

Международная конференция
Синхротронное излучение и лазеры
на свободных электронах
СИ и ЛСЭ – 2026



22 – 25 июня 2026

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Новосибирск – 2026

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

Международная конференция
**Синхротронное излучение и лазеры
на свободных электронах**

22 – 25 июня 2026 г., Новосибирск, Россия

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Новосибирск – 2026

УДК 535.33/.34; 538.97-405
ББК 22.344; 22.386
К64

К64 Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах.

Международная конференция: Сборник тезисов (22 – 25 июня 2026 г., Новосибирск, Россия)

[электронный ресурс] / под редакцией член-корреспондента РАН Винокурова Н.А., к.ф.-м.н. Николенко А.Д., к.т.н. Кузина М.В.

- Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, 2026

- адрес размещения <https://www.inp.nsk.su/images/SFR26-Thesis-book.pdf>

- ISBN 978-5-904968-10-6

Настоящий сборник тезисов является рабочим документом Международной конференции «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах», организованной ИЯФ СО РАН с 22 по 25 июня 2026 г. Сборник включает тезисы пленарных, устных и стендовых докладов по направлениям:

- статусы и обзоры научных программ действующих и проектируемых центров СИ и терагерцового излучения;
- источники, инструментарий и методики работы с СИ и ТГц-излучением;
- применение СИ и ТГц излучения.

Книга предназначена для научных сотрудников и инженеров, занимающихся исследованиями на синхротронном, терагерцовом излучении, разработкой элементов ускорителей заряженных частиц, а также может быть полезной студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

УДК 535.33/.34; 538.97-405
ББК 22.344; 22.386

ISBN 978-5-904968-10-6

© Институт ядерной физики СО РАН, 2026

Оглавление

Тезис ID	Название, авторы	стр
001	Моделирование спектров рассеяния с помощью мета-рэлеевской спектроскопии, мета-спектроскопии Лауэ-Брэгга-Вульфа и их взаимодействия в высокочастотном малоугловом рассеянии на примере поверхностной акустической волны Рэлея. Чуков В.Н.	13
002	Особенности вакуумной системы инжекционной части ЦКП «СКИФ». Семенов А.М., Краснов А.А., Мешков О.И.	14
004	Исследование динамики массы и линейной плотности потоков микрочастиц, формируемых при воздействии сильной ударной волны на металлические пластины. Халеменчук В.П., Тен К.А., Кашкаров А.О., Прууэл Э.Р., Рубцов И.А., Асылкаев А.М., Туманик А.С.	15
005	Определение особенностей влияния высокотемпературного газофазного наводороживания на структуру и дефектное состояние циркониевого сплава Э110 с применением in situ методов позитронной спектроскопии и рентгеновской дифракции на синхротронном излучении. Кругляков М.А., Кудияров В.Н., Лаптев Р.С.	16
006	Система регистрации теневых рентгеновских изображений. Д.А. Вихляев, С.Д. Девятков, А.В. Емельянов, Д.О. Замураев, С.Ф. Ковалёва, Д.С. Носуленко, А.С. Тищенко, А.Л. Шамраев, Н.А. Федоров, Н.К. Федотов	17
007	Система управления ондулятором с переменным периодом на Новосибирском ЛСЭ. Горбачев Я.И., Середняков С.С., Шевченко О.А.	18
008	Архивирование и визуализация параметров работы ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ. Середняков С.С.	19
009	Лазер-плазменный источник тормозного излучения для радиографии плотных объектов. Флегентов В.А., Горохов С.А., Сафронов К.В., Шишков И.Н., Бушухин А.А., Борисов Е.С., Лобода Е.А., Титаренко Н.Ю., Казаков Д.Н., Говрас Е.А., Тищенко А.С., Малюгина С.Н., Потапов А.В., Какшин А.Г., Павленко А.В.	20
011	Разработка, создание и применение дифракционных структур для современных источников излучения – синхротронов и генераторов высоких гармоник. (От Брэгг-Френеля до полного внешнего отражения.). Фирсов Ал. Ан., Свинцов Ал. Ал., Фирсов Ан. Ал., Рощупкин Д. В.	21
012	Томография образцов тротила с разной структурой. Сатонкина Н.П., Анисичкин В.Ф. , Ершов А.П., Купер К.Э., Рубцов И.А., Хлебановский Н.А.	22
013	Обоснование достоверности палеоклиматических реконструкций по данным РФА-СИ на примере донных осадков озера Нижнее Мультиинское. Новиков В.С., Дарьин А.В., Бабич В.В., Маркович Т.И., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С. , Рудая Н.А.	23
014	Станция синхротронного излучения «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне», вчера, сегодня, завтра. Купер К.Э., Легкодымов А.А., Завьялов П.С., Макаров С.Н., Скоков Д.В.	24

015	Регистрация термически индуцированной релаксации в дирадикалах методами ЭПР спектроскопии с применением терагерцового излучения. Самсоненко А.А., Вебер С.Л. , Мельников А.Р.	25
016	Генерация гармоник дальнего инфракрасного НЛСЭ в нелинейных материалах. Кубарев В.В., Потехин А.А., Шевченко О.А., Горбачёв Я.В.	26
017	Разработка импульсного затвора рентгеновского излучения для исследования быстропротекающих процессов на источниках синхротронного излучения. Студенников А.А., Пальчиков Е.И., Прууэл Э.Р. , Плуман А.А., Станкевич С.В. , Самойленко М.С.	27
018	Влияние топологии внутренней структуры полимерных материалов на параметры распространения ударных волн. Плуман А.А., Студенников А.А., Прууэл Э.Р. , Девушкин М.П., Кашкаров А.О.	28
019	Измерение ударной адиабаты в аддитивном материале PETG с помощью синхротронного излучения. Девушкин М. П., Кашкаров А. О., Тен К. А., Плуман А. А., Студенников А. А.	29
020	Измерения протяженной тонкой структуры спектров поглощения белковых монослоев на жидкости. С.С. Савин, А.В. Рогачев, Н.Н. Новикова, А.А. Вологжанникова, М.Е. Пермьякова, А.Л. Тригуб, С.Е. Пермьяков, С.Н. Якунин	30
021	Экспериментальное определение порога подавления СИ люминесценции на зёрнных границах. Завьялов А.П., Ворновских А.А., Косьянов Д.Ю.	31
022	Перспективы люминесцентных спектроскопических методик в ЦКП «СКИФ». Завьялов А.П., Пустоваров В.А., Каменских И.А., Ивановских К.В., Мешков О.И., Косьянов Д.Ю.	33
023	In situ дифракционные исследования материалов энергетической отрасли с использованием синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3. Сыртанов М.С., Кашкаров Е.Б., Кудияров В.Н., Кроткевич Д.Г., Камелина К.Д.	35
024	Фазовые переходы в титановом сплаве Ti-3Al-5Mo-5V, полученном проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологией, при газофазном наводороживании. Камелина К.Д.	36
025	Синхротронные исследования динамики фазообразования при высокотемпературном синтезе в механоактивированной порошковой смеси системы Ti-Al-B. Собачкин А.В., Логинова М.В., Ситников А.А., Яковлев В.И., Филимонов В.Ю., Негодяев А.З., Мясников А.Ю., Шарафутдинов М.Р., Толочко Б.П., Розный А.А., Лакман Е.В., Собачкин А.В., Очаковский Я.В.	37
026	Разработка методик проведения энергодисперсионных исследований на сверхпроводящем ондуляторе СКИФ. Овсянник В.В., Золотарев К.В.	38
027	Расположение молекул в электроосажденных пленках проводящих полимеров на углеродных поверхностях. Сюгаев А.В., Маратканова А.Н.	39
028	Определение функции аппаратного искажения из уравнения типа свертки. Коротаев Е.В.	40
029	Излучение закрученных фотонов, создаваемое релятивистской частицей, двигающейся в эллиптическом виггелере, заполненном средой. Лазаренко Г.Ю., Малыгина Н.И.	41

030	Генерация волн с ОУМ в синхротронном излучении. Лазаренко Г.Ю., Малыгина Н.И.	42
031	Трёхмерный объёмный растр для пространственной фильтрации рассеянного рентгеновского излучения. Пальчиков Е.И., Баев С.Г., Генцелев А.Н., Долгих А.В., Шеплев Б.В.	43
032	Фазовая эволюция и термическая стабильность <i>in situ</i> композита ВТ6–В4С, полученного методом прямого лазерного выращивания. Герцель И.С., Маликов А.Г., Шмаков А.Н.	44
033	Применение СИ-методик для исследования $Al_2O_3-Ce^{3+}(Y,Tb)_3Al_5O_{12}$ керамик. Завьялов А.П., Кривенцов В.В., Ворновских А.А., Косьянов Д.Ю.	45
034	СИ люминесценция и дифракция $Al_2O_3-Ce^{3+}(Y,Gd)_3Al_4GaO_{12}$ керамик. Завьялов А.П., Ворновских А.А., Косьянов Д.Ю.	46
035	Исследование уровня накопления йода в опухолевых тканях иммунодефицитных мышей при инфицировании вирусом осповакцины с трансгеном симпортёра йодида натрия: данные рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении. Лапшин К.А., Дроков Д.В., Ткачева А.В., Гражданцева А.А., Легкодымов А.А., Кочнева Г.В.	47
036	Структурные исследования $La_{0.65}Ca_{0.35}Fe_{0.8-x}Co_{0.2}Ni_xO_{3-\delta}$ оксида, перспективного для применения в качестве воздушного электрода в твердооксидных топливных элементах и электролизерах. Брагина О.А., Хохлова М.О., Шубникова Е.В., Кривенцов В.В., Немудрый А.П.	48
037	Структурные и электрохимические характеристики катодного материала ТОТЭ на основе $La_{0.65}Ca_{0.35}Co_{0.2}Fe_{0.8-x}Cu_xO_{3-\delta}$ ($x=0-0.20$). Хохлова М.О., Шубникова Е.В., Кривенцов В.В., Брагина О.А., Немудрый А.П.	49
038	Программно-аппаратная open-source реализация системы управления щелями монохроматического пучка синхротронного излучения. Панарин С.В., Довженко Г.Д., Селютин А.Г.	50
039	Применение синхротронного излучения для исследования высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов. А.Г. Маликов, И.Е.Витошкин, К.Э.Купер, И.С. Герцель, А.Н.Шмаков	51
040	XAFS-исследование окислительного состояния и локального атомного окружения железа и меди в синтетических смешанослойных сульфидно-гидроксидных соединениях (валлериитах, точилинитах). Лихацкий М.Н., Борисов Р.В., Зверева В.В., Трубина С.В., Кривенцов В.В.	52
041	Разработка защитных покрытий из инструментальной стали и исследование их фазового состава методом синхротронного излучения. А.А. Голышев, А.Г. Маликов, И.С. Герцель, Шмаков А.Н.	53
042	Эффективность оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах различного класса в условиях скалярного синхронизма. Шевченко О.Н., Николаев Н.А., Анцыгин В.Д.	54
043	Детекторы для изучения динамических процессов на пучке СИ. В.М.Аульченко, В.Е.Бурдин, А.А.Жариков, В.Н.Кудрявцев, С.В.Иваненко, В.М.Титов, Л.И.Шехтман*, А.А.Юровская, М.А.Ярцева	55

044	О программе научных исследований на станции «РФА-Геология» второй очереди ЦКП «СКИФ». Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, А.С. Гоголев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, А.М. Дымщиц, О.Н. Киселева, А.В. Корсаков, А.М. Логвинова, Д.С. Михайленко, И.Р. Прокопьев, С.В. Ращенко, В.А. Чернов, А.Ф. Шацкий	56
045	Обработки данных микро-рентгенофлуоресцентного анализа и микро-томографии с использованием искусственного интеллекта. Скляров А.Н., Веригин С.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С.	57
046	Структурная релаксация в сплаве технического алюминия марки А6, упрочненном многостенными углеродными нанотрубками. Тяпкин П.Ю., Петров С.А., Кузнецов В.А., Коротаева З.А., Жданок А.А., Толочко Б.П.	58
047	Исследования потенциальных термоядерных керамик методами рентгеновской дифракции. Балаш И.И., Казанцев С.Р., Шмаков А.Н., Черепанов Д.Е., Серегин А.Ю.	59
048	Высокоплотные поликристаллические катоды/фотокатоды на основе гексаборида лантана для ускорительной техники и рентгеновских детекторов. Краснов Д.А., Толочко Б.П., Жданок А.А., Коротаева З.А., Кузнецов В.А., Чакин И.К.	61
049	Возможности сканирующего микро-РФА-СИ в решении задач тефрохронологии. Дарьин А.В., Новиков В.С., Пруцков Г.В., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В.	62
050	Аналитическая микростратиграфия (скан.мРФА-СИ) керна донных осадков озера Чеко (Тунгусский природный заповедник). Дарьин А.В., Бабич В.В., Маркович Т.И., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Rogozin Д.Ю.	63
051	ПО для обработки рентгенофлуоресцентных спектров геологических образцов методом фундаментальных параметров. Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Дарьин А.В.	64
052	Методы обработки спектрометрических данных “поточкового” анализа при исследовании стратифицированных геологических образцов. Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Дарьин А.В., Скляров А.Н., Дарьин Ф.А.	65
053	Подготовка тестовых образцов и рентгеноконтрастных фантомов. Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Дарьин Ф. А., Хомяков Ю.В.	66
054	Система монохроматизации в мягком рентгеновском диапазоне для метрологической станции Курчатковского источника синхротронного излучения. Сурикова Е.Е., Чумаков Р.Г.	67
055	Применение метода рентгеновской рефлектометрии для характеристики тонких пленок, полученных при разных режимах вакуумного напыления. Коченева А.Г., Шарафутдинов М.Р., Лемзяков А.Г.	68
056	Предложен метод определения критического тока в Nb-Ti сверхпроводниках в диапазоне «гелиевых» температур. Бродников А.Ф.	69
057	Разработка детектора прямого счета фотонов SciCODE с энергетическим разрешением. В.М.Аульченко, В.Е.Бурдин*, В.В.Жуланов, С.В.Иваненко, В.Н.Кудрявцев, В.М.Титов, Л.И.Шехтман, А.А.Юровская, М.А.Ярцева	70

058	Расчёт и оптимизация параметров канала вывода излучения станции «ИК-диагностика» синхротронного источника СКИФ. Ташкеев Н.А., Жимулева Е.С., Солдатенко А.В., Золотарев К.В., Вебер С.Л.	71
059	Синхротроны и лазеры на свободных электронах для промышленной EUV/BEUV литографии. Дорофеев В.П.	72
060	Концепция станции «БелРос-СИ» ЦКП «СКИФ». Бурдилов А.А., Довженко Г.Д., Платунов М.С., Карпинский Д.В., Гилеп А.А., Труханов А.В., Зубавичус Я.В., Бухтияров А.В.	73
061	Разработка проекта системы диагностики пучка на установке «СИЛА». Павлов В.М., Мезенцев А.А., Ким В.Л., Вуколов А.В., Шкитов Д.А., Шевелёв М.В., Ефимов Ю.В.	74
062	Восстановление уравнения состояния взрывчатых веществ с использованием малоуглового рентгеновского рассеяния в локальной области зоны химической реакции. Толочко Б.П., Чернышев А.П., Тен К.А., Рубцов И.А.	75
063	Исследование широкополосного поглощения в структуре металл-диэлектрик-металл в терагерцевом диапазоне спектра. В.В. Герасимов, С.А. Кузнецов, А.Г. Лемзяков, А.А. Рыбак, В.А. Степанов, Д.В. Фромичев	76
064	Реконструкция станции «Аномальное Рассеяние» на канале №2 источника СИ ВЭПП-3. Шмаков А.Н., Папко С.С., Балаш И.И., Евдоков О.В., Гольденберг Б.Г.	77
065	Дифракционные исследования функциональных и конструкционных материалов в СЦСТИ. Шмаков А.Н., Герцель И.С., Маликов А.Г., Денисов В.В., Сыртанов М.С., Подъячева О.Ю., Пригородова А.Н., Низовский А.И.	78
066	Модернизация пироэлектрических детекторов на основе пленок тетрааминодифенила для работы в терагерцевом диапазоне частот. Н.М. Шемягин, В.В. Герасимов, С.А. Кузнецов, В.А. Степанов, Д.В. Фромичев	80
067	Пятиполюсный сверхпроводящий шифтер с полем 5.5 Тесла для КИСИ-2. Хрущев С.В., Шкаруба В.А., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н.	81
068	Выявление геохимически контрастных ритмов в спелеотложениях Денисовой пещеры методами статистического анализа (по данным РФА СИ). Кириченко И.С., Козликин М.Б., Сокол Э.В., Некипелова А.В., Шуньков М.В.	82
069	Моделирование генерации дифракционного излучения, несущего орбитальный угловой момент, от секторной спиральной мишени. Шкитов Д.А., Бердников Н.С.	84
071	Станция второй очереди «Метрология и спектроскопия в мягком рентгеновском диапазоне». Состояние проекта. К.В. Золотарев, С. В. Кузин, А.Д. Николенко, А.Д. Федоренко, М.С. Платунов, А.Г. Шмаков, С.С. Папко	85
072	Система монохроматоров станции «Космос-2». А.Д. Николенко, А.Д. Федоренко, М.С. Платунов, А.Г. Шмаков	86
073	Детекторы мягкого рентгеновского диапазона для станции синхротронного излучения «Космос». В.В. Забродский, С. В. Кузин, А.Д. Николенко	87

