести как к сокращению шероховатости поверхности, устранению/залечиванию дефектов, так и к более крупномасштабным изменениям, например к профилированию поверхности (рис. 1) за счёт сил тяжести и поверхностного натяжения.

Текущая работа направлена на моделирование процесса оплавления ступенчатых структур при ЭЛО на оптическом стекле и формирования таким образом заданного профиля микролинзы.

1. Fabrication of Microlens Array and Its Application: A Review / W. Yuan [и др.] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2018. Дек. Т. 31, № 1. ISSN 1000-9345, 2192-8258. DOI: 10.1186/s10033-018-0204-y.
2. Fabrication, Characterization, and Applications of Microlenses / T. Hou [и др.] // Applied Optics. 2015. 20 авг. Т. 54, № 24. С. 7366. ISSN 0003-6935, 1539-4522. DOI: 10.1364/ao.54.007366.
3. Microlenses Arrays: Fabrication, Materials, and Applications / S. Cai [и др.] // Microscopy Research and Technique. 2021. Ноябрь. Т. 84, № 11. С. 2784–2806. ISSN 1059-910X, 1097-0029. DOI: 10.1002/jemt.23818.
4. Stepped Confocal Microlens Array Fabricated by Femtosecond Laser / J. Wu [и др.] // Photonics. 2025. 16 мая. Т. 12, № 5. ISSN 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics12050494.
5. Xu R., Zhou T., Cheung R. Fabrication of SiC Concave Microlens Array Mold Based on Microspheres Self-Assembly // Microelectronic Engineering. 2021. 15 февр. Т. 236. С. 111481. ISSN 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111481.
6. Photopolymer Resins from Sulfenyl Chloride Commodity Chemicals for Plastic Optics, Photopatterning and 3D-Printing / C. Olikagu [и др.] // Advanced Materials. 2025. Т. 37, № 14. С. 2418149. ISSN 1521-4095. DOI: 10.1002/adma.202418149.

# Структурные особенности наночастиц серебра в композитах на основе производных целлюлозы: сравнительное исследование методов “сверху-вниз” и “снизу-вверх”

Н.Ш. Ашуров<sup>1</sup>, А.А. Атаханов<sup>1</sup>, Г.Б. Эшонкулов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии и физики полимеров АН РУз, 100128, г.Ташкент, ул. А.Кадыри 76, e-mail: [polymer@academy.uz](mailto:polymer@academy.uz)

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, 100174, г.Ташкент, ул. Университетская 4

Композитные материалы на основе наноцеллюлозы, функционализированной наночастицами серебра (Ag НЧ), перспективны для биомедицины, катализа и оптоэлектроники [1-3]. Структурное совершенство и фазовый состав наночастиц критически зависят от метода синтеза. В данной работе методом рентгеновской дифракции (XRD) и полнопрофильного анализа (WPPF) проведено систематическое сравнение двух подходов: «сверху-вниз» (лазерная абляция Ag в среде суспензии ОНЦ) и «снизу-вверх» (фотоиндуцированное УФ-восстановление Ag<sup>+</sup> в присутствии ОНЦ).

Для образца Ag ОНЦ (лазерная абляция) характерна экстремальная кинетика – кавитация, плазменный нагрев и сверхбыстрое охлаждение. Для образца Ag<sup>+</sup>УФ ОНЦ (УФ-восстановление) реализуется мягкое фотокаталитическое восстановление с контролируемой нуклеацией. Качество уточнения структурных моделей оценивалось по факторам сходимости Rwp и  $\chi^2$ . Оба образца демонстрируют высокую точность подгонки, однако несколько большие значения для УФ-образца (Rwp = 1,95%) указывают на присутствие микрогетерогенностей и аморфных прослоек.

Для образца Ag ОНЦ (лазерная абляция) наблюдается аномальное сжатие кубической (ГЦК) решетки Ag ( $a = 3,41 \text{ \AA}$ ) относительно стандартного металлического серебра ( $a = 4,09 \text{ \AA}$ ) на ~16%. Это прямое доказательство формирования суб-нано кластеров (2–3 нм), где доминируют поверхностные эффекты и высокие внутренние давления, вызванные кавитацией и быстрой закалкой. Деформация решетки составляет 0,133%. Кроме того, для данного метода зафиксирована метастабильная гексагональная аллотропная модификация Ag ( $a = 1,977 \text{ \AA}$ ,  $c = 12,87 \text{ \AA}$ ). Такая фаза характерна для ультрамалых кластеров (10–15 атомов) и стабилизируется за счет неравновесных условий синтеза. Её высокая деформация (0,977%) свидетельствует о неоднородном распределении межатомных связей. Присутствие фазы NaAgO ( $a = 9,397 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,772 \text{ \AA}$ ) подтверждает сильное химическое взаимодействие наночастиц с карбоксильными и гидроксильными группами оксидированной наноцеллюлозы.

Для образца Ag<sup>+</sup>УФ ОНЦ (УФ-восстановление) картина принципиально иная. Кубическая фаза Ag имеет параметры, близкие к стандартным ( $a = 4,1 \text{ \AA}$ ), с минимальной деформацией (0,02%), что указывает на равновесный рост частиц и их более крупный размер. Гексагональная фаза также

присутствует, но её количество снижено вдвое, а параметры решетки ( $a = 2,01 \text{ \AA}$ ,  $c = 12,44 \text{ \AA}$ ) ближе к объемным значениям; деформация (0,427%) в два с лишним раза ниже, что отражает более качественную кристаллизацию. Интересно, что фаза NaAgO в УФ-образце демонстрирует расширение решетки ( $a = 9,436 \text{ \AA}$ ), которое можно объяснить частичной потерей ионов Na<sup>+</sup> в процессе фотокатализа или изменением степени гидратации.

Метод лазерной абляции («сверху-вниз») генерирует ультрамалые кластеры Ag с экстремально сжатой ГЦК-решеткой и метастабильной гексагональной фазой. Высокие значения микронапряжений (до 0,98%) – прямой маркер неравновесности процесса.

УФ-восстановление («снизу-вверх») приводит к формированию более равновесных структур с параметрами решетки, близкими к массивному Ag, и существенно меньшими деформациями, что делает этот метод предпочтительным для получения стабильных нанокомпозитов с воспроизводимыми свойствами.

Обнаружение гексагональной фазы Ag в обоих случаях, но с разной степенью деформации, позволяет утверждать, что она является не артефактом, а реальной аллотропной формой, стабилизированной в наноразмерном диапазоне и в присутствии функционализированной целлюлозной матрицы.

Параметр деформации решетки (strain) выступает чувствительным критерием для оценки «кинетической жесткости» синтеза: чем выше скорость охлаждения/восстановления, тем больше накопленные упругие напряжения.

Таким образом, выбор метода синтеза НЧ Ag в матрице ОНЦ диктует конечную структуру – от неравновесной, высокодеформированной (лазерная абляция) до квазиравновесной, низкодефектной (УФ-восстановление). Полученные результаты создают основу для направленного дизайна нанокомпозитов с заданными антибактериальными, каталитическими или проводящими свойствами.

1. N.Z. Ramesha et al. Properties and Characterization of Nanocellulose and Nanocellulose-Based Composites, Woodhead Publishing, 2026, 85-120,
2. B.M. Vuangi et al. International Journal of Biological Macromolecules 349, (2026), 150535
3. Zulfqar Ali Raza et al. Cellulose (2025), 32, 1423–1446

# Структурный анализ композитов ZnO/окисленная целлюлоза

Б.Н. Мамадиев, Н.Ш. Ашуров, А.А. Атаханов

Институт химии и физики полимеров АН РУз, 100128, г.Ташкент, ул. А.Кадыри 76, e-mail: [polymer@academy.uz](mailto:polymer@academy.uz)

Оксид цинка (ZnO) является одним из наиболее перспективных материалов, обладающих высокой экологической безопасностью, химической стабильностью и выраженными фото-, пьезо- и антимикробными свойствами [1-2]. Особый интерес представляет конструирование гибридных материалов на основе ZnO и природных полимеров, в частности окисленной наноцеллюлозы (ОНЦ). Введение функциональных кислородсодержащих групп в целлюлозную матрицу создаёт дополнительные центры комплексообразования для ионов  $Zn^{2+}$ , что позволяет управлять процессами нуклеации и роста кристаллических фаз [3]. Такой подход открывает путь к созданию биосовместимых, биоразлагаемых и функционально активных материалов для биомедицины, катализа и экологии [4]. Однако фундаментальные аспекты взаимодействия фаз ZnO с полярными группами окисленной целлюлозы, влияние матрицы на кристаллографические параметры и иерархическую морфологию остаются недостаточно изученными. Настоящая работа посвящена комплексному анализу фазового состава и микроструктурной организации композитов ZnO+ОНЦ.

Рентгенофазовый анализ выявил наличие двух кристаллических модификаций оксида цинка в синтезированных образцах. Доминирующей является гексагональная фаза вюрцита с параметрами элементарной ячейки  $a = 3.25 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.21 \text{ \AA}$ . Эти значения хорошо согласуются с литературными данными для гексагонального вюрцита ( $a=3.24\text{--}3.25 \text{ \AA}$ ,  $c=5.20 \text{ \AA}$ ) [5]. Рассчитанная величина деформации решётки составляет всего 0,158 %, что свидетельствует о высокой степени кристаллической упорядоченности и незначительных искажениях решётки. Столь малые деформации характерны для крупных кристаллитов, формирующихся в условиях, близких к равновесным, что коррелирует с классической моделью Оствальдовского созревания. Вторая фаза идентифицирована как метастабильный вульфнгит (орторомбическая сингония) с параметрами  $a = 4.94 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.41 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.93 \text{ \AA}$ . Появление этой фазы, обычно нестабильной при нормальных условиях, обусловлено, вероятно, кинетическими ограничениями и поверхностными эффектами в наноразмерном состоянии, а также взаимодействием с гидроксильными группами целлюлозы.

Интересно, что введение ОНЦ приводит к возрастанию деформации решётки вульфнгита до 0.335 %, что почти вдвое превышает аналогичный показатель для вюрцита. Это различие указывает на избирательное механическое воздействие макромолекул целлюлозы на разные кристаллографические направления. Вероятно,

полярные функциональные группы ОНЦ создают анизотропные внутренние напряжения, которые сильнее влияют на менее симметричную орторомбическую решётку, что согласуется с теорией упругих деформаций в гетерогенных системах.

Карбоксильные и гидроксильные группы, выступающие в роли центров координации для  $Zn^{2+}$ , что является прямым экспериментальным подтверждением гетерогенной нуклеации по механизму «роста на активных центрах», что согласуется с моделями Стронского-Крастанова для систем полимер-неорганика.

При этом полимерная цепь оказывает стерическое затруднение, ограничивая неограниченное развитие кристаллитов, что приводит к формированию нано- и субмикронных агрегатов.

Установлена корреляция между фазовым составом и морфологией: основная вюрцитная фаза формирует кристаллиты с менее выраженной анизотропией, в то время как метастабильный вульфнгит, вероятно, локализуется в тонких поверхностных слоях и проявляет повышенную чувствительность к механическим напряжениям со стороны полимера. Различие в деформациях (0.158 % против 0.335 %) позволяет сделать вывод о том, что целлюлозная матрица выступает не только инертным носителем, но и активным участником структурообразования, влияя на межатомные расстояния и симметрию решётки.

Проведённое исследование показало, что окисленная целлюлоза является эффективной матрицей для направленного формирования композитов с ZnO, проявляющих двойственный фазовый состав (вюрцит+вульфнгит) и двухуровневую иерархическую морфологию. Установлено, что полимерная составляющая индуцирует селективные деформации кристаллических решёток, зависящие от симметрии фазы, что может быть использовано как инструмент модуляции свойств. Полученные результаты закладывают фундаментальную основу для создания нового класса биосовместимых и функционально активных гибридных материалов с прогнозируемой структурой и свойствами.

1. Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C., et al. Journal of Applied Physics, 2005, 98, 041301.
2. Wang Z.L. Journal of Physics: Condensed Matter, 2004, 16, R829–R858.
3. Fujisawa S., Saito T., Kimura S., et al. Cellulose, 2017, 24, 4861–4870.
4. Gowthami S., Ravindran L., Sethu Lakshmi M.B., et al. Applied Research, 2025, 4(4), e70030.
5. Suciati S.W., Prastica L., Supriyanto A., et al. Jurnal ilmiah pendidikan fisika Al-Biruni, 2025, 14(2), 71-86.

# Сравнительный анализ порового пространства природного и синтетического малахита

Т.М. Бубликова<sup>1</sup>, Т.В. Сеткова<sup>1</sup>, Д. В. Корост<sup>2</sup>, С.Р. Корост<sup>2</sup>, Д.Р. Гафурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН  
142432 Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 4

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет Москва  
119234 Москва, ГСП-1, Ленинские горы

Малахит, основной карбонат меди  $[\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2]$  – на протяжении нескольких веков остается одним из популярных и востребованных ювелирно-поделочных камней благодаря своим уникальным текстурным характеристикам и высоким декоративным качествам. В связи с истощением месторождений Урала и прекращением добычи большая часть малахита в настоящее время поступает из Центральной Африки (ДР Конго, Замбия). В сложившихся условиях дефицита природного малахита в период 1970–1980 гг. были разработаны три технологии его синтеза (ВНИИСИМС, г. Александров; СПбГУ, Санкт-Петербург и ИЭМ РАН, Черноголовка), которые позволили синтезировать большинство текстурных разновидностей малахита, по структуре и физико-химическим характеристикам идентичного природному минералу [1,2]. Тем не менее, были обнаружены и некоторые различия. Измерения плотности малахита, проведенные Т.В. Черненко и Е.П. Мельниковым, показали, что плотность синтетического малахита на 7–16 % меньше, чем природного [3]. Для установления причин пониженной плотности методом электронной микроскопии было изучено внутренне строение 15 образцов природного и синтетического малахита. Во всех исследованных образцах установлено наличие пор, микротрещин и пустот размерами от первых микрон до нескольких миллиметров (рис.1). Однако дать сравнительную количественную оценку пористости по результатам изучения строения поверхностных слоев и сколов образцов не представлялось возможным. Детально структура порового пространства двух образцов (синтетического малахита ИЭМ РАН и природного малахита месторождения Колвези, ДР Конго) была исследована методом рентгеновской компьютерной микротомографии (микро-КТ), который позволяет анализировать строение минерала во всем объеме образца без изменения его структуры и свойств [4]. Изучение образцов проводилось с помощью микрофокусной рентгеновской трубкой Hamamatsu 100/250 и детектором (ПЗС-матрица 11 Мрiх). Последующая реконструкция полученных данных проводилась с помощью программного обеспечения Datos и NRecon (Bruker). Установлено, что средний и максимальный диаметры пор в синтетическом малахите больше, чем в природном минерале, но их количество в образце природного малахита больше, чем в синтетическом. Суммарный объем пор в образцах синтетического малахита в среднем на 40% превышает объем пор в образце природного малахита (Таблица 1). Таким образом, более высокая пористость синтетического малахита является основ-

ным фактором пониженной плотности синтетического аналога в сравнении с природным минералом.

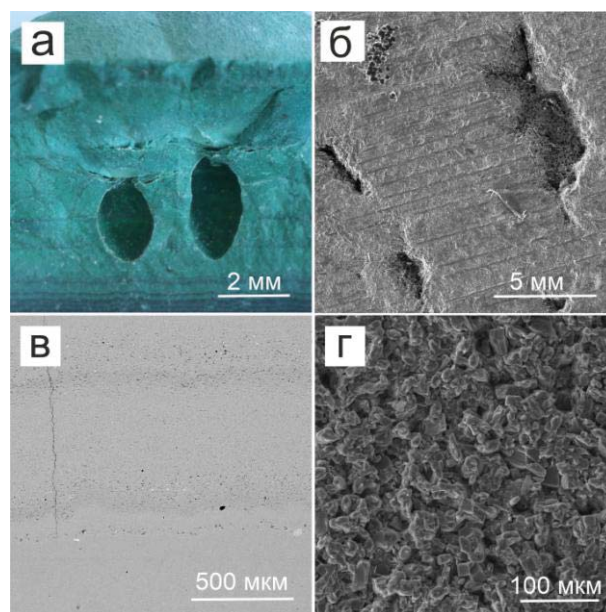


**Рис. 1.** а – полые каналы (“газмиты”) в слое малахита (ИЭМ РАН); СЭМ-изображения: б – пустоты и полости, заполненные рабочим раствором (ВНИИСИМС); в – микропоры, расположенные вдоль границ цветовых слоев малахита (ДР Конго); г – поры между кристаллами в параллельно-шестоватых агрегатах малахита (ИЭМ РАН).

**Таблица 1.** Характеристики порового пространства образцов (1 – синтетический малахит; 2 – природный малахит)

| Образец | Количество объектов (пор) | Суммарный объем пор, мкм <sup>3</sup> | Средний диаметр пор, мкм |
|---------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 1       | 12 935                    | 4 091 450                             | 5.49                     |
| 2       | 21 007                    | 2 589 352                             | 4.13                     |

Работа выполнена в рамках темы НИР ИЭМ РАН № FMUF-2022-0002

- Бубликова Т.М., Балицкий В.С., Тимохина И.В. Синтез минералов. Т. 1. Александров, ВНИИСИМС, 2000. 662.
- Bublikova T.M., Balitsky V.S., Khanin D.A., Nekrasov A.N., Setkova T.V. Moscow university geology bulletin, 2019, 74., 1, 73–80.
- Черненко Т.В., Мельников Е.П. Вестник геммологии, 2003, 8–9, 11–26 (8), 31–35 (9).
- Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К. Геология нефти и газа, 2010, 2, 36–42.

# Микроскопические исследования изменения поверхности стального контртела в процессе фрикционного взаимодействия с сальниковой набивкой из ТРГ

П.О. Буковский<sup>1</sup>, О.О. Щербакова<sup>1</sup>, Т.И. Муравьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Сальниковые уплотнения являются критически важными элементами в широком спектре промышленного оборудования, обеспечивая герметичность подвижных соединений в условиях высоких давлений, температур и агрессивных сред [1]. Их надежная работа напрямую влияет на безопасность, энергоэффективность и т.д. В настоящее время все больше предприятий нефтегазовой, химической и энергетической отраслей предпочитают сальники на основе терморасширенного графита (ТРГ) традиционным материалам [2]. Это обусловлено уникальным комплексом свойств ТРГ, таких как высокая химическая стойкость, термостабильность, компрессионная прочность и способность к самоприлеганию, что позволяет создавать высокоэффективные и долговечные уплотнительные системы [1, 2].

При трении графитовых материалов о металлические контртела происходит выкрашивание частиц и формирование так называемой фрикционной пленки (тонкого слоя из изношенных частиц), которая может выполнять функцию твердой смазки и улучшать трибологические характеристики как основного материала, так и сопряженной поверхности.

Целью данной работы являлось изучение фрикционной пленки на поверхности стальных контртел, формирующейся в процессе трения с сальниковой набивкой из ТРГ.

Для детального изучения морфологии поверхности исследуемых стальных контртел одним из наиболее эффективных методов является сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). СЭМ позволяет получать изображения поверхности с высоким разрешением, выявлять мельчайшие дефекты, оценивать степень износа и изучать структуру образующихся продуктов трения. Элементный состав поверхности контртел изучали с использованием энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализатора EDS (EDAX Company, США), входящего в оснащение микроскопа.

В данной работе были проведены трибологические испытания сальниковых набивок (марки Н1200), изготовленных из ТРГ. Испытание на трение проводили на трибометре UMT-3MT (CETR, США) по схеме полного контакта  $K_{вз} = 1$  при нагрузке 500 Н и скорости скольжения  $V = 5$  мм/с.

На рис. 1 представлены типичные СЭМ-изображение и карта распределения углерода на поверхности контртела после взаимодействия с

сальниковой набивкой. Темные области на СЭМ изображении представляют собой фрикционную углеродную пленку, а светлые области – стальное контртело.

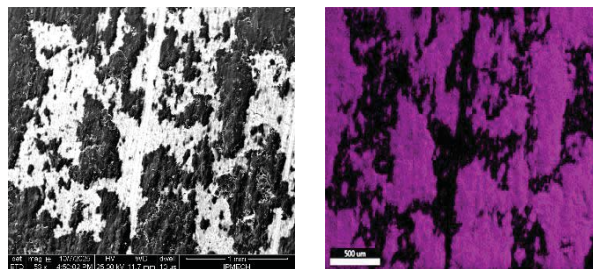


Рис. 1. СЭМ-изображение (слева) и картирование по углероду (справа) поверхности контртела после трибологических испытаний.

Ключевым механизмом, определяющим трибологическое поведение, является разрушение верхних слоев сальниковых набивок. Обнаруженный феномен не является дефектом, а представляет собой функциональный механизм самосмазывания, характерный для углеродных материалов. В процессе трения происходит отделение чешуек, которые затем переносятся на поверхность контртела, формируя фрикционную пленку. Этот перенос материала и последующее трение «углерод по углероду» является центральным механизмом, обеспечивающим низкий и стабильный коэффициент трения.

Определено, что функциональные свойства материала определяются процессом контролируемого поверхностного разрушения. В условиях трения этот механизм обеспечивает перенос графитовых чешуек на контртело и формирование фрикционной пленки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-11-00350).

1. A.I. Vakis, V.A. Yastrebov, J. Scheibert, et al. Tribology International, (2018), 125, 169–199.
2. A.V. Yakovlev, A.I. Finaenov, S.L. Zabudkov, et al. Russ J Appl Che, (2006), 79, 1741–1751.

# Исследования фазового состава ионно-лучевых пленок Ta-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии

Е.И. Гайворонская<sup>1</sup>, М.И. Гайворонская<sup>1</sup>, И.В. Польшин<sup>1</sup>, Е.С. Керсновский<sup>1</sup>, С.А. Ивков<sup>1</sup>, Я.А. Пешков<sup>1</sup>, А.И. Чукавин<sup>1,2</sup>, Г.П. Потуданский<sup>1,3</sup>, Н.В. Пермяков<sup>1</sup>, Н.А. Борщ<sup>1</sup>, А.Е. Никонов<sup>4</sup>, А.В. Ситников<sup>4</sup>, К.А. Барков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Университетская пл. 1, 394018

<sup>2</sup>УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34, 426067

<sup>3</sup>АО «РТ Лабс», г. Москва, пр. Вернадского, 41, 119415

<sup>4</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, 394006

Пленки Ta-Si возможно использовать в качестве чувствительного слоя для однофотонных детекторов дальнего ИК излучения, так как некоторые силициды тантала переходят в сверхпроводящее состояние при криогенных температурах. Особый интерес представляет фаза Ta<sub>3</sub>Si типа A15 с температурой сверхпроводящего перехода T<sub>c</sub>=9.3 К [1]. В большинстве случаев пленки Ta-Si являются не однофазными. В свою очередь ввиду малой толщины данные пленки не имеют дальнего порядка, что затрудняет идентификацию фазового состава. В работе показаны возможности исследования фазового состава пленок Ta-Si с помощью взаимодополняющих методов ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) и рентгеновской рефлектометрии.

В данной работе методом ионно-лучевого распыления составной мишени получены пленки Ta-Si с содержанием тантала в пленках от ~30 до 80 ат.%. Основным методом анализ фазового состава пленок Ta-Si являлась УМРЭС спектроскопия, чувствительная к ближнему порядку атомов, и реализованная на уникальной научной установке «Рентгеновский спектрометр монохроматор РСМ-500».

Анализ УМРЭС Si L<sub>2,3</sub>-спектров показал, что в пленках Ta-Si присутствуют характерные особенности силицидов тантала и оксидов кремния. Для идентификации фаз силицидов тантала спектры УМРЭС были рассчитаны из первых принципов в рамках теории функционала плотности для соединений TaSi, TaSi<sub>2</sub>, Ta<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> и Ta<sub>3</sub>Si. Исходя из сопоставления теоретических и экспериментальных УМРЭС спектров можно сказать, что в пленке с низким содержанием тантала ~30 ат.% присутствуют высшие силициды тантала. Увеличении содержания тантала до ~80 ат.% приводит к изменению спектров в пользу низших силицидов.

По результатам рентгеновской рефлектометрии была определена плотность пленок Ta-Si. Из рисунка 1 видна тенденция увеличения плотности от 9,67 до 13,18 г/см<sup>3</sup> с увеличением содержания тантала. В случае образцов с высоким содержанием тантала, полученные значения плотности пленок Ta-Si несколько ниже по сравнению с объемными фазами низших силицидов, что характерно для аморфных пленок. При этом в пленках с низким содержанием тантала плотность выше чем в силициде TaSi<sub>2</sub>, что может быть связано с присутствием нескольких фаз силицидов в пленке.

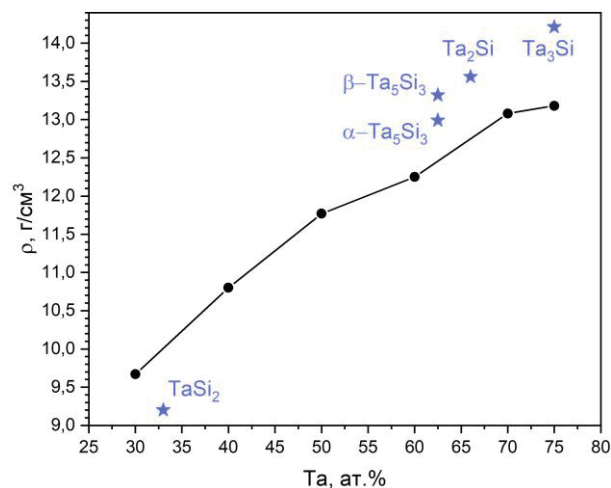


**Рис. 1.** Зависимость плотности пленок Ta-Si от содержания Ta в пленке, а также эталонные плотности фаз силицидов тантала TaSi<sub>2</sub>, α- и β-Ta<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>Si и Ta<sub>3</sub>Si из баз данных Springer Materials и Materials Project.

1. Murao R. et al. Superconducting phase prepared from Ta<sub>3</sub>Si under high pressure // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2010. – Т. 215. – №. 1. – С. 012139.

# Анализ формирования фазы $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ в пленке $\text{Mo-Si}$ по данным ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии

М.И. Гайворонская<sup>1</sup>, Е.И. Гайворонская<sup>1</sup>, И.В. Польшин<sup>1</sup>, Е.С. Керсновский<sup>1</sup>, С.А. Ивков<sup>1</sup>, Я.А. Пешков<sup>1</sup>, А.И. Чукавин<sup>1,2</sup>, Г.П. Потуданский<sup>1,3</sup>, Н.В. Пермяков<sup>1</sup>, Н.А. Борщ<sup>1</sup>, А.Е. Никонов<sup>4</sup>, А.В. Ситников<sup>4</sup>, К.А. Барков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Университетская пл. 1, 394018

<sup>2</sup>УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34, 426067

<sup>3</sup>АО «РТ Лабс», г. Москва, пр. Вернадского, 41, 119415

<sup>4</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, 394006

Пленки на основе  $\text{Mo-Si}$  подходят для создания сверхпроводниковых однофотонных детекторов, поскольку некоторые фазы соединения  $\text{Mo-Si}$  переходят в сверхпроводящее состояние при криогенных температурах [1], при условии их однофазности. Также такие тонкие пленки аморфны, что затрудняет их исследование. В данной работе представлены результаты комплексных исследований фазового состава пленки  $\text{Mo-Si}$  с использованием методов ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) и рентгеновской рефлектометрии.

Была получена пленка  $\text{Mo-Si}$  с атомным составом  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$  методом ионно-лучевого распыления составной мишени. Методом УМРЭС анализировали фазовый состав пленки  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$  по эмиссионным  $\text{Si } L_{2,3}$  спектрам, полученным на уникальной научной установке «Рентгеновский спектрометр монохроматор РСМ-500». Рентгеновская рефлектометрия использовалась для определения толщины, плотности и шероховатости пленки.

Спектры УМРЭС пленки  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$ , полученные на глубине анализа 10 нм показали, что основа пленки сформирована фазой  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ , с небольшим окислением кремния (~10%  $\text{SiO}_2$ ), что хорошо коррелирует с результатами работы [2]. На глубине 20 нм пленка представляет собой только фазу  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ . Экспериментальный УМРЭС спектр пленки  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$  хорошо согласуется с теоретически рассчитанным в рамках

теории функционала плотности спектром фазы  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ .

По данным рентгеновской рефлектометрии была получена плотность ( $8.11 \text{ г/см}^3$ ) тонкой пленки  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$ , которая соотносится с табличными данными плотности для фазы  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  ( $8.19 \text{ г/см}^3$ ), что подтверждает полученный результат анализа УМРЭС спектров.

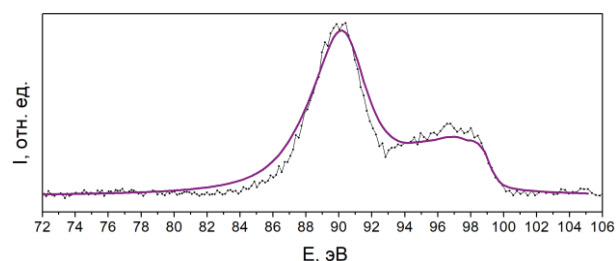


**Рис. 1.** Рентгеновский эмиссионный  $\text{Si } L_{2,3}$  пленки  $\text{Mo}_{65}\text{Si}_{35}$  (точки) и рассчитанный спектр фазы  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  (сплошная линия).

1. Banerjee A. et al. Characterisation of amorphous molybdenum silicide ( $\text{MoSi}$ ) superconducting thin films and nanowires //Superconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 30. – №. 8. – С. 084010.
2. Miyata N. et al. Buried Interfaces of Heat-Loaded  $\text{Mo/Si}$  Multilayers Studied by Soft-X-Ray Emission Spectroscopy //Surfac.

# Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации рентгенооптических элементов

С.А.Гарахин<sup>1</sup>, С.С. Морозов<sup>1</sup>, В.Н. Полковников<sup>1</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>, А.Е. Пестов<sup>1</sup>, Р.М. Смертин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

Последние несколько десятилетий оптика рентгеновского диапазона претерпевает бурный рост. Для аттестации многослойных зеркал и фильтров необходимы рефлектометры для прецизионных измерений спектральных и угловых зависимостей коэффициентов отражения и пропускания оптических элементов. Разработанный в ИФМ РАН рефлектометр работает в диапазоне длин волн 4-50 нм. Для монохроматизации излучения используется высокоразрешающий спектрометр Черни-Тюрнера с плоской дифракционной решеткой и двумя коллимирующими зеркалами. Источником рентгеновского излучения является высокоионизованная плазма, генерируемая при взаимодействии мощного лазерного пучка (плотность мощности  $10^{11}$ - $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) на твердотельную мишень. Гониометр обеспечивает пять степеней свободы для образца с диаметром до 500 мм и две степени свободы для детектора.

За последнее время рефлектометр претерпел значительные конструкционные улучшения: разработана новая камера лазерно-плазменного источника с газодинамической защитой оптических элементов, реализована новая оптическая схема монохроматора и системы формирования зондирующего пучка. Проведены работы по оснащению гониометра линейными и угловыми датчиками положения.

Для максимального увеличения интенсивности регистрируемого излучения и минимизации размера изображения источника была разработана и собрана новая рентгенооптическая схема рефлектометра.

Общая длина монохроматора в этой модели составляет около 2 метров, что даёт значительный оптический рычаг, положительно влияющий на монохромизирующие свойства прибора. В схеме оба оптических рычага имеют одинаковую длину, поэтому изображение источника не увеличивается, что улучшает минимально достижимый размер источника. Эта схема также позволяет работать без входной щели, что означает, что больше фотонов попадает в монохроматизирующую систему и больше фотонов попадает на детектор. В новом монохроматоре используются новые внеосевые параболические коллимирующее и фокусирующее зеркала.

Подложки зеркал М1 и М2 одинаковы, и, согласно схеме, стремились изготовить два идентичных внеосевых параболических цилиндра. РВ асферизации составил 80 мкм. В результате удалось достичь среднеквадратичного отклонения 30 нм от идеального (смоделированного) параболического цилиндра с фокусным расстоянием 948,75 мм для этих зеркал. Для формирования зондирующего пучка на образце

используется тороидальное зеркало. Принцип его действия заключается в следующем: в вертикальной плоскости тороид формирует изображение источника излучения, а в горизонтальной плоскости – выходной щели. Разработана и собрана новая камера источника. Была модернизирована конструкция мишени-барабана, имеющая меньшие механические биения для повышения стабильности положения лазерной искры. Добавлена газодинамическая и магнитная защита оптических элементов от продуктов эрозии мишени. Излучение лазера, работающего в режиме модулированной добротности (рабочая длина волны 1064 нм, частота следования импульсов 10 Гц,) с помощью длиннофокусной линзы фокусируются на мишени в пятно, диаметром около 50 мкм. Калибровка монохроматора осуществлялась по краям поглощения свободновисящих фильтров Be, Al, MoZrSi<sub>2</sub>, MoSi<sub>2</sub> и ZrSi. Размер зондового пучка на образце измерялся ножевым методом и составил 0,25 мм. Регистрации рентгеновского излучения производится с помощью детектора монитора из микроканальных пластин.



Рис. 1. Внешний вид модернизированного рефлектометра.

Рефлектометр оснащен гониометром, позволяющим снимать спектральные зависимости для углов, не превышающими 89°. Для повышения точности перемещений гониометр был оснащен 2 линейными и 5 угловыми датчиками положения. Ведутся работы по реализации автоматических измерений.

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

1. S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov et al. // Rev. Sci. Instrum. (2020). V. 91. P. 063103C.A.
2. Н. В. Загайнов, С. А. Гарахин, С. С. Морозов, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, ЖТФ, 95:10 (2025)

# Дифракционная эффективность среднечастотных решеток с малыми углами блеска для нежного рентгена

Л.И. Горай<sup>1,2,3</sup>, Т.Н. Березовская<sup>1</sup>, Н.А. Костромин<sup>1,2</sup>, Д.В. Мохов<sup>1,2</sup>, К.Ю. Шубина<sup>1</sup>, Е.В. Пирогов<sup>1</sup>, Н.Д. Прасолов<sup>4</sup>, А.Д. Буравлев<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup> Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 19702, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт аналитического приборостроения РАН, 198095, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Спектральная область «нежного рентгена» (tender X-ray) – жесткой части мягкого рентгена – на сегодня является наиболее интересной и, одновременно, сложной для спектроскопических исследований. Расширенный до октавы диапазон длин волн составляет, примерно,  $\lambda = 0,15\text{--}1,2$  нм и охватывает К- и L-края поглощения важнейших легких и тяжелых элементов [1]. Эта область науки, в значительной степени не изучена из-за дефицита специализированных установок и составляющих их сложных элементов. Общеизвестно также, что высокочастотные дифракционные решетки «с блеском» (с треугольным профилем штрихов), как покрытые благородным металлом, так и многослойные, являются лучшим выбором с точки зрения достижения максимальной абсолютной эффективности  $\eta$  и разрешения в этом диапазоне спектра, особенно для резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (RIXS) [2].

Решетки с блеском имеют, как минимум, вдвое большую эффективность по сравнению с аналогичными ламельными и синусоидальными решетками, а в высоких порядках дифракции они незаменимы. К среднечастотным решеткам обычно относят решетки, имеющие период  $d$  около одного-двух микрон. Подобные решетки могут изготавливаться с помощью прямой лазерной литографии и анизотропного жидкостного травления монокристаллических пластин Si, вырезанных под определенным углом [3]. В данной работе мы исследуем дифракционные свойства среднечастотных решеток с минимальными углами блеска ( $\alpha = 0,5^\circ\text{--}2^\circ$ ), достижимыми с применением указанной технологии. Исследуемые нами решетки сравнимы или, даже, превосходят по разрешению высокочастотные решетки, так как они могут «блестеть» в выбранном диапазоне в высоких порядках дифракции, благодаря высокому качеству штрихов треугольной формы, в т.ч. у получаемых реплик. Применение покрытия из Pt дает более высокие, по сравнению с Au, коэффициенты отражения при слабом рассеянии и оно, по сравнению с многослойными покрытиями, позволяет использовать одну и ту же решетку как в классической (in-plane), так и в конической (off-plane) схеме дифракции в широком диапазоне длин волн нежного рентгена и за его пределами. Для достижения высокой дисперсии и разрешения и, одновременно, максимальной  $\eta$  в жестком рентгене предпочтительнее использовать решетки, работающие в схеме конической дифракции и не имеющие ограничений на максимальную частоту и глубину штрихов.

На рис. 1 представлены зависимости  $\eta$  для  $\lambda = 1,2$

нм в ТЕ поляризации и двух типов схем Pt решеток с  $d = 1,2$  мкм: классической, с  $\alpha = 0,5^\circ$ , от полярного угла падения; конической, с  $\alpha = 2^\circ$ , от азимутального угла падения (полярный равен 0). Как следует из приведенных графиков, в максимуме классической дифракции  $\eta(-1) > 0,23$  и эффективность превышает 20% в широком диапазоне углов падения. В конической дифракции,  $\eta(-3) > 0,61$  и имеет выраженный максимум вблизи угла падения  $87,55^\circ$ . Однако, в широком диапазоне углов падения, от  $87,1^\circ$  до  $88^\circ$ , эффективность в конической схеме превышает максимальную эффективность в классической дифракции, достигаемую при угле падения  $87,775^\circ$ . Аналогичная ситуация наблюдается для  $\lambda < 1,2$  нм при различных  $d$  и  $\alpha$ . При этом,  $\eta$  в диапазоне  $\lambda = 0,2\text{--}1,2$  нм не опускается в максимуме ниже  $\sim 10\%$  для классической схемы и ниже  $\sim 60\%$  – для конической.

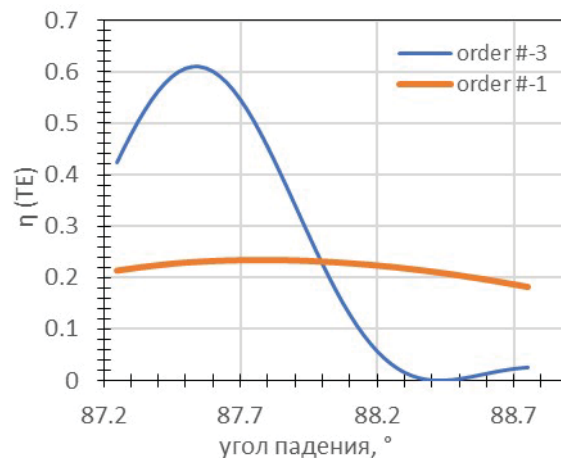


**Рис. 1.** Эффективность  $\eta(\#)$  для  $\lambda = 1,2$  нм в ТЕ поляризации и типа установки Pt решетки с  $d = 1,2$  мкм: классической, с  $\alpha = 0,5^\circ$ , от полярного угла падения; конической, с  $\alpha = 2^\circ$ , от азимутального угла падения.

1. D. Attwood. Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications. Cambridge University Press, 1999.
2. K.V. Nikolaev, L.I. Goray, P.S. Savchenkov, A. V. Rogachev, A.A. Chouprik, T.N. Berезовская, D.V. Mokhov, S.A. Garakhin, N.I. Chkhala, A.D. Bouravlev, and S.N. Yakunin. J. Appl. Cryst., 2026, 59, 737–750.
3. Л.И. Горай, Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Н.А. Костромин, Е.В. Пирогов, Н.Д. Прасолов, К.В. Николаев, Г.В. Пруцков, А.В. Рогачев, С.А. Гарахин, Н.И. Чхало, С.Н. Якунин, А.Д. Буравлев. ЖТФ, 2026, принята в печать.

# Новый алгоритм численного решения уравнений Такаги-Топена для кристаллов с дефектами

В.А. Григорьев<sup>1</sup>, Ф.Н. Чуховский<sup>1</sup>, П.В. Конарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники  
НИЦ “Курчатовский институт”, 119333 Москва, Россия  
vasiliy.grigorev.1996@mail.ru

В последние годы техника компьютерной рентгеновской дифракционной микротомографии активно развивается как перспективный метод исследования микродефектов в кристаллах и их трехмерной реконструкции [1–3]. Важным этапом развития данной техники является совершенствование методов численного решения уравнений Такаги–Топена, обеспечивающих корректный расчет дифракционного контраста.

В докладе предложен новый подход к численному решению уравнений Такаги–Топена. Предлагаемая схема основана на интегрировании уравнений на каждом шаге расчетной сетки. В новой схеме использовалась интегральная теорема о среднем [4], позволяющая вынести амплитуды волн из-под интеграла:

$$\begin{aligned} D_0(s_0, s_h) - D_0(s_0 - p, s_h) &= \\ \frac{ik\chi_h}{4} (D_h(s_0, s_h) + D_h(s_0 - p, s_h)) \int_{s_0-p}^{s_0} \exp(ihu(s, s_h)) ds, \\ D_h(s_0, s_h) - D_h(s_0, s_h - p) &= \\ \frac{ik\chi_h}{4} (D_0(s_0, s_h) + D_0(s_0, s_h - p)) \int_{s_h-p}^{s_h} \exp(-ihu(s_0, s)) ds \end{aligned}$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны излучения),  $D_0$  и  $D_h$  – амплитуды прошедшей и дифрагированной волн,  $\chi_h$  и  $\chi_{-h}$  – фурье-компоненты диэлектрической восприимчивости кристалла;  $s_0$  и  $s_h$  – координаты вдоль направлений прошедшей и дифрагированной волн,  $\mathbf{h}$  – вектор дифракции,  $\mathbf{u}$  – поле смещений дефекта.

Расчеты контролировались с помощью улучшенной разностной схемы критерия точности:

$$\begin{aligned} \text{div}(s_0, s_h) &= \text{div}_0 + \\ 2k\text{Im}(\chi_h) \text{Re}(D_0(s_0, s_h) D_h^*(s_0, s_h) \exp(-ihu(s_0, s_h))) \end{aligned}$$

где

$$\text{div}_0 = (I_0(s_0 + p, s_h) - I_0(s_0 - p, s_h) + I_h(s_0, s_h + p) - I_h(s_0, s_h - p)) / p,$$

что является аппроксимацией выражения:

$$\frac{\partial I_0(s_0, s_h)}{\partial s_0} + \frac{\partial I_h(s_0, s_h)}{\partial s_h}$$

где  $I_0$ ,  $I_h$  – интенсивности прошедшей и дифрагированной волн.

Расчеты были проведены для дефекта в Si(111) радиусом  $R = 0.4$  мкм и  $\epsilon = 10^{-3}$  ( $\epsilon$  – величина, характеризующая упругость континуума) и для дефекта в SiC-6H с  $R = 10$  мкм и  $\epsilon = 10^{-4}$ . Шаг сетки по  $X$  и  $Y$  ( $\Delta x$ ) в плоскости изображения принят равным 0.4 мкм.

Из анализа расчетного контраста точечного дефекта показано, что новая схема позволяет получить точность расчетов, сопоставимую с точностью расчетов, проведенных с помощью дифференциальной схемы с  $\Delta x = 0.05$  мкм [5]. Значения критерия точности решения составили  $\sim 10^{-3}$  для Si(111) и для SiC-6H, что свидетельствует о достоверности проведенных расчетов.

На рис. 1 даны изображения дефекта в Si(111) и SiC-6H.

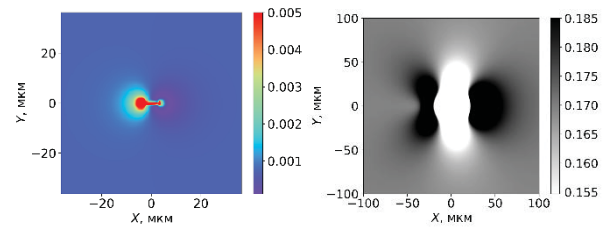


Рис. 1. Изображения дефекта в Si(111) (слева) и в SiC-6H (справа).

Сравнение профилей интенсивности на рис. 1 и в [5] показывает, что предложенная схема позволяет воспроизводить те же распределения интенсивности при существенно большем шаге сетки. Таким образом, новая схема позволяет проводить расчеты дифракционного контраста при существенно меньшем объеме вычислений, чем при использовании дифференциальной схемы [5].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

1. И.Л. Шульпина, Э.В. Суворов, И.А. Смирнова, Т.С. Арзунова // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – № 10. – С. 1475-1496.
2. Д.А. Золотов, В.Е. Асадчиков, А.В. Бузмаков, В.В. Волков, И.Г. Дьячкова, П.В. Конарев, В.А. Григорьев, Э.В. Суворов // УФН. – 2023. – Т. 193. – № 9. – С. 1001-1009.
3. В.А. Григорьев, П.В. Конарев, Ф.Н. Чуховский, В.В. Волков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2024. – № 2. – С. 68-73.
4. Г.М. Фихтенгольц, Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник : в 3 томах / Г. М. Фихтенгольц. — 14-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020 — Том 1 — 2020. — 608 с.
5. P.V. Konarev, F.N. Chukhovskii, V.A. Grigorev V.V. Volkov // Crystallogr. Rep. – 2026. – V. 71. – P. 1-6.

# Спектральное разложение полихроматического рентгеновского излучения в термоупруго изогнутом монокристалле кварца в геометрии Лауэ

Т.Г. Довлатян<sup>1</sup>, А.Н. Шахвердян<sup>1</sup>, Р.К. Мирзоян<sup>1</sup>, К.Г. Труни<sup>1</sup>, К.Т. Айрапетян<sup>1</sup>, В.Н. Агабекян<sup>1</sup>, И.А. Бабаян<sup>1</sup>, С.Н. Нореян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладных проблем физики Национальной академии наук Республики Армения, 0014, РА, г. Ереван, ул. Грачья Нерсисяна, 25

В настоящей работе исследована дифракция узкоколлимированного полихроматического рентгеновского излучения в монокристалле кварца при наличии температурного градиента в условиях симметричной геометрии Лауэ. Цель работы заключалась в создании рентгеновского спектрометра с управляемыми спектральными и угловыми характеристиками - светосилой и разрешающей способностью.

Экспериментальные исследования выполнены на Х-срезе кварца размерами  $35 \times 32 \times 6,77$  мм<sup>3</sup> для семейства отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}0$ ), ориентированных перпендикулярно большой поверхности кристалла. Рабочий пучок формировался вертикальными коллимационными щелями  $10 \times 0,02$  мм<sup>2</sup> и  $10 \times 0,05$  мм<sup>2</sup>, обеспечивавшими угловую расходимость порядка 90 угл. сек. Температурный градиент создавался цилиндрической нихромовой спиралью сопротивлением 2 Ом, установленной вдоль боковой грани образца, температура нагреваемого края изменялась от комнатной температуры до 700 °С. Пространственное распределение отраженного пучка регистрировалось координатным детектором ADVAPix TIMEPIX-3 с размером пикселя 55 мкм на расстояниях 134 и 180 см от кристалла.

Показано, что при отсутствии значительного температурного градиента от образца отражается преимущественно линия  $AgK\alpha_1$ . По мере увеличения градиента наблюдаются монотонный рост интегральной интенсивности и сужение поперечного сечения отраженного пучка, что указывает на уменьшение эффективной толщины области брэгговской дифракции внутри кристалла. При дальнейшем увеличении деформации в условие отражения входит также линия  $AgK\alpha_2$ , и на секционных топограммах формируются пространственно разделенные пучки, соответствующие различным длинам волн первичного полихроматического излучения.

Анализ топограмм и кривых качания показал рост интенсивности, сужение отраженного пучка и появление спектрально разделенных компонент  $AgK\alpha_1$  и  $AgK\alpha_2$  (рис. 1).

Для уточнения углового расстояния между линиями и их угловой ширины использована двухкристалльная схема с кварцевым кристаллом-анализатором толщиной 0,29 мм, установленным на

расстоянии 55 см от исследуемого образца. Измеренные кривые качания при различных температурах края кристалла подтвердили изменение брэгговских углов и уменьшение углового расстояния между линиями по сравнению с недеформированным случаем.

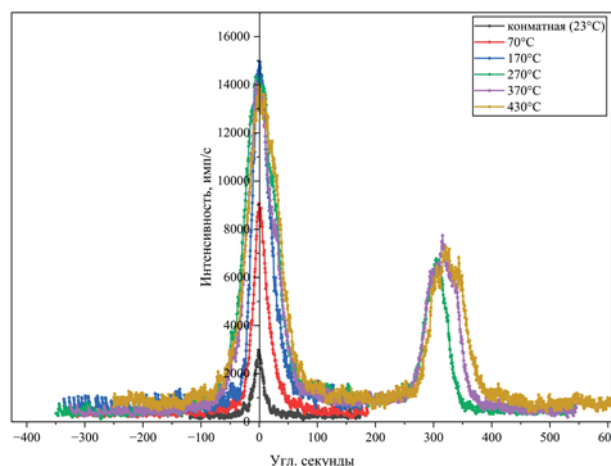


Рис. 1. Кривые качания при различных температурах нагреваемого края кристалла.

На основе геометрического анализа распространения лучей в пределах треугольника Бормана получены оценки спектральной ширины разложенного пучка, а также выражения для линейной и угловой дисперсий предлагаемой схемы. Установлено, что основной вклад в спектральную ширину вносит член, связанный с радиусом кривизны отражающих плоскостей.

Таким образом, изменение температурного градиента в монокристалле кварца позволяет управлять условиями брэгговского отражения различных компонент полихроматического рентгеновского излучения. Предложенная схема обеспечивает одновременное спектральное разложение и фокусировку дифрагированных пучков и может быть использована как основа рентгеновского спектрометра нового типа, позволяющего повысить угловую разрешающую способность до двух раз по сравнению с традиционными схемами при сохранении регулируемой светосилы.

# Неразрушающий анализ наноструктур методом рентгеновской птихографии: состояние и перспективы

В.П. Дорофеев<sup>1</sup>, В.Г. Криштоп<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

<sup>2</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук  
142432, Россия, Черноголовка, ул. Осипьяна, 6

С уменьшением размеров транзисторов ниже 7 нм традиционные методы метрологии полупроводников — сканирующая (SEM) и просвечивающая (TEM) электронная микроскопия — сталкиваются с фундаментальными ограничениями: разрушающим характером пробоподготовки, поверхностной чувствительностью и невозможностью получения полной 3D-картины внутренней структуры чипа. Рентгеновская птихография, как безлинзовый метод когерентной дифракционной визуализации, предлагает уникальное сочетание проникающей способности жёсткого рентгенового излучения и разрешения на уровне единиц нанометров.

В птихографии образец последовательно освещается перекрывающимися участками когерентного рентгенового пучка. Регистрируемые в дальней зоне дифракционные картины содержат информацию об амплитуде и фазе рассеянного излучения. Используя избыточность данных от перекрывающихся областей, итерационные алгоритмы восстановления фазы реконструируют комплексную функцию пропускания образца с разрешением, определяемым максимальным углом регистрации рассеяния (числовой апертурой детектора), а не качеством оптики. Для получения 3D-изображения птихография комбинируется с томографией (РХСТ) или ламинографией (РyXL), что позволяет анализировать полные, неразрезанные кристаллы.

Ключевые достижения последних лет включают демонстрацию птихографической томографии с изотропным разрешением 16 нм на процессоре Intel [1], развитие птихографической ламинографии для плоских чипов с разрешением 18,9 нм [2], а также рекордное разрешение 4 нм, достигнутое методом импульсной птихографии (burst ptychography) на коммерческом логическом чипе 7-нм узла [3]. Метод импульсной птихографии использует серию коротких измерений («вспышек»), эффективно «замораживающих» движение образца, с последующей вычислительной коррекцией дрейфа. Это обеспечило 170-кратное увеличение скорости сбора данных и 10-кратное увеличение глубины поля зрения. Однако, несмотря на ускорение, абсолютное время сканирования одного чипа всё ещё исчисляется часами, что пока позиционирует метод как инструмент углублённого офлайн анализа, а не поточного контроля.

Практические приложения для разработчиков чипов включают:

1. Инспекцию масок EUV-литографии: актиничное измерение на рабочей длине волны (13,5 нм) с возможностью количественной оценки фазовых сдвигов в поглощающих слоях и поиска скрытых дефектов под мультислоем.

2. Анализ дефектов: обнаружение скрытых дефектов в многоуровневых 3D-архитектурах (пустоты в TSV, электромиграция в интерконнектах). Метод обеспечивает превосходный контраст для тяжёлых металлов (Cu, W, Ru, Co), однако визуализация границ между лёгкими элементами (Si, O, C, N) в современных high-k/low-k стеках остаётся сложной задачей из-за малой разницы в показателях преломления.

3. Аппаратная безопасность: верификацию проектирования через неразрушающую томографию полного чипа с последующим послойным сравнением с проектным GDS-файлом для поиска «аппаратных троянов».

4. Анализ напряжений: картирование деформаций в кристаллической решётке методом Брэгг-птихографии.

Ключевые вызовы на пути к широкому внедрению связаны с необходимостью синхротронных источников (когерентный поток существующих лабораторных источников пока недостаточен для суб-5 нм разрешения), высокой вычислительной сложностью реконструкции и строгими требованиями к подготовке образцов. Особую проблему представляет радиационное повреждение: жёсткий рентген вызывает деградацию пористых low-k диэлектриков, что требует применения криогенного охлаждения образцов или оптимизации дозовой нагрузки.

Перспективные направления включают развитие алгоритмов на базе ИИ и GPU-ускорение, проведение in-situ измерений под воздействием напряжения/температуры и создание специализированных установок для фабрик. В долгосрочной перспективе интеграция птихографии в производственные линии (in-line metrology) станет возможной по мере появления компактных источников когерентного излучения высокой яркости (DLSR, лазерные плазменные источники).

1. M. Holler et al., Nature, 2017, 543. 7645. 402-406.
2. M. Holler et al., Nature Electronics, 2019, 2, 10, 464-470.
3. T. Aidukas et al., Nature, 2024, 632. 8023, 81-88.

## Многослойные структуры для зеркал гебелевского типа

К.В. Дуров, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, А.Д. Ахсаляян, Д.Г. Реунов, Е.С. Антюшин

Институт физики микроструктур РАН, 603951, Россия, Нижний Новгород, ГСП-105

Задача повышения эффективности коллимирующих и фокусирующих зеркал в области жесткого рентгеновского излучения ( $\lambda \approx 0.1$  нм) появилась с начала работ Шустера и Гёбеля [1,2] и остается актуальной до сих пор [3,4]. Применение таких рентгенооптических элементов позволяет более чем на порядок увеличить интенсивность излучения в экспериментах по рентгеновской дифракции и малоугловому рассеянию. На сегодняшний день такими зеркалами оснащают многие современные аналитические приборы, например, дифрактометры ДРОН и Bruker.

В настоящей работе исследованы структурные характеристики и отражательная способность (рис. 1) различных зеркал, синтезированных методом магнетронного распыления: W/Si, NiMo/Si и NiMo/C.

Зеркала на основе NiMo/Si многослойной структуры не показали высокой отражательной способности. Полагается, что основные причины, которые приводили к снижению коэффициентов отражения данных зеркал – взаимная диффузия и образование химических соединений на границах раздела слоев.

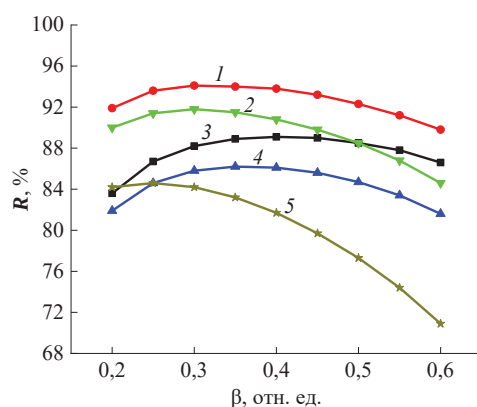


**Рис. 1.** Расчетные пиковые коэффициенты отражения на длине волны  $\lambda = 0.154$  нм в зависимости от доли более «тяжелого» вещества в периоде многослойных структур Ni/C (1), NiMo/C (2), Ni/Si (3), NiMo/Si (4), W/Si (5); период  $d = 4$  нм, число периодов  $N = 100$ , идеальные границы раздела слоев.

Методом реактивного магнетронного распыления с импульсной подачей азота в вакуумную камеру синтезированы зеркала NiMo/C с пиковыми коэффициентами отражения, превосходящими NiMo/Si и W/Si (рис. 2). Дополнительно проводился вакуумный отжиг NiMo/C до 320 °С, который приводил к росту коэффициентов отражения.

В работе приводится сравнение поперечных сечений интенсивности излучений, отраженных от гебелевских зеркал W/Si и NiMo/C. Результаты бы-

ли получены на стенде с рентгеновской трубкой дифрактометра ДРОН и стенде с острофокусной рентгеновской трубкой.

Также обсуждаются результаты моделирования подавления зеркалами W/Si и NiMo/C линии излучения Cu K $\beta$ .

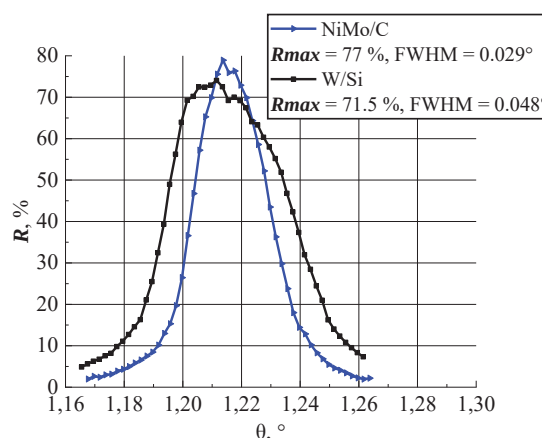


**Рис. 2.** Сравнение первых порядков отражения в центре рабочей области параболических гебелевских зеркал на основе многослойных структур NiMo/C и W/Si.

Продемонстрированная высокая отражательная способность NiMo/C зеркал позволяет утверждать, что их можно использовать как альтернативу широко используемой в мире паре материалов W/Si.

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

1. M. Schuster, H. Göbel. J. Phys. D: Appl. Phys., 1995, 28, 270.
2. C. Michaelsen, P. Ricardo, D. Anders, M. Schuster, J. Schilling, H. Göbel. Advances in X-ray Analysis, 2000, 42, 308.
3. К.В. Дуров, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, А.А. Ахсаляян, И.В. Малышев. Журнал технической физики, 2024, 94, 8, 1280-1287.
4. К.В. Дуров, А.Д. Ахсаляян, И.В. Малышев, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало. Журнал технической физики, 2025, 95, 9, 1808-1816.

## Исследование эффективности различных сцинтилляторов для двумерного рентгеновского детектора

И.Г. Дьячкова, М.М. Сеницына, В.Е. Асадчиков, А.В. Бузмаков, Д.А. Золотов, Б.С. Рошин, В.А. Федоров

Отделение “Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова” Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники  
НИИ “Курчатowski институт”

123098 Москва, площадь Академика Курчатова, 1

Разработка эффективных детекторов рентгеновского излучения остается ключевой задачей в области микротомографии и рентгеновской визуализации. В области регистрации рентгеновского излучения широкое распространение получили детекторы непрямого счета. Качество изображения при этом во многом определяется характеристиками сцинтиллятора. Поэтому задача разработки тонких и ярких сцинтилляторов с гладкой поверхностью, подходящих для высокоразрешающей микротомографии, становится особенно актуальной в условиях ограниченного доступа к импортным рентгеновским детекторам.

Целью работы являлось создание рентгеновского детектора непрямого счета для высокоразрешающей микротомографии на основе отечественных материалов и комплектующих, а также исследование сцинтилляторов для использования их в составе детектора для достижения максимального пространственного разрешения. Для этого решались следующие задачи: протестировать полученные методом горизонтальной направленной кристаллизации серии монокристаллов YAG:Ce,Tb, LuAG:Ce,Tb и YAG:Tb с различным содержанием активаторов ( $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ) и разной толщиной (от 100 до 1250 мкм); изучить их рентгенолюминесцентные свойства, оптическое качество и дефекты поверхности (различная обработка); собрать детектор на основе CMOS-матрицы, объектива и сцинтилляционного кристалла; провести его испытания на тестовых объектах и биологических образцах для оценки пространственного разрешения и пригодности к использованию в микротомографии.

В ходе выполнения работы был разработан и протестирован рентгеновский детектор непрямого счета, созданный на базе CMOS-матрицы Sony с размером пикселя 3,45 мкм, оптической системы в виде объектива с максимальным увеличением 2,7 и выращенных в КККиФ НИИ «Курчатowski институт» сцинтилляторов.

Установлено, что YAG:Ce,Tb обладает максимальной яркостью, однако характеризуется сильными дефектами поверхности (царапины и шерховатости), а также наличием на рентгеновских изображениях (полученных с его помощью) множественных ярких пятен (артефактов), связанных с неоднородным распределением церия. LuAG:Ce,Tb содержит меньшее количество артефактов на изображениях благодаря меньшей концентрации церия, однако его яркость ниже. YAG:Tb при концентрации тербия 4–8% демонстрирует высокую однородность свечения, отсутствие ярких пятен на изображениях и хорошее качество поверхности. Максимум световыходов достигается при концентрации тербия равной 6%.

Выявлено влияние концентрации активатора на однородность свечения. Для сцинтилляторов YAG:Ce,Tb и LuAG:Ce,Tb появление локальных областей повышенной яркости на рентгеновских изображениях обусловлено неравномерным распределением активатора и образованием микронеоднородностей в объеме кристалла. В случае сцинтиллятора YAG:Tb подобные дефекты практически отсутствуют при концентрации тербия 4–8%, но наблюдаются уже при концентрации 10%.

Установлено, что при использовании прозрачного толстого монокристаллического сцинтиллятора (1200 мкм) оптическое увеличение (в 2,7 раз) позволяет сохранить высокое пространственное разрешение (порядка 9–10 мкм). Поэтому наличие у детектора оптического увеличения позволяет эффективно применять прозрачные монокристаллические сцинтилляторы с толщиной, превышающей глубину резкости объектива (300 мкм), без критической потери разрешающей способности детектора. Оптическое увеличение является необходимым условием для достижения высокого пространственного разрешения (9–10 мкм). При съемке без увеличения разрешение ухудшается примерно в 2 раза (21–22 мкм).

В результате исследования различных образцов сцинтилляторов по совокупности характеристик наилучшим для использования в составе разработанного детектора признан образец сцинтиллятора YAG:Tb с концентрацией тербия 6% и толщиной 1200 мкм. Он обеспечивает пространственное разрешение детектора не хуже 6 мкм (при наличии оптического увеличения в 2,7 раз), высокий контраст, достаточную яркость для экспозиции 10 сек, и отсутствие на рентгеновских изображениях паразитных светящихся артефактов, связанных с дефектами поверхности и неоднородным распределением активирующей примеси.

Разработанный детектор успешно протестирован на биологических образцах – интактной лапке и регенерировавшем хвосте (после ампутации регенерировавший в условиях космического полета образец) тритона. Полученные проекционные изображения позволили выявить костные и хрящевые структуры (карпальные кости, позвонки) и мягкие ткани.

Работа демонстрирует возможность создания конкурентоспособной отечественной аппаратуры в условиях импортозамещения.

Работа проведена в рамках государственного задания НИИ «Курчатowski институт» (в части изготовления сцинтилляторов) и в рамках задания Министерства науки и высшего образования России (грант № 075-15-2025-458) (в части изучения свойств кристаллов сцинтилляторов).