074	Использование рентгеновской томографии для исследования зернограницной структуры системы Al-Ga-In. Низовский А.И., Шмаков А.Н., Гогин А.А., Клещев И.М., Бухтияров В.И.	88
075	Моделирование и оптимизация ондуляторной линии лазера на свободных электронах «СИЛА» жесткого рентгеновского диапазона. Аккуратов В.И., Тютюкин А.А., Комлев А.С., Клочков Н.С., Таргонский А.В.	89
077	Исследование качества и устойчивости мультимодальных алгоритмов совмещения трехмерных изображений. Коляскин Л.Ю., Гильманов М.И., Чукалина М.В.	90
078	Рентгеновский детектор на основе электронно-оптического преобразователя. Терещенко О.Е., Меркулин К.В., Шайблер Г.Э., Бакин В.В., Мараховка И.И., Кислых Н.В., Копотилов А.В., Демин А.Ю., Куликов Д.М., Ярмошенко Ю.М, Кантур И.Э., Кузнецова Т.В.	91
079	Сравнение стандартных образцов горных пород России и Китая методом РФА-СИ. Дарьин А.В., Sun Q., Маркович Т.И., Кириченко И.С. , Новиков В.С., Ракшун Я.В.	92
080	Диэлектрические свойства наноплёнок титаната-стронция в терагерцовом диапазоне. Грибанов Д.С., Николаев Н.А., Павленко А. В.	93
081	Исследования процессов синтеза покрытий на поверхности инструментальных материалов методом in situ - дифрактометрии на канале № 6 источника СИ ВЭПП-З. Денисов В.В. , Леонов А.А., Денисова Ю.А., Савчук М.В., Островерхов Е.В., Шмаков А.Н., А.Н. Залого, П. С. Дубинин, И.С. Якимов	94
083	Использование синхротронного излучения для исследования процесса роста пленок сплава Ti-Zr. Ю.Ф. Иванов, Н.А. Прокопенко, Е.А. Петрикова, Ю.Х. Ахмадеев, О.В. Крысина, Н.Н. Коваль, А.Н. Шмаков	95
084	Рентгенофлуоресцентный анализ в области низких энергий на канале вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4М. Гольденберг Б.Г., Копылов А.Д., Копалкин И.П. , Амброс Е.В.	96
085	Разработка сверхпроводящего спирального ондулятора для станции “Наноскопия” на “СКИФ”. Седов А. А., Мезенцев Н. А.,Ракшун Я. В., Сафронов А. Н., Хомяков Ю. В.,Чернов В. А., Шкаруба В. А.	97
086	Вклад Института сильноточной электроники СО РАН в разработку научно-технологического оборудования станций первой очереди ЦКП «СКИФ». Бескончин К.В., Денисов В.В., Сыртанов М.С., Ковальский С.С., Панченко Ю.Н., Андреев М.В., Дульцев К.И., Назаров А.С.	98
087	Синхротронное излучение как источник флуоресценции для исследования элементного состава биопсийного материала методом РФА-СИ. В. А. Трунова, М.С. Войтко, Т.И. Поспелова	99
088	Автоматизация измерения поперечных параметров электронного пучка на Новосибирском ЛСЭ. Горбачев Я.И., Середняков С.С., Шевченко О.А.	100
089	Поляризационная спектроскопия рентгеновского поглощения для выполнения фундаментальных исследований современных магнитных материалов. М.С. Платунов	101

090	Проект автоматической системы управления экспериментом на станции 1-7 ЦКП «СКИФ». Довженко Г.Д., Гольденберг Б.Г., Копылов А.Д., Копалкин И.П.	103
091	Компенсация температурных эффектов датчика Холла в магнитных измерениях сверхпроводящего ондулятора. Каноник П.В, Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Гусев Е.А., Казанцев Ф.П., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М.	104
092	РФА-СИ на накопительном кольце ВЭПП-4М. Легкодымов А.А., Лапшин К.А., Золотарёв К.В., Назьмов В.П., Кочнева Г.В.	105
093	Анализ сильно перекрывающихся EXAFS сигналов на примере каталитических систем. Хаметова Э.Ф., Бакиева О.Р., Кривенцов В.В.	106
094	Статус экспериментальной станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ». Шарафутдинов М.Р., Я.В. Ракшун, А.С. Гоголев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, С.В. Рашченко, Ю.В. Хомяков, В.А. Чернов	107
095	XANES и РФЭС исследование магнитных комплексов Re(IV). Федоренко А.Д., Асанов И.П., Бердюгин С.Н., Николенко А.Д.	108
096	Проект станции второй очереди HAXPES на источнике ЦКП «СКИФ». Федоренко А.Д., Асанов И.П., Зенкевич А.В., Мезенцев Н.А., Полковников В.Н., Ракшун Я.В., Хомяков Ю.В., Чернов В.А.	109
097	Анализ локальной атомной структуры пленок Ti-O с разрешением по глубине методом EXELFS. Гусейнов Т.З., Бакиева О.Р.	110
098	Оптимизация финишной очистки вакуумных камер накопительного кольца источника синхротронного излучения СКИФ. Жуков А.А., Кайгородцев В.А., Краснов А.А., Лемзяков А.Г., Мамошкина Е.В.	111
099	Возможности метода РФЛА-СИ для определения концентраций Ni и Ti в биопсийном материале животных с NiTi-имплантатами. Крупович Е.С., Трунова В.А., Смирнов Я.М., Владимиров С.В., Бородин В.П., Крайнова Е.О. , Маджара Н.Е.	112
100	Локальная атомная структура оксида железа, сформированного при окислении магнетронно-осажденных металлических пленок. Валеев Р.Г., Петков А.А., Кривенцов В.В.	113
101	Анализ структурных изменений магнетронно осажденных пленок железа при термическом отжиге. Валеев Р.Г., Петков А.А.	114
102	Терагерцовое техническое зрение на основе ЖК пространственного модулятора. Хасанов И.Ш., Ю.В. Евдокимов, С.А. Кузнецов, В.И. Лапаник, Халиков Р.Ф.	115
103	Об энергоэффективности акустооптической модуляции поверхностных плазмон-поляритонов дальнего инфракрасного диапазона. Никитин П.А.	116
104	Изучение режимов работы двухдорожечного ускорителя-рекуператора комплекса «Новосибирский лазер на свободных электронах». Гетманов Я.В., Эптешев Е.С., Горбачев Я.И., Середняков С.С., Шевченко О.А., Винокуров Н.А.	117

105	Оптимизация магнитной структуры четырехдорожечного ускорителя-рекуператора для генерации коротких импульсов рентгеновского излучения на комплексе «Новосибирский лазер на свободных электронах». Гетманов Я.В., Шевченко О.А., Эптешев Е.С., Винокуров Н.А.	118
106	Ондуляторы с переменным периодом для рентгеновских лазеров на свободных электронах. Шевченко О.А., Винокуров Н.А.	119
107	Полное поглощение и рассеяние на детекторе как механизмы формирования металлических артефактов в компьютерной томографии. Гильманов М.И., Казимиров Д.Д., Полевой Д.В., Киркича А.А., Коляскин Л.Ю., Чукалина М.В., Арлазаров В.В.	120
108	Ограничение мощности генераторного лазера на свободных электронах при помощи магнитного группирователя. Винокуров Н.А., Шевченко О.А.	121
109	Моделирование продольной динамики электронного пучка в Новосибирском лазере на свободных электронах и сравнение с результатами измерений. Шевченко О.А., Винокуров Н.А., Гетманов Я.В., Эптешев Е.С., Борин В.М., Рева С.В.	122
110	Измерение параметров электронного пучка в пушке Новосибирского лазера на свободных электронах. Шевченко О.А., Горбачев Я.И., Середняков С.С., Абед Н., Никифоров Д.А., Федоров В.В., Иванов А.В.	123
111	Расчет транспортной матрицы электронного пучка в пушке Новосибирского лазера на свободных электронах. Шевченко О.А., Винокуров Н.А.	124
112	Калибровка ЖК модулятора в задаче однопиксельной визуализации при когерентном ТГц освещении. Благова Т.В., Хасанов И.Ш.	125
113	Статус уникальной научной установки «Новосибирский лазер на свободных электронах». Шевченко О.А., Винокуров Н.А., Гетманов Я.В., Арбузов В.С., Чернов К.Н., Дейчули О.И., Дементьев Е.Н., Довженко Б.А., Горбачев Я.И., Кондаков А.А., Козак В.Р., Козырев Е.В., Крутихин С.А., Кубарев В.В., Кулипанов Г.Н., Купцов И.В., Куркин Г.Я., Медведев Л.Э., Мотыгин С.В., Овчар В.К., Осипов В.Н., Пилан А.М., Попик В.М., Попик И.В., Репков В.В., Саликова Т.В., Седяров И.К., Середняков С.С., Скринский А.Н., Тарарышкин С.В., Трибендис А.Г., Ческидов В.Г., Власенко М.Г., Волков В.Н.	126
114	Система рентгеновских зеркал для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ». Разумов Н.И., Бугаев С.В., Чхало Н.И., Толочко Б.П.	127
115	Исследование структурных превращений в ходе первого гальваностатического разряда анодного материала CuSnO_3 для металл-ионных аккумуляторов с помощью метода рентгеновской дифракции на синхротронном излучении. Д.В. Новожилов, А.А. Шиндров, А.С. Улихин, А.П.Завьялов, Б.П. Толочко	128
116	Изучение влияния генерации излучения на электронный пучок в двухдорожечном ускорителе-рекуператоре комплекса «Новосибирский лазер на свободных электронах». Эптешев Е.С., Гетманов Я.В., Шевченко О.А., Винокуров Н.А.	129

117	Изучение возможностей оптимизации магнитной структуры двухдорожечного ускорителя-рекуператора комплекса «Новосибирский лазер на свободных электронах». Эптешев Е.С., Гетманов Я.В., Шевченко О.А., Винокуров Н.А.	130
118	Развитие технологий создания высокоаспектных псевдометаллических микроструктур для терагерцовых приложений. Кузнецов С.А., Генцелев А.Н., Николаев Н.А., Баев С.Г., Тархов М.А., Филлипов И.А.	131
119	Высокоэффективные амплитудные пространственные модуляторы субтерагерцового излучения на основе жидкокристаллических метаструктур. Кузнецов С.А., Хасанов И.Ш., Лапаник В.И., Евдокимов Ю.В.	132
120	Финальный цикл работ на станции EXAFS спектроскопии в ЦКП СЦСТИ. Кривенцов В.В.	133
121	Разработка квазиоптических дихроичных фильтров мм/субмм-диапазонов спектра для космической обсерватории «Миллиметрон». Кузнецов С.А., Гельфанд А.В., Лазорский П.А., Турыгин С.Ю., Худченко А.В., Чёрный Р.А., Голубев Е.С.	134
122	Эллипсометрия мм-диапазона длин волн для неразрушающего контроля оптически непрозрачных диэлектрических покрытий и материалов. Кузнецов С.А., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В., Кравченко Ю.Л., Гусаченко А.В., Новгородов Б.Н.	135
123	Комплексное XAFS исследование модифицированных наносистем платиноид/углерод. Кривенцов В.В.	136
124	Применение резонансной фотоэмиссионной спектроскопии для исследования многокомпонентных R-T соединений. Кузнецова Т.В., Пономарева Е.А., Чумаков Р.Г.	137
125	Технологии искусственного интеллекта для обработки данных и управления экспериментами на станции синхротронного центра. Солдатов А.В., Гуда А.А., Проценко Б.О., Гуда С.А., Панкин И.А.	138
126	Специализированная вакуумная камера поворотного магнита СКИФ для эффективного вывода синхротронного излучения инфракрасного диапазона. Вебер С.Л., Мельников А.Р., Ташкеев Н.А., Байструков М.А., Жимулева Е.С., Солдатенко А.В., Винокуров Н.А., Краснов А.А., Пиминов П.А., Золотарев К.В., Зубавичус Я.В.	139
127	Изображающий спектрометр мягкого рентгеновского излучения на основе кремниевых коммерческих КМОП-матриц. Кириченко А.С., Кузин С.В., Перцов А.А., Золотов Д.А., Васильев А.Л., Артёмов В.В., Лобода И.П., Рева А.А., Богачёв С.А., Червинский В.И.	140
128	Новые горизонты станции X-техно. Назьмов В.П., Генцелев А.Н.	141
129	Искажение топологии при переносе размеров с «толстой» рентгеновской маски. Назьмов В.П., Неустроева А.А., Гольденберг Б.Г.	142
130	Допированный вольфрамом нанорезист. Назьмов В.П., Генцелев А.Н., Варанд А.В.	143
131	Пространственное разрешение после LIGA-растров. Назьмов В.П., Неустроева А.А., Салошенко Т.В.	144

132	Статус экспериментальной станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ. Рубцов И.А., Бухтияров А.В., Зубавичус Я.В., Купер К.Э., Прууэл Э.Р., Студенников А.А., Тен К.А., Толочко Б.П., Шмаков А.Н.	145
133	Расширение методов спектроскопии и микроскопии функциональных материалов в ультрамягкой рентгеновской области синхротронного излучения. Турищев С.Ю., Парина Е.В., Чувенкова О.А., Титова С.С., Фатеев К.А.	146
134	Статус работ по станции 1-2 «Структурная диагностика» в ЦКП «СКИФ». Винокуров З.С., Зубавичус Я.В., Шмаков А.Н., Мищенко Д.Д., Селютин А.Г., Сыртанов М.С., Гоголев А.С., Денисов В.В., Тересов А.Д., Панченко Ю.Н., Ковальский С.С., Бескончин К.В., Киселев В.Н., Евдокимов А.А., Андреев М.В.	147
135	Комплексное исследование слоистых двойных Ni(2+)–Al(3+) и Zn(2+)–Al(3+) гидроксидов методами синхротронного излучения. Кривенцов В.В., Завьялов А.П., Тхи Ван Ань Нгуен, Толочко Б.П.	148
136	Исследования с использованием синхротронного излучения в Новосибирском центре синхротронного и терагерцового излучения. З.С. Винокуров, Б.Г. Гольденберг, Ф.А. Дарьин, К.В. Золотарев, В.В. Кривенцов, Г.Н. Кулипанов, К.Э. Купер, А.А. Легкодымов, К.А. Тен, Б.П. Толочко, М.Р. Шарафутдинов, А.Н. Шмаков, А.Д. Николенко, П.А. Пиминов, Е.Б. Левичев, И.А. Рубцов, В.П. Назьмов	150
137	Импульсные магнитные измерения сверхпроводящего ондулятора станции 1-1 ЦКП «СКИФ». Ф. П. Казанцев, П. В. Каноник, Н. А. Мезенцев, А.А. Седов, С. В. Хрущев, В. М. Цуканов, В. А. Шкаруба	151
138	Скорость термического разложения триаминотринитробензола после облучения электронами. Михайленко М.А., Толочко Б.П., Герасимов К.Б., Брызгин А.А., Гармашев А.Ю., Смирнов Е.Б., Станкевич А.В., Чемагина И.В.	152
139	ЦКП СКИФ, статус и перспективы. Бухтияров А.В., Левичев Е.Б., Бухтияров В.И.	153
140	Структурные исследования трансформаций фазового состава в наноструктурированной системе Me–Pt. Пригородова А.Н., Захаров Н.С., Кривенцов В.В., Шмаков А.Н., Пугачев В.М., Адодин Н.С.	154
141	Сверхпроводящие устройства генерации синхротронного излучения на ЦКП «СКИФ». Шкаруба В.А.	155
142	Электронное строение и локальная атомная структура соединений U и Np полученное с помощью спектроскопии рентгеновского поглощения. Новичков Д.А., Крот А.Д., Аверин А.А., Федосеев А.М., Матвеев П.И., Калмыков С.Н.	156
143	Применение синхротронного излучения для установления влияния размера межслоевого катиона на структуру двойных карбонатов Pu(V) и Np(V). Кузенкова А.С., Плахова Т.В., Куликова Е.С., Светогоров Р.Д., Тригуб А.Л., Цымбаренко Д.М., Романчук А.Ю., Калмыков С.Н.	157
144	Исследование влияния совместного измельчения и электронно-лучевой обработки на процесс кристаллизации D-ПЛА в смесях с арабиногалактаном. Михайленко М.А., Шахтшнейдер Т.П., Шарафутдинов М.Р., Мызь С.А., Кузнецова С.А., Коробейников М.В.	158

Моделирование спектров рассеяния с помощью мета-рэлеевской спектроскопии, мета-спектроскопии Лауэ-Брэгга-Вульфа и их взаимодействия в высокочастотном малоугловом рассеянии на примере поверхностной акустической волны Рэлея

Чуков В.Н.

Институт Биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

E-mail: vchukov@mail.ru

Теоретически получено, что новые топологические законы рассеяния [1-19], обобщающие законы рассеяния Рэлея [5-8,13,14-16] и Лауэ-Брэгга-Вульфа [7,9-12], позволяют моделировать спектр рассеяния в широком диапазоне длин волн: от рэлеевского [3] до суб-брэгговского и Лауэ-Брэгга-Вульфа [17-19]. Обнаружено взаимодействие указанных мета-спектроскопий для высокочастотного малоуглового рассеяния ПАВ Рэлея на топологических структурах неоднородностей поверхности твёрдого тела [18], нарушающее известные законы.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Госзадания НИОКТР № 122041400112-8.

Литература:

- [1] Чуков В.Н. Диссертация к.ф.-м.н. Москва. МИФИ, 1994.
- [2] Чуков В.Н. // ФТТ. 1997. Т. 39, № 2. С. 267.
- [3] Чуков В.Н. О законах рэлеевского, резонансного и коротковолнового рассеяния волны Рэлея. Препринт ИБХФ РАН. Москва. РИИС ФИАН, 2002.
- [4] Chukov V.N. The new laws of the Rayleigh wave scattering on a near-surface inhomogeneity, In: Proc. Days on Diffraction (DD), International Seminar, IEEE Conference Publications, 2012. DOI: 10.1109/DD.2012.6402750
- [5] Чуков В.Н. Структура поверхностной неоднородности и законы рэлеевского рассеяния волны Рэлея. Препринт ИБХФ РАН. Москва. РИИС ФИАН, 2003.
- [6] Chukov V.N. // Ultrasonics. 2012. V. 52. P. 5. DOI: 10.1016/j.ultras.2011.07.010
- [7] Chukov V.N. On violation of Rayleigh and Bragg laws of scattering, In: Proc. Days on Diffraction (DD), International Seminar, IEEE Conference Publications, 2011. DOI: 10.1109/DD.2011.6094365
- [8] Chukov V.N. The Rayleigh law violation and its influence on the wave scattering. Lambert Academic Publishing, 2017.
- [9] Chukov V.N. Topological laws of the Rayleigh wave scattering. Lambert Academic Publishing, 2018.
- [10] Чуков В.Н. Сборник трудов III Всероссийской Акустической конференции. Политех-Пресс, Санкт-Петербург, 2020, С. 87. <https://acoust-conference.iapras.ru>.
- [11] Chukov V.N. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012157.
- [12] Chukov V.N. // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol.16, № 1,2. P. 557-564.
- [13] Chukov V.N. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88, № 2. P. 244–253.
- [14] Chukov V.N. // Russian Physics Journal, Springer Nature. 2024. V. 67, № 10. P. 1787. DOI: 10.1007/s11182-024-03313-y.
- [15] Chukov V.N. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025, V. 89, № 1. P. 96–108.
- [16] Chukov V.N. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2025, V.18, № 5. P. 585.
- [17] Чуков В.Н. Материалы XX Международной молодёжной конференции по люминесценции и лазерной физике. 30 июня – 5 июля 2025, С. 142. Иркутск, Россия.
- [18] Чуков В.Н. Мета-спектроскопия рассеяния волны Рэлея на топологических структурах шероховатости. Препринт ИБХФ РАН. Москва. Паблит, 2025. ISBN: 978-5-6053423-9-7.
- [19] Чуков В.Н. Суб-брэгговский спектр рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея. Препринт ИБХФ РАН. Москва. Паблит, 2025. ISBN: 978-5-6055100-2-4.