## Особенности PIXE спектromетрии в условиях применения плоских рентгеновских волноводов-резонаторов

В.К. Егоров<sup>1</sup>, Е.В. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИПТМ РАН, ул. Академика Осипьяна, 6, Чернооголовка, Мос. Обл. Россия 142432

Спектromетрия протон-индуцированной рентгеновской эмиссии (PIXE) является стандартным высокоэффективным методом элементной диагностики материалов [1,2]. Его применение особенно полезно для анализа содержания в изучаемых объектах легких элементов, хотя имеются определенные ограничения, связанные с поглощением излучения окнами рентгеновских детекторов [3]. В ионно-пучковой диагностике материалов он является прекрасным дополнением к возможностям метода резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов [4]. Однако в условиях стандартной геометрии измерений возможности PIXE спектromетрии оказываются существенно ограниченными для элементной диагностики тонкого поверхностного слоя материалов [2], поскольку фиксируемый детектором рентгенофлуоресцентный выход отражает содержание элементов в поверхностном слое, соответствующим глубине проникновения возбуждающего ионного пучка, составляющего значения в несколько микрометров.

Выполненные нами эксперименты показали, что стандартный метод PIXE может быть преобразован в эффективную аналитическую процедуру элементной диагностики поверхности путем включения в его измерительную схему плоского рентгеновского волновода-резонатора (ПРВР) специальной конструкции. В такой модифицированной схеме ионный пучок попадает на изучаемый объект через отверстие, соответствующее поперечному сечению пучка, проделанное в плоском рефлекторе с внутренней полированной поверхностью, на края которого нанесены параллельные полосы (например, хрома или титана) толщиной 100 нм. Поверхность изучаемого объекта с внутренней поверхностью рефлектора образуют ПРВР, который позволяет выводить из канала, обозначенными указанными поверхностями и нанесенными полосками, рентгеновский характеристический выход, характеризующий только тонкий приповерхностный слой изучаемого объекта. Толщина этого слоя определяется плотностью материала рефлектора. При использовании Ве рефлектора диагностируемая

толщина поверхностного слоя изучаемого образца составит 12-15 нм, в зависимости от длины волны возбуждаемого рентгенофлуоресцентного выхода. Для Si рефлектора: 10-12 нм, для рефлектора из  $\text{HfO}_2$  – 3-5 нм. Такая простейшая модернизация позволяет на базе PIXE спектromетрии сформировать новый весьма эффективный метод элементной диагностики поверхности материалов. К сожалению, в отличие от стандартного метода тестирования поверхности, основанного на рентгенофлуоресцентном анализе поверхностного слоя материалов в условиях полного внешнего отражения возбуждающего потока на изучаемой поверхности (РФА ПВО) [5], предлагаемый метод не лишен влиянию матричного фактора, но по чувствительности превосходит стандартную процедуру на несколько порядков. В работе освещаются основы предлагаемого аналитического метода и приведены экспериментальные данные, характеризующие его уникальные особенности. Интересной его особенностью является возможность расширения его применения в условиях электронного возбуждения рентгенофлуоресценции, поскольку ионно-пучковые установки являются достаточной редкостью, а построение подобных установок на базе электронных микроскопов может иметь широкое распространение.

1. М.В. Коляда, А.Н. Зайченко, Р.В. Дмитренко. Рентгеноспектральный анализ с ионным возбуждением. М.: Атомиздат, 1978. 248 с.
2. S.A.E. Johansson, J.L. Campbell, K.G. Malkquist. Particle Induced X-ray Emission Spectrometry (PIXE). New York: Wiley, 1995. 451 p.
3. А.Н. Жуковский, Г.А. Пшеничный, А.В. Майер. Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 161 с.
4. M. Nastasi, J.W. Mayer, Y. Wang. Ion Beam Analysis, Fundamentals and Application. Boca Raton: CRC Press, 2015. 434 p.
5. R. Klockenkamper, a. Von Bohlen. Total Reflection X-ray Fluorescence analysis and Related Methods. New York: Wiley, 2015. 528 p.

# О возможности построения сканирующих рентгеновских литографов

В.К. Егоров<sup>1</sup>, Е.В. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИПТМ РАН, ул. Академика Осипьяна, 6, Черноголовка, Мос. Обл. Россия 142432

Центральной задачей литографической технологии является развитие сканирующей литографии, позволяющей получать прямое изображение без использования масок [1]. Параметры материала, соответствующие линиям изображения, должны иметь существенные отличия от его параметров в фоновых позициях. Такое различие может быть создано за счет локальных фазовых превращений, например, за счет воздействия фотонного, электронного или ионного ионизирующего излучения. В зависимости от типа применяемого излучения различаются и типы литографических установок [2]. Установки, предназначенные для сканирующей литографии, предполагают наличие системы формирования потока ионизирующего излучения, 2х координатного подложечного столика и блока компьютерного управления, позволяющего варьировать интенсивность и позиционирование ионизирующего потока. Наиболее подходящими для построения сканирующих литографов являются электронные радиационные потоки [3]. В практическом плане сканирующая электронная литография позволяет получать изображение и приготовить шаблоны (или маски) с разрешением на уровне 10 нм. Ионные пучки, вследствие обладания зарядом, так же как потоки электронные, отлично управляются внешними полями и, при использовании в сканирующей литографии демонстрируют более высокую разрешающую способность [2], но вследствие повышенной стоимости используется реже электронной. Сканирующая рентгеновская литография в настоящее время практически отсутствует [4]. При этом основные трудности связаны с наличием ограниченных методов управления рентгеновскими потоками и проблемой формирования рентгеновских пучков наноразмерного диапазона. Проблема управления параметрами рентгеновских потоков к настоящему времени частично решена, поскольку имеет место быть серийное производство рентгеновских трубок, имеющим возможность модуляции выходного радиационного потока с частотой 910 МГц для любых анодов, начиная с Вe ( $\lambda_0=11.4$  нм) [5]. К сожалению, варьировать пространственным распределением интенсивности в формируемых потоках конструкция этих источников не позволяет. В тоже время проблема формирования пучков характеристического рентгеновского излучения наноразмерного сечения квадратной формы в настоящее время успешно решена [6]. Путем использования плоских рентгеновских волноводно-резонансных структур специальной конструкции. В процессе исследования

рентгено-транспортной эффективности плоских протяженных щелевых зазоров было установлено, что они способны формировать рентгеновские пучки наноразмерной ширины [7]. Простейшей структурой, формирующей такие потоки, является плоский рентгеновский волновод-резонатор (ПРВР), комплектирующейся парой плоских полированных кварцевых рефлекторов, располагающихся на расстоянии, не превышающим половины длины когерентности предполагаемого к использованию рентгеновского излучения. Для работы с излучением  $\text{MoK}\alpha\beta$  это расстояние не должно превышать 110 нм. Обычно в работе с этим излучением высота формируемого пучка составляет 10 мм, а ширина – 100 нм. Его угловая расходимость по горизонтали равняется  $0.04^\circ$ . При использовании составного волновода-резонатора, представляющего два последовательно установленных ПРВР в скрещенной геометрии оказалось возможным получить рентгеновский пучок квадратного сечения  $100\times 100$  нм<sup>2</sup> с интегральной интенсивностью  $2\cdot 10^5$  фотон/сек при его угловой расходимости около  $0.1^\circ$  в условиях использования рентгеновской трубки БСВ-21 (Mo) в режиме  $U=25$  кВ,  $I=10$  мА. Радиационная плотность в пучке составила  $4\cdot 10^{15}$  фотон/см<sup>2</sup>сек. Такой поток в резисте плотностью  $1.5$  г/см<sup>3</sup> на толщине 10 мкм выделяет мощность около 5 мВт/см<sup>2</sup>. Такая мощность вполне допустима для попыток разработки рентгеновского сканирующего литографа, однако он будет уступать электронным по производительности, поскольку фактором сканирования в этом случае будут механические возможности подложечного столика. В докладе обсуждается оригинальная составная конструкция и результаты ее экспериментального тестирования.

1. К.А. Валиев. Физика субмикронной литографии. М.: Наука, ГРФМЛ, 1990. 528 с.
2. H.J. Levinson, W.H. Arnold. Handbook of Microlithography, Micromashing and Microfabrication. V.1, London: Bellingham SPIE Press, 1997. P. 1-138.
3. R.W. Hawkes, E.Kasper. Principles of Electronic Optics: Wave Optics. London: Academic Press, 2012. 752 p.
4. H.I. Smith, M.L. Schattenberg. Why bother with X-ray Lithography. London: Bellingham SPIE Press. V.1671, 1992. P. 282-298.
5. <https://melz-elt.ru/> (08.06.2026)
6. V.K. Egorov, E.V. Egorov. Russian Microelectronics, v.54(8), 2025, P. 1283-1291.
7. Е.В. Егоров, В.К. Егоров. Явление волноводно-резонансного распространения радиационных потоков (явление радиационной сверхтекучести) и некоторые аспекты его проявления в реальности. М.: Физматлит, 2025. 326 с.

# Оптическая диагностика источника рентгеновского излучения

Жуликова М.Н., Баранников А.А., Зверев Д.А., Лятун И.И., Снигирев А.А.

Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, Россия

E-mail: mnzhulikova@stud.kantiana.ru

Синхротронное излучение (СИ) востребовано в химии, медицине, материаловедении и фармакологии благодаря возможности неразрушающего контроля с высоким пространственным разрешением. Самые современные источники СИ 4-го поколения открывают новые возможности для таких экспериментов, благодаря уникальным характеристикам генерируемого пучка. Они обеспечивают предельно высокую пространственную когерентность излучения и высокое временное разрешение.

Развитие Мегасайенс-установок предъявляет высокие требования к контролю параметров генерируемого пучка, во многом определяющих возможности экспериментальных методов, используемых на синхротронных станциях. Для прямого контроля параметров источника необходимы рентгенооптические методы, дополняющие диагностику электронного пучка в накопительном кольце. Они позволяют получать информацию о размере и форме источника, распределении интенсивности, а также о стабильности его пространственных характеристик. Такие данные обеспечивают независимый контроль параметров источника синхротронного излучения, позволяют сопоставлять характеристики электронного и рентгеновского пучков, выявлять причины их возможного несоответствия и обеспечивать достижение требуемых параметров излучения на экспериментальных станциях.

Для оценки параметров источника СИ существует ряд прямых и косвенных методов. Прямые методы реализуют непосредственное формирование изображения источника в области наблюдения: камера-обскура (пинхол) с одиночным отверстием или кодированной апертурой, визуализация с помощью составных преломляющих линз (CRL) и брэгг-френелевской оптики [1-3].

При использовании косвенных методов вычисление параметров источника производится по сопутствующим физическим эффектам, выраженным дифракцией и интерференцией излучения: опыт Юнга, Тальбот-интерферометрия, K-edge диагностика, дисперсионный кристалл-дифракционный анализ, а также дифракционные методы Френеля [2, 4-9].

В настоящей работе проведено исследование размеров и формы рентгеновского источника с помощью камеры обскура и преломляющих рентгеновских линз. Исследование проводилось с использованием лабораторного микрофокусного рентгеновского источника с жидким GaIn анодом ( $E=9.251$

кэВ, GaK $\alpha$ 1). Устройство позволяет управлять размером, формой и положением области засветки анода электронным пучком, что обеспечивает воспроизводимое формирование источников с различными пространственными характеристиками.

В ходе исследования было выполнено сравнение использованных методов по пространственному разрешению, чувствительности к спектру излучения и сохранению потока фотонов исходного рентгеновского пучка.

При регистрации изображения источника с помощью Pt апертуры диаметром 5 мкм время экспозиции составило 960 минут. В то же время с помощью Be линз с радиусом кривизны 50 мкм изображение регистрировалось за 2 минуты при субмикронном пространственном разрешении.

1. Yang B. et al. High-Energy X-Ray Pinhole Camera for High-Resolution Electron Beam Size Measurements. – Argonne National Laboratory (ANL), 2017.
2. Weitkamp T. et al. Refractive lenses as a beam diagnostics tool for high-energy synchrotron radiation //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2001. – Т. 467. – С. 248-251.
3. Samadi N. et al. A spatial beam property analyzer based on dispersive crystal diffraction for low-emittance X-ray light sources //Scientific Reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 18267.
4. Holldack K., Feikes J., Peatman W. B. Review of Emittance and Stability Monitoring Using Synchrotron Radiation Monitors //DIPAC. – 2001. – Т. 1. – С. 16.
5. Lyubomirskiy M., Snigireva I., Snigirev A. Lens coupled tunable Young's double pinhole system for hard X-ray spatial coherence characterization //Optics express. – 2016. – Т. 24. – №. 12. – С. 13679-13686.
6. Snigirev A. et al. X-ray nanointerferometer based on si refractive bilenses //Physical review letters. – 2009. – Т. 103. – №. 6. – С. 064801.
7. Zverev D. et al. Coherent X-ray beam expander based on a multilens interferometer //Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 22. – С. 35038-35053.
8. Samadi N. et al. Source size measurement options for low-emittance light sources //Physical Review Accelerators and Beams. – 2020. – Т. 23. – №. 2. – С. 024801.
9. Kohn V., Snigireva I., Snigirev A. Direct measurement of transverse coherence length of hard x rays from interference fringes //Physical review letters. – 2000. – Т. 85. – №. 13. – С. 2745

# Изготовление и исследование волноводных структур на основе Si/Be/SiO<sub>2</sub> для рентгеновского диапазона

Н.В. Загайнов<sup>1</sup>, Р.С. Плешков<sup>1</sup>, В.Н. Полковников<sup>1</sup>, Д.Г. Реунов<sup>1</sup>, Р.М. Смертин<sup>1</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603087 Нижний Новгород, Россия

Настоящая работа посвящена созданию и последующему экспериментальному тестированию планарных рентгенооптических волноводных систем Si/Be/SiO<sub>2</sub>, кором которых выступает слой бериллия толщиной 30 нм. Использование бериллия продиктовано его малой электронной плотностью: это дает возможность существенно нарастить эффективную длину распространения излучения (при энергии 8 кэВ) на фоне классических решений на базе углерода или карбида бора [1–4]. Захват жесткого рентгеновского пучка (на длине волны  $\lambda = 0,154$  нм, соответствующей линии Cu K $\alpha_1$ ) осуществлялся посредством резонансного возбуждения [5], что гарантирует высокую степень ввода излучения за счет увеличенной входной апертуры.

Формирование многослойных структур методом магнетронного напыления опиралось на отработанные технологические подходы к созданию бериллиевой рентгеновской оптики [6–8]. В качестве базовых поверхностей для осаждения применялись стеклянные подложки со сверхгладким рельефом. В ходе измерений было установлено, что резонансный угол падения равен 0,204°. Данная величина демонстрирует отличное совпадение с расчетным значением в 0,203°, полученным с применением матричного формализма [9,10].

С целью корректной обработки спектра выходящего излучения и сепарации волноводной моды был применен подход, базирующийся на использовании профиля псевдо-Фойгта [11,12]. Оценка эффективности структуры продемонстрировала расхождение между расчетным (2,19%) и практически достигнутым (1,58%) значениями КПД. Данный эффект объясняется дополнительными потерями энергии моды на рассеяние, вызванное неидеальностью межслойных границ. Привлечение статического фактора Дебая–Валлера [13] позволило определить среднеквадратичную шероховатость на границах раздела фаз стекло/Be и Be/Si, составившую приблизительно 1,5 нм. Предложенный в работе подход демонстрирует высокий потенциал как

инструмент для неразрушающего контроля скрытых интерфейсов, а также для дальнейшего совершенствования технологий производства элементов рентгеновской оптики.

1. Miao J. Extending the methodology of X-ray crystallography to non-crystalline specimens // AIP Conference Proceedings. Stanford, California (USA): AIP, 2000. Т. 521. С. 3–6.
2. Wilke R. N. и др. Quantitative X-ray phase contrast waveguide imaging of bacterial endospores // J Appl Crystallogr. 2015. Т. 48, № 2. С. 464–476.
3. Feng Y. P. и др. X-ray Fraunhofer diffraction patterns from a thin-film waveguide // Applied Physics Letters. 1995. Т. 67, № 24. С. 3647–3649.
4. Müller M. и др. Microcrystallography with an X-ray waveguide // J Appl Crystallogr. 2000. Т. 33, № 5. С. 1231–1240.
5. Pelliccia D. и др. Advancements in X-ray waveguides and their applications in coherent diffraction imaging // Radiation Physics and Chemistry. 2009. Т. 78, № 10. С. S42–S45.
6. Polkovnikov V. N. и др. Beryllium-based multilayer X-ray optics // Phys.-Usp. 2020. Т. 63, № 1. С. 83–95.
7. Chkhalo N. I. и др. Be/Al-based multilayer mirrors with improved reflection and spectral selectivity for solar astronomy above 17 nm wavelength // Thin Solid Films. 2017.
8. Svechnikov M. V. и др. Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography // Opt. Express. 2018. Т. 26, № 26. С. 33718.
9. Born M., Wolf E., Bhatia A. B. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 1999. 1000 с.
10. Parratt L. G. Surface Studies of Solids by Total Reflection of X-Rays // Phys. Rev. 1954. Т. 95, № 2. С. 359–369.
11. Thompson P., Cox D. E., Hastings J. B. Rietveld refinement of Debye–Scherrer synchrotron X-ray data from Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Journal of Applied Crystallography. 1987.
12. Wertheim G. K. и др. Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes // Review of Scientific Instruments. 1974.
13. Als-Nielsen J., McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011.

# Получение рентгенофлуоресцентных изображений объектов с использованием КМОП-камеры с пинхолом

Д.А. Золотов<sup>1</sup>, И.Г. Дьячкова<sup>1</sup>, А.В. Бузмаков<sup>1</sup>, В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>, С.В. Кузин<sup>2</sup>, А.С. Кириченко<sup>2</sup>

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

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

В настоящее время при изучении химического состава исследуемых объектов широкое развитие получили методы рентгеновской флуоресцентной микроскопии. Например, применение в качестве объектива пинхола с малым диаметром отверстия (камера-обскура) позволяет получать информацию о пространственном распределении различных химических элементов на площади в несколько квадратных сантиметров с пространственным разрешением на уровне 50–100 мкм [1]. После прохождения через пинхол рентгенофлуоресцентные фотоны, испускаемые исследуемым образцом, регистрируются позиционно-чувствительным детектором. Применение детекторов с зарядовой связью (ПЗС) или комплементарной структурой металл-оксид-полупроводник (КМОП) с их прямой регистрацией рентгеновских лучей и высокой чувствительностью по энергии позволяет проводить исследования химического состава с возможностью варьировать геометрическое увеличение. В отличие от поликапиллярной оптики камера-обскура имеет ряд преимуществ благодаря простоте юстировки, большому полю зрения и низкой стоимости изготовления.

Целью настоящей работы являлось разработка и тестирование детектора для получения изображения объектов во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах с использованием свинцового пинхола в качестве объектива и цифровой КМОП-камеры для последующей регистрации рентгеновского изображения.

Тестирование предложенной схемы проводилось на рентгеновском дифрактометре ДИТОМ-М (рис.1). Образец с заранее известным составом закреплялся на держателе и освещался полихроматическим пучком от рентгеновской трубки с молибденовым анодом типа БСВ-45. Двумерный детектор на основе КМОП-сенсора Sony с размером пикселя 1.85 мкм и свинцовым пинхолом располагался перпендикулярно падающему рентгеновскому пучку. Размер отверстия пинхола составлял 350 мкм. Расстояние «образец-детектор» подбиралось таким образом, чтобы геометрическое увеличение было однократным (рис. 2).

С целью регистрации одиночных флуоресцентных фотонов на детекторе снимались серии изображений от 500 до 1000 кадров с экспозицией 5 секунд. В результате с применением дальнейшей математической обработки были получены результирующие флуоресцентные спектры для ряда металлических объектов и кристаллов разного химического состава. Затем на их основе рассчитывалась зависимость, связывающая энергию вторичного флуоресцентного кванта с отчетами, регистрируемыми двумерным

детектором. Достигнуто пространственное разрешение на уровне нескольких десятков микрометров.

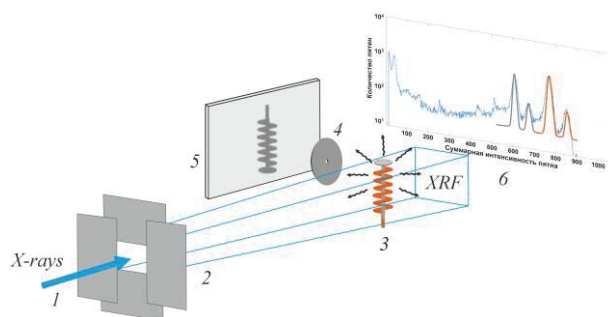


**Рис. 1.** Схема установки для получения рентгенофлуоресцентных изображений. 1 – источник рентгеновского излучения (рентгеновская трубка); 2 – блок щелей; 3 – объект исследования; 4 – пинхол из свинца; 5 – двумерная КМОП-камера; 6 – результат цифровой обработки.

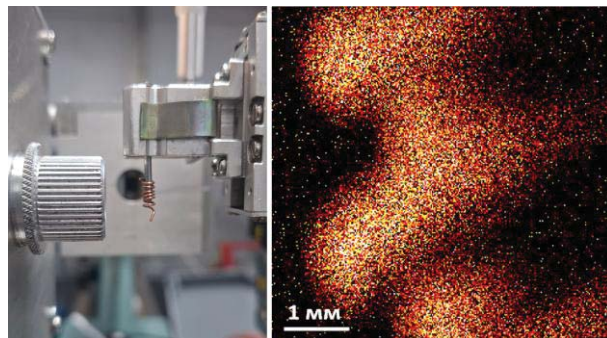


**Рис. 2.** Фотография детектора и исследуемого образца (слева); результирующее рентгенофлуоресцентное изображение (справа).

Таким образом, создан прототип прибора для получения двумерных флуоресцентных изображений, что создает задел для последующего трехмерного картирования по химическим элементам исследуемых объектов различной природы.

Работа проведена в рамках задания Министерства науки и высшего образования России (грант № 075-15-2025-458) (в части проектирования и изготовления двумерного детектора) и в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” (в части получения и обработки рентгеновских изображений).

1. Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, Ю.К. Ломашко. Приборы и методы измерений, (2016), 7, 169-175.

# Пленочные нанокомпозиты поли-*n*-ксилилен – сульфид кадмия: электропроводность, структура и спектральные свойства

О.П. Иванова<sup>1</sup>, А.В. Кривандин<sup>1</sup>, С.А. Завьялов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИБХФ РАН, 119334 Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д.4.

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, г. Москва, пл. Ак. Курчатова, д.1.

Создание композитных материалов с неорганическими включениями в виде полупроводниковых наночастиц является предметом интенсивных исследований в связи с фундаментальными научными проблемами и возможностями их практического применения [1]. Возможность регулирования электронных и спектральных свойств в таких композитах путем концентрационных изменений наполнителя делает их перспективными для создания материалов с заданными свойствами. Для стабилизации наночастиц широко используется поли-*n*-ксилилен (ППК), а в качестве наполнителя – сульфид кадмия (CdS), обладающий высокой чувствительностью к воздействию света видимого диапазона.

Исследуемые пленки поли-*n*-ксилилен - сульфид кадмия (ППК-CdS) толщиной ~0.2 мкм с содержанием наполнителя от  $C \sim 5$  до 100 об.% CdS были получены методом низкотемпературной газофазной полимеризации на поверхности (ГПП-метод) при совместном осаждении паров мономера *n*-ксилилена и CdS на кварцевые подложки при температуре жидкого азота.

Исследование электропроводности пленок в зависимости от содержания наполнителя показало ее немонокотный характер изменения с максимальным значением при  $C = C_0 \sim 11$  об.% CdS. Величина проводимости была незначительной при содержании наполнителя  $C < C_0$  и отличалась примерно на два порядка от проводимости при  $C \sim C_0$ . Скачкообразное изменение проводимости происходило в узкой области концентраций при значениях, близких к  $C \sim C_0$ , а при  $C > C_0$  наблюдалось уменьшение проводимости более, чем на порядок.

Методом рентгеновской дифракции в больших углах выявлены существенные различия в структурах пленок ППК-CdS с разным содержанием наполнителя, которые связаны с изменениями структуры наночастиц CdS и ППК. Показано, что при  $C < 10$  об.% CdS наблюдались только рентгеноаморфные фазы ППК и CdS. При более высоком содержании CdS ( $C \sim C_0 \geq 10.5$  об.% CdS) на дифрактограммах отсутствует пик ППК и зарегистрированы только узкие пики, положение которых соответствует дифракционным пикам кристаллической фазы CdS типа вюрцита с размером частиц ~ 25-30 нм. Наибольшую относительную интенсивность имел дифракционный пик CdS (002), что можно объяснить преимущественной ориентацией кристаллографических плоскостей (001) параллельно плоскости подложки.

Методом АСМ в режиме контактной моды проведено исследование и обнаружена перестройка структуры поверхности пленок с ростом содержания наполнителя: фибриллярная структура ( $C < C_0$ ) переходит фибриллярно-глобулярную ( $C \sim C_0$ ), а потом - в глобулярную ( $C > C_0$ ). Определены изменения характеристик шероховатости ( $R_q$  и  $R_{max}$ ), проведены оценки зависимости распределения глобул матрицы по размерам и установлено, что с увеличением содержания наполнителя CdS происходят немонокотные изменения размеров глобул матрицы с экстремальными значениями при концентрации  $C \sim C_0$ .

Исследование спектральных свойств показало немонокотный сдвиг спектров оптического поглощения в длинноволновую область с максимумом при  $C_0 \sim 11$  об.% CdS с ростом содержания наполнителя,

В спектрах люминесценции пленок наблюдалось присутствие полос собственной молекулярной флуоресценции полимера ППК и примесной люминесценции, соответствующей свечению аномальных стильбеновых звеньев [2], которые образуются в незначительных количествах в ППК при синтезе парациклофана. С ростом содержания наполнителя происходит немонокотное изменение интенсивности полосы примесной люминесценции с минимальным значением при  $C \geq C_0 \sim 11$  об.% CdS. Такое затухание флуоресценции, с одной стороны, может быть связано с процессом переноса энергии электронного возбуждения с наночастиц в полимерной слой или с полимера на наночастицы в зависимости от содержания наполнителя, либо с появлением других конкурирующих каналов переноса энергии. С другой стороны, в пленках ППК-CdS помимо флуоресцирующих транс-стильбеновых звеньев, могут образовываться звенья с цис-стильбеновой конфигурацией, которые не обладают флуоресценцией.

Полученные результаты показывают, что в исследуемых пленках ППК-CdS изменения электропроводности и спектральных свойств коррелируют с изменениями структуры CdS и ППК.

1. Е.И. Григорьев, С.А. Завьялов, С.Н. Чвалун. Российские нанотехнологии, 2006. 1, С. 58-70.
2. Р.Н. Нурмухаметов, С.Н. Дядюшкина и др. Высокомолек.соед. А, 1991, 33, 1525-1529.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253304)..

# Структурные изменения компонент в пленках нанокompозитов поли-*n*-ксилилен — сульфид кадмия

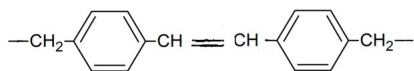
О.П. Иванова<sup>1</sup>, А.В. Кривандин<sup>1</sup>, С.А. Завьялов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИБХФ РАН, 119334 Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д.4.

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, г. Москва, пл. Ак. Курчатова, д.1.

Для создания новых материалов с заданными свойствами интерес представляют нанокompозиты с полупроводниковыми частицами, иммобилизованными в различных полимерных матрицах. Особого внимания заслуживают нанокompозиты на основе полимерных матриц из поли-пара-ксилилена (ППК) и наполнителя сульфида кадмия (CdS), что определяется возможностями их практического применения в оптоэлектронике, фотонике и катализе..

Мономерное звено ППК представляет собой бензольное кольцо с двумя метиленовыми группами в пара-положении: Он относится к флуоресцирующим полимерам, благодаря наличию хромофорной (фенильной) группы в молекуле ППК. Люминесцентные свойства пленок ППК определяются как собственной молекулярной флуоресценцией полимера (~290 нм), так и наличием в основной цепи полимера сопряженных фрагментов со структурой стилибена (~350, 370 нм и ~390 нм), которые образуются в незначительных количествах в процессе пиролизической полимеризации парациклофана [1].



Использование в качестве наполнителя CdS объясняется его высокой чувствительностью к воздействию света видимого диапазона. Модификация ППК наночастицами CdS приводит к созданию композитов с измененными свойствами, которые во многом определяются их структурой, строением межфазной границы, и взаимодействием между наночастицами и матрицей.

В настоящей работе методом рентгеновской дифракции проведены исследования структуры пленок ППК-CdS толщиной ~0.2 мкм с ростом содержания наполнителя (С) от ~2 до ~13.5 об.% CdS. Полученные данные дополнены исследованиями по люминесценции в УФ области, что позволило сделать предположение о возможных процессах, влияющих на изменение структуры ППК в пленках ППК-CdS.

Методом рентгеновской дифракции выявлены существенные различия в структурах пленок ППК-CdS с разным содержанием наполнителя, которые связаны с изменениями структуры наночастиц CdS и ППК, происходящими в результате взаимодействия наночастиц между собой и с полимерной матрицей. Показано, что с ростом содержания наполнителя происходит образование наночастиц CdS с различной структурой и выявлены

изменения в структуре ППК. Так при С < 10 об.% CdS наблюдались только рентгеноаморфные фазы ППК и CdS. Кристаллические ориентированные частицы CdS со структурой типа вюрцита формировались при содержании CdS более 10%. Для пленки, содержащей ~11% CdS, дифракционный пик CdS 002 имел наибольшую интенсивность, а пик ППК при  $S \approx 2.2 \text{ нм}^{-1}$  не регистрировался.

Исследование спектров флуоресценции показало, что в них наблюдались две полосы, соответствующие собственной молекулярной флуоресценции ППК и примесной флуоресценции в результате появления дефектов в молекулярной цепи ППК в виде аномальных стилибеновых звеньев. С ростом содержания наполнителя происходит немонотонное изменение интенсивности полосы примесной люминесценции. Максимальная интенсивность этой полосы наблюдалась при ~6.% CdS. Увеличении до ~10.5 об.% CdS и более приводило к ее значительному уменьшению. Такое затухание флуоресценции, возможно, связано с образованием не обладающих флуоресценцией звеньев цис-стильбеновой конфигурации, помимо флуоресцирующих транс-стильбеновых звеньев (транс-цис изомеризация) в результате взаимодействия наночастиц CdS и ППК. Можно предположить, что такое увеличение доли цис-стильбеновых звеньев приведет к изменениям структуры ППК (уменьшение плотности) и повлияет на структурные характеристики наночастиц CdS (размер, расстояние между частицами, распределение по размерам).

Результаты проведенного исследования показывают, что на формирование кристаллической структуры наночастиц CdS в пленках ППК-CdS определенное влияние оказывает содержание в них наполнителя и строение полимерной матрицы. Согласно данным рентгеновской дифракции, формирование кристаллической структуры CdS происходит только в тех пленках, на дифрактограммах которых исчезал пик ППК при  $S \geq 10.5 \text{ об.}\%$  CdS. Данные по флуоресценции показали, что при этих содержаниях наполнителя, по-видимому, происходит процесс транс- цис-изомеризации, приводящий к изменению структуры ППК.

1. Р.Н. Нурмухаметов, С.Н. Дядюшкина и др. Высокомолек.соед. А, 1991, 33, 1525-1529.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253304).

# Профилирование элементного состава по толщине тонких плёнок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ после осаждения импульсным эксимерным лазером из одной мишени

А.И. Ильин<sup>1</sup>, В.К. Егоров<sup>1</sup>, А.А. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской АН, Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Синтез однофазных эпитаксиальных пленок позволил наладить производство сверхпроводящих (СП) лент и пленок на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO), востребованных в линиях электропередачи, высокопольных магнитах и системах магнитной левитации [1-3]. Функциональные свойства этих материалов напрямую зависят от равномерности распределения элементов, составляющих сверхпроводящую фазу  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , по толщине. Повышение этой однородности критически важно для улучшения СП-характеристик, таких как критическая температура ( $T_c$ ), ширина перехода ( $\Delta T_c$ ) и плотность критического тока ( $J_c$ ).

Другим фактором, осложняющим технологии изготовления двумерных приборов [3-4], является развитый рельеф поверхности пленок. Период решетки орторомбической фазы YBCO в направлении [001] близок к 1,2 нм, и поэтому при послойном механизме роста Франка – Ван дер Мерве шероховатость поверхности не должна превышать этой величины. Однако островковый механизм Вольмера – Вебера или послойно-островковый механизм Странского – Крастанова при росте пленок приводят к шероховатости поверхности, значительно превышающей один или два периода решетки, что можно объяснить вариациями скорости роста кристаллитов с отличающейся кристаллографической ориентацией относительно подложки. При импульсном лазерном осаждении пленок сложного состава, таких как YBCO, на формирование морфологии влияет диффузионное перераспределение элементов матрицы и примесей в результате изменения температуры поверхности. Основная проблема при точном выборе режимов осаждения с помощью профилирования состава заключается в изменчивости морфологии поверхности и плотности дефектов кристаллической решетки, возникающих во время напыления, даже при использовании одной и той же мишени.

Для оценки распределения элементов по глубине в пленках, синтезированных в различных условиях, был проведен комплексный анализ результатов их исследования методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции (РД) и рентгеновской флуоресценции (РФА). Состав мишени определяли стандартным методом Резерфордского рассеяния (РОР) ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{He}^+$ . При осаждении из мишени состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$  были получены пленки толщиной 170–300 нм с температурой нулевого сопротивления  $T_c(R=0)$ , определенной по зависимости  $R(T)$ , в диапазоне 77.4–87 К. Образцы, осажденные со скоростью ~0,5 нм/с, характеризовались значениями  $T_c(R=0) = 85\text{--}87$  К и величиной кислородного индекса ~6,9 (пленки 1, 4). Снижение скорости осаждения до

значений менее 0,1 нм/с при длительности процесса 30–60 мин приводило к падению  $T_c(R=0)$  до ~77 К при значениях кислородного индекса ~6,75 (пленки 2, 3).

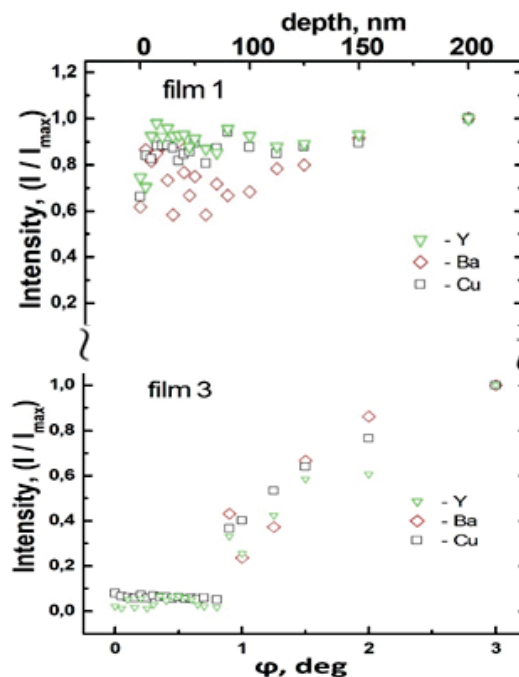


**Рис.1.** Распределение относительной интенсивности пиков рентгеновской флуоресценции ( $I/I_{\max}$ ) для атомов Y, Ba, Cu в пленках 1 и 3 в зависимости от: угла падения возбуждающего рентгеновского потока  $\phi$  (градусы) – нижняя шкала и глубины (нм) – верхняя шкала. Скорости осаждения пленок 1 и 3 составили 0,5 и 0,1 нм/с, а высота пирамид на поверхности ~20 и 80 нм, соответственно.

Наблюдаемые профили состава пленок в зависимости от скорости осаждения указывают на изменения содержания элементов вдоль оси  $c$ , перпендикулярной подложке (рис. 1). Поэтому функциональные свойства определяются не только средней концентрацией кислорода, но и вариациями содержания в тонких пленках других элементов.

1. Manabe, T.; Kondo, W.; Yamaguchi, I.; Sohma, M.; Tsuchiya, T.; Tsukada, K.; Mizuta, S. & Kumagai, T., Physica C 417 (2005), 98-102
2. Wang, K.; Dong H.; Huang D.; Shang H.; Xie B.; Zou Q.; Zhang L.; Feng C.; Gu H.; Ding F. Soft. Sci. 2 (2022), 12
3. Goyal, A. (Ed.) Springer US, (2005), 346
4. V. L. Gurtovoi, A. I. Il'in, A.V. Nikulov, Physics Letters A., 2020, v. 384, № 26, C. 126669

# Дифракция рентгеновского излучения на изогнутом кристалле ниобата лития, промодулированном поверхностной акустической волной

Д.В. Иржак, С.Е.Куманяев, К.С. Пундигов, Д.В. Рощупкин, Р.Р. Фахртдинов

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,  
Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6.

Рентгеновская дифрактометрия и топография представляют собой мощные инструменты для исследования дефектов структуры и полей деформаций в монокристаллах. В случае, когда кристалл подвергается воздействию поверхностной акустической волны (ПАВ), периодическая модуляция кристаллической решетки приводит к возникновению динамической дифракционной решетки для рентгеновских лучей. Это явление проявляется в возникновении сателлитных максимумов вокруг основного брэгговского пика. Введение механического изгиба кристалла создает сложное распределение статических напряжений, которое накладывается на динамические деформации, вызванные распространением ПАВ. Взаимодействие статической деформации изгиба и динамической деформации акустической волны приводит к перераспределению интенсивности дифрагированного пучка, изменению условий брэгговского отражения по площади кристалла и модификации топографического контраста.

Исследования проводились на YZ-срезе монокристаллической подложки  $\text{LiNbO}_3$ . На поверхности кристалла был сформирован встречно-штыревой преобразователь для возбуждения распространяющейся ПАВ с длиной волны  $\Lambda=4$  мкм.

На рисунке 1 представлены рентгеновские топограммы кристалла  $\text{LiNbO}_3$  без ПАВ (рисунок 1а) и при условии возбуждения ПАВ (рисунок 1б).

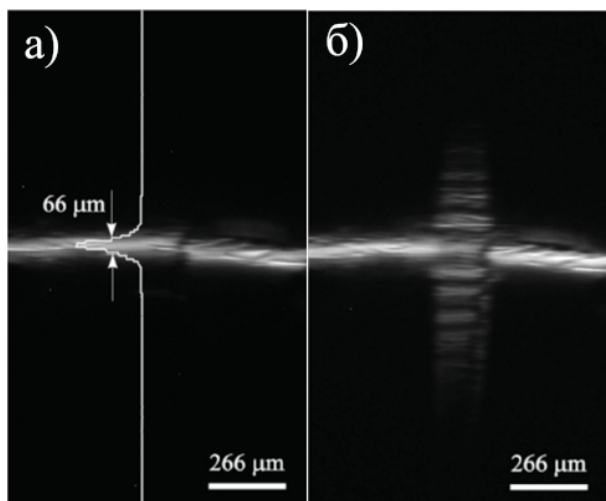


Рис. 1. Рентгеновские топограммы кристалла ниобата лития без ПАВ (а) и при условии возбуждения ПАВ (б)

В положении брэгговского максимума при распространении ПАВ на топограмме появляются полосы, расположенные в акустическом волновом тракте. Данные полосы соответствуют дифракционным сателлитам с кривой качания кристалла и вы-

званы изгибом монокристаллической пластины, в которой распространяется ПАВ.

Для физической интерпретации экспериментальных данных было проведено численное моделирование процесса дифракции. Моделирование базировалось на решении уравнений динамической теории дифракции (уравнений Такаги-Топэна) с учетом полного поля деформаций, складывающегося из статической компоненты изгиба и динамической компоненты, вызванной распространением ПАВ. На рисунке 2 продемонстрированы результаты расчетов, показывающие, что изгиб кристалла приводит к смене типа топографического изображения от изображения волнового поля ПАВ в случае плоской поверхности (рисунок 2а), к сателлитной структуре в случае наличия изгиба (рисунок 2б).

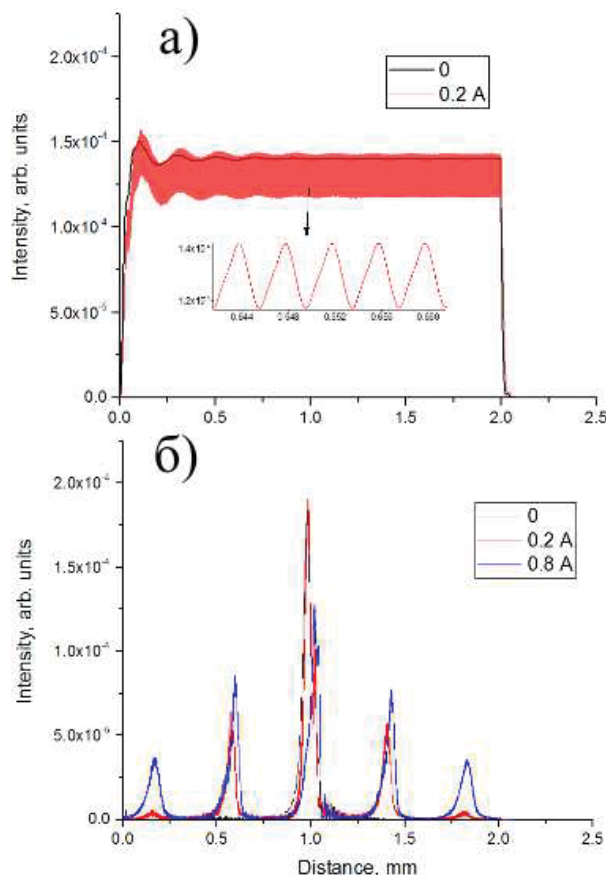


Рис. 2. Распределение интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения по поверхности кристалла при различных амплитудах ПАВ для плоского (а) и изогнутого (б) кристаллов.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда, грант 25-72-20016.

# Моделирование работы двухкристального Лауэ-монокроматора станции 1-5 ЦКП «СКИФ»

П.С. Завьялов<sup>1,2</sup>, Д.В. Карпов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, ул. Русская, 41, 630058

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, 630073

Станция 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» ЦКП «СКИФ» оснащена двухкристальным монокроматором в геометрии Лауэ (Si(111), асимметричный срез 21,9°). Оптическая схема работает в антидисперсионной конфигурации с фиксированным вертикальным смещением выхода (25 мм). Из-за экстремальных тепловых нагрузок на первый кристалл (поглощаемая мощность около 700 Вт) [1] и отсутствия прямого доступа к оптическим элементам в вакуумном хатче во время эксперимента, критически важна точная первичная юстировка и понимание того, как механические ошибки позиционирования влияют на параметры выходного пучка.

Для определения бюджетов ошибок и допусков на юстировку выполнено численное трассирование лучей (30 кэВ) в среде XRayTracer (xrt) [2]. Проводилось сканирование пяти степеней свободы второго кристалла относительно первого. Критериями оценки служили интегральный фотонный поток, размеры и смещение пучка на финальном диагностическом экране на 115 метрах (Рисунок 1).

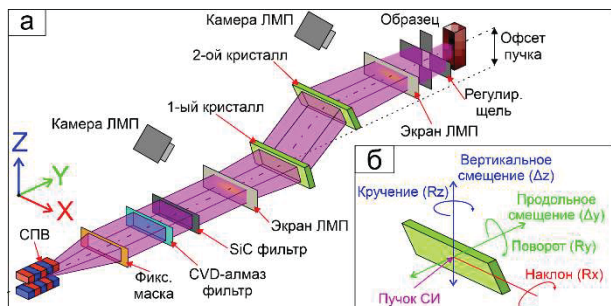


**Рис. 1.** Схематическое изображение оптической схемы станции 1-5 (а). Отклонения второго кристалла монокроматора, исследуемые при моделировании (б).

Моделирование выявило выраженную анизотропию чувствительности системы к механическим смещениям. Угловые отклонения в плоскости дифракции критичны для сохранения интенсивности (Рисунок 2), в то время как повороты вокруг оси пучка приводят к масштабным линейным дрейфам положения пучка при относительно слабом влиянии на пропускную способность.

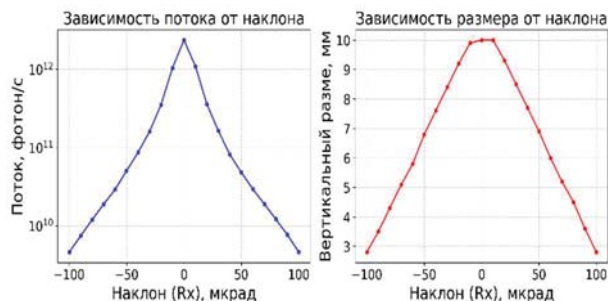


**Рис. 2.** Результаты моделирования наклона второго кристалла монокроматора в плоскости дифракции

Наиболее критичным параметром является наклон второго кристалла (Рис. 2): отклонение всего на  $\pm 100$  мкрад ( $\sim 20$  угл. сек.) приводит к падению интенсивности более, чем на два порядка. При этом вертикальный размер пучка линейно уменьшается при увеличении отклонения, в то время как горизонтальный профиль остается стабильным. Физически это обусловлено нарушением условия Брэгга и изменением направления пучка на выходе из второго кристалла. Продольное смещение второго кристалла имеет широкие допуски (до  $\pm 70$  мм), что обусловлено большой длиной (до 1530 мм) базы монокроматора [3]. Этот вид расстройки приводит к смещению пучка в вертикальном направлении, уменьшению интегрального потока и сдвигу центральной энергии.

Полученные количественные зависимости между вектором расстройки кристалла и откликом пучка устанавливают строгие физические допуски для механических узлов монокроматора. Полученные данные определяют стратегию использования люминесцентных мониторов положения пучка (ЛМП) как основного инструмента бесконтактной диагностики при вводе станции в эксплуатацию, позволяя по картине на экране однозначно идентифицировать тип механической ошибки и компенсировать её.

1. Купер К. Э. и др. Концептуальный проект Станции 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов "СКИФ". Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. Т. 1. С. 168–226.
2. Klementiev K., Chernikov R. Powerful scriptable ray tracing package xrt // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. SPIE, 2014. Т. 9209. С. 60–75. DOI: 10.1117/12.2061400.
3. Довженко Г. Двухкристальный Лауэ-монокроматор с меридиональным изгибом для медицинской радиографии на синхротроне СКИФ. НГТУ, 2023.

# Рентгенографическое исследование интеркалированных углеродных волокон на основе пека

И.В.Клименко

ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук,

119334, Москва, ул. Косыгина 4

Рентгено-структурный анализ является одним из прямых методов исследования фазового состава вещества. Он позволяет не только получить информацию о строении материала, но и идентифицировать начальные, промежуточные и конечные продукты интеркалирования.

В данной работе проведено рентгенографическое исследование бромированных в течение 0 - 120 часов пековых углеродных волокон с температурой термообработки 3000° С с целью установления корреляционной связи между электрическими свойствами и структурой волокон в процессе интеркалирования.

Бромирование пековых моноволокон проведено при комнатной температуре в стеклянном сосуде, наполненном газообразным бромом. Диаметр исходных волокон составлял 8–10 мкм. После удаления избыточного брома в вытяжном шкафу, образцы выдерживали под вакуумом в течение 3 суток. В результате бромирования произошло уменьшение электрического сопротивления в 7 раз: с 1.19 до 0.17 МОм·см, в течение первых 30 ч бромирования [1]. При дальнейшем увеличении времени бромирования до 120 ч происходит рост сопротивления до 0.35 МОм·см.

Структурные исследования исходных и бромированных пековых волокон выполнены с помощью рентгеновского дифрактометра “ДРОН-1,5” с модифицированной коллимацией на Cu(Kα)-излучении. Излучение Cu(Kα) отфильтровывалось никелевой пластиной толщиной 3 мм. Напряжение на трубке составляло 33 кВ, анодный ток – 27 мА. Использовался сцинтилляционный счетчик с амплитудным дискриминатором.

Образцы УВ измельчали и набивали в металлические кюветы с рабочим объемом 17 × 17 × 1.5 мм<sup>3</sup>. Запись образцов проводили в интервале углов  $\theta$  от 1° до 45°. Измерение углового положения рефлексов осуществляли с точностью до 0.01°. Все образцы исследовались как в отраженном, так и в прошедшем свете, что позволило получить дополнительные рентгенографические характеристики.

Анализ полученных дифрактограмм позволил определить следующие структурные характеристики:  $d_{002}$  – расстояние между графитовыми плоскостями (002),  $L_c$  – размер кристаллитов вдоль оси “с”,  $L_a$  – размер кристаллитов перпендикулярно оси “с”,  $C_{тр}$  –

степень графитации. Значения  $L_c$ ,  $L_a$ ,  $d_{002}$  были определены с использованием формулы Брэгга и Шеррера, а также формулы Селякова:  $n\lambda = 2d\sin\Theta$ ,  $L = K\lambda/(\beta\cos\Theta)$ , где  $\Theta$  – угол рассеяния,  $d$  – внутриплоскостное расстояние,  $\lambda$  – длина волны рентгеновских лучей,  $\beta$  – полуширина максимума интенсивности линии в радианах [1, 2]. Значение  $K$  для  $L_c$  составляло 0.9, для  $L_a$  – 1.84. Степень графитации волокна рассчитывают по формуле  $C_{тр} = (3.440 - d_{002})/(3.440 - 3.354)$ .

Согласно данным рентгенографического анализа (увеличение  $d_{002}$ , уменьшение  $C_{тр}$ ), в результате бромирования происходит некоторое разуплотнение графитовой структуры волокна. Размеры кристаллитов изменяются таким образом: при постоянном значении  $L_a$  значение  $L_c$  сначала увеличивается, затем уменьшается. Наиболее интенсивно интеркалирование происходит в местах наличия дефектов структуры. Сначала происходит кажущееся увеличение доли графитовой компоненты, уменьшение количества дефектов на поверхности волокна благодаря воздействию газообразного брома, что приводит к уменьшению электрического сопротивления волокна в 7 раз.

При бромировании от 48 до 96 ч количество дефектов в волокне за счет его контакта с бромом резко уменьшается, в небольшом количестве начинают образовываться связи С–Вг. Происходит некоторое измельчение графитовых частиц в направлении оси “с”, что приводит к уменьшению среднего размера  $L_c$ .

При времени бромирования >96 ч бром начинает разрушать саму графитоподобную структуру волокна, интенсивно вступая в химическую связь с атомами углерода графитовой сетки, в следствии чего происходит образование мелкокристаллической фазы и рост электрического сопротивления волокна (с 0.17 до 0.35 МОм·см).

Исследование проведено в рамках государственного задания ИБХФ РАН № 125020401357-4.

1. И.В.Клименко. Химическая физика, 2022, 41, 2, 70–77.
2. S.S.Mohindar, A.S.Pavlovic. Carbon, 1993, 31, 4, 557–564.

# Новый вариант теории нанофокусировки пучков жесткого синхротронного излучения составной преломляющей линзой

В.Г. Кон

НИИ «Курчатовский институт», 123182 Россия, г. Москва, пл. Курчатова, 1

В [1] было показано, что для получения минимального поперечного размера пучка синхротронного излучения (СИ) в фокусе составной преломляющей линзы (СПЛ) необходимо уменьшать апертуру СПЛ  $A$  и длину волны СИ  $\lambda$ . При этом аналитическая теория, представленная в [2] становится неточной, так как она не учитывает апертуру СПЛ. Апертура не влияет на результат в том случае, когда пучок СИ на выходе из СПЛ имеет размер меньше апертуры вследствие поглощения, а источник СИ находится на очень большом расстоянии. Если указанные выше условия не выполняются, то апертуру необходимо учитывать.

В новом варианте теории для планарных СПЛ с малой апертурой и при высоких энергиях фотонов апертура учитывается разными способами в зависимости от конкретных условий. В [3] рассмотрен вариант, когда СПЛ является первым элементом экспериментальной схемы и получает СИ непосредственно от источника через монохроматор. В этом случае волновая функция (ВФ) СИ определяется двумя параметрами: расстоянием до источника  $z_s$  и поперечным сдвигом  $x_s$  источника от оптической оси.

При этом ВФ на выходе из СПЛ имеет аналитический вид  $\exp(ia_0 + ia_1x + ia_2x^2)$  с комплексными коэффициентами  $a_0, a_1, a_2$ , которые вычисляются в рамках аналитической теории [2]. В [3] получены аналитические формулы для действительных и мнимых частей этих коэффициентов в линейном по малому параметру  $\gamma = \beta/\delta$  приближении. При этом коэффициент преломления равен  $n = 1 - \delta + i\beta$ . Такой результат получается без учета апертуры. Учет апертуры в [3] выполняется в рамках геометрической оптики, которая получается в том же приближении, что и теория в [2]. Траектория определяется поперечной координатой  $x$  и углом  $\theta$  между направлением ее распространения и оптической осью. Нужно выбрать такие траектории, которые в точке поворота касаются апертуры с двух сторон. Концы этих траекторий определяют размер пучка на выходе из СПЛ.

Фактически достаточно определить только координаты входа таких траекторий  $x_{0d}$  и  $x_{0u}$ , а все остальное зависит от них. Так угол  $\theta_0 = (x_0 - x_s)/z_s$ . А координата выхода траектории равна  $x_1 = x_0 \cos(u) - \theta_0 \sin(u)$ ,  $u = L/L_c$ ,  $L_c = (LR/2N\delta)^{1/2}$ . Здесь  $L$  – длина СПЛ,  $R$  – радиус кривизны параболических поверхностей,  $N$  – число элементов в СПЛ. Для вычисления координат  $x_{0d}$  и  $x_{0u}$  необходимо решать трансцендентное уравнение методом итераций. Такой подход позволяет получить правильный ответ при любых значениях параметров  $z_s$  и  $x_s$ . В частности была вычислена кривая качания СПЛ, то

есть зависимость интегральной интенсивности после СПЛ от угла между осью СПЛ и оптической осью. В расчете угол определяется отношением  $x_s/z_s$ .

Также рассмотрен случай длинной СПЛ, когда  $L = 7.54$  см,  $z_s = 1$  мм и фокусное расстояние  $z_f = 1.01$  мм. В этом случае СПЛ принимает очень узкий интервал поперечного сечения СИ, расширяется внутри СПЛ до размеров апертуры, а потом сжимается в фактически такой же узкий интервал. Вычислить такой случай другими методами весьма сложно.

ВФ на выходе из СПЛ имеет вид экспоненты от квадратного трехчлена, обрезанной внутри интервала от  $x_{1d}$  до  $x_{1u}$ . По этой причине интеграл свертки ВФ с пропагатором Френеля аналитически не вычисляется. Стандартно нужно использовать метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Альтернативно предложен вариант выразить интеграл свертки через комплексные интегралы Френеля (КИФ) от комплексного аргумента. А сам такой интеграл можно вычислять суммированием степенного ряда и асимптотики.

Как показала практика, время расчета у методов БПФ и КИФ примерно одинаковое, но новый метод КИФ в некоторых случаях может оказаться более устойчивым и точным, так как для него не требуется вычислять результат на очень большой сетке точек с мелким шагом.

Если СПЛ не является первым элементом экспериментальной схемы, то рассмотренный выше метод не применим. Точнее вычислить траектории в общем случае очень сложно. Для этих случаев можно применить 3 итерационных метода. Один из них ориентирован на ВФ в виде экспоненты, в котором соответствие конечных интервалов на входе и на выходе вычисляется методом стационарной фазы. Если интервал на выходе больше апертуры, то он уменьшается до размеров апертуры. Два других метода требуют численного вычисления интеграла свертки ВФ с пропагаторами СПЛ. Итерации состоят в том, что длина линзы делится на куски и после прохождения каждого куска, часть ВФ, которая выходит за пределы апертуры, обнуляется.

Рассмотренные 4 метода реализованы в программе XRWP, написанной на языке программирования VKACL. Получить программу для работы можно на ее сайте [4].

1. V.G. Kohn, M.S. Folomeshkin. J. Synchrotron Radiation (2021) 28, 419-428.
2. В.Г. Кон. ЖЭТФ (2003) 124, 224-236.
3. В.Г. Кон. Российские нанотехнол. (2025) 20, 282–288.
4. В.Г. Кон. Программа XRWP. (2026) <https://xray-optics.ucoz.ru/XR/xrwp.htm>

# Применение рентгеновской компьютерной микротомографии для анализа объемных микроструктурных свойств горных пород

И.Ж. Бунин<sup>1</sup>, А.Н. Кочанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4*

Надежная аттестация структурных и прочностных свойств горных пород необходима для эффективного, комплексного освоения недр и предупреждения горных ударов. Разрушение геоматериалов во многом определяется их исходной структурой: формой зерен, наличием пор и микротрещин. Минимальный размер микродефектов в твердом теле может составлять 0.01–0.1 мкм. Изучение геометрии дефектов в объеме требует применения неразрушающих методов с высоким пространственным разрешением. Полученные 3D-данные критически важны для численного моделирования разрушения, в частности, с использованием метода фазового поля, который позволяет описывать сложную топологию трещин без явного отслеживания их границ.

В настоящей работе методами рентгеновской компьютерной микротомографии (РКМТ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) и исследована структура пор и микротрещин в поликристаллическом граните после динамического воздействия.

**Методика эксперимента.** Образцы представлены в виде фрагментов гранитного блока, подвергнутого лабораторному динамическому нагружению. Исследование поверхности образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JEOL-JSM-5910LV. Для трехмерного анализа внутренней структуры специально подготовленных образцов гранита размерами 2×1×1 мм использовали рентгеновский микротомограф SkyScan 1272. Сканирование выполняли в следующем режиме: разрешение — 1.1 мкм/пиксель; напряжение на источнике — 90 кВ; экспозиция — 4331 мс; фильтрация пучка — 0.5 мм Al + 0.038 мм Cu; шаг вращения объекта — 0.1°. Метод РКМТ основан на реконструкции пространственного распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения. Компьютерная обработка теневых проекций позволяет визуализировать внутреннее строение объектов, содержащих компоненты разной плотности.

**Результаты и обсуждение.** При анализе пустотного пространства материала выделены два типа дефектов различного генезиса: первичные генетические поры и вторичные трещины деструкции. Образование генетических пор обусловлено природными факторами и связано с геологическими процессами формирования породы. По данным РЭМ, поры имеют округлую морфологию с двумя максимумами распределения по размерам: 1.0–2.5 мкм и около 5.0 мкм. РКМТ-визуализация подтвердила, что в объеме генетические поры (диаметром 1.0–5.0 мкм)

распределены крайне неравномерно: обнаружены как локальные области их скопления, так и зоны, свободные от пор. Общая «томографическая» пористость образца составила ~1.8%.

Второй тип дефектов — микротрещины деструкции — вызван динамическим воздействием на гранит. Они локализованы в зернах кварца, полевого шпата и на их границах. На поверхности образцов длина микротрещин достигает 1.0 мм при ширине (раскрытии) до 50.0 мкм. В объеме образца зафиксирована разветвленная сеть внутренних трещин с раскрытием 3–10 мкм (рис.1). Отдельные фрагменты трещин заполнены более плотным вторичным минералом (отображаются темным цветом), тогда как свободные пустоты имеют белый оттенок.

Анализ экспериментальных данных, полученных методами томографии и микроскопии, показал, что параметры генетических пор на поверхности и в объеме идентичны. При этом трещины деструкции на поверхности имеют большую ширину раскрытия, чем в объеме, что связано со спецификой релаксации напряжений на свободной поверхности.

Результаты 3D-реконструкции реальной геометрии генетических пор и дефектов могут быть импортированы в расчетную среду для последующего математического моделирования методом фазового поля, что позволит в перспективе с высокой точностью описать зоны концентрации напряжений и траектории магистрального разрушения»

**Закключение.** Совместное применение рентгеновской микротомографии и электронной микроскопии обеспечивает комплексную аттестацию дефектов структуры горных пород. Трехмерная визуализация генетических пор и трещин деструкции создает основу для верификации теоретических моделей физики прочности горных пород, планируемой к реализации в рамках подхода фазового поля.

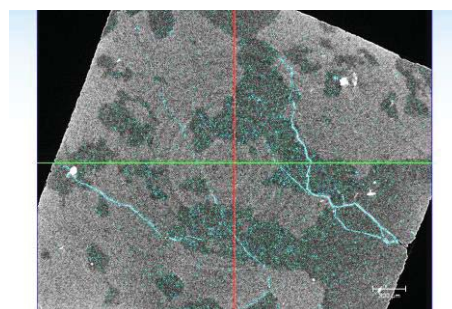


Рис. 1. Изображение микротрещин в граните по данным РКМТ. Масштабная линейка 300 мкм

# Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов в монокристалле кварца в присутствии теплового градиента

В.Р. Кочарян<sup>1</sup>, В.В. Маргарян<sup>1</sup>, Г. Кубе<sup>2</sup>, С. Строков<sup>2</sup>, С.Н. Норейян<sup>1</sup>, Г.Ф. Хачатрян<sup>1</sup>, Ю.М. Черепенников<sup>1</sup>, Е.А. Мкртчян<sup>1</sup>, А.П. Потылицын<sup>1</sup>, А.Е. Мовсисина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладных проблем физики НАН РА, ул. Нерсисяна, 25, Ереван, 0014, Армения

<sup>2</sup>Немецкий электронный синхротрон DESY, Ноткестр. 85, 22607, Гамбург, Германия

Рентгеновское излучение сегодня широко используется для визуализации и исследования внутренней структуры материалов как в современной медицине и биологии, так и в фундаментальных научных исследованиях благодаря своим свойствам проникновения, поглощения, дифракции, отражения и рассеяния.

В настоящее время передовые исследования в области рентгеновской визуализации проводятся в лабораториях, оснащённых крупными электронными ускорителями, поскольку такие исследования требуют высокой яркости, мощности, монохроматичности и когерентности излучения.

В качестве альтернативных источников рентгеновского излучения могут использоваться: параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), возникающее при движении заряженной частицы в кристалле; канальное излучение; переходное излучение, возникающее на границах раздела сред. Во всех этих случаях наблюдается значительное усиление интенсивности излучения в определённых направлениях для заданной длины волны. Например, в лаборатории LEBRA Университета Нихон был создан источник параметрического рентгеновского излучения (LEBRA-PXR) на основе сравнительно небольшого линейного ускорителя электронов с энергией 100 МэВ. Его характеристики сопоставимы с источниками аналогичного когерентного рентгеновского излучения, работающими на крупных ускорительных комплексах с энергиями в десятки ГэВ.

Для практического применения ПРИ обычно необходим ускоритель электронов с большим током пучка. Это ограничение может быть частично устранено за счёт оптимизации толщины кристаллической мишени, величины мозаичности кристалла, либо введения специальных деформаций в монокристалл, например, изгиба соответствующих атомных плоскостей.

Наличие внешних акустических полей или температурного градиента в кристаллических монохроматорах, работающих в геометрии Лауэ, позволяет значительно увеличить интенсивность отражённого пучка и управлять его спектрально-угловыми характеристиками.

Высокая чувствительность дифрагированного рентгеновского пучка к деформациям рассеивающего кристалла, включая акустические колебания и температурные градиенты, делает актуальным исследование зависимости интенсивности параметрического рентгеновского излучения, возникающего при прохождении релятивистских электронов через

кристалл, от величины приложенного температурного градиента.

С этой целью, проведено экспериментальное исследование параметрического рентгеновского излучения, генерируемого релятивистскими электронами в монокристалле кварца под воздействием температурного градиента с использованием электронов энергией 1.4 ГэВ. Измерения выполнялись на испытательной пучковой линии DESY II (TB21).

Спектр ПРИ регистрировался от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) кристалла кварца без и при приложении температурного градиента, направленного перпендикулярно этим плоскостям. Спектры ПРИ приведены на рисунке 1.