Особенности вакуумной системы инжекционной части ЦКП «СКИФ»

Семенов А.М.^{1,2}, Краснов А.А.^{1,3}, Мешков О.И.^{1,3}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

При разработке вакуумной системы инжекционной части синхротронного источника 4+ поколения ЦКП «СКИФ» учитывался опыт создания и эксплуатации вакуумной системы ТНК (Зеленоград) [1], инжекционного комплекса ВЭПП-5 (Новосибирск) и бустера NSLS-II (Нью-Йорк, США) [2].

Тем не менее наука не стоит на месте и постоянно разрабатываются новые технологии, методы, материалы, например, усовершенствование методов диагностики пучка привело к необходимости применения материалов, которые мало изучены или совсем не изучены с точки зрения вакуумной техники, такие как аэрогель [3] или сцинтиллятор P43, изготовленный методом осаждения.

В докладе представлены результаты измерения вакуумных свойств для аэрогеля и для сцинтиллятора P43, нанесенного методом электрофоретического осаждения, в зависимости от длительности и условий вакуумных испытаний. Также описываются вакуумные системы линейного ускорителя, бустера и обоих каналов перепуска. Приводятся расчеты профиля давления.

Литература:

[1] Semenov A.M., Anashin V.V., Goncharova N.F., [et al.]. // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2011. Vol.5, №6. P.1058-1062.

<https://doi.org/10.1134/S1027451011110188>.

[2] Semenov A.M., Anashin V.V., Gurov S.M, and Krasnov A.A. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. Vol.79, № 1. P. 57-61. <https://doi.org/10.3103/S1062873815010268>.

[3] Zhao Q., Bähr J., Bohnet I., Flöttmann K., Lipka D., Richter D., Stephan F.// Proceed. Particle Accelerator Conference. 2001. Chicago, P.2299.

Исследование динамики массы и линейной плотности потоков микрочастиц, формируемых при воздействии сильной ударной волны на металлические пластины

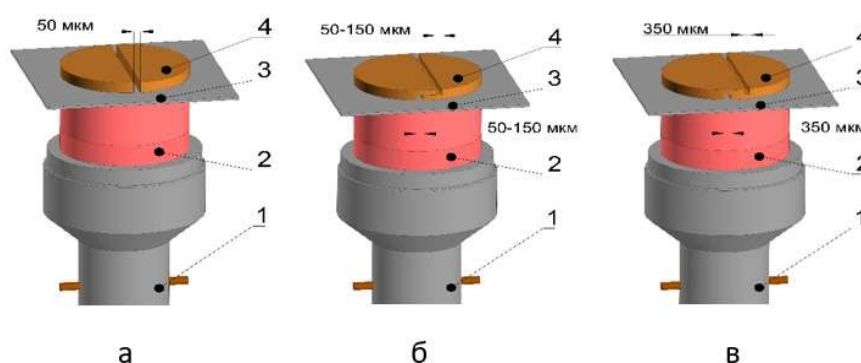
Халеменчук В.П.¹, Тен К.А.¹, Кашкаров А.О.¹, Прууэл Э.Р.¹, Рубцов И.А.^{1,2}, Асылкаев А.М.^{1,2}, Туманик А.С.^{1,2}

1 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: slava.khalemenchuk@mail.ru

В работе исследовались потоки микрочастиц, формируемые в зазорах различных конструктивных стыков: прямой (рис.1, а); ступенчатый (рис.1, б); диски с проточками (рис.1, в) при нагружении ударной волной (УВ) ~ 40 ГПа. Прямой и ступенчатый стык формировался при сопряжении двух полудисков из одного материала: медь М1, алюминиевый сплав Д16Т, олово марки О1. Так же изготавливались диски с проточками на двух торцах шириной 350 мкм и глубиной 1 мм. Исследования проводились в трех экспериментальных постановках: вдоль движения микрочастиц и в двух проекциях сбоку.



*1- генератор плоской ударной волны; 2- энергетический материал; 3- прокладка;
4- исследуемый образец.*

Рис. 1. Экспериментальная сборка с прямым стыком (а); ступенчатым стыком (б); проточками (в).

Эксперименты проводилась на станции «Субмикросекундной диагностики», ускорительного комплекса ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН методом импульсной рентгенографии синхротронным излучением с энергией 20 кэВ и длительностью импульса 1 нс. Регистрация рентгеновской тени проводилась однокоординатным детектором DIMEX записывающим 100 кадров с промежутком времени между кадрами 124 нс.

Проведены рентгенографические эксперименты по измерению скоростей и распределения массы микроструй образуемых из зазоров полудисков при ударно волновом нагружении. По результатам опытов проведено сравнение выброшенной массы и скорости потоков микрочастиц в зависимости от материала исследуемого образца, глубины и ширины зазоров (канавок).

Определение особенностей влияния высокотемпературного газофазного наводороживания на структуру и дефектное состояние циркониевого сплава Э110 с применением *in situ* методов позитронной спектроскопии и рентгеновской дифракции на синхротронном излучении

Кругляков М.А.¹, Кудияров В.Н.¹, Лаптев Р.С.¹

1 – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: kruglyakov97@tpu.ru

Изменения свойств циркониевых сплавов после гидрирования обусловлены рядом физико-химических процессов, включая водородное охрупчивание. Это явление снижает пластичность материала из-за накопления водорода и образования гидридов с различными типами и ориентациями. В рамках настоящей работы исследуются фазовые превращения и эволюция дефектной структуры циркониевого сплава Э110 при его высокотемпературном газофазном наводороживании.

In situ исследования фазовых переходов во время процесса наводороживания проводились методами дифрактометрии с использованием источника синхротронного излучения в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН (Новосибирск). *In situ* исследования эволюции дефектной структуры при высокотемпературном газофазном наводороживании осуществлялись с помощью экспериментального комплекса контроля и анализа методами позитронной спектроскопии на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ (Томск); в качестве источника позитронов использовался радионуклидный изотоп ⁶⁴Cu.

Установлено, что при температуре, не превышающей 400 °С, проникновение водорода в объем материала приводит к формированию стабильной δ -фазы ZrH непосредственно при наводороживании, инициируя медленный рост гидридного слоя и формирование «гидридного обода». Существенным отличием наводороживания при температуре 450 °С является образование промежуточной метастабильной γ -фазы ZrH, которая по окончании наводороживания полностью переходит в стабильную δ -фазу ZrH; при 550 °С наблюдается схожий с 450 °С механизм, который в свою очередь протекает значительно быстрее, в частности, значительно сокращается время до образования δ -ZrH из метастабильного γ -гидрида ZrH.

Благодарности: Данное исследование было профинансировано в рамках государственной программы, Грант № FSWW-2026-0044.

Система регистрации теневых рентгеновских изображений

Д.А. Вихляев, С.Д. Девятков, А.В. Емельянов, Д.О. Замураев, С.Ф. Ковалёва, Д.С. Носуленко, А.С.

Тищенко, А.Л. Шамраев, Н.А. Федоров, Н.К. Федотов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина

E-mail: dep5@vniitf.ru

Одним из важнейших направлений физики высоких плотностей энергии является исследование быстропротекающих процессов с помощью импульсной рентгенографии, которая дает информацию о распределении вещества в заданный момент времени. С появлением новых задач и возросших требований к получаемым изображениям стали набирать популярность рентгеновские микроскопы на основе изогнутых кристаллов. Они позволяют получать увеличенные рентгеновские изображения исследуемых объектов с высоким пространственным разрешением (~ 10 мкм) [1, 2], а также характеризуются большим полем зрения (несколько мм). Кроме этого, системы на основе кристаллов работают в узком спектральном диапазоне ($\Delta\lambda/\lambda=10^{-3}-10^{-4}$), что позволяет получать изображения в практически монохроматических лучах. Это упрощает интерпретацию результатов экспериментов по рентгеновскому зондированию вещества, особенно в тех случаях, когда исследуемый объект сам является ярким источником рентгеновского излучения.

Для проведения экспериментов по рентгенографии объектов на мощных лазерных установках создана система регистрации теневых изображений, основным элементом которой является кристалл кварца ($10\bar{1}1$) ($2d = 6,68$ Å) изогнутый по сферической поверхности радиусом $R = 250$ мм. Разработанная система настраивалась на линию Si-He α ($E = 1,87$ кэВ), брэгговский угол для которой составляет $86,4^\circ$.

Обработка системы регистрации проводилась на мощной фемтосекундной лазерной установке. Источником рентгеновского излучения в экспериментах служила кремниевая полированная пластинка, облучаемая лазерными импульсами с энергией $E_{\text{ли}} = 1,8 \div 2,6$ Дж, длительностью $\tau_{\text{ли}} = 24$ фс. Интенсивность лазерного импульса на мишени составляла $\sim 5 \times 10^{19}$ Вт/см ^{2} .

В результате проведенных экспериментов определено, что разрешение созданной системы составило 10 мкм в сагиттальном и меридиональном направлении. При просвечивании мишени монохроматическим излучением получают изображения, обладающие малым уровнем фонового сигнала.

Литература

[1] B. Kozioziemski et al, X-ray imaging methods for high-energy density physics applications, Rev. Sci. Instrum. 94,041102, 2023

[2] G. N. Hall. et al. The Crystal Backlighter Imager: A spherically bent crystal imager for radiography on the National Ignition Facility, Rev. Sci. Instrum. 90, 013702, 2019

Система управления ондулятором с переменным периодом на Новосибирском ЛСЭ

Горбачев Я.И.¹, Середняков С.С.^{1,2}, Шевченко О.А.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 –Новосибирский Государственный Университет , Новосибирск, Россия

E-mail: S.S.Serednyakov@inp.nsk.su

Для генерации когерентного излучения на второй очереди Новосибирского ЛСЭ, был разработан уникальный ондулятор, в котором регулирование длины волны генерируемого излучения осуществляется путем механического перемещения полюсов друг относительно друга. Для осуществления эффективного управления данным процессом, и установления нужного периода ондулятора была разработана система управления, включающая в себя ряд аппаратных и программных компонентов. Данная система полностью интегрирована в систему управления всей магнитной системой ускорителя-рекуператора.

Литература:

- [1] N.A. Vinokurov et al. // Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. Proceedings of FEL2009, TUOD01
- [2] N.A. Vinokurov et al. // COMMISSIONING THE FIRST FREE ELECTRON LASER BASED ON A VARIABLE-PERIOD UNDULATOR . PHYSICS OF PARTICLES AND NUCLEI LETTERS . 2023. Т.20. С. 897-900.
- [3] <https://arduino.ru>

Архивирование и визуализация параметров работы ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ

Середняков С.С.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 –Новосибирский Государственный Университет , Новосибирск, Россия

E-mail: S.S.Serednyakov@inp.nsk.su

Новосибирский лазер на свободных электронах(ЛСЭ) является уникальным источником когерентного излучения с возможностью перестройки длины волны в достаточно широком диапазоне. Он работает на базе многооборотного ускорителя-рекуператора, который сам по себе является крупной электрофизической установкой. Для полноценного функционирования данного комплекса необходимо мониторировать и контролировать большое количество параметров. Также для анализа работы комплекса необходимо производить их архивирование в реальном времени. Система архивирования, используемая в настоящее время на Новосибирском ЛСЭ, а также средства для управления и просмотра заархивированных ранее данных рассмотрена в данной статье. Также представлены средства для просмотра параметров работы комплекса в реальном времени.

Литература:

- [1] N.A. Vinokurov et al. // Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. Proceedings of FEL2009, TUOD01
- [2] Дементьев Е.Н., Винокуров Н.А., и др. // СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛСЭ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ. Приборы и техника эксперимента. 2025. S8. С.59-65.
- [3] <https://github.com/epicsdeb/channelarchiver>

Лазер-плазменный источник тормозного излучения для радиографии плотных объектов

Флегентов В.А., Горохов С.А., Сафронов К.В., Шишков И.Н., Бушухин А.А., Борисов Е.С., Лобода Е.А., Титаренко Н.Ю., Казаков Д.Н., Говрас Е.А., Тищенко А.С., Малюгина С.Н., Потапов А.В., Какшин А.Г., Павленко А.В.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Проведены первые эксперименты на лазерном радиографическом комплексе (ЛРГК), созданном на основе 100 ТВт пикосекундной установки (Nd: glass, CPA, 80 Дж, $0,7 \div 1$ пс) и легкогазовой пушки. ЛРГК позволяет проводить ударно-волновые эксперименты, сопровождаемые радиографией с высоким пространственным ($< 0,1$ мм) и временным ($< 0,1$ нс) разрешениями снимков.

В экспериментах образцы, нагружаемые ударником легкогазовой пушки облучались в различные моменты времени вспышками тормозного рентгеновского излучения, которое генерировалось при взаимодействии ультракороткого, высокоинтенсивного ($\geq 10^{19}$ Вт/см²) лазерного излучения с мишенью-конвертером из W толщиной 2 мм.

Разработан набор диагностик, позволяющий проводить измерения спектрально-угловых характеристик пучков тормозного излучения во время проведения гидродинамических экспериментов.

В результате ударно-волновых экспериментов получены радиографические снимки эволюции разрушения дисковых ($\varnothing 52$ мм) образцов из стали на временном интервале до 6 мкс после соударения.

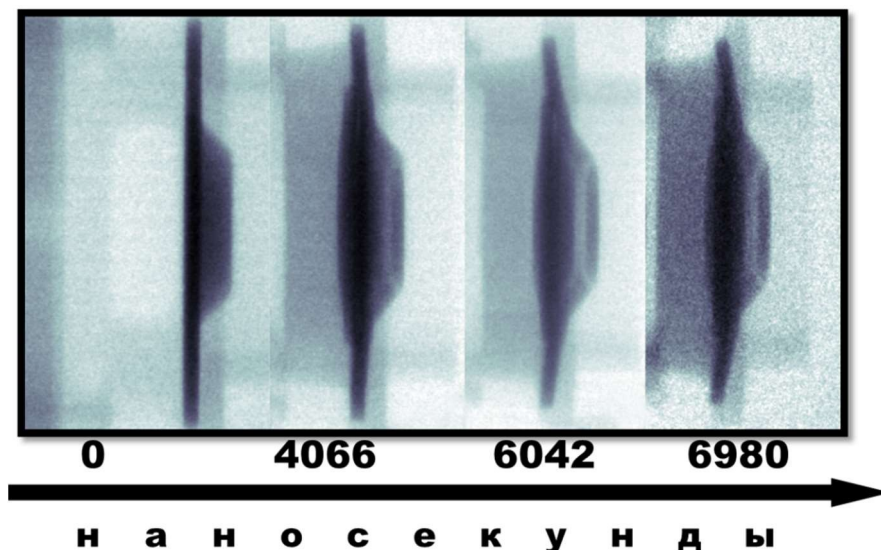


Рисунок 1. Эволюция развития откола составленная из снимков полученных с помощью ЛРГК .
Ударник Ст.3, $\varnothing 34 \times 2$ мм, $V_{уд} \approx 414 \pm 1$ м/с.

Разработка, создание и применение дифракционных структур для современных источников излучения – синхротронов и генераторов высоких гармоник. (От Брэгг-Френеля до полного внешнего отражения.)

Фирсов Ал. Ан., Свинцов Ал. Ал., Фирсов Ан. Ал., Рощупкин Д. В.

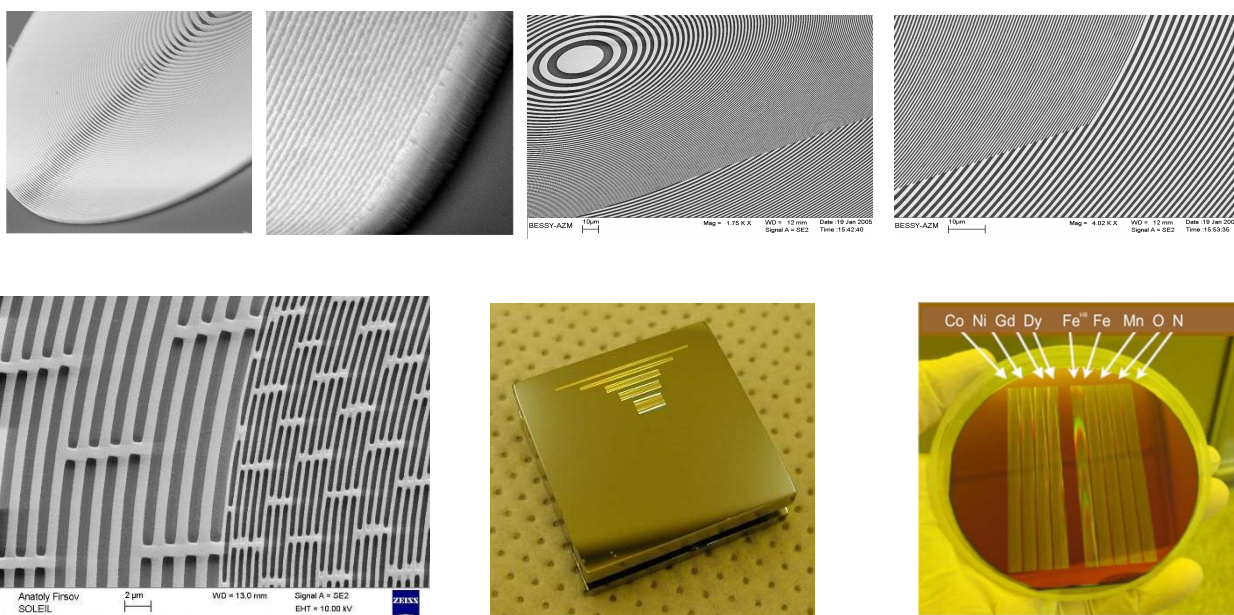
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук; 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика
Осипяна, д. 6

E-mail: firsov@iptm.ru

Абстракт

Современные источники излучения (строящиеся синхротроны нового поколения и генераторы высоких гармоник) имеют размеры источника излучения порядка нескольких десятков микрон, одинаковые по обоим координатам, а также очень маленькую расходимость излучения. Это приводит к тому, что на расстоянии в несколько десятков метров от источника сечение пучка излучения составляет 2-5 мм. При таких параметрах источника проблематично использовать стандартные оптические элементы при создании цифрового двойника оптической линии.