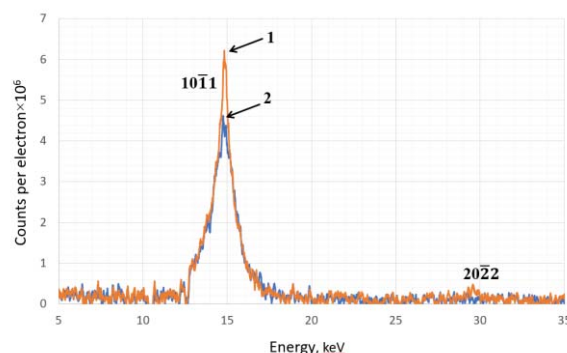


**Рис. 1.** Рентгеновские спектры от атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) при энергии пучка 1.4 ГэВ, толщине кристалла 0.7 мм,  $\theta_b \approx 7^\circ$  и приложенном к кристаллу температурном градиенте (1)  $\Delta T/\Delta x = 120$  К/см и (2)  $\Delta T/\Delta x = 0$  К/см.

Экспериментальные результаты показывают, что наличие температурного градиента приводит к увеличению интенсивности параметрического рентгеновского излучения. Этот эффект объясняется переносом переходного излучения, возникающего при входе электронов в кристалл. При этом полуширина спектрального пика параметрического рентгеновского излучения практически не изменяется.

# Исследование параметров микротрещин в образцах песчаника и гранита при поэтапном нагружении методами рентгеновской микротомографии и компьютерного моделирования

Ю.С. Кривоносов<sup>1</sup>, А.В. Бузмаков<sup>1</sup>, Е.Е. Дамаскинская<sup>2</sup>, В.Л. Гиляров<sup>2</sup>, В.Е. Асадчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123098 площадь Академика Курчатова, д. 1, Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Политехническая ул., д. 26. Санкт-Петербург, Россия

Исследование процессов разрушения гетерогенных материалов, таких как горные породы, является актуальной задачей в таких областях науки и техники, как строительство и разработка месторождений полезных ископаемых. Понимание механизмов образования и развития микротрещин под действием механических напряжений позволяет прогнозировать поведение материалов в естественных условиях и при эксплуатации ответственных конструкций.

Данная работа посвящена прямому наблюдению и количественному анализу морфологии микротрещин в образцах природных гетерогенных материалов (песчаник Berea, гранит Westerly) под действием одноосной сжимающей нагрузки. Ключевой особенностью проведенных исследований является непосредственное наблюдение дефектов в объеме образцов в процессе нагружения. Для этого использовался конусно-лучевой рентгеновский микротомограф «МИКРОТОМ» (НИЦ «Курчатовский институт») в сочетании со специальной переносной нагрузочной ячейкой. Данное устройство позволяет поддерживать постоянную нагрузку на образец в процессе томографического эксперимента, не препятствуя процессу измерения. С помощью рентгеновской микротомографии были получены трехмерные изображения структуры образцов песчаника и гранита на различных этапах деформирования (см. рис. 1.).

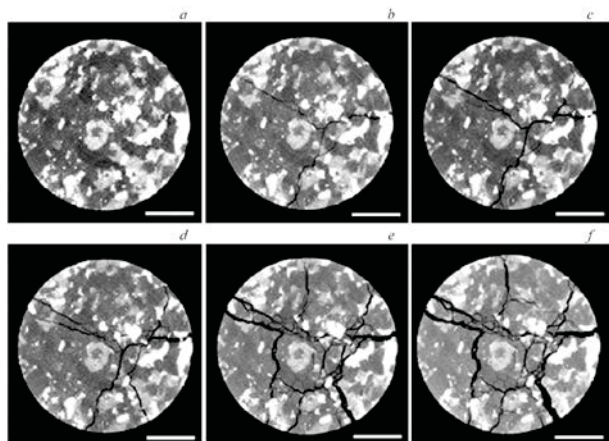


**Рис. 1.** Томографические сечения образца гранита: *a*) исходный образец; *b, c, d, e, f*) образец после каждого этапа нагружения. Длина штриха равна 2 мм.

Анализ томографических данных позволил выявить, что с увеличением приложенной нагрузки

происходит увеличение как фрактальной размерности системы микротрещин (определенной методом box counting), так и их относительного объема. Это свидетельствует о прогрессирующем развитии дефектной структуры и о постепенном вовлечении в этот процесс все большей доли объема образца.

Параллельно с экспериментальными исследованиями была разработана компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов на основе метода дискретных элементов (DEM). Модель, реализованная в пакете программ MUSEN, позволяет исследовать эволюцию дефектной структуры и особенности процесса разрушения. Численные эксперименты по одноосному нагружению образцов с различной внутренней структурой показали хорошее согласие с результатами лабораторных исследований. Удалось выявить детали образования фрактальных структур магистральных трещин и проследить изменение корреляционной фрактальной размерности кластеров дефектов в процессе их роста.

Сопоставление экспериментальных данных рентгеновской микротомографии с результатами моделирования показало, что разработанная компьютерная модель демонстрирует свою адекватность и способность описывать эволюцию дефектной структуры в процессе механического нагружения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение спектра исследуемых материалов, изучение влияния различных видов нагружения, а также на более детальный анализ связи между микроструктурой материала и параметрами развития трещин.

Результаты исследований опубликованы в работах [1, 2].

*Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части проведения и обработки томографических экспериментов. Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе в части постановки задачи, анализа результатов и компьютерного моделирования.*

1. Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.И. Фролов / Физика твердого тела. 2024. Том 66. Вып. 9. С. 1623 – 1630.
2. Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.И. Фролов / Физика твердого тела, 2026, том 68, вып. 2. С. 336 – 341.

# Рентгеновские микролампы с эмиттером на основе наноструктурированного углеродного материала

М.Н. Левин<sup>1</sup>, С.П. Наговицын<sup>2</sup>, С.Л. Ермаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, улица Академика Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., Россия, 142432

<sup>2</sup> ИП «Наговицын», площадь Журавлева, 2, корп.2, г. Москва, Россия, 107023

Компактные рентгеновские источники с холодными автоэмиссионными катодами востребованы в лабораторной и прикладной рентгеновской аппаратуре. По сравнению с термокатодными источниками они допускают быстрый электрически управляемый запуск, импульсную модуляцию рентгеновского потока, снижение тепловой нагрузки и миниатюризацию конструкции. В качестве полевых эмиттеров, в частности, используются структуры с углеродными нанотрубками. Для таких источников реализованы микрофокусные режимы, высокая плотность эмиссионного тока и возможность динамической рентгенографии [1, 2]. Вместе с тем для ряда применений существенны не предельные токовые характеристики, а сочетание малой мощности, технологичности эмиттера, устойчивости катодной поверхности и работоспособности в области мягкого рентгеновского излучения.

В работе представлена рентгеновская микролампа с холодным автоэмиссионным катодом на основе наноструктурированного углеродного материала. В качестве эмиттера использована нанографитная плёнка, сформированная методом плазмохимического осаждения в водород-метановой газовой смеси. Такая структура содержит развитую систему эмиссионных центров и обеспечивает автоэмиссию при токах, достаточных для работы низкоэнергетической рентгеновской микролампы. Для катода диаметром 3–4 мм ток 50 мкА соответствует плотности тока порядка единиц мкА/мм<sup>2</sup>; этот уровень существенно ниже характерных достижимых плотностей тока для исследованных нанографитных эмиттеров, что задаёт щадящий режим работы катода.

Работоспособность микролампы оценивали по ионизационному отклику, возбуждаемому рентгеновским излучением, в зависимости от анодного напряжения и анодного тока.

Показано, что регистрируемый отклик достигается при анодных напряжениях порядка 5–6 кВ и токах порядка десятков микроампер. Эти параметры соответствуют малой электрической мощности источника и режиму генерации рентгеновского излучения с энергией порядка 10 кэВ. В исследованных режимах эмиттер сохранял устойчивую автоэмиссию без признаков разрушения.

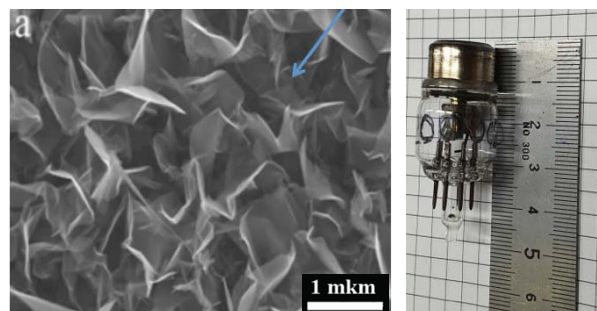


Рис. 1. Эмиттер и рентгеновская микролампа.

Перспективные области применения разработанной рентгеновской микролампы связаны с компактными лабораторными источниками рентгеновского излучения, малогабаритными аналитическими приборами, локальной рентгеновской диагностикой, микрофокусными источниками для исследования микро- и наноструктур, а также аппаратурой, где существенны малые размеры, низкое энергопотребление и быстрый управляемый запуск источника.

1. Cheng Y., Zhang J., et al., Dynamic radiography using a carbon-nanotube-based field-emission x-ray source. Review of Scientific Instruments, 2004, 75, 3264–3267.
2. Han J.S., Lee S.H., et al., High-performance cold cathode X-ray tubes using a carbon nanotube field electron emitter. ACS Nano, 2022, 16, 10231–10241.

# Спектрограф с плоским полем на область длин волн 1 – 6 нм

А.О. Колесников<sup>1</sup>, М.Д. Логачев<sup>1</sup>, А.Н. Шатохин<sup>1</sup>, Е.А. Вишняков<sup>1</sup>, Е.Н. Рагозин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Создан и испытан дифракционный спектрограф скользящего падения с плоским полем, концепция которого предложена Харадой [1], в области длин волн 1 – 6 нм. Разработка подобных спектрографов востребована для задач диагностики лабораторных плазменных источников [2], астрофизических исследований и работ на источниках синхротронного излучения.

В приборе используется позолоченная сферическая VLS-решетка (Varied Line-Space) с радиусом кривизны 23.55 м и центральной частотой штрихов 3200 мм<sup>-1</sup> [3]. Изменение частоты линий на поверхности решетки задается полиномом вида:

$$p(y) = p_0 + p_1y + p_2y^2 + p_3y^3 \quad (1)$$

с проектными коэффициентами  $p_0 = 3200 \text{ мм}^{-1}$ ,  $p_1 = 14.43 \text{ мм}^{-2}$ ,  $p_2 = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-3}$  и  $p_3 = 8.0 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-4}$ , где частота штрихов изменяется от 2850 до 3600 мм<sup>-1</sup>. Ширина заштрихованной рабочей области составляет 50 мм.

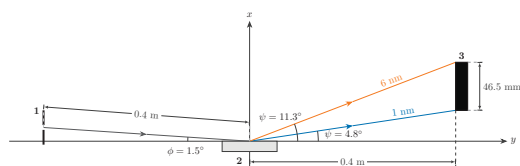


**Рис. 1.** Схема спектрографа. 1 – регулируемая входная щель, 2 – VLS-решетка, 3 – ПЗС-детектор.

Расстояния от входной щели до решетки и от решетки до детектора приблизительно равны и составляют 0.4 м (Рис. 1). Скользящий угол падения излучения составляет 1.5°. В качестве приемника используется ПЗС-матрица компании Teledyne e2v с обратной за светкой и размером ячейки 13 мкм.

Методом численной трассировки лучей было показано, что теоретическая разрешающая способность  $\lambda/\delta\lambda$  во всем рабочем диапазоне составляет  $\sim 10^3$ , за исключением небольшой области у коротковолновой границы плоского поля. На практике разрешение дополнительно ограничено конечной шириной входной щели и размерами пикселя детектора. В эксперименте была достигнута  $\lambda/\delta\lambda \approx 300$  в коротковолновой области и  $\lambda/\delta\lambda \approx 900$  в длинноволновой.

Экспериментальные испытания прибора проводились в вакуумной камере. Линейчатые спектры возбуждались импульсами лазера Nd:YAG ( $\lambda = 1.064 \text{ мкм}$ , длительность 10 нс, энергия 1 Дж) на мишенях из тефлона, алюминия и титана. Интенсивность излучения в фокусе была не ниже  $10^{12} \text{ Вт/см}^2$ .

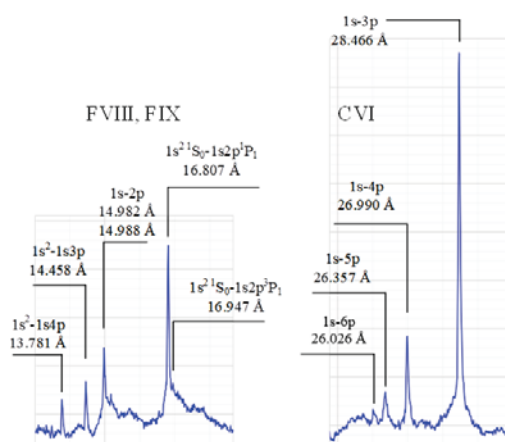


**Рис. 2.** Участки спектра тефлоновой мишени, содержащие линии ионов F VIII и F IX (слева) и лаймановскую серию иона C VI (справа).

В зарегистрированных спектрах уверенно разрешаются линии гелие- и водородоподобных ионов углерода и фтора (Рис. 2). Видна также слабая интеркомбинационная линия иона F VIII, красные крылья резонансных линий образованы многочисленными неразрешенными диэлектронными сателлитами.

На спектре титана (Рис. 3) отчетливо видны линии ионов Ti XIII, Ti XIV, Ti XV, Ti XVI, Ti XVII (потенциалы ионизации 788, 863, 942, 1044, 1131 эВ соответственно).

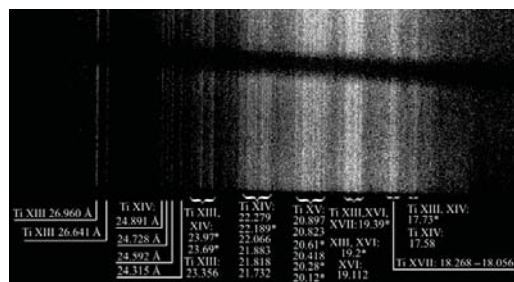


**Рис. 3.** Спектр титановой мишени.

Испытания подтвердили расчетные характеристики созданного отечественного спектрографа.

1. T. Kita, T. Harada, N. Nakano, H. Kuroda. Appl. Opt., 1983, 22, 512.
2. J. Dunn, E.W. Magee, R. Shepherd et al. Rev. Sci. Instr., 2008, 79, 10E314.
3. А.О. Колесников, М.Д. Логачев, Е.Н. Рагозин и др. Квантовая электрон., 2026, 56, 103.

## Высокоразрешающая преломляющая микрооптика на основе алмаза и диоксида кремния для когерентной рентгеновской визуализации

И.И. Лятун, А.С. Коротков, С.С. Лятун, А.А. Баранников, Д.А. Зверев, А.А. Снигирев

*Международный научно-исследовательский центр «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс»,  
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград 236041*

Стремительное развитие современных дифракционно ограниченных источников синхротронного излучения открывает новые горизонты для когерентной рентгеновской визуализации и микроскопии высокого разрешения. Реализация данных методов требует создания специализированной преломляющей оптики, способной сохранять когерентность волнового фронта излучения. Монокристаллический алмаз считается наиболее перспективным материалом для работы в условиях экстремальных тепловых и радиационных нагрузок благодаря своей рекордной теплопроводности и радиационной стойкости [1]. Кроме того, большой интерес для рентгеновской оптики представляют рентгеноаморфные материалы (в частности, диоксид кремния) и нанополикристаллический алмаз [2], использование которых позволяет полностью избежать возникновения паразитных брэгговских отражений (так называемых «глитчей») на оптических элементах.

В данной работе продемонстрирована возможность изготовления компактных рентгеновских микрообъективов с пространственным разрешением менее 100 нм на основе алмаза и диоксида кремния (кварцевого стекла). Ультракompактные габариты микролинз достигаются благодаря использованию метода ионно-лучевой литографии на базе двухлучевой платформы FIB-SEM Zeiss Crossbeam 540, позволяющего формировать вогнутые параболические профили с радиусами кривизны

вершины  $R < 5$  мкм [3]. Малые радиусы кривизны (3 - 5 мкм) обеспечивают короткие фокусные расстояния — менее 25 мм для алмаза при энергии рентгеновского излучения 12 кэВ. Это позволяет реализовывать ультракompактные схемы рентгеновской микроскопии с общей оптической длиной менее 1 м с увеличением более 40×.

Для микролинз из диоксида кремния успешно апробирован метод быстрого прототипирования, сочетающий предварительную FIB-разметку с последующим изотропным жидкостным химическим травлением [4]. Данный подход позволяет сократить время изготовления единичного оптического элемента более чем на порядок (более чем в 10 раз) по сравнению со стандартным прямым ионным фрезерованием, открывая эффективный путь к созданию сложных матричных преломляющих оптических систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 26-12-00523.

1. P. Medvedskaya, I. Lyatun, S. Shevyrtalov et al., Optics Express 28 (4) (2020) 4773.
2. I. Snigireva, T. Irifune, T. Shinmei et al., In Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XVI (11837) (2021) 8-14.
3. I.I. Lyatun, P.N. Medvedskaya, A.S. Korotkov et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 18 (6) (2024) 1508.
4. I.I. Lyatun, S.S. Lyatun, A.A. Snigirev, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 19 (4) (2025) 833.

## Бериллиевая преломляющая оптика для экспериментальных станций первой очереди ЦКП «СКИФ»

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

*Международный научно-исследовательский центр «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс»,  
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград 236041*

Предстоящий ввод в эксплуатацию отечественного источника синхротронного излучения четвертого поколения с энергией 3 ГэВ — ЦКП «СКИФ» (Новосибирск) определяет необходимость развития высокоэффективной рентгеновской оптики. Уникальные характеристики пучка дифракционно ограниченного источника, в частности его беспрецедентно высокая яркость и пространственная когерентность, накладывают жесткие требования к радиационной и термической стабильности всех оптических элементов на экспериментальных станциях. Преломляющие линзы из металлического бериллия (CRL) [1] традиционно выступают в качестве базового инструментария для подготовки, коллимации и фокусировки жесткого рентгеновского излучения на современных источниках синхротронного излучения [2].

В МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс» БФУ им. И. Канта разработана и используется сквозная технология проектирования, аттестации и изготовления бериллиевой преломляющей оптики для работы в широком энергетическом диапазоне [3]. Экспериментальные станции первой очереди ЦКП «СКИФ», включая станцию «Микрофокус» (1-1), «Структурная диагностика» (1-2) и

«Быстропротекающие процессы» (1-3), будут штатно оснащены специализированными комплектами бериллиевых линзовых сборок для обеспечения линейной и двумерной фокусировки, а также коллимации излучения.

Для субмикронной фокусировки были созданы параболические короткофокусные линзы с радиусом кривизны  $R = 50$  мкм, в которых минимизация потерь интенсивности излучения достигается за счет предельного уменьшения толщины центральной части линзы (перешейка). Для решения задач транспорта синхротронного пучка в условиях экстремальных тепловых нагрузок разработаны длиннофокусные оптические элементы с рабочей апертурой более 1 мм по вертикали и более 10 мм по горизонтали. В работе представлены результаты комплексных исследований оптических характеристик изготовленных бериллиевых линз с использованием лабораторных методов диагностики.

1. A. Snigirev, I. Snigireva, B. Lengeler, V. Kohn, Nature 384 (6604) (1996) 49.
2. T. Roth, L. Alianelli, D. Lengeler, A. Snigirev, F. Seiboth, MRS Bulletin 42 (6) (2017) 430.
3. A. Narikovich, I. Lyatun, D. Zverev, I. Panormov et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 17 (6) (2023) 1258.

# Рентгеновская рефлекто-интерферометрия на основе преломляющих рентгеновских линз

С. Лятун<sup>1</sup>, И.Лятун<sup>1</sup>, Д.Зверев<sup>1</sup>, И. Снигирева<sup>2</sup>, А.Снигирев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Международным научно-исследовательский центр

“Когерентная рентгеновская оптика для установок Мегасайенс”,

Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта, 236041 Калининград, Россия

<sup>2</sup> ESRF, Европейский Центр Синхротронного Излучения, Гренобль, Франция

В работе продемонстрированы возможности метода рентгеновской рефлекто-интерферометрии (РРИ) на основе составных преломляющих линз (СПЛ). Физическая основа метода - зондирование исследуемой структуры сходящимся когерентным рентгеновским пучком, формируемым составными преломляющими линзами [1, 2]. Сфокусированный пучок содержит в себе непрерывный диапазон углов падения и отражаясь от структуры образца формирует двумерное распределение интенсивности, содержащее интерференционные полосы (осцилляции Киссига) [3]. Данный подход расширяет возможности классического метода рентгеновской рефлектометрии благодаря одновременной регистрации двумерного (2D) интерференционного распределения интенсивности без необходимости углового сканирования [4]. Анализ полос позволяет определять толщины исследуемых слоев и регистрировать их изменения.

Метод РРИ обладает ключевыми достоинствами по сравнению со стандартной схемой  $\theta$ -2 $\theta$  сканирования [2]:

- **отсутствие сканирования:** угловая характеристика отражения от структуры фиксируется в рамках одной двумерной интерференционной картины, которая определяется числовой апертурой оптики. Такой подход исключает необходимость сканирования образцом и/или детектором;

- **субмикронное пространственное разрешение:** использование СПЛ с высокой числовой апертурой позволяет локализовать сфокусированный пучок на поверхности образца в пределах до ~100 нанометров;

- **высокое временное разрешение:** применение современных источников синхротронного излучения (СИ) в сочетании с высокочувствительными 2D-детекторами позволяет сократить время экспозиции до единиц миллисекунд. Это открывает перспективы для экспресс-анализа быстропотекающих процессов и проведения экспериментов *in situ*.

Возможности метода РРИ были экспериментально продемонстрированы на источнике синхротронного излучения в широком энергетическом диапазоне от 10 до 25 кэВ. В качестве исследуемых образцов были выбраны тестовые структуры - свободновисящие мембраны нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) различной толщины (от 200 до 1000 нм). В результате проведенных экспериментов была получена и проанализирована серия интерференционных картин [2,5].

Метод РРИ открывает широкие перспективы для экспресс-анализа тонкопленочных и многослойных систем с использованием когерентного синхротронного излучения [2]. Использование комбинаций и объединения 2D и 1D преломляющей оптики позволяет существенно расширить и оптимизировать метод РРИ для решения различных экспериментальных задач, включая возможность управления пространственным разрешением и плотностью потока излучения при выполнении исследований тонкопленочных структур. Благодаря фокусирующим свойствам составных преломляющих линз открываются новые перспективы исследований как в области физики твердого тела, так и в области материаловедения и биологических приложений, а также для проведения промышленных исследований с принципиально новым пространственным и временным разрешением.

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler. *Nature*, (1996), 384, 49.
2. S. Lyatun, D. Zverev, P. Ershov, I. Lyatun, O. Konovalov, I. Snigireva, A. Snigirev. *Journal of Synchrotron Radiation*, (2019), 26, 1599–1606.
3. H. Kiessig. *Annalen der Physik*, (1931), 402, 769–788.
4. M. Krumrey, L. Cibik, A. Fischer, A. Gottwald, U. Kroth, F. Scholze. *PTB-Mitteilungen*, (2014), 124, 35.
5. Lyatun, S., Lyatun, I., Zverev, D., Konovalov, O., Snigireva, I., & Snigirev, A. (2020). In *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XV* (Vol. 11491, pp. 57-65). SPIE.

# Кремниевая решетка с периодом 1,2 $\mu\text{m}$ и малым углом блеска: изготовление и характеристика

Д.В. Мохов<sup>1,2,3</sup>, Л.И. Горай<sup>1,2,3</sup>, Т.Н. Березовская<sup>1</sup>, К.Ю. Шубина<sup>1</sup>, Н.А. Костромин<sup>1,2</sup>, Е.В. Пирогов<sup>1</sup>,  
Н.Д. Прасолов<sup>4</sup>, А.Д. Буравлев<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 19702, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Институт аналитического приборостроения РАН, 198095, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Для применения в рентгеновском диапазоне спектра (от жесткого рентгена до экстремального ультрафиолета) наиболее подходят решётки с асимметричным треугольным профилем штриха. Отражательные решётки имеют хорошую дисперсию, высокое разрешение и максимальную дифракционную эффективность  $\eta(n)$  в порядке спектра  $n$  при заданных углах падения и длинах волн излучения. Изготавливаемая Si решётка предназначена для работы в «нежном рентгене» в схеме классической или конической дифракции в определенном порядке и, следовательно, должна иметь соответствующую глубину штрихов (угол блеска).

Метод жидкостного травления Si подложек используют для изготовления дифракционных решёток с несимметричным профилем штрихов, предназначенных для ультрафиолетового [1], экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты применения для получения решётки с периодом 1,2 мкм и малым углом блеска ( $\alpha \leq 1,8^\circ$ ) ранее разработанного нами процесса изготовления среднечастотных решёток с углом блеска  $\sim 4^\circ$  [4] и оптимизированного в части сглаживания профиля, в том числе для высокочастотных решеток [5].

Кремниевая дифракционная решётка с периодом 1,2  $\mu\text{m}$  была изготовлена на пластине Si(111)1,8° с использованием лазерной литографии и анизотропного жидкостного травления. В процессе изготовления параметры решётки исследовали с помощью растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Процесс изготовления Si решётки треугольного профиля состоит из четырех основных стадий: (1) получение рисунка защитной маски для травления штрихов; (2) анизотропное травление штрихов в растворе КОН; (3) травление для сглаживания профиля решетки и полирования поверхности отражающих граней; (4) нанесение отражающего покрытия.

На рис.1 показаны РЭМ изображения поверхности решётки с нанесенной маской фоторезиста (PR-маской) (рис.1а) и Cr-маской после взрыва (рис.1б). Как можно видеть на рис. 1а, на краях линий PR-маски наблюдается большая волнистость, которую удалось уменьшить обработкой кислородной плазмой. На краях линий Cr-маски также наблюдается наследуемая от PR-маски волнистость, но менее выраженная (рис. 1б). Травление в КОН выполнено

в два шага для достижения оптимальной глубины травления (рис.2а). После удаления Cr-маски в цериевом травителе решётку обработали в сглаживающем-полирующем травителе для удаления Si-выступов и уменьшения шероховатости отражающих граней (рис.2а).

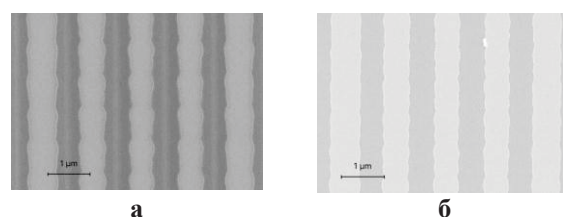


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности, 50К: а) PR-маска (PR полосы темные); б) Cr-маска (Cr полосы светлые).

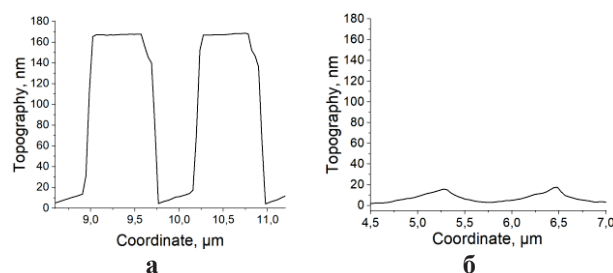


Рис. 2. АСМ профили после травления в: а) КОН; б) сглаживающем-полирующем травителе.

Согласно АСМ измерениям, изготовленная решетка размером 36x36 мм<sup>2</sup> имеет следующие параметры: угол блеска 1,0°, глубина штриха  $\sim 13$  нм, шероховатость 0,84 нм (1x1 мкм<sup>2</sup>), 1,61 нм (20 мкм), значения которых позволяют ожидать высокую дифракционную эффективность в определенном порядке в диапазоне нежного рентгена.

1. B. Sheng, X. Xu, Y. Liu, Y. Hong, H. Zhou, T. Huo, S. Fu, *Opt Lett.*, 2009, 34(8), 1147–1149.
2. A.E. Franke, M.L. Schattenburg, E.M. Gullikson, J. Cottam, S.M. Kahn, A. Rasmussen. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1997, 15, 2940–2945.
3. D.L. Voronov, E.H. Anderson, R. Cambie, S. Cabrini, S.D. Dhuey, L.I. Goray, E.M. Gullikson, F. Salmassi, T. Warwick, V.V. Yashchuk, and H.A. Padmore. *Opt.Express.*, 2011, 19(7), 6320.
4. Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, В.А. Шаров, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков. *ЖТФ*, 2021, т. 91, 10, 1538–1547.
5. Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.В. Нащекин, В.А. Шаров, Л.И. Горай. *ЖТФ*, 2022, т.92(8), 1192–1198.

# Изучение изменений поверхности МДО-покрытий, модифицированных УПТФЭ-Forum, в процессе трибологических испытаний

А.А. Хад<sup>1,2</sup>, Т.И. Муравьева<sup>2</sup>, П.О. Буковский<sup>2</sup>, О.О. Щербакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Ярославское шоссе, д. 26

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Алюминиевые сплавы являются ключевыми конструкционными материалами в авиакосмической, автомобильной и судостроительной отраслях [1] благодаря высокой удельной прочности и низкой плотности. Однако ограниченная поверхностная твердость и низкая стойкость к коррозии и абразивному износу сдерживают их применение в ответственных узлах трения и агрессивных средах. Эффективным методом решения этой проблемы является микро-дуговое оксидирование (МДО), позволяющее формировать на поверхности алюминиевых сплавов твердые, толстые и химически стойкие оксидно-керамические слои.

Актуальность современных исследований в области МДО связана с необходимостью целенаправленного управления структурой покрытий и придания им специальных функциональных свойств. Модификация состава электролитов (в том числе введение наноразмерных добавок и дисперсных частиц) [2, 3] и оптимизация электрических режимов позволяют получать керамические покрытия с улучшенными трибологическими, теплозащитными и антикоррозионными характеристиками. Одним из таких модификаторов является УПТФЭ-Forum, который представляет собой высокоэффективный твердый смазочный материал, обладающий уникально низким коэффициентом трения и антиадгезионными свойствами.

Целью данной работы являлось исследование изменения морфологии поверхности керамических МДО-покрытий модифицированных УПТФЭ-Forum в условиях фрикционного взаимодействия.

В работе исследовались образцы марочного алюминиевого сплава В95 на поверхность которых методом МДО были нанесены керамические покрытия с различной концентрацией антифрикционного модификатора (0,5, 1 и 6 г/л).

Эксперимент на трение и износ проводился на трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments Inc., США) по стандартной методике в соответствии с ASTM G99-23 по схеме контакта шар – диск.

Структура образцов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 650 (FEI, США), оснащенном аналитическим оборудованием EDAX, в том числе энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором (EDS), при ускоряющем напряжении 20 кВ kV. Поскольку изучаемые керамические МДО-покрытия являются диэлектриками, то при работе был выбран специальный низковакуумный режим исследования. В этом режиме в качестве рабочей среды использовался

разреженный водяной пар при остаточном давлении 15–20 Па. Поверхность образцов с МДО-покрытиями изучали как в исходном состоянии, так и после трибологических испытаний.

Для всех образцов были получены зависимости коэффициента трения от времени испытания. Значения коэффициента трения находятся в диапазоне от 0,4 до 0,65, при этом самое низкое было у образца модифицированного 0,5 г/л УПТФЭ-Forum.

На рис.1 показаны СЭМ-изображения поверхности МДО-покрытия до и после трибологических исследований.