Альтернативой является разработка и применение дифракционных структур, работающих на принципе Брэгг-Френеля (искусственные многослойные структуры и кристаллы) и работающих на принципе полного внешнего отражения.



ИПТМ РАН имеет большой опыт в разработке, создании и применении таких структур. Данные структуры для экспериментов с временным разрешением (например, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) на источнике синхротронного излучения и источниках типа генераторы высоких гармоник. Это структуры, создающие “закрученный” свет, структуры на втором кристалле монохроматора. Терагерцовое излучение также заслуживает внимания с точки зрения его использования в научных экспериментах.

Томография образцов тротила с разной структурой

Сатонкина Н.П.¹, Анисичкин В.Ф.¹, Ершов А.П.¹, Купер К.Э.², Рубцов И.А.², Хлебановский Н.А.¹

1 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов",

г. Новосибирск, Россия

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

Как хорошо известно, некоторые детонационные характеристики заряда взрывчатого вещества зависят от дисперсности зерна и плотности заряда. Так, для высокоплотных зарядов при уменьшении количества неоднородностей вплоть до состояния монокристалла критический диаметр экспоненциально возрастает при значительном снижении чувствительности [1]. Эта зависимость наиболее ярко проявляется для тротила: критический диаметр литого и прессованного зарядов отличается на порядок [2, 3]. В работе [4] проведено исследование характеристик зарядов литого тротила до и после термоциклирования, обнаружено существенное сокращение критического диаметра и изменение характера зависимости скорости детонации от диаметра. Пока не удалось выявить ключевые факторы, влияющие на чувствительность, кроме общих тенденций.

В настоящей работе томографическим методом исследованы следующие образцы: литой тротил, литой после термоциклирования, прессованный, монокристалл тротила, монокристалл после термоциклирования, высокоплотный прессованный тротил с добавлением 0.5% углеродных одностенных нанотрубок. Разрешение методики составляет около 3 мкм на точку. Проведено статистическое исследование неоднородностей. Выполнено сопоставление структуры и детонационных характеристик. Обсуждается интерпретация экспериментальных данных.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 25-29-00042.

Литература:

- [1] Апин, А.Я., Велина, Н.Ф. О критическом диаметре детонации монокристаллов взрывчатых веществ // Второй всероссийский симпозиум по горению и взрыву. Автореферат докладов. 1969. С. 317–318.
- [2] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва, Т. 1 / М: Физматлит, изд. 3-е, испр., 2002, 2004. 832 с.
- [3] Satonkina, N.P., Kuper, K.E., Ershov, A.P., Prueel, E.R., Yunoshev, A.S., Lukyanov, Ya.L., Gusachenko, D.V., Khorungenko, A.S., Kuzminykh, A.A. Tomographic study of the structure of cast and pressed trotyl charges // Results in Engineering. 2022. V. 16. P. 100621.
- [4] Кравцов В. В., Сильвестров В. В., Влияние низкой температуры на параметры детонации литого тротила // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 119–124.

Обоснование достоверности палеоклиматических реконструкций по данным РФА-СИ на примере донных осадков озера Нижнее Мультиинское

Новиков В.С.^{1,2}, Дарьин А.В.², Бабич В.В.², Маркович Т.И.², Ракшун Я.В.^{2,3}, Дарьин Ф.А.^{3,4},
Сороколетов Д.С.^{3,4}, Рудая Н.А.⁵

1 - Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

2 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

3 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

4 - ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

5 – Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: AVD@igm.nsc.ru

Для построения палеоклиматических реконструкций по литолого-геохимическим данным исследований кернов донных отложений методом сканирующего мРФА-СИ предложено и количественно обосновано использование отношения брома (Br) к рубидию (Rb). В изучаемых озерах интервалы концентраций: Br 2–10 ppm, Rb 15–100 ppm. Предел обнаружения мРФА-СИ составляет 0,5–1 ppm [1], что позволяет уверенно регистрировать полезный сигнал.

Подход верифицирован на осадках озера Нижнее Мультиинское (Алтай). Верхний интервал керна, охватывающий 1940 – 2016 гг., использовался для калибровки модели: сопоставление 4-летних средних Br/Rb с инструментальными аномалиями среднегодовой температуры показало значимую сильную корреляцию ($r = +0.82$, 20 точек).

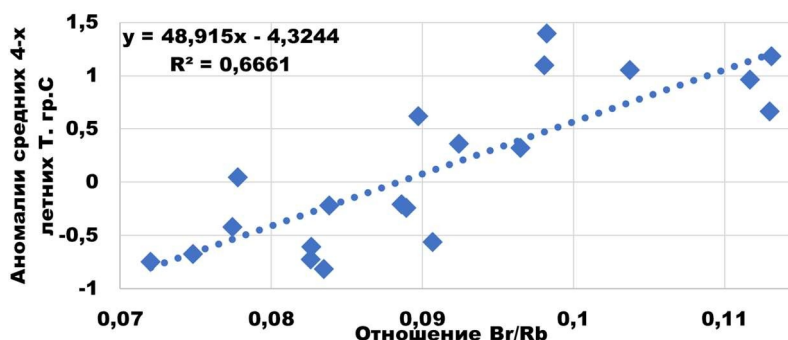


Рис.1. Связь аномалий средней 4-х летней T региона с отношением Br/Rb в датированных слоях донных осадков оз. Нижнее Мультиинское по данным мРФА-СИ.

Полученная трансферная функция позволила реконструировать температуры для всего опробованного интервала керна (10700 лет). Прямая эмпирическая калибровка делает прокси Br/Rb свободным от сезонных искажений, доказывая применимость данных РФА-СИ для фундаментальных палеоклиматических задач.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 42030507, 42372352, 42302344, 42471175), государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Литература:

[1] Дарьин А.В., Ракшун Я.В. // Научный вестник НГТУ. 2013. Т. 51. № 2. С. 112–118.

Станция синхротронного излучения «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне», вчера, сегодня, завтра.

Купер К.Э.^{1,2}, Легкодымов А.А.^{1,2}, Завьялов П.С.³, Макаров С.Н.³, Скоков Д.В.³

1 – ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: K.E.Kuper@inp.nsk.su

«Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» — одна из станций первой очереди Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» («ЦКП СКИФ»). На станции будет реализовано ряд исследовательских методик с использованием высокоразрешающей рентгеновской микроскопии, дифракции и рассеяния рентгеновских лучей. Результаты исследований могут быть полезны в областях материаловедения, геофизики, археологии, палеонтологии и медицины. Инициатором создания станции выступил Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН.

Станция состоит из трех основных блоков: оптический блок (где происходит подготовка пучка) и две секции с оборудованием для проведения исследований, причем одна из них вынесена в отдельное здание. Ближайшая к источнику секция нацелена на исследования, проводимые с использованием рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного анализа в высокоэнергетическом диапазоне. А в конце канала размещается секция, позволяющую получать высококонтрастные изображения биологических тканей в рентгеновском диапазоне. В качестве источника СИ будет использоваться 40-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 4.5 Тесла и периодом 48 мм.

Станция будет оснащена микроскопами, работающими в рентгеновском диапазоне, что позволит получать изображения с субмикронным разрешением. А применение метода рентгеновской вычислительной томографии, который планируется использовать на станции, даст возможность для неразрушающего исследования трехмерной структуры любых объектов. В частности, такие исследования будут очень интересны палеонтологам при изучении уникальных образцов окаменелостей древней флоры и фауны.

Одно из главных направлений станции связано с медициной и биологией. Такие исследования особенно важны при диагностике злокачественных опухолей на ранней стадии развития и позволяют контролировать ход развития различных патологий в течении процесса лечения.

Также, результаты исследований на станции помогут при конструировании и создании различных металлических изделий и конструкций. Используя методы рентгеноскопии и рентгеноструктурного анализа можно будет предсказать, как поведут себя металлические конструкции при механической и термической нагрузке. Это исследования будут наиболее актуальны в авиастроении, машиностроении.

Регистрация термически индуцированной релаксации в дирадикалах методами ЭПР спектроскопии с применением терагерцового излучения

Самсоненко А.А.^{1,2}, Вебер С.Л.^{1,2,3}, Мельников А.Р.^{1,3}

1 – Международный томографический центр СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

3 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов", г. Новосибирск, Россия

E-mail: a.samsonenko@tomo.nsc.ru

Дирадикалы – это молекулы с двумя неспаренными электронами. Они являются популярным объектом исследований в области молекулярных электронных устройств и спинтроники. Ключевыми характеристиками таких двухспиновых систем выступают времена спиновой релаксации. Один из возможных подходов к наблюдению их релаксационных процессов заключается в создании неравновесного поляризованного состояния путем быстрого термического возбуждения системы. Для резкого нагрева образца может быть использовано излучение с энергией, существенно меньшей, чем энергия электронных переходов, например, излучение терагерцового (ТГц) диапазона [1]. Анализ такой термически индуцированной релаксации даёт возможность определить времена релаксации в дирадикалах.

Мощным источником ТГц-излучения является Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ), который генерирует импульсное излучение мощностью до 500 Вт. Станция ЭПР спектроскопии НЛСЭ позволяет проводить стационарные, импульсные и времяразрешённые эксперименты и тем самым осуществлять характеризацию широкого класса магнитоактивных соединений.

В работе представлены результаты исследования дирадикала NFFN [2] методами стационарной и импульсной ЭПР-спектроскопии с использованием ТГц-излучения НЛСЭ. Для возбуждения спиновой динамики применялся метод температурного скачка, при котором образец, предварительно охлажденный до 4 К, подвергался резкому нагреву импульсами ТГц-излучения. Возникающая при этом термически индуцированная релаксация населенностей синглетного и триплетного состояний регистрировалась методом время-разрешенной и импульсной ЭПР спектроскопии. Полученные данные позволили количественно охарактеризовать скорости синглет-триплетных и внутритриплетных переходов.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-13-20039) и Новосибирской области (соглашение № 30-25-000858).

Литература:

- [1] Melnikov, A. R. et al. Inductive detection of temperature-induced magnetization dynamics of molecular spin systems. The Journal of chemical physics vol. 160, 22 (2024): 224201.
- [2] Fedyushin, P. et al. Synthesis of Nitroxide Diradical Using a New Approach. Molecules (2020), 25, 2701.

Генерация гармоник дальнего инфракрасного НЛСЭ в нелинейных материалах

Кубарев В.В., Потехин А.А., Шевченко О.А., Горбачёв Я.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: potekhinaleksandr.0101@gmail.com

Высокие импульсная и средняя по макроимпульсам мощности НЛСЭ дальнего инфракрасного диапазона (до 2 МВт и 3 кВт соответственно) позволяют проводить эффективные эксперименты по нелинейной оптике, в частности по генерации гармоник в нелинейных материалах. В докладе рассмотрены результаты экспериментов по генерации гармоник в различных нелинейных материалах. Наиболее успешными среди них оказались эксперименты с полупроводниковыми кристаллами InSb. На длине волны НЛСЭ 69 мкм с максимальной мощностью излучения в результате тщательной оптимизации многих параметров эксперимента получен рекордно высокий коэффициент конверсии этого излучения в третью гармонику (23 мкм). Эффект объясняется нелинейной динамикой свободных носителей (электронов) в этом материале. Сообщается также о результатах по генерации второй гармоники, основанной на нелинейном взаимодействии излучения первой гармоники НЛСЭ на длине волны 50 мкм с кристаллической решеткой InSb.

Разработка импульсного затвора рентгеновского излучения для исследования быстропротекающих процессов на источниках синхротронного излучения

Студенников А.А.¹, Пальчиков Е.И.¹, Прууэл Э.Р.¹, Плуман А.А.¹Станкевич С.В.¹,
Самойленко М.С.¹

1 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: aleksei.studennikov@mail.ru

Исследование ударно-волновых процессов с помощью синхротронного излучения активно развивается с 2001 г. в России [1] и, с 2009 г в общемировой практике. Развитие данной области исследования во многом обусловлено стремительным ростом источников синхротронного излучения (СИ) и развитию методологии и аппаратного обеспечения исследований быстропротекающих процессов.

Одна из проблем регистрации быстропротекающих процессов на источниках СИ с ударными испытаниями лайнеров, метаемых импульсными пневматическими устройствами (пушками), срабатывающими в случайный момент при разрыве мембраны, является создание быстрого затвора, открывающего канал пучка СИ с задержкой не более 100 мкс от подачи импульса синхронизации. Желательно с разбросом во времени не более 1 мкс.

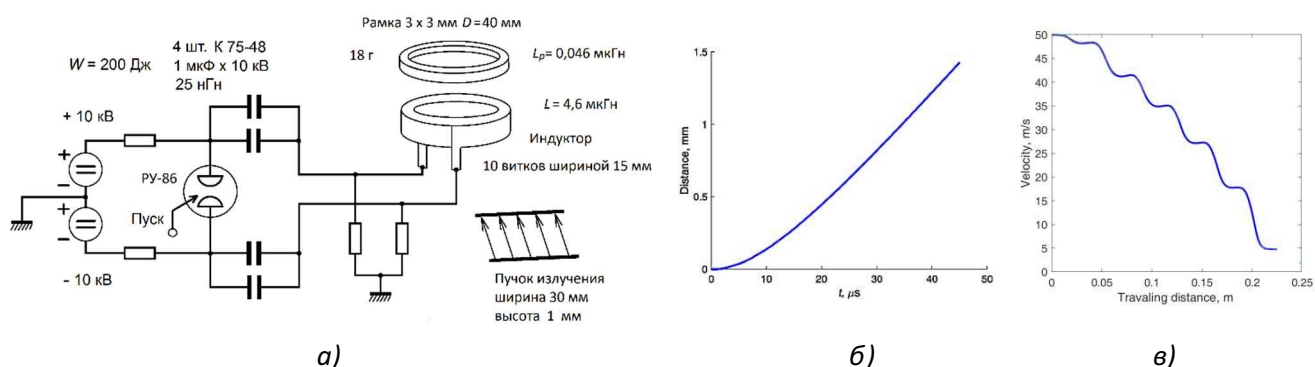


Рис. 1. а) Принципиальная схема затвора; б) Динамика разгона затвора; в) Динамика торможения.

В работе приводится схема, описание конструкции и расчетные параметры создаваемого для станции 1.3 СКИФ импульсного рентгеновского электромагнитного затвора (рис. 1). Затвор в виде медного кольца метается импульсным магнитным полем с ускорением порядка 100000 g (рис. 1б), открывая канал за время около 50 мкс. После срабатывания дальнейшее торможение затвора осуществляется цепочкой встречно включенных неодимовых магнитов (рис. 1в), до скорости на порядок меньшей от максимально достигнутой, что соответствует стократному снижению энергии удара кольца о демпфер.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в лице Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2025-459.

Литература:

- [1] И. А. Рубцов, Ya. V. Zubavichus, K. A. Тен, Ё. R. Pruu  l, A. O. Kashkarov, K. Э. Купер, A.A. Студенников, B.P. Tolochko, L. Shekhtman. Conceptual Design of a Synchrotron Beamline Dedicated to Ultrafast Time-Resolved Small-Angle X-Ray Scattering / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. V.87. N5. P.600-603. DOI: 10.3103/s1062873822701751.

Влияние топологии внутренней структуры полимерных материалов на параметры распространения ударных волн

Плуман А.А.¹, Студенников А.А.¹, Прууэл Э.Р.¹, Девушкин М.П.¹, Кашкаров А.О.¹

1 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

В настоящее время особенно интенсивно набирает популярность использование аддитивных технологий, позволяющих создавать метаматериалы с заданной плотностью и акустическим импедансом для задач демпфирования взрывных нагрузок. [1] В работе представлены результаты экспериментального исследования эволюции ударно-волновых возмущений в полимерных средах (ПММА, ABS-пластик) с контролируемой внутренней структурой. Целью работы являлось определение влияния топологии заполнения (структуры по форме гироида и сот) и базового материала (оргстекло и ABS-пластика) на затухание ударной волны, инициированной детонационным цилиндрическим осесимметричным нагружением от заряда ТГ 50/50.

Экспериментальная диагностика проводилась на источнике синхротронного излучения (СИ) (ЦКП «СЦСТИ») методом скоростной рентгенографии. Данный метод позволяет регистрировать положение фронта ударной волны и плотности на луче в малоконтрастных полимерных средах с временным разрешением 124 наносекунды.

Экспериментальная постановка представляет собой цилиндрические «рубашки» высотой 60 мм с осевым каналом, в котором размещался заряд взрывчатого вещества ТГ 50 соответствующего диаметра. Серия включала 6 экспериментов, разделенных на три логические группы сравнения:

Результаты исследования показали, что топология заполнения и форм-фактор структуры слабо влияет на распространение ударной волны в материале в приведенном диапазоне нагружений. По экспериментальным данным восстановлена ударная адиабата некоторых полимерных материалов в доступной области нагружений.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в лице Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2025-459.

Литература:

[1] А.И. Клёнов, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, В.В. Астафьев, Е.Б. Смирнов, А.Ю. Гармашев. Влияние топологии сетчатых структур на динамические свойства сплава Al-Cu-Mg-Si, полученного технологией 3D-печати. Физика горения и взрыва, 2024, т. 60, № 6.