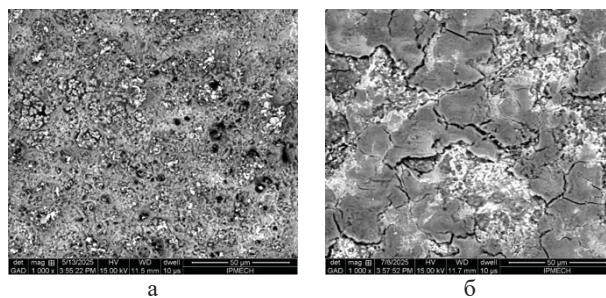


**Рис. 1.** СЭМ-изображения образца, модифицированного 0,5 г/л: а - исходная поверхность; б - поверхность после трения.

На СЭМ-изображениях после трения (рис. 1б) наблюдаются характерные признаки разрушения (локальные трещины). При этом отмечается общее сглаживание поверхности по сравнению с исходным состоянием (рис. 1а), что может быть обусловлено абразивным износом и/или деформацией в процессе трения.

Таким образом, введение модификатора в электролит при формировании МДО-покрытий приводит к появлению в покрытиях антифрикционной добавки и снижению коэффициента трения.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024)

1. Z. Fan, H. Lu, P. Liu, et al. *Ceramics International*, (2024), 50, 44993–45005.
2. L. Ren, T. Wang, Z. Chen, et al. *Metals*, (2019), 9, 170.
3. L. Liu, L. Wang, J. Pan, et al. *Surface and Coatings Technology*, (2022), 441, 128592.

## Программный комплекс cdi-kit для обработки данных когерентной дифракционной визуализации

А.В. Мурзина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, площадь академика Курчатова, д. 1

Когерентная дифракционная визуализация (CDI) – безлинзовый метод рентгеновской микроскопии, основу которого составляет численное итерационное решение фазовой проблемы по зарегистрированной дифракционной картине. CDI позволяет восстанавливать структуру объекта за счёт реконструкции комплексного поля рассеянного объектом излучения, с пространственным разрешением, теоретически ограниченным только длиной волны. Благодаря этим свойствам когерентная безлинзовая визуализация за последние десятилетия получила широкое применение в исследованиях микро- и нанообъектов в биологии, материаловедении и других областях [1].

В связи с развитием когерентных ярких источников рентгеновского излучения, в частности, с появлением источников синхротронного излучения четвёртого поколения и лазеров на свободных электронах (СКИФ, СИЛА и др.), метод полнопольной когерентной безлинзовой визуализации представляет особый интерес [2]. Для проектируемых экспериментальных станций с реализацией метода CDI необходимы программные средства, обеспечивающие обработку данных, включая чтение и предобработку исходных измерений, реализацию различных итерационных алгоритмов восстановления фазы, а также вычисление специализированных метрик качества реконструкции, позволяющих контролировать и оптимизировать стратегию восстановления комплексного поля объекта. На данный момент, на

большинстве экспериментальных станций CDI эти шаги реализованы набором разрозненных программ, что затрудняет воспроизводимость кода для различных экспериментов, его масштабируемость и сравнительный анализ работы различных алгоритмов реконструкции фазы.

В данной работе представлена библиотека cdi-kit, разработанная на языке программирования Python, которая позволяет реализовать полный цикл обработки данных CDI, включая восстановление изображений методами реконструкции фазы. Описана архитектура библиотеки, а также продемонстрированы основные инструменты и примеры типичных сценариев использования. Обсуждаются перспективы расширения программного пакета за счёт включения актуальных подходов и алгоритмов метода восстановления фазы и интеграции с существующими открытыми пакетами [3] для родственных когерентных методов.

1. J. Miao. Nature (2025), 637, 281–295.
2. Я. В. Ракиун, Ю. В. Хомяков, Е. И. Глушков, А. С. Гоголев, М. В. Горбачев, А. В. Дарьин, Ф. А. Дарьин, И. П. Долбня, С. В. Раценко, В. А. Чернов, Н. И. Чхало, М. Р. Шарафутдинов. Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов (2025), 336, 229–251.
3. B. Enders, P. Thibault. Proc. R. Soc. A (2016), 472, 20160640.

# Особенности роста и структура эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$

А.М. Назаров<sup>1</sup>, Р.М. Садыгов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,  
AZ1073, Баку, пр.Г.Джавида, 131

<sup>2</sup>Азербайджанский технический университет Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,  
AZ1073, Баку, пр.Г.Джавида, 25

Полуманитные полупроводники являются новым классом материалов, сочетающих в себе свойства обычных и магнитных полупроводников. К полуманитным полупроводникам относят полупроводниковые кристаллы, легированные s, d-ионами переходных металлов, либо твердые растворы, содержащие магнитные компоненты. В этих материалах в магнитном поле необычно изменяется энергетический спектр носителей заряда, благодаря чему появляется возможность управления свойствами структур на их основе с помощью магнитного поля и температуры.

В последние годы широкое распространение получили эпитаксиальные пленки этих материалов. Создание различных приборов и многоэлементных матриц на основе указанных пленок и их успешного применения в современной оптоэлектронике, требует выращивания пленок со стабильными свойствами. В связи с этим необходимо разработка технологии получения эпитаксиальных пленок с заданными структурными и электрофизическими параметрами. Известно, что приборы создаются в тонких приповерхностных слоях кристаллов. Поэтому структура и морфология поверхности кристаллов играет важную роль при изготовлении различных приборов.

В настоящей работе рассматривается исследование особенности синтеза и роста, структуры эпитаксиальных пленок  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$  ( $x=0.1$ ) толщиной 0.5 мкм, выращенных на стеклянных подложках методом конденсации молекулярных пучков в вакууме  $10^{-4}$  Па.

В качестве источника использовали синтезированные твердые растворы  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$  ( $x=0.1$ ). Испарителем исходных материалов служила ячейка Кнудсена из особо чистого графита.

Для отработки технологии эпитаксиального роста, получения качественных монокристаллических слоев и их характеристики были проведены следующие измерения: структурное совершенство оценивалось с помощью рентгеновского дифрактометра (XRD) (рис.1), состав и размеры кристалликов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис.2).

Кристаллические структуры и состав полученных пленок исследовали с помощью рентгеновской установки Bruker XRD D8 Advance с использованием фильтрованного  $\text{CuK}\alpha$ -излучения и полевого эмиссионного сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7600F. Толщину пленок измеряли с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

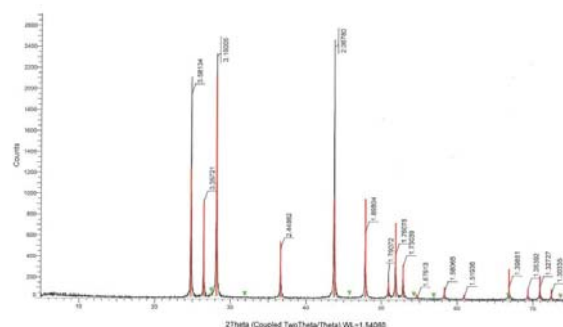


Рис. 1. Рентгенодифракционный снимок твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$  ( $x=0.1$ ).

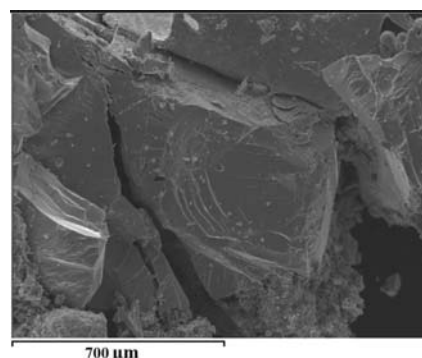


Рис. 2. СЭМ изображения твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$  ( $x=0.1$ ).

Особенности роста и структуры пленок исследовались рентгенодифракционным методом. Показано, что при температурах подложки  $T=273\div473$  К растут поликристаллические пленки с кубической структурой. С повышением температуры выше 473 К начинается эпитаксиальный рост пленок и на рентгенографических снимках пленок, полученных при 673 К, наблюдаются лишь отражения типа (111).

Для создания различных стабильных структур необходимо получение пленок с чистой, гладкой поверхностью без включения второй фазы. С этой целью, в процессе роста пленок, был использован дополнительный компенсирующий источник серы (S). Регулируя температуры компенсирующего источника S удалось получить структурно совершенные пленки  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$  ( $x=0.1$ ) с n- и p-типом проводимости.

## Исследования струйных кластеризованных мишеней в составе лазерно-плазменного источника излучения.

А. Н. Нечай, В. Е. Гусева, Н. И. Чхало

*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7,  
д. Афонино, г. Нижний Новгород, 603087  
nechay@ipmras.ru*

В настоящее время в ИФМ РАН проводится разработка различных лазерно-плазменных источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения для лабораторных целей. Ранее в качестве мишени для лазерно-плазменных источников излучения использовалась газовая струя. Интенсивность излучения газоструйных источников увеличивается с ростом концентрации частиц в газовой струе. Повышение концентрации частиц в зоне образования лазерной искры может быть достигнуто понижением температуры, что приводит к конденсации (кластеризации) вещества газоструйной мишени. Использование кластеризованных мишеней не требует увеличения скоростей откачки и может быть применено в существующих источниках излучения.

Для разработки кластерных мишеней проводился ряд экспериментов, включающих в себя изучение параметров в кластеризованных струях и эмиссию излучения из лазерной плазмы, образованной на кластерных струях. Так проводились исследования концентрации частиц в кластерной мишени, образуемой при истечении газа из различных сверхзвуковых конических сопел.

В проводимых экспериментах для возбуждения кластерной мишени использовался импульсный Nd:YAG лазер (длина волны 1064 нм, длительность

лазерного импульса 5,2 нс, энергия импульса 0.8 Дж). Кластерная мишень формировалась при истечении охлажденных струй газа в вакуумную камеру из различных конических сверхзвуковых сопел. Откачка производилась группой турбомолекулярных насосов. Исследовались эмиссионный спектр лазерной плазмы с использованием спектрометра на базе многослойных рентгеновских зеркал и интенсивность излучения на фиксированной длине волны 11,2 нм. Исследовались кластерные мишени формируемые на различных газах.

В процессе проведения исследований были получены следующие результаты:

1. Кластеризация газоструйной мишени существенно меняет распределение плотности струи за срезом сопла.

2. При кластеризации малоплотной мишени получен существенный рост интенсивности ЭУФ излучения, излучаемого лазерной плазмой.

3. При кластеризации высокоплотной мишени получен незначительный рост интенсивности ЭУФ излучения, излучаемого лазерной плазмой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-62-00068.

# Изучение фертильности спонтанных гибридов пшеницы × *Ae. Cylindrica* методом микрофокусной рентгенографии

Ю.В. Орлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский центр карантина растений,  
40150, Московская область, м.о. Раменский, пгт. Быково, ул. Пограничная, д. 32

*Aegilops cylindrica* Host. (эгилопс цилиндрический) – тетраплоидный сорный злак (геномная формула CD), широко распространённый в Северо-Кавказском регионе [1]. Этот вид является ближайшим диким сородичем пшеницы и представляет собой ценный источник генов устойчивости к абиотическим стрессам, в том числе к морозам и засухе [2]. В последние годы на полях Северного Кавказа отмечается массовое появление спонтанных межродовых гибридов пшеницы и эгилопса, что создаёт серьёзные проблемы для видовой идентификации и может способствовать неконтролируемому дрейфу генов в агроценозах.

В ходе полевых исследований нами были зафиксированы спонтанные гибридные растения, морфологически занимающие промежуточное положение между пшеницей и *Ae. cylindrica*. Гибриды отличались повышенной высотой, более крупным, часто окрашенным и рыхлым колосом с деревянистыми чешуями, а также низкой фертильностью. Для экспресс-оценки наличия выполненных зерновок в колосках гибридов F<sub>1</sub> мы применили метод микрофокусной рентгенографии – неинвазивный высокочувствительный подход, позволяющий визуализировать внутреннюю структуру колосков без их разрушения.

Предварительная рентгенографическая оценка показала наличие сформированных зерновок в колосках исследованных гибридных растений, что свидетельствует об их частичной фертильности даже в первом поколении. Это противоречит классическим представлениям о полной стерильности F<sub>1</sub> у отдалённых гибридов и указывает на возможное наличие генетических факторов, способствующих завязыванию семян. Учитывая, что гибриды F<sub>1</sub> цветут открыто и ветроопыляются, даже единичные зерна (в среднем 1 на 10–15 колосьев) могут давать начало последующим поколениям, у которых фертильность

возрастает. В наших полевых популяциях идентифицированы гибриды разных поколений с разной степенью плодovitости, что подтверждает активный процесс интрогрессии. Массовое распространение таких форм затрудняет традиционную ботаническую диагностику и требует применения объективных инструментальных методов. Микрофокусная рентгенография зарекомендовала себя как быстрый и информативный способ скрининга фертильности гибридов, позволяющий отличать пустые колоски от выполненных без вскрытия образцов. Этот метод может быть рекомендован для мониторинга спонтанных гибридных популяций в регионах интенсивного земледелия. Наши дальнейшие исследования будут направлены на рентгеноструктурный анализ зерновок гибридов и их сравнительную характеристику с родительскими формами.

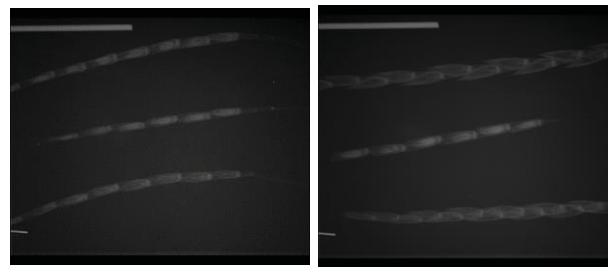


**Рис. 1.** Исследование методом микрофокусной рентгенографии образцов зрелых колосьев у *Ae. cylindrica* (слева) с зерновками и у гибридных растений (справа) зерновки присутствуют только в центральном колосе.

1. Цвелев Н.Н., Пробатова Н.С. Злаки России. – М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. – 646 с.
2. Feldman M., Levy A. A. *Aegilops* L // Wheat evolution and domestication. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – С. 213-364.

# Применение XRR и USXES для анализа тонких пленок Fe-Si

Я.А. Пешков<sup>1</sup>, К.А. Барков<sup>1</sup>, Е.И. Гайворонская<sup>1</sup>, А.В. Ситников<sup>2</sup>, С.А. Ивков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет, 394018 Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, 394026 Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14

Главным ограничением для развития магниторезистивных устройств остается отсутствие эффективного источника спин-поляризованного тока. Широко используемый аморфный сплав  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  обладает спиновой поляризацией лишь около 65% [1], а структурные дефекты в кристаллических сплавах Гейслера не позволяют достичь теоретически предсказанной полуметалличности. Перспективной альтернативой являются аморфные сплавы псевдо-Гейслера  $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ , для которых при  $x = 0.65$  достигнута спиновая поляризация около 70% [2], что значительно выше, чем у поликристаллического  $\text{Fe}_3\text{Si}$  (45±5%). В данной работе мы исследуем влияние морфологии на электронное строение тонкой пленки  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ .

Тонкая плёнка  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  была изготовлена ионно-лучевым распылением составной мишени Fe-Si при давлении в рабочей камере  $\sim 5 \times 10^{-4}$  Торр. В качестве подложки использовалась пластина монокристалла Si (100) с буферным слоем  $\text{SiO}_2$ . Слой  $\text{SiO}_2$  предназначался для дополнительной аморфизации тонкой пленки и предотвращения межфазных взаимодействий на интерфейсе пленка-подложка. Для предотвращения окисления компонентов пленки был нанесен поверхностный слой Al толщиной  $\sim 9$  нм. Кристаллическую структуру образца исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-07 ( $\text{CuK}_\alpha$ ). Атомный состав исследовался рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS). Толщина и массовая плотность определялись путём моделирования экспериментальной кривой рентгеновской рефлектометрии (XRR), полученной на дифрактометре ДРОН-8Т. Электронная структура изучалась ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопией (USXES) на установке PCM-500. Si  $L_{2,3}$  спектр позволяет получить информацию о локальной парциальной плотности состояний валентной зоны кремния.

Данные рентгеновской дифракции демонстрируют аморфное состояние тонкой пленки сплава  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ , что является необходимым условием для высокого значения спиновой поляризации на уровне Ферми. Анализ XPS данных пленки показал содержание Fe около 50.3 ат.%, что практически соответствует стехиометрическому моносилциду FeSi. Моделирование XRR кривой (рис. 1а) с помощью программы GenX позволило вычислить толщину пленки (134 нм) и массовую плотность аморфного сплава  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  ( $6.23 \text{ г/см}^3$ ). Такое значение плотности тонкой пленки близко к объёмному поликристаллическому FeSi  $\sim 6.2 \text{ г/см}^3$  [3], в то время как плотность высшего силицида  $\text{FeSi}_2$  существенно ниже  $\sim 5.1 \text{ г/см}^3$ . Это дает основание полагать, что в образце сформировалась единственная фаза аморфного FeSi.

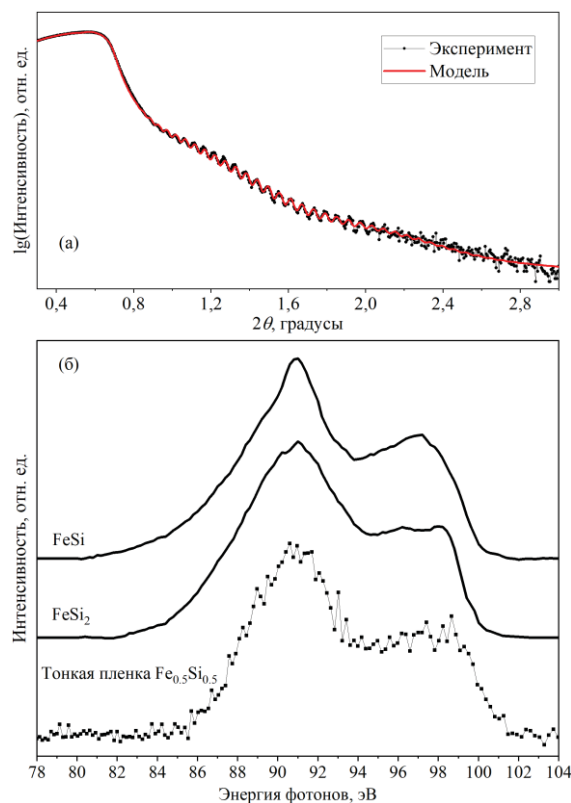


**Рис. 1.** а – XRR-кривая тонкой пленки  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  (чёрные точки – экспериментальные данные, красная линия – модельная кривая). б – экспериментальный Si  $L_{2,3}$  спектр образца и эталонные спектры соединений Fe-Si.

На рис. 1б представлен экспериментальный Si  $L_{2,3}$  тонкой пленки аморфного сплава  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  наряду с эталонными спектрами соединений FeSi и  $\text{FeSi}_2$  [4]. Спектр пленки можно разделить на две области: область основного максимума, расположенного на 88-93 эВ и относящегося к негибридизованным 3s состояниям Si, и область плеча на 94-100 эВ, простирающуюся до потолка валентной зоны. Сравнение спектров FeSi,  $\text{FeSi}_2$  и тонкой пленки демонстрирует, что аморфная структура сплава  $\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  сильно влияет на плотность состояний. Самым существенным изменением является уширение основного максимума, говорящее об уменьшении расстояния между соседними атомами Si в аморфной фазе по сравнению с кристаллическим FeSi.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-29-20055, <https://rscf.ru/project/26-29-20055>.

1. S.X. Huang, T.Y. Chen, and C.L. Chien. Appl. Phys. Lett., 2008, 92, 242509.
2. J. Karel, et al. Phys. Rev. Materials, 2018, 2, 064411.
3. Y.V. Kudryavtsev, et al. J. Appl. Phys., 2001, 90, 2903.
4. J.J. Jia, et al. Phys. Rev. B, 1992, 46, 9446.

## Детектор с большим полем зрения для синхротронной визуализации

Е.С.Коваленко<sup>1</sup>, А.А.Калоян<sup>1</sup>, К.М.Подурец<sup>1</sup>, В.В.Серов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

<sup>2</sup> ООО «Оптоинструмент» 108841, г. Москва, г. Троицк, Академическая площадь, д. 4

В настоящее время происходит быстрое развитие электронных светочувствительных сенсоров типа ПЗС или КМОП. В большинстве известных детекторов используются сенсоры с горизонтальной размерностью 4–8 К [1], однако не так давно появились сенсоры с размерностью 14 К. Цель данной работы – разработка детектора для синхротронной визуализации на основе большого сенсора (14 К) и получение наилучшего соотношения разрешения и поля зрения при минимальных потерях светосилы.

Детектор состоит из светонепроницаемого корпуса, сцинтиллятора LuAG толщиной 300 мкм, зеркала, поворачивающего световой поток в сторону от пучка излучения, светоприемной камеры и механических устройств, позволяющих дистанционно юстировать детектор. Основным элементом детектора является специализированный аксиально-симметричный макрообъектив. Увеличение объектива равно 0.97. Компонировка объектива представляет собой 2 группы линз, где фронтальные компоненты, в основном, создают необходимую оптическую силу и поле зрения, а компоненты перед КМОП матрицей обеспечивают исправление полевых аберраций системы. Поле зрения детектора составляет 54 мм по горизонтали, размер пикселя равен 3.8 мкм.

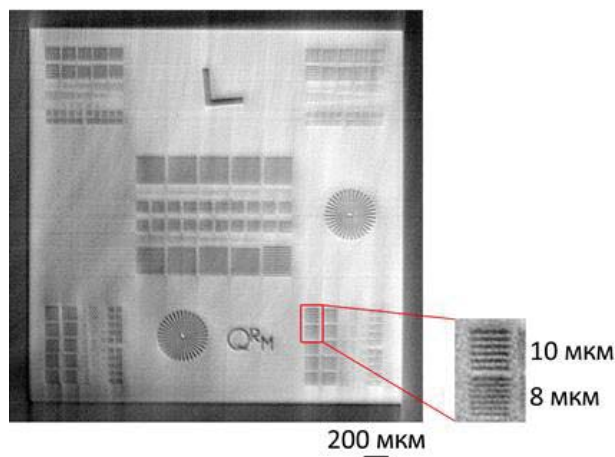


**Рис. 1.** Томографическое изображение тест-объекта QRM со штрихами шириной от 1 до 10 мкм

Испытания детектора проводили при энергии излучения 50 кэВ с помощью штриховых тест-объектов QRM (рис. 1). [2]. Выполнена серия томо-

графических экспериментов при расположении тест-объектов в центре и на различном удалении от оси вращения вплоть до периферии поля зрения. В центральной области поля зрения детектора размером до  $\approx 30$  мм пространственное разрешение составило 8 мкм (рис. 2а, б). При выходе габаритов объекта за пределы этой области пространственное разрешение не хуже 10 мкм (рис. 2в, г), но требуется введение поправок на дисторсию оптической системы. Методика введения поправок разработана на основе математической модели объектива.

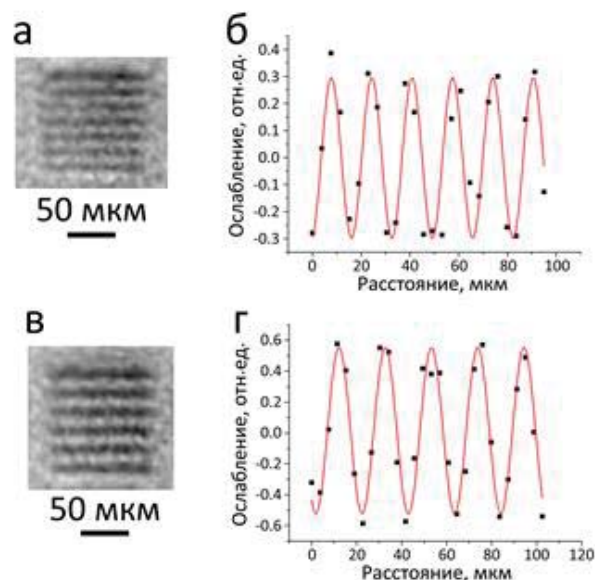


**Рис. 2.** Изображения штриховых картин с шириной штрихов 8 мкм (а) и 10 мкм (в), и соответствующие профили ослабления (б, г).

Детектор является прототипом прибора для использования на перспективном источнике синхротронного излучения СИЛА. Работа профинансирована в рамках программы создания перспективного источника в г. Протвино, Московская область (СИЛА).

1. P.-A. Douissard, A. Cecilia, X. Rochet et al., *Journal of Instrumentation*, V. 7, 2012 P09016.
2. O. Langner, M. Karolczak, G. Rattmann, W.A. Kalender. *IFMBE Proceedings* 25/ 2009. p. 428.

# Исследование особенностей фазового состава и электронной структуры ионно-лучевых пленок Mo-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии

И.В. Польшин<sup>1</sup>, Е.И. Гайворонская<sup>1</sup>, М.И. Гайворонская<sup>1</sup>, Е.С. Керсновский<sup>1</sup>, А.В. Ситников<sup>2</sup>, Г.П. Потуданский<sup>1,3</sup>, К.А. Барков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Университетская пл.1, 394018

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Московский проспект 14, 394026

<sup>3</sup> АО «РТ Лабс», г. Москва, пр. Вернадского, 41, 119415

Тонкие пленки Mo-Si являются важным компонентом при создании сверхпроводниковых детекторов дальнего ИК излучения [1,2]. Особенности данного композита предполагают формирование аморфных структур Mo-Si для достижения наибольшей эффективности детекторов. Основная проблема заключается в невосприимчивости большинства наиболее распространенных методов к подобным структурам. В рамках данной работы предлагается использование метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) для анализа фазового состава пленок Mo-Si.

Пленки Mo-Si были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени [3] которая представляет собой пластину молибдена с кремневыми навесками с постоянно уменьшающимся зазором между ними. Данная конфигурация позволила получить пленки Mo-Si с содержанием Mo от ~45 до 75 ат.%. Далее методом УМРЭС определялся фазовый состав пленок.

Метод УМРЭС реализуется на уникальной научной установке «Рентгеновский спектрометр-монохроматор РСМ-500». Данный метод позволяет узнать распределение плотности электронных состояний в валентной зоне. Помимо этого, изменяя величину ускоряющего напряжения, можно регулировать глубину анализа. На данный момент установка настроена на регистрацию эмиссионных Si  $L_{2,3}$  спектров, поэтому наибольший интерес в рамках настоящей работы представляют силициды молибдена.

На рисунке 1 представлены эмиссионные Si  $L_{2,3}$  спектры пленок Mo-Si. По форме валентной зоны пленки с содержанием Mo ~45 ат.% можно сказать о преобладании в фазовом составе высших силицидов. На это указывает широкий главный максимум (90 эВ) и высокая интенсивность вблизи потолка валентной зоны (94–99 эВ). Компьютерное моделирование подтвердило наличие в пленке ~55% фазы  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ , и ~25% фазы  $\text{MoSi}_2$ . Помимо этого, также обнаружено формирование ~15% фазы низшего силицида  $\text{Mo}_3\text{Si}$  и ~5%  $\text{SiO}_2$ .

При содержании Mo в пленке ~75 ат.% форма валентной зоны говорит о формировании в пленке низших силицидов, на что указывает узкий главный максимум, а также низкая интенсивность вблизи потолка валентной зоны. По результатам компью-

терного моделирования было установлено, что в пленке формируется 100%  $\text{Mo}_3\text{Si}$ .

Таким образом, методом УМРЭС обнаружено формирование в пленке Mo-Si фазы низшего силицида  $\text{Mo}_3\text{Si}$ .

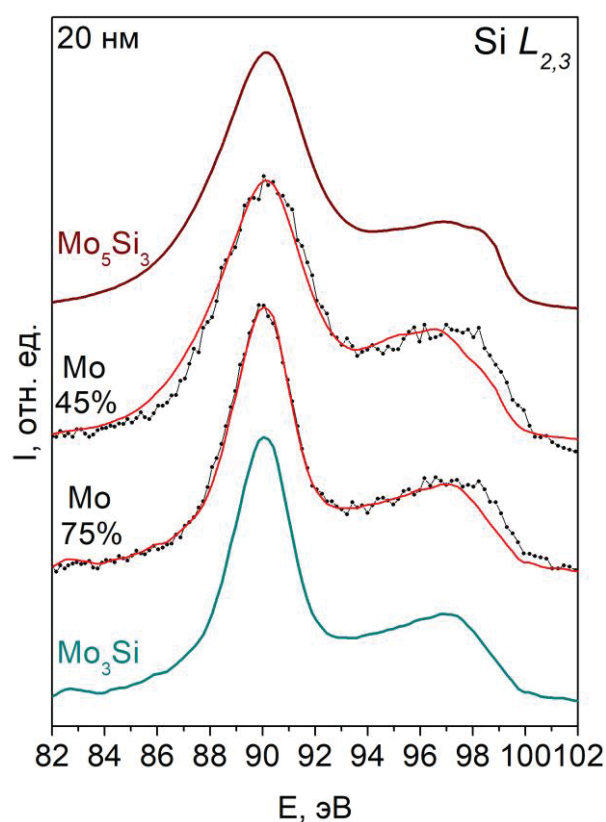


Рис. 1. Эмиссионные Si  $L_{2,3}$  спектры пленок Mo-Si с содержанием Mo ~45 и 75 ат.%, полученные при глубине анализа ~20 нм; а также эталонов  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ , рассчитанного в рамках теории функционала плотности и  $\text{Mo}_3\text{Si}$  [4].

1. Banerjee A. et al. Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires //Superconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 30. – №. 8. – С. 084010.
2. Grotowski S. et al. Optimizing the growth conditions of superconducting MoSi thin films for single photon detection //Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 2438.
3. Gridnev S. A. et al. Nonlinear phenomena in nano- and microheterogeneous systems //Moscow: Binom. – 2012.
4. Miyata N. et al. Buried Interfaces of Heat-Loaded Mo/Si Multilayers Studied by Soft-X-Ray Emission Spectroscopy //Surface Review and Letters. – 2002. – Т. 9. – №. 02. – С. 663-667.

# Исследование методом XAFS пленки $\text{Si}_3\text{N}_4$ после Zn/O имплантации

Е.В. Храмов<sup>1</sup>, В.В. Привезенцев<sup>2</sup>, В.С. Куликаускас<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - НИИСИ, 117218 Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Нанокластеры (НК), внедренные в прозрачную диэлектрическую матрицу и обладающие интересными оптическими свойствами, могут рассматриваться как перспективные материалы для оптоэлектронных устройств. В частности, НК оксида цинка ZnO смогут найти применение в оптоэлектронике, [1], поскольку оксид цинка является прямозонным материалом с шириной запрещенной зоны 3,37 эВ и имеет большую энергию связи электрона и дырки в экситоне 60 мэВ.

Здесь мы представляем результаты исследования методом XAFS-спектроскопии пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , последовательно имплантированной цинком и кислородом и подвергнутой термообработке в Ar. Пленки нитрида кремния толщиной 120 нм были созданы на поверхности монокристаллического Cz n-Si (111) методом PECVD. Они имплантировались ионами  $^{64}\text{Zn}^+$  с дозой  $5 \times 10^{16}/\text{см}^2$  и энергией 60 кэВ, а затем ионами  $^{16}\text{O}^+$  с энергией 20 эВ и дозой  $7 \times 10^{16}/\text{см}^2$ . Во время имплантации плотность тока ионного пучка составляла менее 0,5 мкА/см<sup>2</sup>. После имплантации пластины подвергались изохронной термообработке в течение 1 часа в атмосфере Ar при температурах от 400 до 800°C с шагом 100°C на каждом шаге.

Спектры XAFS на К-крае цинка для образцов после Zn/O имплантации и после отжига при 700°C измерялись в флуоресцентном режиме на станции «СТМ» Курчатовского источника синхротронного излучения [2].

По данным XANES, в обоих образцах цинк находится преимущественно в фазе металла. Спектры XANES для обоих образцов (рис.1 А) сходны со спектром металлического цинка, но искажены, что может быть обусловлено разупорядочением локальной структуры цинка (НК, твердый раствор цинка в кремнии) или небольшой долей фаз с другой координацией Zn.