Измерение ударной адиабаты в аддитивном материале PETG с помощью синхротронного излучения

Девушкин М. П.¹, Кашкаров А. О.^{1,2}, Тен К. А.^{1,2}, Плуман А. А.¹, Студенников А. А.¹

1 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Сибирское Отделение Российской Академии Наук

E-mail: mihaildevuskin0970@gmail.com

В работе исследовались ударно-волновые свойства материала PETG, изготовленного по аддитивной технологии. Образцы нагружались метаемым взрывом медным ударником в вакууме (0,04 абс. атм.) или атмосфере в диапазоне скоростей от 800 м/с до 950 м/с.

Измерения проводились методом скоростной рентгенографии с помощью синхротронного излучения на экспериментальной станции исследования быстропротекающих процессов в ЦКП «СЦСТИ» на накопителе ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН).

Для исследований были изготовлены на 3D принтере (FLYINGBEAR S1) цилиндрические образцы PETG двух плотностей (0,6 и 0,75 г/см³) и различной структурой заполнения при печати (гироид, соты).

Полученные результаты показали, что в данном диапазоне ударных волн структура заполнения не влияет на ударно-волновые свойства материала. Однако экспериментально обнаружено различие между точками на ударных адиабатах, полученных в различных условиях давления окружающей среды (вакуума и атмосферы). При нанесении экспериментальных данных на *Du*-диаграмму видно, что точки, полученные в разряженной атмосфере, лежат заметно ниже, чем полученные при атмосферном давлении.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в лице Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2025-459.

Измерения протяженной тонкой структуры спектров поглощения белковых монослоев на жидкости

С.С. Савин¹, А.В. Рогачев¹, Н.Н. Новикова¹, А.А. Вологжанникова², М.Е. Пермякова², А.Л. Тригуб¹, С.Е. Пермяков², С.Н. Якунин¹

1 - Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

2 - Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино Московской области

E-mail: s.sergei.savinn@gmail.com

Представленные исследования посвящены развитию метода рентгеновской спектроскопии поглощения для структурной диагностики двумерных белковых комплексов, сформированных на поверхности жидкой субфазы. Разрабатываемая методика объединяет сразу несколько выигрышных стратегий: возможность изучать динамику локальной структуры металlosвязывающих центров в белковых молекулах в условиях, приближенных к физиологическим; не требуется проведение кристаллизации; изменяя химические и физические свойства субфазы, можно моделировать различные условия функционирования биомакромолекул в живых клетках в норме и патологии.

Метод рентгеновской спектроскопии поглощения был использован для изучения координационного окружения цинка в белках семейства S100. Представители семейства многофункциональных регуляторных Ca^{2+} -связывающих белков S100 используются в качестве диагностических маркеров и терапевтических мишеней в ряде социально значимых заболеваний. Тогда как Ca^{2+} -связывающие свойства белков S100 и их роль в кальциевой сигнализации достаточно хорошо изучены, их Zn^{2+} -связывающие свойства и влияние Zn^{2+} на активность белков S100 изучены в гораздо меньшей степени. Связывание ионов цинка способно модулировать свойства как апо-формы белка S100, так и его Ca^{2+} -связанной формы. Несмотря на наличие в белках S100 отдельных Zn^{2+} -связывающих центров, известна способность Zn^{2+} конкурировать с Ca^{2+} за Ca^{2+} -связывающие центры белков S100 (два мотива типа «EF-рука»).

Белковые монослои S100B и S100P человека формировали на поверхности буферного раствора в ленгмюровской ванне. Измерения во флуоресцентной моде в скользящей геометрии выполнены на станции «Ленгмюр» Курчатовского источника синхротронного излучения (г. Москва). Эксперименты проведены при температуре 30° С. Для измерения протяженной структуры за краем поглощения была разработана методика позиционирования кристалла-монохроматора по дискретным точкам энергетического диапазона. Методика основана на использовании пропорционально-интегрального алгоритма для стабилизации углового положения кристалла-монохроматора. Разработанный алгоритм позволяет достичь точности позиционирования со среднеквадратическим отклонением 0.01 эВ по энергии (менее 0.05° по углу) в многопроходном режиме измерений. Это обеспечило возможность надежного выделения осциллирующих зависимостей спектра поглощения вблизи и за краем поглощения.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 25-14-00223.

Экспериментальное определение порога подавления СИ люминесценции на зёрненных границах

Завьялов А.П.¹, Ворновских А.А.², Косьянов Д.Ю.²

1 – Отдел синхротронных исследований в высокоэнергетическом диапазоне, ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

*2 – НОЦ «Передовые керамические материалы»,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

E-mail: Zav_Alexey@list.su

Использование керамических люминофоров представляется перспективным подходом для конструирования сверхъярких источников белого цвета благодаря их термической устойчивости, что позволяет значительно увеличивать мощность накачки [1]. Между тем улучшения механических характеристик таких материалов можно достичь за счёт уменьшения размеров зерна. Часто рассматривается создание бифазных керамик, где основную роль люминесцентного материала играет фаза граната, допированного редкими землями, а в качестве второй фазы рассматривается корунд, что позволяет улучшить теплопроводность керамики в целом [2, 3]. При получении бифазных керамик запускаются механизмы самоограничивающегося роста размера зёрен входящих в её состав фаз, что способствует увеличению концентрации межфазных границ. Дополнительное рассеяние света на межфазных границах рассматривается в качестве положительного влияния на целевые свойства материала, поскольку позволяет увеличить степень конверсии используемого для накачки синего света [4]. Таким образом можно заключить, что есть различные резоны формирования мелкозёрненной структуры в конечном материале керамического люминофора.

Вместе с тем ясно, что зёрненные границы выступают в роли губительных дефектов для возбуждений решётки, которые должны быть конвертированы в свет. Полученные нами данные по спектрам люминесценции, полученным при возбуждении СИ на станции Б «Люминесценция с временным разрешением» (<https://ssrc.biouml.org/#!page/vepp3station6>) канала 6 накопительного кольца ВЭПП-3 [5] на УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ЦКП СЦСТИ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [6], для бифазных керамик Al_2O_3 –Ce:YAG с различной концентрацией Ce и различным размером зерна позволили построить простую пороговую модель для описания и определить критическое соотношение между концентрацией Ce и размерами зерна керамики, при которой происходит значительное подавление процесса люминесценции.

Благодарности: Исследования с использованием данных СИ поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042). Получение модельных образцов керамических люминофоров поддержано Российским научным фондом (Проект № 25-73-10179). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Литература:

[1] Lenef A. et al. // Proc., XIII ICSSL. 2014. V. 9190. P. 91900C. DOI: 10.1117/12.2061864

- [2] Liu X. et al. // J. Eur. Ceram. Soc. 2019. V.39, I. 6. P. 2149–2154. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.054
- [3] Kang T. et al. // J. Lumin. 2020. V. 222. P. 117077. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117077
- [4] Tang Y. et al. // Opt. Express. 2015. V. 23, I. 14. P. 17923–17928. DOI: 10.1364/OE.23.017923
- [5] Zinin E.I., Pustovarov V.A. // Изв.вузов. Физика. 2006. Т. 49, № 4. С. 165–168.
- [6] Piminov P.A. et al. // Phys. Procedia.2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005

Перспективы люминесцентных спектроскопических методик в ЦКП «СКИФ»

Завьялов А.П.¹, Пустоваров В.А.², Каменских И.А.³,
Ивановских К.В.⁴, Мешков О.И.⁵, Косьянов Д.Ю.⁶

*1 – Отдел синхротронных исследований в высокоэнергетическом диапазоне,
ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия*

*2 – Кафедра экспериментальной физики,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

*3 – Кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*4 – Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, Москва, Россия*

5 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*6 – НОЦ «Передовые керамические материалы»,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

E-mail: Zav_Alexey@list.ru

Методики люминесцентной спектроскопии входили в первоначальный проект развития ЦКП «СКИФ» для реализации в отдалённой перспективе. Первая концепция станции [1] рассматривала действующую станцию Б «Люминесценция с временным разрешением» (<https://ssrc.bioml.org/#!/page/vepp3station6>) на канале 6 накопителя ВЭПП-3 (ЦКП СЦСТИ, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия) [2], а также мировые аналоги: на канале BW3 (HASYLAB, DESY) [3], на станции Superlumi на канале I накопителя DORIS III (HASYLAB, DESY) [4] и на станции FINESTLUMI накопителя MAX IV (Lund, Sweden) [5, 6]. Актуальный проект станции [7] предполагает использование излучения из слабополюсного поворотного магнита, а также предлагает перенять опыт работы накопителя в «псевдооднобанчевом» режиме для станции люминесценции на MAX IV [8].

Большой интерес со стороны научного сообщества требует ускорить реализацию этих методик в ЦКП СКИФ, для чего рассматривается возможность постепенного их внедрения от более простых к более сложным реализациям. На первом этапе предлагается создание простой установки для постановки экспериментов при возбуждении белым рентгеновским пучком на техническом канале диагностики пучков. Далее возможна разработка мобильного модуля для постановки экспериментов сначала на станциях первой очереди при возбуждении монохроматическим рентгеновским пучком, а затем и на станции второй очереди «Спектроскопия и метрология мягкого рентгеновского диапазона» [9] при возбуждении монохроматическим, белым или розовым пучком мягкого рентгеновского и ВУФ диапазона. И на заключительном этапе – разработка и создание специализированной станции.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

Литература:

- [1] Пустоваров В.А., Иванов В.Ю. // Технологическая инфраструктура «СКИФ». 2022. Т.3. Статья 3-10.
- [2] Zinin E.I., Pustovarov V.A. // Изв.вузов. Физика. 2006. Т. 49, № 4. С. 165–168.
- [3] Moller T. // Synchrotron Radiat. News. 1993. V.6. P.16–18.
- [4] Zimmerer G. // Radiat. Meas. 2007. V.42. P.859–864.

- [5] Pankratov V. et al. // Radiat. Meas. 2019. V.121. P.91–98.
- [6] Pärna R. et al. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 2017. V.A859. P.83–89.
- [7] Завьялов А.П. и др. // Сбор. тез. Конгресс пользователей ЦКП СКИФ. 2025. С. 152.
- [8] The FinEstBeAMS beamline team // FinEstBeAMS beamline review report. September 2022.
- [9] Дмитриев А.М. и др. // Сбор. тез. Конгресс пользователей ЦКП СКИФ. 2025. С. 163.

In situ дифракционные исследования материалов энергетической отрасли с использованием синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3

Сыртанов М.С., Кашкаров Е.Б., Кудияров В.Н., Кроткевич Д.Г., Камелина К.Д.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
E-mail: mss12@tpu.ru

Разработка современных материалов водородной энергетики и атомной промышленности не представляется возможной без комплексного анализа структурно-фазового состояния, включая *in situ* эксперименты в эксплуатационных и аварийных условиях. Критически важным является получение данных об изменении фазового состава и структуры материалов в условиях близких к реальным непосредственно в процессе эксплуатации, а также возможных аварий (криогенные и высокие температуры, действие агрессивных сред, пониженное и повышенное давление и т.д.). Такие данные представляют не только фундаментальный, но и практический интерес, так как на их основе открывается возможность прогнозирования и оценки физико-механических свойств исследуемых материалов. Информация о структурно-фазовом состоянии материалов в экстремальных условиях может быть получена на основе данных *in situ* рентгеновской дифракции с использованием источников синхротронного излучения.

В представленной работе представлены результаты исследований структурно-фазовых превращений различных материалов энергетической отрасли, проведенные командами лаборатории перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем и отделения экспериментальной физики ТПУ в институте ядерной физики им. Будкера с использованием экспериментальных станций накопителя ВЭПП-3 за последние несколько лет. Показаны особенности оборудования станций, основные реакционных камеры, в которых проводились исследования, а также условия проведения экспериментов с временным разрешением. Показаны фазовые превращения в композитах $\text{Mo/Ti}_3\text{Al(Si)C}_2\text{-TiC}$ при высокотемпературном окислении на воздухе до 1300 °C с последующей выдержкой 30 мин. Выявлены особенности окисления двумерных карбидных материалов MXene Ti_3C_2 , Nb_4C_3 , Mo_2C и V_2C . Установлено, что десорбция водорода из композита на основе MgH_2 в интервале температур (350–560) K имеет двухстадийный характер. Также показаны фазовые превращения в композитах на основе MgH_2 с каталитическими добавками. Продемонстрированы фазовые переходы в сплавах Ti-3Al-5Mo-5V и Ti-6Al-4V в процессе газофазного наводороживания при температурах 450, 550 и 650°C. Выявлена эффективность подавления взаимной диффузии Cr и Zr при использовании барьерного Mo подслоя в системах Cr/Mo/Zr при нагреве до 1250 °C

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Государственного задания, проект № FSWW-2024-0001.

Фазовые переходы в титановом сплаве Ti-3Al-5Mo-5V, полученном проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологией, при газофазном наводороживании

Камелина К.Д.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: kdk11@tpu.ru

Несмотря на широкое распространение аддитивных технологий для изготовления деталей из титановых сплавов [1], существующие данные о поведении этого материала в среде водорода основаны на исследованиях литых изделий. Это создает проблему отсутствия данных о структурно-фазовых превращениях, протекающих в аддитивно полученном материале в условиях водородной среды. Без этих данных невозможно прогнозировать работу изделий, контактирующих с водородом. Целью данной работы было исследование фазовых переходов в титановом сплаве Ti-3Al-5Mo-5V, полученном проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологией, при газофазном наводороживании.

В работе исследованы образцы титанового сплава Ti-3Al-5Mo-5V, полученные методом проволоочного электронно-лучевого аддитивного производства и подвергнутые газофазному наводороживанию при температурах 450, 550 и 650°C. Методами оптической микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа проведена аттестация микроструктуры и фазового состава образцов перед насыщением водородом. Размеры образцов, подготовленных для дифракционных *in situ* измерений, составляли 5 мм × 5 мм × 0,1 мм. Измерения были выполнены на дифрактометре Shimadzu XRD-7000, оснащенном высокоскоростным детектором MYTHEN 1K (Dectris).

Образцы подвергались нагреву до необходимой температуры (450, 550 или 650°C) с последующим наводороживанием при данной температуре. Нагрев осуществлялся в высокотемпературной камере НТК 2000N. Газовая среда создавалась в системе, разработанной в Томском Политехническом Университете [2]. Наводороживание осуществлялось в две стадии: нагрев образцов до необходимой температуры в вакууме и выдержка при данной температуре в водородной атмосфере. Методом плавления в атмосфере инертного газа определено массовое содержание водорода в образцах после окончания процесса наводороживания.

По результатам выполненной работы продемонстрированы закономерности фазовых переходов аддитивно полученного сплава Ti-3Al-5Mo-5V при взаимодействии с водородом.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Государственного задания, проект № FSWW-2024-0001.

Литература:

- [1] Mosallanejad M. H., Abdi A., Karpasand F. et al. // Advanced engineering materials. 2023. V.25. P. 2301122.
- [2] Syrtanov M., Garanin G., Kashkarov E. et al. // Metals. 2020. V.10. P. 447.

Синхротронные исследования динамики фазообразования при высокотемпературном синтезе в механоактивированной порошковой смеси системы Ti-Al-B

Собачкин А.В.¹, Логинова М.В.¹, Ситников А.А.¹, Яковлев В.И.¹, Филимонов В.Ю.^{1,2},
Негодяев А.З.¹, Мясников А.Ю.^{1,3}, Шарафутдинов М.Р.^{3,4}, Толочко Б.П.^{3,5}, Розный А.А.¹,
Лакман Е.В.¹, Собачкин А.В.¹, Очаковский Я.В.¹

*1 – Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Барнаул, Россия*

2 – Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

3 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

5 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: anicpt@rambler.ru

С использованием метода синхротронного излучения изучена динамика процессов фазообразования при проведении высокотемпературного синтеза в режиме теплового взрыва для механоактивированной системы Ti-Al-B. Исследовано два состава: Ti (66 мас. %) + Al (18 мас. %) + B (16 мас. %) и Ti (68 мас. %) + Al (9 мас. %) + B (23 мас. %). Экспериментально выявлено, что процессы фазообразования имеют стадийный характер. Для обоих составов на этапе разогрева порошковой смеси при увеличении температуры происходят изменения в кристаллических ячейках Ti и Al, что выражается в сдвиге линий в сторону меньших углов – больших межплоскостных расстояний, рефлексы бора не регистрируются по причине его аморфного состояния. Фазовые изменения у обоих составов начинаются в твердой фазе, с образованием интерметаллидного соединения $TiAl_3$, как промежуточной фазы. Для первого состава температура образования $TiAl_3$ зафиксирована при ~ 559 °С, для состава с увеличенным содержанием бора – 617 °С. Далее в обоих случаях при достижении 660 °С алюминий плавится с образованием расплава Al-Ti, одновременно в расплаве, который ускоряет диффузию титана и бора, кристаллизуется TiB_2 . Взаимодействие титана и углерода обеспечивает основное тепловыделение и реализацию теплового взрыва. Во время реализации теплового взрыва единственной зафиксированной фазой является TiB_2 . Практически не изменяемые значения интенсивностей пиков диборида титана свидетельствуют об отсутствии взаимодействия его с расплавом Al-Ti. На этапе выдержки системы на 11 с после завершения реакции у состава Ti (66 мас. %) + Al (18 мас. %) + B (16 мас. %) из расплава кристаллизуется γ -TiAl. Кристаллизация γ -TiAl при синтезе второго состава происходит через 8 с после реализации теплового взрыва. При дальнейшем охлаждении в обоих составах при 918 °С и при 850 °С (соответственно) фиксируется образование второй интерметаллидной фазы $TiAl_3$. При этом в составе Ti (66 мас. %) + Al (18 мас. %) + B (16 мас. %) ее содержание больше. Для обоих составов в конечных продуктах фиксируются TiB_2 и алюминиды титана (TiAl и $TiAl_3$).

Благодарности: Работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2026-0005.

Разработка методик проведения энергодисперсионных исследований на сверхпроводящем ондуляторе СКИФ

Овсянник В.В.^{1,2}, Золотарев К.В.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», филиал Института Катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: ovsyannik2013@mail.ru

Одной из станций первой очереди проекта СКИФ является станция 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм». Как следует из названия, на данной станции планируется проводить исследования с использованием XAFS, а также ряда других энергодисперсионных методик. Ключевой особенностью данной станции является то, что в качестве источника излучения на ней будет использоваться сверхпроводящий ондулятор, а значит, на ней будет реализован новый подход проведения XAFS-спектроскопии.