Данные EXAFS и результаты моделирования с помощью программного пакета IFEFFIT [3] представлены на рис.1 В и в таблице 1. Для исходного образца пики от нескольких координационных сфер значительно уширены и сливаются в один широкий пик в диапазоне 1 – 3 Å. Модель из трех путей рассеяния фотоэлектронов (Zn-O и два Zn-Zn) удовлетворительно описывает данные EXAFS, что согласуется с данными XANES: цинк находится в исходном образце преимущественно в металлических НК с тетрагональной структурой, представляющих собой чистый Zn или твердый раствор Zn-Si. Небольшая часть цинка находится в составе фазы, в которой цинк координирован кислородом: в оксиде ZnO или силикате  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ .

Для образца, отожженного при 700°C, на рис.1 В видны 2 отчетливых пика, соответствующих координации Zn-O и Zn-Zn: происходит упорядочение локальной структуры цинка в виде двух типов – металлических и оксидных частиц. Координационное число (КЧ) как для кислорода, так и для металла при отжиге увеличивается, что, вероятно, вызвано укрупнением частиц обеих фаз в ходе отжига, но все еще значительно меньше объемных значений для металла и оксида, т.е. обе цинксодержащие фазы после отжига остаются нано-дисперсными.

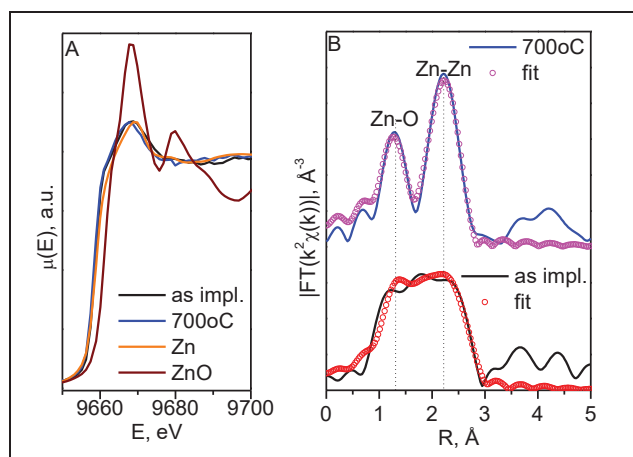


Рис.1. А) Спектры XANES для пленки нитрида кремния, имплантированной Zn/O, и после термообработки при 700°C. Здесь же приведены эталонные спектры для Zn и ZnO. Б) Данные EXAFS ( $k_w = k^2$ ,  $k = 2 - 9 \text{ Å}^{-1}$ ) для образца до и после отжига при 700°C с подгонными кривыми

Таблица 1. Результаты моделирования EXAFS на К-крае Zn. Весовой коэффициент  $k^2$ , диапазон Фурье-преобразования  $k = 2 - 9 \text{ Å}^{-1}$ , диапазон межатомных расстояний  $R = 1.0 - 2.8 \text{ Å}$ ,  $R_f$  - фактор расходимости при моделировании

| Образец                   | Путь рассеяния | КЧ            | R, Å            |
|---------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| as impl.<br>$R_f = 1.0\%$ | Zn-O           | $0.9 \pm 0.2$ | $1.93 \pm 0.06$ |
|                           | Zn-Zn          | $2.6 \pm 0.5$ | $2.56 \pm 0.04$ |
|                           | Zn-Zn          | $2.6 \pm 0.5$ | $2.75 \pm 0.05$ |
| 700°C<br>$R_f = 1.4\%$    | Zn-O           | $0.5 \pm 0.1$ | $1.83 \pm 0.06$ |
|                           | Zn-Zn          | $6.6 \pm 3.0$ | $2.62 \pm 0.03$ |

1. Litton C.W., Collins T.C., Reynolds D.S. Zinc Oxide Materials for Electronic and Optoelectronic Device Application, Wiley, Chichester, 2011.
2. A. Chernyshov, A. Veligzhanin, Y. Zubavichus. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 2009, 603, 95-98.
3. B. Ravel. J. Synchrotron. Rad., 2005, 12, 537-541.

# Дифракция рентгеновских лучей от упруго изогнутого кристалла, промодулированного поверхностной акустической волной

В.И. Пунегов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, Россия

На сегодняшний день опубликовано большое количество экспериментальных и теоретических работ по дифракции рентгеновских лучей в изогнутых кристаллах. Однако, в большинстве случаев теоретические расчеты кривых дифракционного отражения (КДО) не совпадают с экспериментальными измерениями. Это связано с тем, что численные расчеты выполняются с использованием одномерных уравнений дифракции, в то время как необходимо применять двумерные уравнения Такаги-Топена. Кроме того, требуется использовать пространственно ограниченные рентгеновские пучки [1].

В настоящее время кроме КДО, проводятся измерения карт распределения интенсивности рассеяния в обратном пространстве (reciprocal space maps (RSMs)). Имеется всего одна экспериментальная работа, в которой измерена карта RSM от изогнутого кристалла [2].

Совсем недавно выполнено исследование дифракции синхротронного излучения в изогнутом кристалле, промодулированном поверхностной акустической волной (ПАВ) [3]. Получены топографические изображения с дифракционными сателлитами, которые соответствуют измеренным профилям КДО в результате модуляции ПАВ.

Поскольку отсутствует теория и метод вычисления карт RSM рентгеновской дифракции от изогнутого кристалла, промодулированного ПАВ, что затрудняет проведение экспериментов, данная работа посвящена решению этой проблемы.

В работе, используя двумерные рекуррентные соотношения [4], выполнено теоретическое исследование рассеяния рентгеновских пучков на изогнутом кристалле, промодулированном ПАВ. Рассмотрена рентгеновская дифракция (300) с длиной волны 0.1 нм на изогнутом кристалле LiNbO<sub>3</sub>, промодулированном ПАВ. Толщина кристалла составляла 20 мкм. Длина ультразвуковой волны  $\Lambda=4$  мкм.

Численные расчеты RSM выполнены в логарифмическом масштабе, отношение интенсивностей между соседними линиями составляет 0.273. На рис. 1 показаны карты в обратном пространстве для разных случаев дифракции рентгеновского пучка от кристалла LiNbO<sub>3</sub>. Поперечный размер падающего рентгеновского пучка 50 мкм, что при угле дифракции 20 градусов давало засветку рентгеновским пучком поверхности кристалла 140 мкм.

На рис. 1а показана карта RSM от недеформированного кристалла. Рисунок 1б демонстрирует контуры равной интенсивности от изогнутой структуры с радиусом изгиба 5м. Угловое распределение интенсивности рассеяния от планарного кристалла,

промодулированного ПАВ, представлено на рис. 1с. Дифракция ограниченного рентгеновского пучка на изогнутом кристалле, промодулированном ПАВ, показана на рис. 1д.

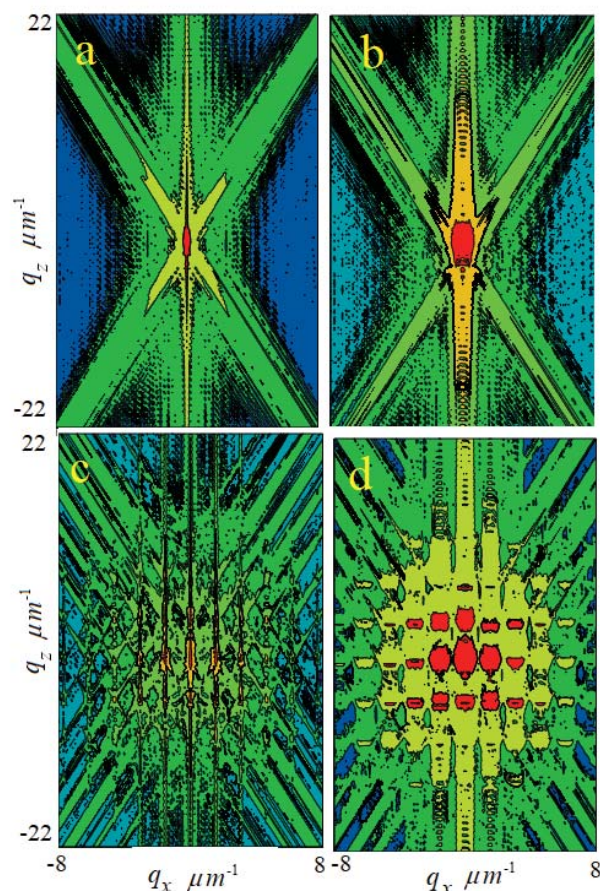


**Рис. 1.** Расчетные карты распределения интенсивности рассеяния в обратном пространстве для разных случаев дифракции рентгеновского пучка от кристалла LiNbO<sub>3</sub>. а) недеформированный кристалл; б) изогнутый кристалл; в) недеформированный кристалл, промодулированный ПАВ; д) изогнутый кристалл, промодулированный ПАВ.

1. D.M. Malkov, V. Punegov. J. Appl. Cryst., 2024, 57, 296-305.
2. A. Neels, A. Domman. NSTI-Nanotech., 2010, 2, 182-185.
3. R. Fakhrtdinov, D. Irzhak, S. Kumanyaev, K. Pundikov, D. Roshchupkin, A. Seregina. Materials Letters, 2026, 405, 139810.
4. V.I. Punegov, S.I. Kolosov. J. Appl. Cryst., 2022, 55, 320-328.

# Дифракция рентгеновского излучения на кристалле $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ , промодулированном поверхностной акустической волной

Д.В. Рошчупкин, Д.В. Иржак, Р.Р. Фахртдинов, К.С. Пундинов, С.Е. Куманяев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук

142432 Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6

Кристаллы  $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$  (CTGS) являются перспективными материалом для акустоэлектроники и акустооптики [1]. В докладе рассмотрены результаты исследования процесса распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в кристалле CTGS на станции РКФМ Курчатовского источника синхротронного излучения.

Исследования были выполнены для X- и Y-срезах кристалла CTGS. На поверхности кристаллов были сформированы структуры встречноштыревых преобразователей (ВШП) для возбуждения ПАВ с длиной волны  $\Lambda=6$  мкм. Для проведения исследований была использована схема двухкристального рентгеновского дифрактометра.

Возбуждение ПАВ приводит к синусоидальной модуляции кристаллической решетки и появлению на кривой качания дифракционных сателлитов. Если угловая расхожимость между дифракционными сателлитами на кривой качания определяется длиной волны ПАВ и значением межплоскостного расстояния, то интенсивность и количество дифракционных сателлитов зависит от амплитуды ПАВ.

Для исследования процесса дифракции была использована энергия рентгеновского излучения  $E=10.5$  кэВ, которая находится сразу после K-края поглощения Ga ( $E=10.367$  кэВ). Кривые качания акустически промодулированного кристалла были измерены при амплитудах входного сигнала на ВШП  $U=0\div 1.59$  В с шагом 0.1 В. На рис. 1 представлен пример кривых для отражения от плоскостей (100). Можно наблюдать, что с увеличением амплитуды входного сигнала на ВШП увеличивается количество дифракционных сателлитов на кривой качания. Также следует отметить, что увеличение  $U$  приводит к изменению интенсивности дифракционных сателлитов.

Также процесс дифракции был исследован для отражения от плоскостей (200). В данном случае межплоскостное расстояние уменьшается в два раза и в соответствии с этим возрастает количество наблюдаемых дифракционных сателлитов на кривые качания.

Также впервые был исследован процесс формирования полей стоячих рентгеновских волн в акустически промодулированном кристалле CTGS. Стоячие рентгеновские волны формируются в процессе интерференции падающей и дифрагированной рентгеновских волн. Для визуализации полей стоячих рентгеновских волн был использован процесс регистрации флуоресцентного выхода от атомов Ta ( $L_\alpha$ ) и Ga ( $K_\alpha$ ). Было продемонстрировано, что при возбуждении ПАВ в кристалле возникают дополни-

тельные поля стоячих рентгеновских волн, угловые положения которых соответствуют угловому положению кривых качания.

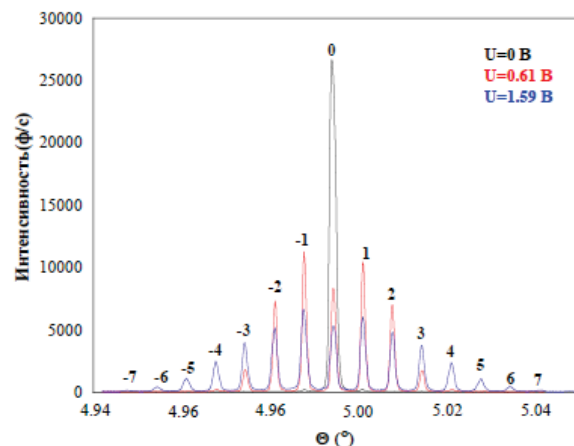


Рис. 1. Дифракция рентгеновского излучения на Y-срезе кристалла CTGS, промодулированном ПАВ с длиной волны  $\Lambda=6$  мкм. Энергия рентгеновского излучения  $E=10.5$  кэВ. Отражение от плоскостей (100).

Однако было установлено, что угловые положения полей стоячих рентгеновских волн для атомов Ta и Ga различаются, что связано с положением атомов в элементарной кристаллической ячейки. Так атомы Ta расположены в узлах элементарной кристаллической ячейки и являются базовыми структурными атомами, а атомы Ga смещены в элементарной кристаллической ячейки относительно сторон элементарной ячейки.

Таким образом в докладе представлены комплексные исследования процесса дифракции рентгеновского излучения на акустически промодулированном кристалле CTGS на основе измерения кривых качания и исследования процесса формирования полей стоячих рентгеновских волн.

Исследования были выполнены при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 25-72-202016).

1. D. Roshchupkin, L. Ortega, O. Plotitsyna, A. Erko, I. Zizak, D. Irzhak, R. Fahrtdinov, O. Buzanov, Appl Phys A, (2014), 114, 1105–1112.
2. D. Irzhak, D. Roshchupkin, Journal of Applied Physics, (2014), 115, 244903.
3. D. Irzhak, D. Roshchupkin, AIP Advances, (2013), 3, 102108.

# Исследование эластомерных композитных материалов с использованием изотопов $^{241}\text{Am}$ и $^{57}\text{Co}$

В.М. Скоркин<sup>1</sup>, М.Н. Лифанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук,  
117312, Россия, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

Существует актуальная задача экологической безопасности на предприятиях ядерной энергетики, в научно-исследовательских институтах и медицинских учреждениях – это обеспечение рабочего персонала эффективными средствами защиты при утилизации радиоактивных отходов и ликвидации аварийных ситуаций. Для снижения дозовых нагрузок на персонал разрабатываются новые композитные полимерные материалы с различными модификаторами, которые обеспечивают необходимые защитные и физико-механические свойства. Применение слоистых композитов на основе эластомера с наполнением диспергированными частицами оксидов висмута, вольфрама, редкоземельных элементов обеспечивает безопасность применения защитных покрытий активированных отходов и средств индивидуальной защиты [1-3]. В процессе эксплуатации происходит старение композитов, изменение их структуры и ухудшение функциональных свойств под воздействием радиационных и физических нагрузок [4, 5].



**Рис. 1.** Деструкция полимерной матрицы с газовыми полостями и трещинами.

Поэтому необходим оперативный спектральный контроль микроструктуры поверхности композита с использования лабораторных радионуклидных источников рентгеновского излучения  $^{241}\text{Am}$  и  $^{57}\text{Co}$  [6]. Анализируются спектры отраженного и характеристического рентгеновского излучения от коллимированного облучения поверхности композита. Измерение рентгеновских спектров выполнены в интервале в интервале энергий от 15 кэВ до 150 кеВ с помощью NaI-сцинтилляционного детектора и Ge-полупроводникового детектора. Измерения позволяют анализировать локальные повреждения неровности поверхности, микротрещины. На рис. 2 представлен рентгеновский спектр от радионуклидных

источников  $^{241}\text{Am}$  и  $^{57}\text{Co}$ , измеренный с помощью спектрометра СКС-07П-Г41.

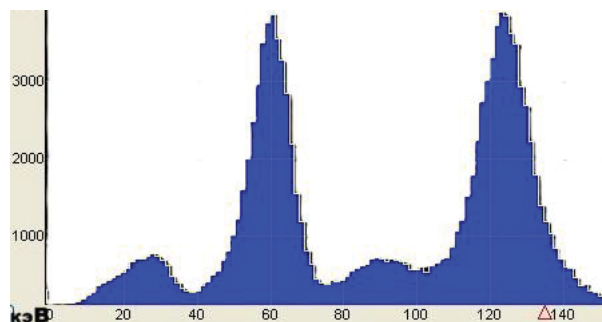


**Рис.2.** Спектр излучения радионуклидных источников  $^{241}\text{Am}$  и  $^{57}\text{Co}$  в интервале энергий (15-150) кэВ.

На рис. 3 представлен спектр излучения от  $^{57}\text{Co}$  (с энергией 122 кэВ и 136 кэВ) и характеристическое излучение висмута, измеренные от тыльной поверхности облученного образца с помощью Ге-полупроводникового спектрометра.

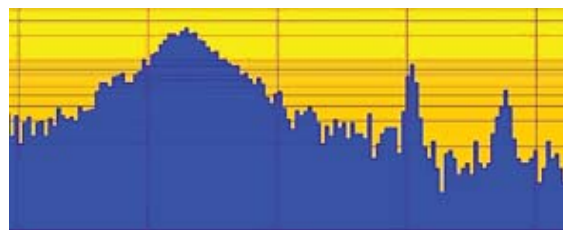


**Рис. 3.** Спектр вторичного излучения висмута и ослабленное поглощением излучение от  $^{57}\text{Co}$  (с энергией 122 кэВ и 136 кэВ, измеренное Ge- спектрометром.

Испытания эластомерного композитного материала на физические и радиационные нагрузки от нейтронного и гамма-излучения показали его стойкость и сохранение функциональных защитных и физических свойств.

1. T. Shams, M. Eftekhari, A. Shirani. Construction and Building Materials, (2018), 182, 35–42.
2. D.Yu.C. Shu-Quan, Z. Hong-Xu et al. Chinese Physics Letters, (2012), 29 (10), 1081–1102.
3. P. Worawat, E. Wimolmal, K. Saenboonruang. Radiation Physics and Chemistry, (2018), 153, 1–9.
4. V.D. Cherkasov, V.V. Avdonin, Y.V. Yurkin. Materials Physics and Mechanics, 2020, 44, 433–438.
5. M.E. Buzoverya, Y.P. Scherbak, V.D. Cherkasov. Materials Physics and Mechanics, 2021, 47. № 1, 117–122.
6. Э.А. Калмыков, А.М. Торубаров. Способ экспресс-анализа механических поверхностных напряжений поликристаллических материалов и параметров их кристаллической решетки и устройство для его осуществления RU2387980C1, Russia, 27.04.2010. Бюл. № 12.

# Особенности дифракции рентгеновского излучения в геометрии отражения при механическом изгибе кристалла

И.А.Смирнова<sup>1</sup>, Э.В.Суворов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, 142432 Черноголовка, Россия

С момента появления синхротронного излучения изогнутые кристаллы стали применяться в различных областях. К ним относятся полихроматоры для рентгеновской абсорбционной спектроскопии, монохроматоры с сагитальной фокусировкой и двух-кристалльные системы. В рентгеновских спектрометрах со средним или высоким энергетическим разрешением в качестве кристаллических анализаторов также часто используются изогнутые кристаллы. С помощью таких кристаллов можно фокусировать или коллимировать рентгеновские лучи, а также расширять их спектральную ширину для получения более высокого потока.

Оптическая конструкция изогнутых монохроматоров на основе кристаллов обычно разрабатывается с использованием методов, основанных на приближении геометрической оптики, в которых в основном учитывается распространение лучей внутри кристалла. Динамическая теория Такаги - Топэна часто используется для более точного объяснения оптических характеристик изогнутых кристаллов. Аналитические решения существуют лишь для цилиндрически изогнутого кристалла, которое может быть выражено с использованием сливающихся гипергеометрических функций.

Анализаторы Брэгга на основе кремния или германия, как правило, приклеиваются к подложкам из кварцевого стекла с изогнутой поверхностью, в то время как у анализатора Лауэ нет подложки. Пластины кристалла изгибаются приложением момента сил специальным механизмом изгиба. Кристалл изгибается цилиндрически или сферически с постоянным радиусом изгиба вдоль длины.

В данной работе кристалл закреплен на одном конце и изгибается поперечной силой, приложенной к другому концу. В этом случае, согласно элементарной теории упругости, формулы для кривизны изогнутой оси кристалла имеют такой же вид, что и в случае чистого изгиба:  $1/R = M / (EI)$ , ( $R$  - радиус изгиба,  $E$  - модуль Юнга,  $I$  - момент инерции). Только в данном случае изгибающий момент  $M$  меняется по длине оси кристалла и равен  $M = -Pz$ , где  $P$  - приложенная сила. На рис.1 показана принципиальная геометрия эксперимента. Было сконструировано устройство, которое позволяет изгибать кристаллы длиной 60 мм, шириной до 10 мм. Образец зажимается с одного конца, а свободный конец можно отклонять на известное смещение  $p$ . Кристалл кремния толщиной 0,66 мм, был вырезан из пластины 001- типа таким образом, что направления длины ( $z$ ) и ширины ( $x$ ) были параллельны кристаллографическим направлениям  $[110]$  и  $[-110]$ .

Как известно, в секционной топографии в геометрии отражения в случае цилиндрически изогнутого кристалла наблюдаются интерференционные "деформационные" полосы или полосы муара. По по-

ложению первого максимума и периоду интерференционных полос можно определить радиус изгиба, период полос увеличивается при увеличении радиуса изгиба [1].

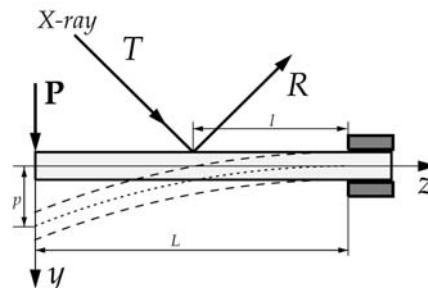


Рис. 1. Геометрия дифракции

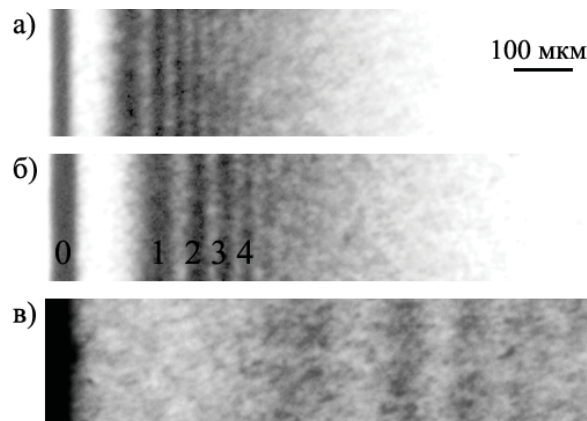


Рис. 2. Фрагменты секционных топограмм,  $\text{MoK}_{\alpha 1}$ , отражение  $\text{Si}(004)$ ,  $p = 465$  мкм,  $L = 45$  мм, положение пучка на поверхности кристалла  $l$  равно: а) 7.4, б) 25.9, в) 40.7 мм.

На секционных топограммах рисунка 2, видно, что и в случае параболически изогнутого кристалла можно наблюдать интерференционные полосы. Период полос не меняется по всей ширине кристалла, на рисунке представлены только короткие фрагменты топограмм. Для всех трех рисунков нагрузка была постоянна, отличается только положение пучка на кристалле. Период интерференционных полос минимален, когда рентгеновский пучок падает вблизи точки крепления образца. Предварительный анализ изображений с помощью численного моделирования дифракционного эксперимента по уравнениям Такаги - Топэна показал соответствие эксперимента и теории. Таким образом, представленное устройство изгиба позволяет изгибать кристалл с контролируемым переменным радиусом изгиба, что может быть использовано для тестирования анализаторов рентгеновского излучения.

1. Смирнова, Э.В. Суворов, Е.В. Шулаков ФТТ, (2011), 53, 35- 40.

# Исследование влияния технологий глубокого анизотропного травления кремния на качество планарной рентгеновской оптики

М.Н. Сороковиков<sup>1\*</sup>, Д.А. Зверев<sup>1</sup>, И.И. Лятун<sup>1</sup>, А.А. Баранников<sup>1</sup>, М.А. Воеводина<sup>1</sup>,  
В.А. Юнкин<sup>2,3</sup>, А.В. Мяконьких<sup>2</sup>, К.В. Руденко<sup>2</sup>, А.А. Снигирёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, 236041 Россия

<sup>2</sup> Отделение физико-технологических исследований имени К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»,  
Москва, 117218 Россия

<sup>3</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМ),  
Черноголовка, 142432 Россия

Кремниевая планарная оптика находит широкое применение в системах формирования и транспорта пучков рентгеновского излучения [1, 2]. Эффективность применения элементов рентгеновской оптики определяется точностью формирования их геометрических параметров и шероховатостью рабочих поверхностей. При этом требования к качеству поверхности существенно различаются для элементов, работающих на физических принципах преломления и отражения. Для составных преломляющих линз (СПЛ) ключевым фактором является точность воспроизведения параболического профиля, тогда как для зеркальной оптики скользящего падения определяющим параметром становится шероховатость отражающих поверхностей. Различие требований к отражающим оптическим элементам обуславливает необходимость комплексного анализа, сочетающего несколько взаимодополняющих методов исследования. В настоящей работе представлены результаты исследования основных геометрических параметров и шероховатости поверхности кремниевых планарных оптических элементов, изготовленных с использованием Bosch-процесса [3] и криогенного плазмохимического травления [4].

Геометрические параметры кремниевых планарных СПЛ исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Измеренные значения физической апертуры  $A=10.1$  мкм, расстояния между апексами парабол  $b=1.9$  мкм и длины линзы  $2l=20$  мкм соответствуют проектным, подтверждая воспроизведение заданных геометрических параметров элементов. Для оценки точности формирования параболического профиля использовалась методика цифровой обработки СЭМ-изображений, основанная на автоматическом выделении контура линзы, аппроксимации методом наименьших квадратов, коррекции ориентации изображения и статистической оценке погрешностей [5]. Полученные значения радиуса кривизны в области апекса  $R=1.24$  мкм подтверждают точность воспроизведения проектного параболического профиля.

Шероховатость рабочих поверхностей исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на продольных сколах тестовых структур. Bosch-процесс формирует регулярную волнообразную поверхность с периодом 345 нм и амплитудой 15 нм со среднеквадратичной шероховатостью 6.5 нм, тогда как криогенное плазмохимическое травление полностью исключает регулярную структуру и обеспечивает снижение значения до 3.6 нм (область сканиро-

вания  $2 \times 2$  мкм). На основании полученных данных АСМ была выполнена оценка отражательной способности поверхностей [6] при энергии излучения  $E=9.25$  кэВ и угле скольжения  $\theta=0.11^\circ$ . Показано, что увеличение среднеквадратичной шероховатости  $>5$  нм приводит к снижению эффективности зеркальной рентгеновской оптики скользящего падения.

Исследование влияния технологий изготовления на качество отражающих поверхностей тестовых структур в виде каналов (период  $p=10$  мкм, ширина  $d=5$  мкм) проводилось с использованием высокочувствительного интерференционного метода. Эксперимент был выполнен на лабораторном рентгеновском источнике *MetalJet* при энергии  $E=9.25$  кэВ ( $GaK_\alpha$  линия). Регистрация интерференционных картин осуществлялась CCD камерой с размером пикселя 0.55 мкм на расстоянии Тальбота  $z=0.74$  м. Характеризация полученных интерференционных картин выполнялась по параметру видности  $V=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$ . Видность интерференционных картин для структур, изготовленных Bosch-процессом и криогенным травлением, составила  $V_{\text{Bosch}}=20\%$  и  $V_{\text{Cryo}}=10\%$  соответственно. Дополнительно в режиме асимметричного освещения исследовалась локальная область *Ступо*-структуры, что способствовало увеличению видности  $V_{\text{Cryo}}$  до 25%.

Результаты комплексного исследования демонстрируют соответствие основных геометрических параметров проектным значениям. При этом криогенное травление позволяет получать поверхности с более низкой локальной шероховатостью, что имеет принципиальное значение для элементов кремниевой планарной рентгеновской оптики, эффективность которых определяется минимизацией рассеяния в методах фазового контраста и когерентной дифракционной визуализации.

1. A. Snigirev, I. Snigireva, M. Grigoriev, et al. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II 6705, 670506, (2007).
2. D. Zverev, I. Snigireva, M. Sorokovikov, Opt. Express 29(22), 35038 (2021).
3. F. Laermer and A. Schilp, U.S. Patent No. 5,501,893, Mar. 03, (1996).
4. T. Tillocher, R. Dussart, L. J. Overzet, et al. J. Electrochem. Soc., vol. 155, D187, (2008).
5. A. Narikovich, D. Zverev, I. Snigireva, A. Snigirev, et al. AIP Conf. Proc. 2299, 060006 (2020).
6. L. Nénot, P. Croce, Rev. Phys. Appl. 15(3), 761-779, (1980).

# Применение метода Брэгга - Брентано для исследования кристаллических структур в композициях полилактид-поликапролактон различного состава

Ю.В. Тертышная, А.В. Кривандин, И.М. Жильцова

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, 4

Известно, что упруго-прочностные свойства полимерных материалов, процесс их деградации зависят от структуры полимера или полимеров, входящих в состав композиции [1, 2]. Модуль упругости, прочность, эластичность, ударная вязкость и некоторые другие характеристики зависят от структурных особенностей полимера. Процессы плавления и кристаллизации являются важным аспектом для характеристики кристаллических образований в полимерной матрице. В настоящей работе были получены и исследованы пленочные образцы полимерных композиций полилактид (ПЛА) – поликапролактон (ПКЛ), полученных из раствора органического растворителя – хлороформа.

Вышеуказанные полимеры относятся к экологичным биоразлагаемым полиэфирам, потребность в которых на мировом рынке увеличивается каждый год [3].

Цель данной работы состояла в изучении влияния содержания поликапролактона на макро- и микро-структуру полилактида, а также на процесс гидролитической деградации.

Кристаллическая структура пленочных образцов была охарактеризована методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и методом рентгеновской дифракции с применением геометрии Брэгга-Брентано. Метод Брэгга-Брентано позволяет по положению дифракционных пиков определять межплоскостные расстояния и идентифицировать кристаллические фазы в образце. Сочетание термического и рентгеновского метода дает более четкое представление о процессе кристаллизации и структурообразования полимера. Пленочные образцы, полученные из раствора, не имеют температуры холодной кристаллизации, принадлежащей ПЛА, и демонстрируют четкие рефлексy на дифрактограммах РДА.

Измерения дифрактограмм были проведены на просвет на дифрактометре с координатным детектором (рентгеновская трубка с медным анодом, Ni-фильтр,  $\sim 0.5 \text{ нм}^{-1} \leq S \leq \sim 6 \text{ нм}^{-1}$ , где  $S = (2\sin\theta)/\lambda$ ,  $\theta$  – половина дифракционного угла,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения) и на отражение в геометрии Брэгга-Брентано на дифрактометре HZG4 (Freiburger Präzisionsmechanik, Германия).

В результате эксперимента было обнаружено, что все пленочные образцы ПЛА/ПКЛ с различным содержанием ПКЛ имеют аморфно-кристаллическую структуру с кристаллической частью, состоящей из кристаллитов  $\alpha$ -формы, возможно, с частичным включением  $\delta$ -формы.

Аналогичные дифрактограммы получаются и при измерении методом Брэгга-Брентано (рисунок 1), что говорит об отсутствии в полученных пленках выраженной ориентации кристаллитов ПЛА.

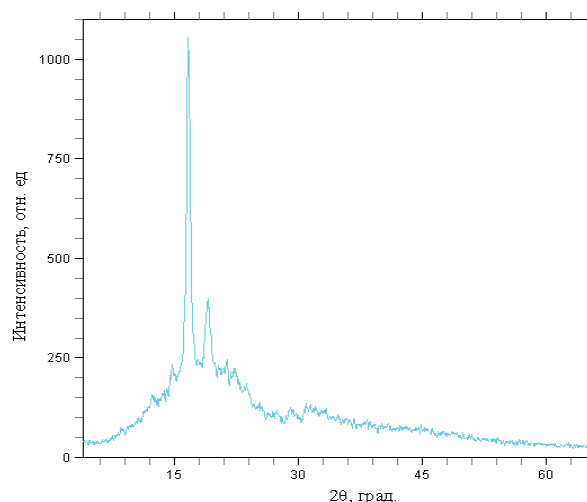


Рис. 1. Дифрактограмма пленки ПЛА/ПКЛ в соотношении 85/15 мас. %, полученная методом Брэгга-Брентано.