В работе детально описаны два метода проведения XAFS-спектроскопии, которые планируется реализовать на станции 1-4. Первый метод заключается в том, чтобы постоянно изменять поле в ондуляторе, тем самым «перемещая гармонику вдоль спектра», и подстраивать под нее угол монохроматора, отражая максимум интенсивности гармоники для снятия каждой точки XAFS-спектра. Второй метод предполагает снятие нескольких точек XAFS-спектра с использованием одной ондуляторной гармоники, после чего происходит изменение поля в ондуляторе с «перемещением» гармоники и повторяется цикл снятия точек уже на «перемещенной» гармонике и так до тех пор, пока не будет снят весь спектр в нужном энергетическом диапазоне.

Для решения некоторых задач была написана программа, позволяющая проводить моделирование XAFS-спектроскопии на станции 1-4 с использованием реализуемых на ней методов. Интерфейс и некоторые функции, связанные с работой методов проведения XAFS-спектроскопии, в дальнейшем планируется интегрировать в программное обеспечение станции 1-4.

По результатам работы было произведено моделирование нескольких методов проведения XAFS-спектроскопии на станции 1-4, а также моделирование некоторых эффектов, связанных с реализуемыми методиками. Помимо этого, в работе была предложена новая «трехточечная схема» калибровки монохроматора, которая позволит при запуске станции провести надежную и точную калибровку двух-кристального монохроматора.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2026-0002).

Расположение молекул в электроосажденных пленках проводящих полимеров на углеродных поверхностях

Сюгаев А.В.¹, Маратканова А.Н.

1 – Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

E-mail: syual@mail.ru, syual@udman.ru

В работе проведено исследование структурной анизотропии пленок полианилина и полипиррола в зависимости от вида проводящей углеродной подложки, на которой проводилось электроосаждение пленок из водных растворов анилина и пиррола. Основные результаты получены на поверхности высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) и стеклоуглерода, представляющего собой по структуре фуллереноподобный материал. Для этих целей были проведены измерения линейного дихроизма рентгеновского поглощения (NEXAFS) сразу на двух краях поглощения (К края углерода и азота). Для анализа химической структуры полимера дополнительно были получены рентгеновские фотоэлектронные спектры полимера. Измерения выполнены на российско-немецком канале синхротрона BESSY II (Берлин).

Установлено, что пленки полианилина являются преимущественно разупорядоченными независимо от материала подложки. Для большинства пленок полипиррола наблюдался выраженный дихроизм NEXAFS-спектров, свидетельствующий о структурной анизотропии этих пленок. Для большинства тонких пленок характер и интенсивность изменений NEXAFS-спектров при смене геометрии измерений оказался одинаковым для поверхности ВОПГ и стеклоуглерода, что свидетельствует о слабом влиянии структуры подложки на молекулярную организацию пленок полипиррола. В спектрах обоих краев наблюдалось существенное уменьшение π^* -резонансов при переходе от скользящего к нормальному падению излучения, что может свидетельствовать о существовании преимущественной пространственной ориентации полипиррольных цепей в пленках. Похожий результат был получен ранее для железных подложек.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ темы 124021900079-9).

Литература:

[1] Syugaev A.V., Maratkanova A.N., Smirnov D.A. // J Solid State Electrochem. 2018. V. 22. P. 2127–2134.

Определение функции аппаратурного искажения из уравнения типа свертки

Коротаев Е.В.¹

1 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: korotaev@niic.nsc.ru

Рентгеновская абсорбционная и эмиссионная спектроскопия, а также рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия в настоящий момент являются эффективными и широко распространенными методами исследования и характеристики различного рода функциональных материалов. Соответствующие методы позволяют не только получить количественные данные о структуре и составе изучаемых материалов, распределении электронной и спиновой плотности на элементах, входящих в состав изучаемых материалов, но и исследовать электронное строение материалов. При этом рентгеновская абсорбционная спектроскопия позволяет изучать особенности распределения электронной плотности в зоне проводимости, тогда как рентгеновская эмиссионная и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия позволяют получить аналогичную информацию о строении валентной зоны. Наиболее продуктивным в данном случае является подход, заключающийся в совместном использовании соответствующих экспериментальных методов высокоэнергетической спектроскопии и теоретических методов современной квантовой химии. При этом необходимо отметить, что структура рентгеновских и рентгеновских фотоэлектронных спектров хотя и связана с распределениями электронной плотности, но усложнена наличием аппаратурного искажения и ширины внутреннего уровня. Экспериментальный рентгеновский спектр может быть представлен в виде уравнения типа свертки

$$F(E) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(E)\varphi(E - E_0)dE ,$$

где E - энергия фотона, $F(E)$ - искаженная аппаратурой экспериментальная кривая, $f(E)$ - истинная форма кривой, $\varphi(E - E_0)$ - функция искажения, E_0 - спектральное положение предельно узкой линии.

В данном случае наблюдается определенный произвол в выборе функции искажения, которая либо постулируется, либо подбирается из соображения наилучшего соответствия экспериментальных и полученных на основе распределений электронной плотности модельных спектров.

В настоящей работе уравнение типа свертки было использовано для нахождения функции аппаратурного искажения в явном виде на основе распределений плотностей состояний (DFT, пакеты BAND и FDMNES) и экспериментальных рентгеновских и рентгеноэлектронных спектров ряда модельных соединений. Полученные с использованием метода регуляризации по Тихонову функции аппаратурного искажения позволили получить хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими К-краями поглощения меди Cu, CuO, Cu₂O, L α -спектрами меди и рентгеноэлектронными спектрами валентных полос для слоистого дисульфида меди-хрома CuCrS₂.

Излучение закрученных фотонов, создаваемое релятивистской частицей, двигающейся в эллиптическом вигглере, заполненном средой

Лазаренко Г.Ю.¹, Малыгина Н.И.¹,

1 – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: lazarenko@tpu.ru

Закрученными фотонами называют кванты электромагнитного поля, обладающие определенным значением проекции орбитально углового момента (ОУМ) на ось распространения [1]. Это приводит к характерной винтовой структуре фазового фронта и нулевой интенсивности вдоль оси распространения. Закрученные фотоны способны передавать свой ОУМ объектам, с которыми они взаимодействуют.

Если вигглер круговой, то в нем возникает правило отбора, согласно которому номер гармоники излучения равен ОУМ излучаемых фотонов [1]. В случае же плоского и эллиптического вигглеров правило отбора есть: сумма номера когерентной гармоники излучения и ОУМ излучаемого фотона равна чётному числу [1-3]. Таким образом, данные устройства не могут быть использованы для создания чистых закрученных фотонов, и круговой ондулятор является предпочтительным.

Мы исследуем влияние среды на правило отбора в эллиптическом ондуляторе и устойчивость правил отбора к несовершенству круговых ондуляторов в релятивистском случае. Нами были получены явные выражения для спектрально-углового распределения закрученных фотонов. В случае заполнения вигглера однородной и изотропной средой полученные ранее правила отбора не нарушаются. При этом наличие среды позволяет создавать излучение с большими значениями ОУМ.

Создаваемые в вигглерах и ондуляторах закрученные фотоны могут быть использованы для возбуждения подавленных и запрещенных переходов в атомах [4], молекулах [5], тонких полупроводниковых плёнках [6] и возбуждать гигантский мультипольный резонанс [7].

Литература:

- [1] Bogdanov O. V., Kazinski P. O., Lazarenko G. Yu. // Probability of radiation of twisted photons by classical currents. Phys. Rev. A, Vol. 97, P. 033837 (2018).
- [2] Kazinski P. O., Ryakin V. A. // Radiation of twisted photons in elliptic undulators. Russian Physics Journal, Vol. 64, P. 717 (2021).
- [3] Bogdanov O. V., Kazinski P. O., Lazarenko G. Yu. // Probability of radiation of twisted photons in an inhomogeneous isotropic dispersive medium. Phys. Rev. A, Vol. 100, P. 043836 (2019).
- [4] Knyazev B. A., Serbo V. G. // Beams of photons with nonzero orbital angular momentum projection: new results. Phys. Usp., Vol. 61, P. 449-479 (2018).
- [5] Maslov M., Koutentakis G. M., Hrast M., Heckl O. H., Lemeshko M. // Theory of angular momentum transfer from light to molecules. Phys. Rev. Research, Vol. 6, P. 033277 (2024).
- [6] Kazinski P. O., Ryakin V. A. // Photoexcitation of planar Wannier excitons by twisted photons. Annals Phys., Vol. 455, P. 169365 (2023).
- [7] Kazinski P. O., Sokolov A. A. // Excitation of Multipolar Transitions in Nuclei by Twisted Photons. Physics of Atomic Nuclei, Vol. 87, P. 561-569 (2024).

Генерация волн с ОУМ в синхротронном излучении

Лазаренко Г.Ю.¹, Малыгина Н.И.¹,

1 – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: nim8@tpu.ru

Синхротронное излучение является источником волн в широком диапазоне энергий. Исследования последних лет, показали, что оно является источником закрученных волн [1].

Нами было рассмотрено излучение, создаваемое электроном, который движется в локально постоянном и однородном электромагнитном поле. На основе статьи [2], мы получили простую формулу, описывающую спектрально-угловое распределение закрученной волны. Используя полученную формулу, мы исследовали зависимость излучённой энергии от ОУМ (см. рис.1).

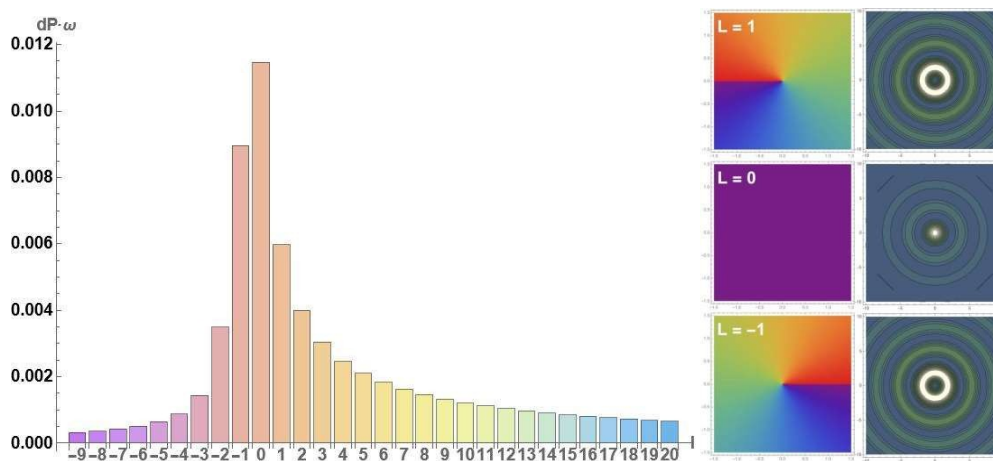


Рис. 1. Слева: зависимость излученной энергии от ОУМ. Справа: фаза и интенсивность Бесселевой волны для доминирующих в излучённой энергии значений ОУМ.

Отметим, что картина для излученной энергии не поменяется при одновременной замене знаков у ОУМ и круговой поляризации. Это следствие общего правила симметрии для волн с ОУМ, излучаемых зарядами, движущимися по плоским траекториям.

Волны с ОУМ представляют собой интерес, так как дают возможность управлять вращательными степенями свободы объектов за счет передачи им ОУМ при фотопоглощении [3]. В работе было показано, что ОУМ, переносимый волной, позволяет возбуждать переходы определенной мультипольности в ядрах [4].

Литература:

- [1] Afanasiev G.N., Kartavenko V.G., Stepanovsky Yu. P. // On synchrotron radiation, J. Phys. D 33 1803.
- [2] Bogdanov O. V., Kazinski P. O., Lazarenko G. Yu. // Probability of radiation of twisted photons by classical currents, Phys. Rev. A 97 (2018), с. 033837.
- [3] Сербо В.Г., Князев Б.А. // Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты. УФН, 188 508–539 (2018).
- [4] Казинский П.О., Соколов А.А.// Индуцирование мультипольных переходов в ядрах закрученными фотонами, Ядерная физика, 2024, том 87, №4, с.355-362.

Трехмерный объёмный растр для пространственной фильтрации рассеянного рентгеновского излучения

Пальчиков Е.И.¹, Баев С.Г.², Генцелев А.Н.³, Долгих А.В.¹, Шеплев Б.В.⁴

1 – Институт гидродинамики СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – ООО «Дентал-Сервис» 630055, Новосибирск, Россия

E-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

В случае рентгеновской съёмки объекта в параллельном или сферически расходящемся пучке излучения возникают рассеянные объектом лучи, усложняющие и искажающие картину на детекторе. Обычно, для фильтрации такого вторичного излучения при медицинской рентгеновской съёмке применяются растры в виде чередующихся плоских ламелей, ориентированных на фокус излучения. В задачах с нерасходящимся исходным пучком, наоборот, иногда необходимо выделить рассеянное излучение от объекта, ослабив прямой параллельный пучок излучения.

В работе рассмотрен изготовленный гексагональный трехмерный растр размером 20×30 мм с фокусным расстоянием 260 мм с шестигранными отверстиями, полученными лазерной гравировкой танталовых фольг толщиной 32 мкм. Фольги разнесены в пространстве при помощи рентгенопрозрачных пленок, в четыре раза превышающих толщину фольг, что, тем не менее, не мешает отфильтровывать все лучи, кроме исходящих из фокуса.

Рассмотренный растр может применяться для рентгеновской съёмки малогабаритных объектов, например в дентальной визиографии [1] при съёмке с дистанции 260 мм. Либо, в случае параллельных пучков синхротронного излучения, можно выделять вторичные рассеянные лучи от объекта, помещенного в фокусе растра.

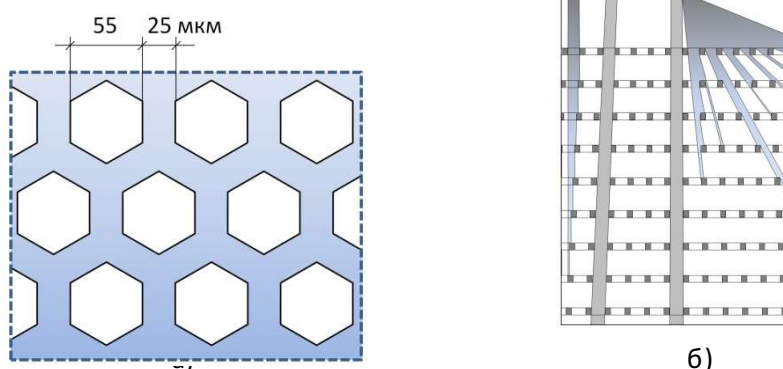


Рис. 1. а) Схема отверстий в первом слое растра; б) прохождение лучей, идущих из фокуса, фильтрация вторичного излучения от объекта и фильтрация прямого параллельного пучка в стороне от центра растра.

Литература:

[1] Nazmov, V.P.; Sheplev, B.V. ; Palchikov, E.I. ; Dolgikh, A.V. ; Samoylenko, M.S. ; Saloshenko, T.V. Application of LIGA Rasters for the Filtration of Scattered Radiation in Dental Radiography. J. Surf. Investig. 17 (Suppl 1), S265–S270 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1027451023070388>.

Фазовая эволюция и термическая стабильность *in situ* композита ВТ6–В₄С, полученного методом прямого лазерного выращивания

Герцель И.С.^{1,2}, Маликов А.Г.¹, Шмаков А.Н.²

1 – Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» ФИЦ «Институт катализа СО РАН»,
Новосибирск, Россия

E-mail: gertsel@itam.nsc.ru, i.s.gertsel@srf-skif.ru

Авиационный титановый сплав ВТ6, относящийся к классу ($\alpha+\beta$)-сплавов, характеризуется низкой износостойкостью в условиях граничного и сухого трения, что ограничивает его применение в нагруженных узлах трения [1].

Анализ доступных механизмов дисперсного упрочнения металлических матриц — твердорастворного, граничного и дисперсного — показывает, что для решения задачи повышения износостойкости наибольшим потенциалом обладает дисперсный механизм, предполагающий введение твердых, тугоплавких частиц. Этим требованиям в полной мере отвечает карбид бора (В₄С) [2].

Мировой опыт показывает, что при получении композитов методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ) в силу нестационарности процесса протекает множество реакций. Частицы В₄С диссоциируют, выделяя реагенты для образования вторичных карбидов и боридов, поэтому такие материалы корректно относить к *in situ* композитам [3].

Одним из перспективных методов диагностики является дифракция синхротронного излучения (СИ) с высоким временным разрешением. При этом фокус настоящего исследования направлен на твердофазные превращения в интервале температур, соответствующих условиям эксплуатации и термической обработки материала.

Исследование выполнено на УНУ «ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» (ИЯФ СО РАН) на 6-м канале накопителя ВЭПП-3 в геометрии Вульфа — Брэгга ($\lambda = 1.01 \text{ \AA}$) при нагреве покрытий в интервале 23–1100 °С [4].

Выполнен рентгеноструктурный анализ и установлена эволюция фазового состава. Выявлена корреляция между режимами ПЛВ и концентрацией вторичных фаз. Проведено комплексное сравнение *in situ* дифракции СИ с *ex situ* методиками.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Соглашение № 075-15-2025-459.

Литература:

- [1] Gialanella S., Malandrucolo A. Aerospace Alloys. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [2] Alman D. E., Hawk J. A. The abrasive wear of sintered titanium matrix–ceramic particle reinforced composites // Wear. 1999. Т. 225–229. С. 629–639.
- [3] Nartu M. S. K. K. Y. и др. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B₄C composites // Scr. Mater. Acta Materialia Inc, 2020. Т. 183. С. 28–32.
- [4] Piminov P. A. и др. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // Phys. Procedia. 2016. Т. 84. С. 19–26.

Применение СИ-методик для исследования $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ce}^{3+}:(\text{Y,Tb})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ керамик

Завьялов А.П.¹, Кривенцов В.В.¹, Ворновских А.А.², Косьянов Д.Ю.²

1 – ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

2 – НОЦ «Передовые керамические материалы»,

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: Zav_Alexey@list.ru

Совместное легирование ионами Ce^{3+} и Tb^{3+} рассматривается в качестве механизма управления сцинтилляционными характеристиками гранатов [1] или параметрами цветопередачи люминофоров на основе гранатов [2]. При этом наблюдается комплексное взаимодействие электронных возбуждений между этими ионами в решётке граната, для явного проявления которого необходимо возбуждение фотонами достаточно жёсткой энергии. Получены данные по спектрам люминесценции при возбуждении белым пучком СИ композитных керамик $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ce}^{3+}:(\text{Y,Tb})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ на станции Б «Люминесценция с временным разрешением» (<https://ssrc.biouml.org/#!/page/vepp3station6>) канала 6 накопительного кольца ВЭПП-3 [3, 4] на УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ЦКП СЦСТИ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [3, 5], в особенностях спектра которых проявляется это сложное взаимодействие. Также получены данные о кинетике СИ люминесценции на характеризующих это взаимодействие линиях. Для уточнения состояния ионов Tb в этих системах получены XANES спектры на L3-крае на станции «EXAFS-спектроскопия» (<https://ssrc.biouml.org/#!/page/vepp3station8>) на канале 8 накопительного кольца ВЭПП-3 [3, 6].

Благодарности: Исследования с использованием СИ поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. Получение образцов керамических люминофоров поддержано Российским научным фондом (Проект № 25-73-10179). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Литература:

- [1] Korzhik M. et al. // J. Lumin. 2024. V. 265. P. 120226. DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.120226
- [2] Cheng J. et al. // J. Eur. Ceram. Soc. 2025. V.45. P. 117333. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117333
- [3] Винокуров З.С. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 2025. Т. 89, №9. С. 1350–1363. DOI: 10.7868/S30346460525090015
- [4] Zinin E.I., Pustovarov V.A. // Изв.вузов. Физика. 2006. Т. 49, № 4. С. 165–168.
- [5] Piminov P.A. et al. // Phys. Procedia.2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
- [6] Kriventsov V.V. // Book of Abs. SFR-2022. 2022. P. 115.

СИ люминесценция и дифракция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ce}^{3+}:(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_4\text{GaO}_{12}$ керамик

Завьялов А.П.¹, Ворновских А.А.², Косьянов Д.Ю.²

1 – Отдел синхротронных исследований в высокоэнергетическом диапазоне, ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

2 – Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: Zav_Alexey@list.ru

Низкий индекс цветопередачи коммерчески-доступных желтых люминофоров Ce:YAG препятствует их широкому применению для создания качественных источников белого цвета. Для расширения и смещения спектра свечения основной линии свечения Ce^{3+} и улучшения этого параметра используется подход искажения кристаллического поля путём создания твёрдых растворов граната. Замещение Y более крупными атомами Gd приводит к увеличению кристаллической решётки, уменьшению уровня 4f атома Ce и смещению линии в красную область спектра, а вариация локального окружения атомов Ce при неполном замещении Al на Ga в больше степени влияет на положение $5d_1$ и $5d_2$ уровней соответствующих атомов, что приводит к высвечиванию разными атомами немного на разной длине волны и расширению общего спектра свечения [1]. В тоже время для улучшения теплопроводности керамических люминофоров на базе гранатов перспективным считается создание бифазных керамик с корундом в качестве второй фазы [2, 3].

В настоящей работе получены спектры люминесценции и измерена кинетика люминесценции на основной линии свечения Ce^{3+} при возбуждении белым пучком СИ композитных керамик $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ce}^{3+}:(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_4\text{GaO}_{12}$ на станции Б «Люминесценция с временным разрешением» (<https://ssrc.biouml.org/#!/page/vepp3station6>) канала 6 накопительного кольца ВЭПП-3 [4, 5] на УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ЦКП СЦСТИ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [4, 6]. Также получены картины двумерной дифракции с целью поиска примесных фаз низкой концентрации на станции «Дифрактометрия в «жестком» рентгеновском диапазоне» (<https://ssrc.biouml.org/#!/page/vepp3station4>) канала 4 накопительного кольца ВЭПП-3 [4, 7].

Благодарности: Исследование выполнено в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Дальневосточного федерального университета (Проект № FZNS-2026-0023). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Литература:

- [1] Nargelas S. et al. // J. Lumin. 2022. V. 242. P. 118590. DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118590
- [2] Liu X. et al. // J. Eur. Ceram. Soc. 2019. V.39, I. 6. P. 2149–2154. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.054
- [3] Kang T. et al. // J. Lumin. 2020. V. 222. P. 117077. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117077
- [4] Винокуров З.С. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 2025. Т. 89, №9. С. 1350–1363. DOI: 10.7868/S30346460525090015
- [5] Zinin E.I., Pustovarov V.A. // Изв.вузов. Физика. 2006. Т. 49, № 4. С. 165–168.
- [6] Piminov P.A. et al. // Phys. Procedia.2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
- [7] Ancharov A.I. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2001. V. 470, I. 1–2. P. 80–83. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01029-4

Исследование уровня накопления йода в опухолевых тканях иммунодефицитных мышей при инфицировании вирусом осповакцины с трансгеном симпортера йодида натрия: данные рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении

Лапшин К.А.¹²⁴, Дроков Д.В.³⁴, Ткачева А.В.³, Гражданцева А.А.³, Легкодымов А.А.¹²,
Кочнева Г.В.³

- 1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
2 – ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия
3 – Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор»
Роспотребнадзора, Кольцово, Россия
4 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: k.a.lapshin@q.nsu.ru

Тераностика — направление, объединяющее терапию и диагностику, — активно развивается в онкологии. Перспективным направлением исследований являются онколитические вирусы, способные селективно реплицироваться в опухолевых клетках и активно лизировать их. Методы генной инженерии позволяют встраивать в вирусный геном трансгены, кодирующие репортёрные белки. Такие белки обеспечивают накопление контрастных агентов в заражённых клетках [1]. ГНЦ ВБ «Вектор» разрабатывает онколитического вирус на основе осповакцины с трансгеном симпортера йодида натрия (NIS). Цель данной работы — оценить степень накопления йода в опухолевых тканях в зависимости от применения лекарственного вируса.

В эксперименте участвовало 36 иммунодефицитных мышей с привитыми ксенографтами опухоли А-431. Животные были разделены на три группы: контрольная группа (15 мышей) — получали инъекцию 25 мл раствора йодида натрия; вирусная группа (15 мышей) — получали аналогичную инъекцию и инфицировались штаммом N21-VV-P11mNIS-Apo; нулевой контроль (6 мышей) — без дополнительного вмешательства. После вывода мышей из эксперимента опухолевые ткани лиофилизировали и спрессовали в таблетки диаметром 6 мм.

Концентрацию йода в образцах определяли методом РФА на синхротронном излучении накопительного кольца ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН с применением метода внешнего стандарта. Проведён статистический и сравнительный анализ данных. В вирусной группе выявлен значимый рост концентрации йода по сравнению с контрольной группой. В обеих группах концентрация йода имеет порядок 10^4 ppm. В группе нулевого контроля йод обнаружен в концентрации порядка единиц ppm.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП «СКИФ»; ИК СО РАН (FWUR-2024-0042)

Литература:

[1] Семенова, А.В., Гражданцева, А.А., Сиволобова, Г.Ф. [и др.]. Рекомбинантный вирус осповакцины, экспрессирующий симпортер натрия/йодида, для тераностики злокачественных опухолей с использованием синхротронного излучения // Биотехнология. – 2023. – Т. 39. – № 5. – С. 97-107.

Структурные исследования $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ оксида, перспективного для применения в качестве воздушного электрода в твердооксидных топливных элементах и электролизерах

Брагина О.А.¹, Хохлова М.О.¹, Шубникова Е.В.¹, Кривенцов В.В.^{1,2}, Немудрый А.П.¹

1 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП СКИФ, Кольцово, 630559, Россия

E-mail: bragina@solid.nsc.ru

Нестехиометрические оксиды со структурой перовскита, обладающие смешанной кислород-электронной проводимостью, являются перспективными электродными материалами для твердооксидных топливных элементов и электролизеров. Однако их коммерциализация сдерживается нестабильностью воздушного электрода и поляризационными потерями, особенно при снижении рабочей температуры. В связи с этим актуален поиск новых составов, сочетающих высокую электрохимическую активность с долговременной стабильностью. Одним из эффективных подходов является допирование А- и В-позиций структуры перовскита $\text{ABO}_{3-\delta}$ [1]. Введение щелочноземельных металлов увеличивает концентрацию кислородных вакансий и ускоряет реакцию восстановления кислорода, а замещение в В-подрешётке переходными металлами (Co, Ni) позволяет оптимизировать транспортные свойства и стабильность. Цель настоящей работы – исследование влияния допирования никелем на структуру $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ оксидов.

Исследуемые материалы были синтезированы керамическим методом с последующим отжигом на воздухе при 1260 °С. Фазовый состав и локальную структуру полученных оксидов $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ изучали с использованием рентгеновской дифракции, мессбауэровской спектроскопии и абсорбционной спектроскопии (XANES). Спектры XANES (Fe-K, Co-K, Ni-K) исследованных образцов были записаны на станции EXAFS спектроскопии (8 канал, СЦСТИ, Новосибирск). Методом XANES спектроскопии по выходу флуоресценции с селективной отсечкой фона выполнено комплексное исследование, получена новая информация о зарядовых состояниях и симметрии ближайшего окружения в оксидных образцах. Данные, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой. С помощью высокотемпературной рентгеновской дифракции проанализирована эволюция структуры материалов в рабочих условиях воздушного электрода ТОТЭ (600–800 °С).

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 26-13-00527.

Работа частично (развитие методик рентгеновской спектроскопии на СИ и регистрация XANES спектров) выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ рамках государственного задания ЦКП СКИФ.

Литература:

[1] Tarutin A.P., Filonova E.A., Ricote S., Medvedev D.A., Shao Z. // Sustain. Energy Technol. Assess. 2023. V.57. art. 103185

Структурные и электрохимические характеристики катодного материала ТОТЭ на основе $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Cu}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($x=0-0.20$)

Хохлова М.О.¹, Шубникова Е.В.¹, Кривенцов В.В.^{1,2}, Брагина О.А.¹, Немудрый А.П.¹

1 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП СКИФ, Кольцово, 630559, Россия

E-mail: khokhlova@solid.nsc.ru

В настоящее время твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), привлекают все большее внимание благодаря высокой эффективности преобразования энергии, экологичности и возможности использования различных видов топлива [1]. Поиск катодных материалов, обладающих высокой каталитической активностью и стабильностью при работе в среднетемпературном диапазоне (500–800 °C), является одной из ключевых задач в области исследований ТОТЭ [2]. Материалы на основе феррита лантана-кальция с перовскитоподобной структурой являются перспективными для использования в качестве катода ТОТЭ.

В данной работе были синтезированы и исследованы материалы на основе $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Cu}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($x=0-0.20$). Синтез оксидов $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Cu}_x\text{O}_{3-\delta}$ осуществлялся с помощью твердофазного метода. Полученные образцы были охарактеризованы методами рентгенофазового анализа (РФА), высокотемпературной рентгеновской дифракции и рентгеновской спектроскопии поглощения (XAFS). Спектры XAFS (Fe-K, Co-K, Cu-K) реперных модельных систем и исследованных образцов были записаны на станции EXAFS спектроскопии (8 канал, СЦСТИ, Новосибирск). Методом XAFS спектроскопии (по флуоресцентному выходу выполнено сравнительное комплексное исследование, получена новая информация о локальных структурных искажениях (для катионных и анионных подрешеток). Данные, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой. Электрохимические показатели единичного топливного элемента с катодным материалом на основе $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Cu}_x\text{O}_{3-\delta}$ были изучены с помощью метода импедансной спектроскопии и измерений вольтамперных характеристик.

Благодарности:

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект № 126011215469-6).

Работа частично (развитие методик рентгеновской спектроскопии на СИ и регистрация XAFS спектров) выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ рамках государственного задания ЦКП СКИФ.

Литература:

[1] Jia Y., Lan X., Fan H. // *Ceramics international*. 2025. Т.51. С. 13697-13712.

[2] Yang G., Su C., Shi H. // *Energy & Fuels*. 2020. Т.34. С. 15169-15194.

Программно-аппаратная open-source реализация системы управления щелями монохроматического пучка синхротронного излучения.

Панарин С.В.¹, Довженко Г.Д.^{1,2}, Селютин А.Г.²

1: Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

2: ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: qpaycts@gmail.com

Щелевые диафрагмы в оптическом хатче станции синхротронного излучения (СИ) обеспечивают формирование и корректировку пучка. Управление ими требует удалённого доступа с интеграцией в общую систему управления экспериментальной станцией СИ. Описываемый проект разрабатывается в рамках создания станции 1-7 "Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов" на источнике СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ» [1].

Ключевой особенностью данного проекта является использование open-source компонентов, как программных, так и аппаратных. Это позволяет сильно уменьшить стоимость конечного продукта по сравнению с коммерчески доступными контроллерами оптических систем на основе шаговых моторов. Также это повышает ремонтопригодность и гибкость, даёт возможность модифицировать устройство под нужды конкретного эксперимента.

Система управления состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть реализована на базе одноплатного компьютера Orange Pi, микропроцессора ESP32, и драйверов шаговых двигателей TMC2209. Программная часть системы управления состоит из прошивки микропроцессора FluidNC [2], а также драйвера для АСУ Tango [3]. Устройство интегрируется в АСУ экспериментальной станции на базе Tango по локальной сети Ethernet. Система управления позволяет контролировать до 6 шаговых моторов.

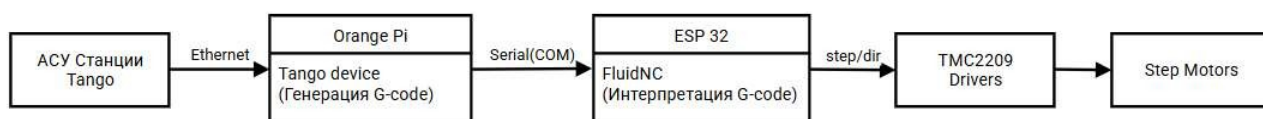


Рис. 1. Структурная схема системы управления шаговыми двигателями

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2026-0002).

Литература:

[1] Булавченко О.А. и др. Концептуальный дизайн экспериментальной станции 1-7 ЦКП «СКИФ»–НГУ «Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов» // Журнал структурной химии. – 2023. – Т. 64, № 7. – С. 113304. – DOI 10.26902/JSC_id113304.

[2] FluidNC [Электронный ресурс] : репозиторий // GitHub. – URL: <https://github.com/bdring/FluidNC>.

[3] Гётц А. и др. TANGO — система управления на базе CORBA // ICALEPCS2003, Кёнджу, октябрь. – 2003. – С. 94-98.

[4] PyTango [Электронный ресурс] : официальная документация. – URL: <https://pytango.readthedocs.io>

Применение синхротронного излучения для исследования высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов

А.Г. Маликов¹, И.Е. Витошкин¹, К.Э. Купер^{1,2}, И.С. Герцель¹, Шмаков А.Н.^{1,2}

*1 – Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия*

*2 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов",
Новосибирск, Россия*

E-mail: smalik707@yandex.ru

Алюминиево-литиевые сплавы широко применяются в авиационной и аэрокосмической промышленности, в том числе данные сплавы используются в сварных конструкциях. Разрабатываются различные технологии сварки данных сплавов. Основные требования: механические свойства сварного шва должны соответствовать механическим свойствам соединяемых сплавов. Однако в результате процесса плавления при сварке упрочняющие фазы могут либо растворяться, либо формироваться на границах зёрен, что приводит к ухудшению механических характеристик материала. Для решения комплексной научной проблемы, связанной с достижением максимальных циклических, динамических и статических механических характеристик неразъемных лазерных сварных соединений нового класса материалов – Al-Li сплавов третьего поколения, проведены исследования по управлению структурой и фазовым составом сварного шва в результате оптимизации процесса лазерного воздействия, последующей термообработки и впервые применяемого контроля эволюции структурно-фазового состава сварного шва Al-Li сплавов, в том числе и *in situ*, за счет применения современного независимого метода диагностики: дифрактометрии синхротронного излучения в сочетании с комплексной оценкой физико-механических, технологических и функциональных свойств.

Рентгенофазовый анализ сварных соединений с помощью дифракции синхротронного излучения осуществлялся в режиме *ex situ* и *in situ*. Режим *ex situ* использовался для определения фазового состава сплава и сварного шва в исходном состоянии и после термообработки. *In situ* дифракция синхротронного излучения алюминиевого сплава и его сварного шва для определения эволюции фазового состава сплава и сварного шва в исходном состоянии в зависимости от температуры нагрева. Данные исследования выполнены в ЦКП СЦСТИ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия [1].

Полученные лазерные сварные швы после оптимальной пост термообработки обладают высокой статической прочностью. Таким образом, показано, что применение синхротронного излучения позволяет детально охарактеризовать структурно-фазовые изменения в лазерных сварных и оптимизировать режимы их термической обработки.

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН) и ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00037, <https://rscf.ru/project/23-79-00037/>

XAFS-исследование окислительного состояния и локального атомного окружения железа и меди в синтетических смешанослойных сульфидно-гидроксидных соединениях (валлериитах, точилинитах)

Лихацкий М.Н.¹, Борисов Р.В.¹, Зверева В.В.², Трубина С.В.², Кривенцов В.В.³

1 – Институт химии и химической технологии СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

2 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «СКИФ», Новосибирск, Россия

E-mail: lixmax@icct.ru

Двумерные материалы благодаря ряду физических свойств, имеющих прикладное значение, привлекают внимание многих исследователей. Поскольку каждый 2D-материал обладает ограниченным множеством функциональных свойств, задача получения новых 2D-материалов, в особенности, полифункциональных, остается актуальной. На основе природных прототипов из группы минералов валлериита - минерала с общей формулой $(\text{Fe,Cu})\text{S}_2 \cdot n(\text{Mg,Fe,Al})(\text{OH})_2$ - ранее нами предложен новый класс синтетических полупроводниковых гетерослойных 2D-2D-материалов, представители которых обладают фотокаталитической активностью, проявляют термоэлектрический эффект, необычное термическое поведение, а также интересные оптические свойства [1]. Предполагается [2], что самосборка в третьем измерении с образованием нанохлопьев происходит за счет противоположных зарядов чередующихся сульфидных и гидроксидных 2D-слоев, который формируется, как полагаем, за счет дефицита катионов в сульфидных слоях и частичного замещения ионов $\text{Mg}(2+)$ на трехзарядные катионы ($\text{Fe}(3+)$ либо $\text{Al}(3+)$) в гидроксидных. Настоящая работа направлена на выявление с помощью XAFS закономерностей в реорганизации окружения и состояния атомов железа и меди как функции ионного состава реакционной смеси, в ряде валлериитов и точилинитов $(\text{FeS} \cdot n(\text{Mg,Fe,Al})(\text{OH})_2)$.