Результаты, полученные в работе, расширяют представление о влиянии поликапролактона на процесс структурообразования в матрице ПЛА.

1. Ю.В. Тертышная, А.В. Хватов, М.В. Подзорова, Г.А. Бузанов, Все материалы. Энциклопедический справочник, 2024, 5, 32-40.
2. Ю.В. Тертышная, А.В. Кривандин, О.В. Шаталова, Химическая физика, 2023, 42, 1, 43-49.
3. L. Xiao, B. Wang, G. Yang, M. Gauthier Biomedical Science, Engineering and Technology / Ed. Ghista D.N. London, UK: Intech Open, 2012. Ch. 11, P. 247.

## Исследования микро- и наноструктур, образующихся при прохождении космических тел через атмосферу

В.Ю. Тугаенко<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва, 141070 Королев, Россия,  
e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

В атмосферу Земли ежедневно поступают тонны космического вещества, состоящего из космической пыли и метеороидов. Сравнительно крупные метеороиды, с размерами (условно) метрового диапазона и более, при прохождении атмосферы разрушаются, с образованием сравнительно крупных фрагментов, достигающих поверхности Земли. Вокруг таких тел образуется слой пылевой плазмы, в значительной степени, состоящий из продуктов абляции. Схожие физико-химические процессы происходят и со спускаемыми космическими аппаратами (СА), на поверхности которых, при спуске, оседает часть пылевых частиц из плазменного слоя. В докладе показано, что на основании морфологических характеристик, многие типы микроскопических частиц, выявленных в составе углистых хондритов были обнаружены и на поверхности СА.

В результате разнообразных физико-химических процессов, происходящих при абляции, в плазменном слое и при взаимодействии плазменного потока с поверхностью космических тел происходит образование большого разнообразия новых форм и структур, не содержащихся в исходном теле. Электронно-микроскопическими исследованиями обнаружены частицы с различными ограниченными формами и объекты, структуры которых связаны с их кристаллической природой. По результатам исследований методом рентгеновской дифракции было показано, что в составе исследуемых проб с поверхности СА присутствуют разнообразные минералы, образовавшиеся из продуктов разрушения поверхности космического тела [1].

Исследованы морфологические характеристики и элементный состав микрочастиц, обнаруженных на

поверхности СА, предложена их классификация [2]. В отдельную группу выделены частицы субмикронного размера и наноструктуры, характеризующиеся разветвленной, сложной поверхностью, см. рис.1. В материалах доклада представлены результаты электронно-микроскопических исследований субмикроструктур, обнаруженных на поверхности спускаемого аппарата. Обсуждаются научные задачи идентификации фаз в структурах, представляющих астробиологический интерес.

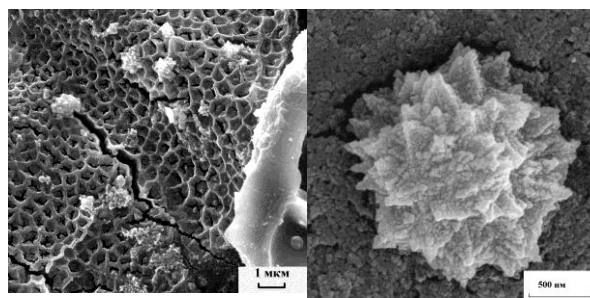


Рис. 1. Субмикроструктуры на поверхности спускаемого аппарата

1. Д.С. Овчинников, М.Г. Исаенкова, Н.И. Каргин, О.А. Крымская, А.А. Тимофеев, Я.А. Бабич, В.Ю. Тугаенко. Геохимия, (2021), 66, 1, 1–7. DOI: 10.1134/S0016702921010110.
2. В.Ю. Тугаенко, Р.А. Ворopaев, С.П. Соколова, Р.М. Хацаева, Д.О. Заикин, А.А. Тимофеев, М.М. Грехов. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, (2025), 19, 5, 1261–1271. DOI: 10.1134/S1027451025701812.

# Формирование бесселевых пучков наноразмерными порами в трековых мембранах

Р.М. Фещенко, А.В. Митрофанов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский проспект 53

В рентгеновской оптике широко применяются оптические элементы, формирующие рентгеновские микро- и наноразмерные пучки и обеспечивающие концентрацию излучения с существенным увеличением его интенсивности. Такие элементы (например, конические преломляющие линзы — рентгеновские аксиконы) могут трансформировать структуру поля исходного микро- или нано-пучка, преобразуя гауссов пучок в слаборасходящийся бесселев пучок [1].

Коническая форма аксиконов роднит их с коническими или биконическими порами в трековых мембранах, которые представляют собой пористые полимерные (например, полиэтилентерефталатные — ПЭТФ) пленки со стохастически расположенными сквозными порами различного диаметра и формы. Трековые мембраны изготавливаются путём травления полимерных плёнок, предварительно облучённых пучками тяжёлых ионов. В зависимости от условий травления скрытые ионные треки превращаются в сквозные поры в общем случае биконической (типа «песочных часов») или даже сигарообразной формы [2]. Пористые мембраны применяются в солнечной рентгеновской астрономии в мягкой области спектра для защиты детектора излучения от интенсивной фоновой засветки ультрафиолетовым, видимым или инфракрасным излучением Солнца, а также в качестве высокопрочных подложек для фильтров мягкого рентгеновского диапазона, устраняющих паразитную засветку в космических солнечных телескопах, и миниатюрных радиаторов для сброса тепла в вакууме.

Численное моделирование распространения излучения в пористых трековых мембранах часто осуществляется путём численного решения 3D параболического уравнения с помощью конечно-разностных схем с точными прозрачными граничными условиями [3]. Пример такого моделирования показан на Рис. 1, где изображена амплитуда поля рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda=0.275$  нм, распространяющегося через биконическую пору в ПЭТФ мембране (рисунок сверху). В пространстве за порой заметно формирование бесселева пучка вблизи фокуса поры и кольцевого пучка в дальней зоне (график снизу). В данном случае биконическая пора работает как оптический аксикон, аналогично преломляющей линзе из работы [1], имеющей форму внеосевого параболоида.

Можно показать, что для формирования бесселева пучка необходимо, чтобы фокус поры располагался в ближней зоне поры. Для этого обратное число Френеля должно быть меньше единицы  $\xi=\lambda/(2\delta L)<1$ , где  $\delta$  — декремент показателя преломления и  $L$  — длина поры. То есть, чем длиннее пора, тем лучше она работает как аксикон. Из ре-

зультатов проведённого численного моделирования также следует, что измерение параметров бесселева пучка в ближней зоне, углового диаметра и ширины кольцевой структуры поля в дальней зоне (даже при освещении мембраны плоской волной) позволяет определить диаметр калиброванных пор, а также отношение диаметра пор к их длине.

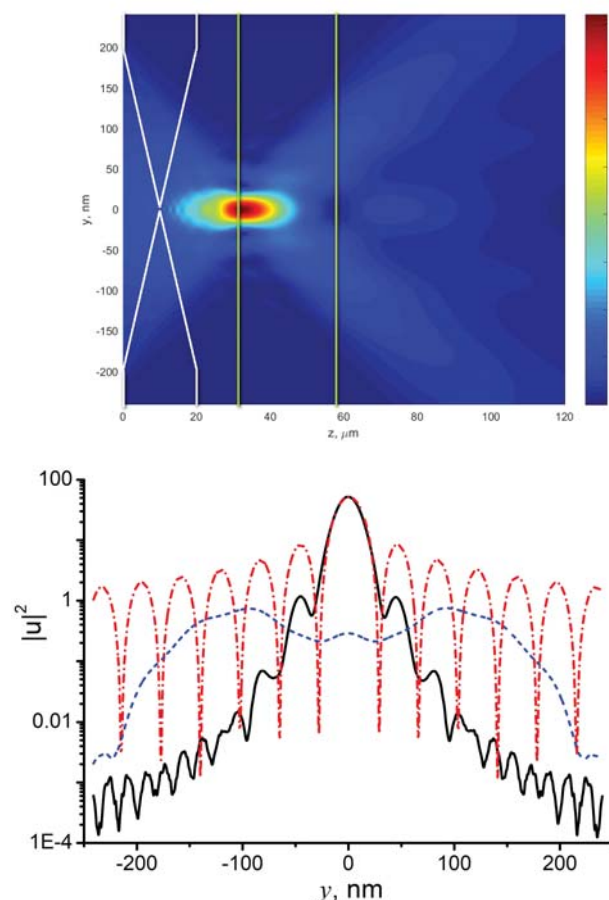


**Рис. 1.** Распространение рентгеновского излучения в биконической поре в ПЭТФ мембране при нормальном падении гауссова пучка на мембрану. Верху показано распределение  $|u|$  в плоскости  $(y,z)$ . Цветовая шкала дана справа. Белые линии — границы стенок поры с входным диаметром 400 нм и длиной 20 мкм. Снизу показано распределение  $|u|^2$  при  $z=29.6$  мкм (черная сплошная линия) и его расчёт по формуле (4) из [1] (штрихпунктирная красная линия), а также распределение  $|u|^2$  в дальней зоне при  $z=66.0$  мкм (синяя пунктирная линия). Положения срезов обозначены вертикальными зелёными линиями.

1. Zverev D. *et al.* Optics Express, 2017, 25(23), 28469–28477.
2. Apel P. Y. *et al.* Journal of Membrane Science, 2006, 282, 393–400.
3. Митрофанов А. В., Фещенко Р. М. ЖТФ, 2023, 93(7), 948–952.

# Монокристаллы $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$ : выращивание и структурные свойства

Хорошко В.В.<sup>1</sup>, Мигалевич С.А.<sup>1</sup>, Лоско Е.В.<sup>1,2</sup>, Осмоловская Т.Н.<sup>1,3</sup>, Кузьмар И.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

Бровки 6, 22013, Минск, Республика Беларусь

e-mail: khoroshko@bsuir.by, elosko17@gmail.com

<sup>2</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин»,

М. Богдановича, 155, 220040, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,

Бровки 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

Синтез шихты для получения монокристаллов  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$  осуществлялся в вакуумированных кварцевых ампулах сплавлением элементарных компонент. Соединение  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$  плавится инконгруэнтно, что не позволяет применять расплавные методы для выращивания его монокристаллов [1, 2]. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнялся на порошкообразном образце кристалла (рисунок 1 сверху) и подтвердил его многофазность. Анализ интенсивности пиков рентгенограммы позволяет оценить фазы: 40-50 %  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$ , 20-30 %  $\text{CdS}$ , 10-20 %  $\text{Cu}_2\text{S}$ , 5-10 %  $\text{GeS}_2$  и др.

Выращивание монокристаллов проходило из порошкообразной шихты массой ~ 3 г в вакуумированных кварцевых ампулах диаметром  $20 \pm 0,1$  мм с использованием йода в концентрации ~ 5 мг/см<sup>3</sup> в качестве газа-носителя в течении 154 ч при градиенте 1123/1063 К между зонами источника и кристаллизации соответственно. Выращенные монокристаллы были преимущественно игольчатыми с размерами до  $25 \times 1 \times 1$  мм<sup>3</sup> и, частично пластинчатыми с размерами до  $25 \times 4 \times 1$  мм<sup>3</sup>, гладко огранёнными с двух сторон чёрного цвета. По результатам элементного анализа можно судить о стехиометричности образцов: Cu – 25,98 ат%; Cd – 12,66 ат%; Ge – 13,06 ат%; S – 48,3 ат%.

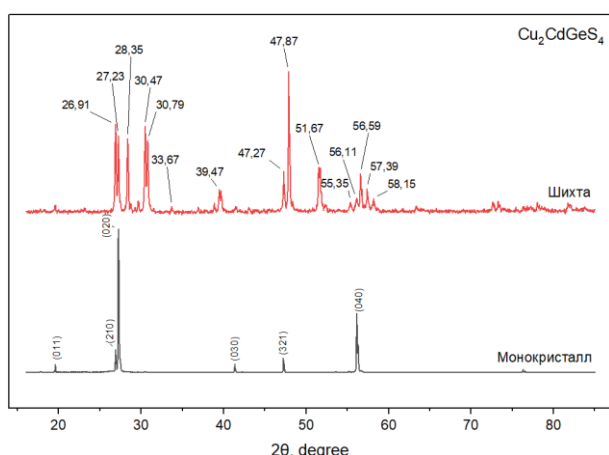


Рис.1. РФА многофазной шихты(сверху) и выращенного монокристалла  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$  (снизу)

Индицирование пиков проводилось по методу Ритвельда. Обработка рентгенограмм проводилась по методу Ритвельда с использованием ПО FullProf и XPert HighScore Plus. Результаты РФА (рисунок 1 снизу) показали образование соединения  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$  орторомбической структуры (пространственная группа  $Pmn2_1$ ) [1-3] с параметрами элементарной ячейки:  $a = 7,69 \pm 0,1$  Å,  $b = 6,55 \pm 0,1$  Å,  $c = 6,28 \pm 0,1$  Å, объём ячейки равен  $V = 316,32$  Å<sup>3</sup>. Полученные величины согласуются с литературными данными, что подтверждает идентичность химического состава и структуры [3]. Для монокристалла зафиксированы характерные для орторомбической структуры рефлексы: (011), (210), (020), (030), (321), (040) — все из которых соответствуют карте базы данных ICDD № 04-074-0515 [3].

Рефлексы, которые могли бы указывать на присутствие сульфидов металлов ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{GeS}_2$ ), оксидных или элементарных фаз, в дифрактограмме монокристалла отсутствуют, что свидетельствует об успешном получении однофазного соединения высокой степени чистоты.

## Благодарности

Исследование выполнено в рамках ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии» на 2026-2030 годы комплексное задание «Физические свойства полупроводниковых материалов на основе халькогенидов и неорганических перовскитов, в том числе в виде пленочных структур, в зависимости от их химического состава, условий получения и факторов внешнего воздействия» и по заданию 3.1.08 ГПНИ «Конвергенция-2030» подпрограмма «Междисциплинарные и синергетические исследования».

[1] O.V. Parasyuk, Y.E. Romanyuk, I.D. Olekseyuk. Journal of Crystal Growth, 2005, 275, e159-e162

[2] M. Quintero, E. Quintero, E. Moreno, P. Grima-Gallardo, J. Marquina, S. Alvarez, C. Rincón, D. Rivero, M. Morcoima, J.A. Henao, M.A. Macías, J.M. Briceño, N. Rodríguez. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2014, 34, 28-38.

[3] Jüri Krustok, Taavi Raadik, Xiaofeng Li, Marit Kaukuusik, Kristi Timmo, Souhaib Oueslati and Maarja Grossberg. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53, 275102.

# X-SLAM: сверхмалоракурсная томография с произвольным позиционированием источника рентгеновского излучения

Д.П. Николаев<sup>1</sup>, М.В. Чукалина<sup>1</sup>, М.И. Гильманов<sup>1</sup>, Д.Д. Казимиров<sup>1</sup>, А.А. Киркича<sup>1</sup>, Л.Ю. Коляскин<sup>1</sup>, О.А. Бугай<sup>1</sup>, А.В. Бузмаков<sup>1</sup>, Д.В. Полевой<sup>1</sup>, Н.Н. Потрахов<sup>2</sup>, В.В. Арлазаров<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ООО «Смарт Энджинс Сервис», проспект 60-летия Октября, дом 9, Москва, Россия, 119333

<sup>2</sup> СПбГУ «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф, Санкт-Петербург, Россия, 197022

Метод компьютерной томографии, позволяющий визуализировать локальную внутреннюю морфологическую структуру объектов, зондируемых рентгеновским излучением, без их физического разрушения, существует уже более ста лет. 3D цифровое изображение объекта реконструируется из набора измеряемых рентгенограмм, собранных от объекта с разных ракурсов. Входными параметрами реконструктора являются параметры, описывающие зондирующий пучок, точные координаты положения источника рентгеновского излучения, точные координаты положения регистратора рентгеновского излучения и координаты положения объекта в системе координат, привязанной к источнику, детектору или объекту. Отклонение передаваемых в реконструктор значений параметров приводит к искажениям восстанавливаемого изображения. Параметры задаются жесткой конструкцией томографа. В данной работе мы представляем нашу новую технологию, названную X-SLAM (X-ray simultaneous localization and mapping) или сверхмалоракурсная томография с произвольным позиционированием источника рентгеновского излучения [1].

Устройство, реализующее технологию, - это портативный томограф. Он представлен портативным рентгеновским источником, портативным позиционно-чувствительным детектором, ноутбуком (рис.1) и полностью уместается в чемодан.

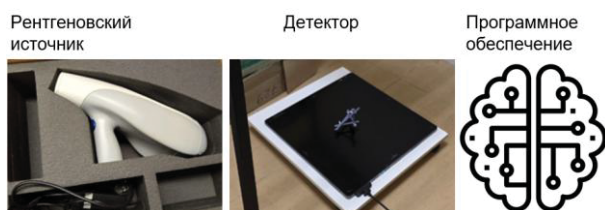


Рис. 1. Части портативного томографа.

Томографируемый объект размещается на поверхности детектора. На ней же размещен якорный объект. Источник рентгеновского излучения находится в руке специалиста, что позволяет снимать рентгенограммы с произвольных (доступных) ракурсов. Принципиальная схема представлена на рисунке 2 (центральный рисунок). Это позволяет использовать портативный томограф для дефектоскопии узлов и механизмов в сборе, причем не обязательно в помещениях ОТК. Есть возможность проводить съемку прямо по месту их эксплуатации. Также благодаря небольшому весу, удобству перемещения, отсутствию необходимости специального размещения объекта в поле вида томографа с жесткой конструкцией, портативный томограф может

найти свое применение в медицине катастроф, машинах скорой помощи, больницах, расположенных в труднодоступных районах, куда невозможно доставить медицинский рентгеновский томограф.

Пространственное разрешение и чувствительность, как способность обнаружения морфологической особенности в локальном объеме, в портативном томографе определяются параметрами источника, параметрами детектора, поглощательными свойствами объекта, точностью алгоритмов позиционирования и, собственно, реконструкции. Алгоритм позиционирования определяет значения параметров, описывающих взаимное положение источника-объекта-детектора.

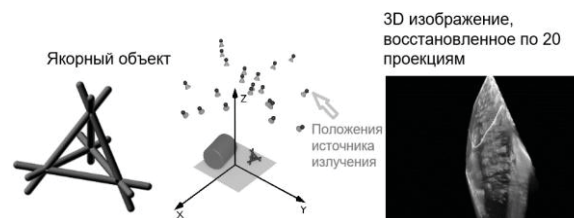


Рис. 2. Слева направо: изображение якорного объекта; принципиальная схема сбора рентгенограмм; результат реконструкции по 20 проекциям.

Алгоритм реконструкции строит 3D цифровое изображение томографируемого объекта, которое может быть подвергнуто полноценному анализу. На рисунке 2 справа приведено изображение, восстановленное с использованием программного обеспечения STE [3]. Для съемки проекций были использованы аппарат рентгеновский острофокусный Пардус-Р в режиме 65 кВ, 150 мкА, масса 2.5 кг и цифровой плоскостовый детектор InnoCare Optoelectronics Corp.

В докладе будут представлены основные этапы работы программной части портативного томографа.

1. Д.Д. Казимиров, М.И. Гильманов, А.В. Бузмаков, М.В. Чукалина, Д.П. Николаев, В.В. Арлазаров. Патент № 2853017, 05.08.2025, Роспатент, (2025).
2. М.В. Чукалина, А.С. Ингачева, М.И. Гильманов, А.В. Ямаев, А.В. Бузмаков, Д.Д. Казимиров, М.С. Шутков, Ж.В. Солдатова, А.А. Смолин, Д.В. Полевой, Д.П. Николаев, В.В. Арлазаров. Третья Международная Конференция "Физика конденсированных состояний" ФКС-2023, (2023), 136, DOI 10.26201/ISSP.2023.KS-3.33.

# Confocal multi-channel arrays as collimators for X-ray Fluorescence micro-Analysis and Radionuclide diagnostics

Ya.L. Shabelnikova<sup>1</sup>, S.I. Zaitsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Microelectronic Technology Problems and high purity materials RAS,  
Academician Osipyan str. 6, Chernogolovka, Moscow distr., Russia

Microscopic XRF ( $\mu$ -XRF) is a branch of XRF that has been developed since 1990 [1,2] mainly thanks to the use and increasing availability of synchrotron radiation (SR) as well as various devices for efficient focusing of X-rays [1,3]. It can provide information on the local elemental composition of inhomogeneous samples. At synchrotron facilities, a variety of micro- and nanofocus optics, based on refraction [4], diffraction [5], or total external reflection [6] of X-rays, is currently in use to create small beams with energies in the 1–100 keV range and diameters of about 0.1–1  $\mu$ m. In laboratory  $\mu$ -XRF instruments mostly polycapillary lenses are employed for focusing [7–8], providing focused X-ray beams that usually are 10–30  $\mu$ m in diameter [9].

A specific sub-type of micro-XRF investigations, aimed to get 3D elemental distribution of the samples, are those employing confocal excitation-detection geometry [10–12]. In this case, the recorded XRF signals stem from a small ‘confocal’ volume that is defined as the intersection of focal spots of two X-ray optical elements: the first positioned between X-ray source and sample (focusing optic) and the second between sample and X-ray detector (confocal collimator) [11, 12].

Most (or almost all) of confocal micro-XRF (CMXRF) experiments [1, 12–13] reported to date have used polycapillary lens (or half lens) as confocal collimators [13, 14]. But its employing limits the scope of CMXRF due to its limited and energy dependent resolution. So the highest resolution offered by a polycapillary was  $\sim 8 \mu$ m at  $\sim 17.5$  keV with a working distance of  $\sim 2$  mm [14]. An improvement in resolution may result in shorter and possibly impractical working distances (because defining the resolution focal spot size of polycapillary lense  $D_{f.s.} \approx d_c + 2F\Theta_c$  linearly depends on focal distance  $F$ , total external reflection (TER) angle  $\Theta_c$  and glass capillary diameter  $d_c$  [13–16]). Moreover using polycapillary optics for high energies (for example, for heavy elements detecting) possesses additional issues: with fluorescent photons energy increase the part of directly (not due to TER) passed radiation increases, as well as  $\Theta_c$  decreases limiting collimator capture angle and, hence, efficiency.

To overcome these limitation imposed by a polycapillary optics collimating device of novel type [14–20] should be considered. This apparatus consists of an array of straight elongated channels directed to a focal point, so main part of collected radiation passes through them directly, without reflections. To date the realizations of such multi-channel devices were performed via standard lithographic techniques and deep reactive ion etching (DRIE) from Si [17–18] and Ge [19]. Herewith its lateral focal spot size (governing the resolution) was defined mainly by channel width and for Si apparatus

[18] nearly energy-independent value of  $\sim 1.7 \mu$ m was achieved for the energy range 4.5–10 keV. Based on the same working principle and arranged the similar way, multi-channel confocal collimator (but with wider channels of 1–2 mm) can be employed in radionuclide diagnostics [20], possessing all abovementioned advantages. The report will discuss the features of functioning for these multichannel collimators of a new type, the advantages of their use and possible methods of creation.

This work was supported by the State Task 075-00296-26-00.

1. K. Janssens, G. Van der Snickt, F. Vanmeert et al. Top. Curr. Chem. (Z), 2016, 374, 77–128.
2. K. Janssens, B. Vekemans, L. Vincze, F. Adams, A. Rindby. Spectrochim. Acta Part B, 1996, 51, 1661–1678.
3. L. Vincze, K. Janssens, F. Adams, A. Rindby, P. Enstrom. Rev. Sci. Instrum, 1998, 69, 3494–3503.
4. B. Lengeler, C.G. Shroer, B. Benner et al. J. Synchrotron Radiation. 2002, 9, 119–124.
5. S. Gorelick, J. Vila-Comamala, V.A. Guzenko et al. 10th International Conference on X-Ray Microscopy, 2011, 88–91.
6. L. Alianelli, K.J.S. Sawhney, R. Barrett et al. Opt Express, 2011, 19, 11120–11127.
7. S. Bichlmeier, K. Janssens, J. Heckel, et al. X-Ray Spectrometry, 2001, 30, 8–14.
8. K. Trentelman, M. Bouchard, M. Ganio et al. X-Ray Spectrometry, 2010, 39, 159–166.
9. G. Vittiglio, S. Bichhneier, P. Klinger et al. Nucl. Instrum. & Methods Sect B, 2004, 213, 693–698.
10. T.X. Sun, X.L. Ding. Rev. Anal. Chem, 2015, 34, 45–59.
11. K. Janssens, K. Proost, G. Falkenberg. Spectrochim Acta Part B At Spectroscopy, 2004, 59, 1637–1645.
12. K. Heimler, C. Gottschalk, C. Vogt. Anal. Bioanal. Chem, 2023, 415, 5083–5100.
13. V.I. Nikolaev, E.V. Chizhova. Nauchnoe Priborostroyeniye, 2011, 21:2, 3–10 (in Russian).
14. S. Choudhury. Development of confocal X-ray fluorescence techniques for biological and archaeological applications, PhD thesis, 2016, 179p.
15. Ya.L. Shabelnikova, M.V. Chukalina. Tech. Phys. Lett, 2012, 38, 452–456.
16. Ya.L. Shabelnikova, Analiz ključevykh karakteristik metodov lokalnoj diagnostiki poluprovodnikov metoda navedennogo rentgenovskim puchkom toka i rentgenovskogo fluorescentnogo metoda, PhD thesis, Moscow, 2013, 155p (in Russian).
17. M.V. Chukalina, S.I. Zaitsev, D.P. Nikolaev, A. Simionovici, M. Knyazev, C.J. Vanegas. European Conference on Modelling and Simulation, Riga, Latvia, 2005, 294–299.
18. A.R. Woll, et al. J. Phys.: Conf. Ser, 2014, 493, 012028.
19. D.N. Agyeman-Budu, S. Choudhury, I. Coulthard et al, AIP Conf. Proc, 2016, 1764(1), 020004.
20. S.I. Zaitsev, O.V. Trofimov, Ya.L. Shabelnikova, M.V. Chikalina, Instrum Exp Tech, 2020, 63, 425–429.

# Влияние добавления наноалмазов в матрицу ЭПХГ каучука на морфологию поверхности

О.О. Щербакова<sup>1</sup>, Т.И. Муравьева<sup>1</sup>, П.О. Буковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Эксплуатация техники в климатических условиях Крайнего Севера сопряжена с воздействием экстремально низких температур и критическими режимами нагружения. Поскольку выход из строя оборудования нередко обусловлен деструкцией или утратой функциональности резинотехнических элементов [например, уплотнительного назначения], к материалам для их изготовления предъявляется комплекс жестких требований. Эпихлоргидриновые каучуки (ЭПХГ) являются наиболее перспективными материалами для работы в таких условиях [1]. Повышение комплекса эксплуатационных характеристик эластомеров может быть достигнуто путем их модификации различными наполнителями [2]. В настоящее время, в качестве таких модификаторов, все чаще применяют наноалмазы (НА).

Целью работы являлось изучение влияния добавления наноалмазов на трибологические свойства и морфологию поверхности морозостойких резин на основе эпихлоргидринового каучука.

Объектами исследования являлись пять групп образцов из ЭПХГ каучука: №1 – немодифицированной; №2 – с добавлением 1 масс. ч., №3 – 3 масс. ч., №4 – с добавлением 5 масс. ч., №5 – с добавлением 10 масс. ч. наноалмазов.

Трибологические исследования проводили на трибометре Rtec по схеме кольцо–диск.

Топография поверхности образцов эластомеров на основе ЭПХГ была исследована с применением 3D бесконтактного профилометра S Neox.

Изучение морфологии поверхности образцов до и после трибологических испытаний проводили на сканирующем электронном микроскопе FEI QUANTA 650. Использовали ускоряющее напряжение 25 кВ, режимы детектирования как вторичных, так и обратно отраженных электронов. Работы проводили в режиме низкого вакуума.

Исследования показали, что концентрация модификатора в составе образцов ЭПХГ каучуков влияет на параметры их шероховатости. Образцы с добавлением 10 масс. ч. наноалмазов имеют самые низкие значения Sa и Sz.

Для всех образцов были изучены их трибологические характеристики при двух различных температурах. Было установлено, что температуре 22°C коэффициент трения увеличивается с ростом скорости скольжения, причем в диапазоне скоростей скольжения 10...100 мм/с наблюдается увеличение коэффициента трения с повышением концентрации НА в исследуемых образцах. При понижении температуры резины до –25°C увеличение коэффициента трения с ростом концентрации НА распространяется на больший диапазон скоростей, но оно менее значительно. Причем коэффициент трения плавно повышается до своего максимума, после которого происходит плавное понижение коэффициента трения.

Особенностью результатов испытаний на износ являлась немонокотная зависимость износостойкости от концентрации НА: при малых концентрациях износ больше, чем у немодифицированной резины, при концентрациях 3, 5 массовых частей модификатора – меньше, для материала с 10 частями износ минимален для рассматриваемого типа фрикционного контакта.

На рис. 1, в качестве примера, приведены СЭМ-изображения образцов с минимальной и максимальной концентрацией наноалмазов после испытаний.

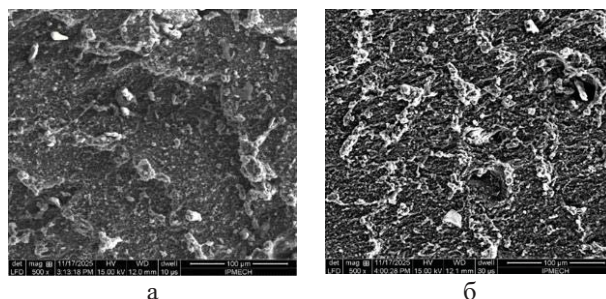


**Рис. 1.** СЭМ-изображение немодифицированного образца из ЭПХГ каучука (слева) и с добавлением 10 масс. ч. наноалмазов (справа) после трибологических испытаний.

Анализ СЭМ изображений образцов до испытаний показал, что максимальная концентрация НА дает наиболее мелкозернистую структуру поверхности, а минимальная – ухудшает регулярность структуры поверхности по сравнению с исходным материалом. Эта же тенденция сохраняется и для изношенной поверхности, определяя средние размеры частиц износа для каждого из образцов.

Проведенные исследования показали, что модификация наноалмазами резин на основе ЭПХГ каучука приводит к повышению коэффициента трения в условиях конформного контакта с гладким стальным контртелом. Износостойкость немонотонно зависит от концентрации модификатора: при малых концентрациях она меньше, чем у немодифицированной резины, при концентрациях 3, 5 массовых частей модификатора – больше, для материала с 10 частями износостойкость максимальна для рассматриваемого типа фрикционного контакта. Модифицированная резина такого типа может быть использована в условиях, когда необходимо сочетание высокой износостойкости и морозостойкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №23-19-00484П).

1. D. Aksut, A. Babapour, M. Sen. Journal of Rubber Research, (2026), 29, 233–245.
2. J.X. Chan, J.F. Wong, et al. Polymers, (2021), 17 (13), 2867.

Научное издание

**Конференция  
«Рентгеновская оптика – 2026».  
Тезисы докладов**

Текст печатается в авторской редакции

Формат А4 (210х297). Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Тираж 20 экз. Заказ 23448-07.  
Отпечатано ООО «Гефест».

ISBN 978-5-6054026-6-4



9 785605 402664 >



---

**Конференция**  
**«Рентгеновская оптика – 2026»**

Черноголовка 19 – 22 октября 2026 года



9 785605 402664 >