Анализ спектров XAFS, полученных на К-краях Fe и Cu на EAXFS-станции ЦКП СЦСТИ накопителя ВЭПП-3 в режиме «на просвет», после соответствующей предобработки, процедуры Фурье-преобразования и подгонки в R-пространстве с использованием ПО Iffefit на серии фазово-чистых смешанослойных соединений, позволил выявить ряд эффектов (сокращение длины связей Fe-S, появление координационной сферы Fe-O, увеличение длины пути рассеяния Fe-Fe(Cu) во второй координационной сфере, снижение к.ч. по металлу для путей рассеяния Cu-Fe(Cu)), возникающих при переходе от Al-замещенных валлериитов и точилинитов к образцам, синтезированным без введения соли Al, которые были отнесены на счет недостатка ионов $\text{Al}(3+)$ в гидроксидных слоях и частичном замещении $\text{Mg}(2+)$ на $\text{Fe}(3+)$.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 26-93-20010.

Литература:

[1] Mikhlin Yu.L., Likhatski M.N., Borisov R.V. et al. *Materials* **2023**, 16, 6381.

[2] Likhatski M. N., Borisov, R. V., Karpov, D. V. et al. *Nanoscale* **2024**, 16(48), P.22360-22373.

Разработка защитных покрытий из инструментальной стали и исследование их фазового состава методом синхротронного излучения

А.А. Голышев¹, А.Г. Маликов¹, И.С. Герцель¹, Шмаков А.Н.²

*1 – Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия*

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: alexgol@itam.nsc.ru

В работе рассматривается вопрос о разработке новых технологических решений для использования металлических покрытий из инструментальной стали, формируемых методом прямого лазерного выращивания, с целью защиты изделий промышленных дробилок, работающих в условиях сложного нагружения. Проведены оптимизация технологического процесса и исследования фазового состава покрытий с использованием синхротронного излучения (длина волны 1,01 Å, геометрия Брэгг-Брентано, на канале ба, УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000», ЦКП СЦСТИ, ИЯФ СО РАН). Синхротронная дифракция позволила выявить фазовые превращения в формируемом покрытии. После отжига при 1220 °С зафиксировано снятие микронапряжений и разделение пиков феррита и аустенита. При выдержке происходит образование карбидов Fe_3W_3C , а при медленном охлаждении (50 °С/мин) – преобладание диффузионных процессов с сохранением ферритно-аустенитной матрицы. Полученные покрытия обладают высокой твёрдостью и износостойкостью, что увеличивает рабочий ресурс дробящих зубьев и повышает эффективность дробления. Таким образом, показано, что применение синхротронного излучения позволяет детально охарактеризовать структурно-фазовые изменения в покрытиях и оптимизировать режимы их термической обработки.

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН) и ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-459).

Эффективность оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах различного класса в условиях скалярного синхронизма

Шевченко О.Н.¹, Николаев Н.А.¹, Анцыгин В.Д.¹

1 – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: shvchenkoon@iae.nsk.su

В работе представлено экспериментальное исследование эффективности генерации терагерцовых (ТГц) импульсов методом оптического выпрямления (ОВ) фемтосекундного излучения высокой мощности в кристаллах различного класса: полупроводниковых (ПП) CdTe, GaSe:S; сегнетоэлектрического KTiOPO_4 (КТР) и диэлектрического $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ($\beta\text{-BBO}$).

Для проведения исследования был собран импульсный терагерцовый спектрометр (ИТС) на базе фемтосекундного лазера с центральной длиной волны 1050 нм, длительностью импульсов ~ 170 фс и средней мощностью излучения $\sim 5,7$ Вт. Возбуждение кристаллов осуществлялось под углом близком к нормали поверхности. Система регистрации была основана на электрооптическом эффекте Поппеля в кристалле CdTe толщиной 2 мм, срез (110).

Измерения для кристаллов $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$ ($x = 0, 0,03, 0,12, 0,16$ и $0,22$) проводились при толщинах кристаллов близких к длине когерентности ($\sim 0,3$ мм) и в более толстых (~ 1 мм) с реализацией скалярного синхронизма. Кристаллы КТР и $\beta\text{-BBO}$ с толщиной ~ 1 мм были вырезаны под небольшим углом к оптической оси, для выполнения скалярного синхронизма в субтерагерцовой области спектра в соответствии с расчетами [1].

Показано, что при короткой фокусировке пучка накачки наблюдается эффект генерации с поверхности, вклад которого сопоставим с объемной генерацией в кристаллах. Несмотря на ограничение накачки значением 0,7 Вт для полупроводниковых кристаллов, в частности GaSe:S (связанное с лучевой стойкостью), они демонстрируют до двух порядков большую эффективность преобразования по сравнению с остальными кристаллами при накачке излучением с мощностью ~ 3 Вт. Определен диапазон содержания серы $x = 0,04 \div 0,12$, при котором наблюдается наибольшая эффективность генерации ТГц-излучения в кристаллах $\text{GaSe}_{(1-x)}\text{S}_x$, что хорошо согласуется с результатами работы других авторов [2].

В докладе обсуждаются детали эксперимента и перспективы применения кристаллов для задач терагерцовой фотоники.

Благодарности: Авторы благодарят ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Литература:

[1] Николаев, Н. А., Ланский, Г. В., Андреев, Ю. М., и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т.63(6). С. 113-116.

[2] Yu. M. Andreev, G.V. Lanskiy, K.A. Kokh, V.A. Svetlichnyi // Proc. Of SPIE. 2015. Vol.9810. PP. 98101P-1 – 98101P-7.

Детекторы для изучения динамических процессов на пучке СИ

В.М.Аульченко, В.Е.Бурдин, А.А.Жариков, В.Н.Кудрявцев, С.В.Иваненко, В.М.Титов,
Л.И.Шехтман*, А.А.Юровская, М.А.Ярцева

Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su

Для экспериментальной станции первой очереди 1-3 «Быстропротекающие процессы» разрабатываются детекторы, позволяющие регистрировать распределение потока рентгеновского излучения по координате с пространственным разрешением 50-250 мкм и временным разрешением от 10 нс до 1 мс. Для секций «Динамические процессы» и «Динамические процессы, отдельное здание» для изучения ударно-волновых и детонационных процессов создаются детекторы линейки DIMEX: газовый однокоординатный детектор DIMEX-G с шагом каналов 150 мкм, рабочей апертурой 100 мм и максимальной частотой смены кадров 10 МГц; кремниевый микрополосковый однокоординатный детектор DIMEX-Si с шагом каналов 50 мкм, рабочей апертурой 100 мм и максимальной частотой смены кадров 50 МГц, а также двух-координатный детектор DIMEX-Si2D с шагом каналов по горизонтали 100 мкм и по вертикали —1 мм, рабочей апертурой 100x5 мм и максимальной частотой смены кадров 50 МГц. Для секции «Плазма» для изучения процессов импульсного теплового и механического воздействия на образец создаются однокоординатные детекторы: GINTOS, - детектор интегрирующего типа с сенсором на основе арсенида галлия, с шагом каналов 50 мкм, рабочей апертурой 50 мм и максимальной частотой смены кадров 10 МГц и детектор прямого счета фотонов с энергетическим разрешением SciCODE, который является первым отечественным полупроводниковым детектором прямого счета фотонов. Детектор SciCODE имеет каналы 50 мкм, рабочую апертуру 50 мм и быстродействие каждого канала до 2 МГц. Кроме того, начата разработка двух-координатного гибридного пиксельного детектора Novopix, который будет востребован для динамических дифракционных экспериментов. В докладе будет представлено текущее состояние работ по всем перечисленным детекторам.

О программе научных исследований на станции «РФА-Геология» второй очереди ЦКП «СКИФ»

Я.В. Ракшун^{1,2}, Ю.В. Хомяков^{2,3}, А.С. Гоголев⁴, А.В. Дарьин¹, Ф.А. Дарьин³, А.М. Дымщиц⁵,
О.Н. Киселева¹, А.В. Корсаков¹, А.М. Логвинова¹, Д.С. Михайленко⁶, И.Р. Прокопьев¹,
С.В. Ращенко¹, В.А. Чернов², А.Ф. Шацкий⁷

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП "Сибирский кольцевой источник фотонов", Кольцово, Россия

4 – Томский политехнический университет, Томск, Россия

5 – Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

6 – Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

7 – Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

E-mail: rakshunyav@igm.nsc.ru

На станции «РФА-Геология» будет реализован набор комплементарных экспериментальных методов в жестком рентгеновском диапазоне (до 140 кэВ) с «белыми» ($\Delta E/E \sim 1$) и «розовыми» ($\Delta E/E \sim 10^{-2}$) пучками СИ с поперечными размерами от менее 5 μm до более 10 см, а именно: рентгеновская дифракция с энергетической и угловой дисперсией при высоких давлении и температуре, рентгенография в абсорбционном и фазовом контрасте, полнопольная томография, рентгенофлуоресцентный анализ в режиме полнопольной визуализации и сканирующей микроскопии, а также сканирующая просвечивающая рентгеновская микроскопия и микротомография. Комбинация указанных методов позволит проводить комплексный неразрушающий анализ макроскопических объектов и решать широкий ряд геологических задач. К таким задачам относятся:

- исследование фазовых диаграмм, уравнений состояния вещества, а также кинетики химических реакций при высоких давлениях и температурах;
- исследование карбонатитных фаз при высоких давлениях и температурах в приложении к изучению состава оболочек Земли и зарождения глубинных магм, в том числе ответственных за рудоносность редкоземельных элементов;
- изучение включений сульфидов в кристаллах алмаза с целью реконструкции процессов распада первичного твердого раствора непосредственно в алмазе-хозяине и диагностики редких минеральных фаз (для определения парагенезиса и возраста алмазов);
- выяснение закономерностей локализации кристаллов алмаза в объеме каждого ксенолита, а также образцах метаморфических пород;
- исследование хромшпинелидов и минералов платиновой группы в мантийных породах;
- исследование состава, концентрации и распределения рудных компонентов редкометалльных и редкоземельных руд карбонатитовых месторождений.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0018)

Обработки данных микро-рентгенофлуоресцентного анализа и микро-томографии с использованием искусственного интеллекта

Скляр А.Н.¹, Веригин С.А.¹, Ракшун Я.В.^{1,2}, Сороколетов Д.С.^{2,3}

1 – Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

3 - ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

E-mail: sklyarovan@igm.nsc.ru

Для задач определения минерального состава в геологических образцах таких, как, керны, шлифы и аншлифы методами микро-рентгенофлуоресцентного анализа (микро-РФА) и микро-томографии была разработана программа на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [1], состоящая из двух блоков. Первый блок проводит в режиме реального времени обработку спектров флуоресценции, зарегистрированных детектором, размечает линии флуоресценции, производит количественный анализ и генерирует гипотезы о возможном минеральном составе в каждой точке растра (вторичные данные), присваивая каждой гипотезе собственную метрику уверенности. Второй блок на основе результатов работы первого блока и трёхмерных карт плотностей исследуемого образца, полученных методом рентгеновской томографии (микро-томографии), отсеивает неподходящие гипотезы и производит пропагацию элементного и минерального состава вглубь образца. Финальным этапом функционирования программы является трёхмерная визуализация образца с указанием элементного и минерального состава, а также его плотности в каждой точке растра.

Отдельно следует отметить, что предварительная оценка времени получения вторичных данных составляет менее 1 секунды, что крайне важно для станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ», поскольку времена регистрации экспериментальных данных также согласно проведённым оценкам в каждой точке растра составит около 1 секунды. Это обеспечит функционирование станции в режиме реального времени.

Благодарности: Результаты были получены в рамках выполнения проекта 075-15-2025-510 при финансовой поддержке Минобрнауки России

Литература:

[1] Kim J.J., Ling F.T., Plattenberger D.A., Clarens A.F., Lanzirotti A., Newville M., Peters C.A. SMART mineral mapping: Synchrotron-based machine learning approach for 2D characterization with coupled micro XRF-XRD//Computers & Geosciences. 2021, V. 156, P. 104898.

Структурная релаксация в сплаве технического алюминия марки А6, упрочненном многостенными углеродными нанотрубками

Тяпкин П.Ю., Петров С.А., Кузнецов В.А., Коротаева З.А., Жданок А.А., Толочко Б.П.

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: tyapkin@solid.nsc.ru

Алюмоматричные композиты являются перспективными материалами, широко востребованными в автомобильной, авиационной и космической отраслях промышленности. Во многом это обусловлено сочетанием высокой удельной прочности, теплопроводности, лёгкости, износо- и коррозионной стойкости, а также низким коэффициентом термического расширения. Управление свойствами реализуется за счет модифицирования алюминия ультрадисперсными частицами тугоплавких соединений, металлов, а также углеродными нанотрубками. Одним из способов характеристики термической и усталостной стабильности данных материалов является рентгеновская дифракция. По смещению рефлексов и изменению их ширин можно провести качественную и количественную оценку остаточных (при охлаждении после литья) или эксплуатационных напряжений в материале. Использование синхротронного излучения позволяет непрерывно регистрировать рентгенограммы в процессе выдержки образца при постоянной температуре, что дает возможность подробно следить за процессом релаксации напряжений в материале.

Нами были проанализированы образцы алюмоматричных композитов, приготовленных из технического алюминия марки А6, модифицированного порошками, содержащими многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), а также металлы Cu или Mg [1]. Концентрация модификатора во всех случаях составляла 0,1 % (по массе).

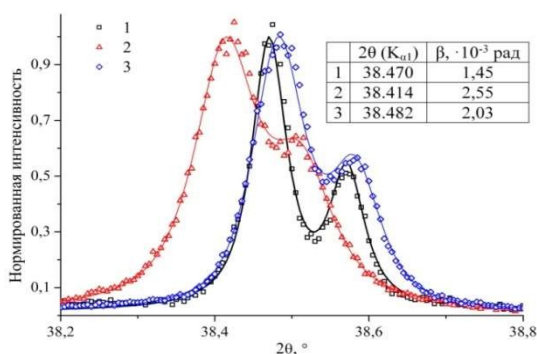


Рис. 1. Рефлекс Al(111) образца, модифицированного МУНТ-Cu (5/95). 1 – исходный образец, 2 – после деформирования поверхности (шлифование шкуркой Р80), 3 – выдержка 1 ч при 160°C.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 23-72-00060. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Литература:

[1] Ширинкина И.Г., Бродова И.Г., Астафьев В.В., Толочко Б.П. и др. // Физика металлов и металловедение. 2025. Т. 126. № 5. С. 629-640.

Исследования потенциальных термоядерных керамик методами рентгеновской дифракции

Балаш И.И.^{1,2,3}, Казанцев С.Р.^{1,2,3}, Шмаков А.Н.^{1,2}, Черепанов Д.Е.^{2,3,4,5}, Серегин А.Ю.⁶

1 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов"

Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный исследовательский центр "Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук", Новосибирская область, р.п. Кольцово, 630559, Россия

2 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия

3 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия

4 – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, 630090, Россия

5 – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", Москва, 117198, Россия

6 – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“», Москва, 123182, Россия

E-mail: I.I.Balash@inp.nsk.su

Новейшие керамические материалы находят все более широкое применение в высокотехнологичных индустриях, таких как аэрокосмическая техника и энергетика. В частности, в термоядерной энергетике ведутся активные поиски конструкционных и функциональных материалов, сочетающих в себе твердость, устойчивость к температурным и химическим воздействиям и низкую плотность. Коллектив лаборатории 9-0 ИЯФ СО РАН активно занимается исследованием таких материалов, как карбид бора (B_4C), карбид кремния (SiC), диборид титана (TiB_2) и др., с точки зрения их применимости в качестве материалов стенок вакуумной камеры токамака [1-4]. Одним из направлений исследования данных материалов является анализ результатов воздействия потоков высокоэнергетических частиц на структурные параметры керамик с помощью методов рентгеновской дифракции. Ранее с помощью методик РСА оценивались остаточные напряжения, наведенные в вольфраме в результате импульсного воздействия электронного пучка, моделирующего удар потока плазмы на дивертор токамака [5, 6]. В текущей работе представлены результаты первичных исследований керамик на экспериментальной станции РКСМ источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов». Были проведены съемки дифрактограмм на парах образцов (облученный лазером – необлученный) из B_4C , SiC и TiB_2 . Полученные данные о влиянии радиационной нагрузки на структуру материала и его дифракционную картину будут использованы для оценки применимости материала в термоядерных реакторах и дальнейших исследований структурных параметров аналогичных керамик.

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

Литература:

- [1] Cherepanov, D.E. et al // Plasma Sci. Technol. 2025 27 115601
- [2] Cherepanov, D.E. et al // Plasma Sci. Technol. 2025 27 125601
- [3] Ryzhkov, G.A. et al // Fusion Eng. Des. 2026 222 115545
- [4] Cherepanov, D.E. et al. // Phys. Atom. Nuclei 2024 87 (Suppl 1) S99–S107
- [5] Balash, I.I. et al. // AIP Conference Proceedings "Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application, SFR 2020" 2020 2299
- [6] Балаш И.И. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая 2023 Т. 87 № 5

Высокоплотные поликристаллические катоды/фотокатоды на основе гексаборида лантана для ускорительной техники и рентгеновских детекторов

Краснов Д.А.¹, Толочко Б.П.¹, Жданок А.А.¹, Коротаева З.А.¹, Кузнецов В.А.¹, Чакин И.К.²

1-Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2-Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: Danilare99@mail.ru

Катоды из гексаборида лантана могут использоваться для генерации электронов в ускорителе, а также использоваться как фотокатоды [1]. Анализ коммерческих катодов показал, что они обладают низкой плотностью (3,9-4,2 г/см³) и высокой пористостью. Одной из целей работы было получение высокоплотного низкопористого катода. Основная задача – синтез гексаборида, разработка методов его допирования, поиск и определение режимов изготовления/спекания катодов с диаметром до 50 мм.

Использовали различные методы синтеза: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, радиационно-химический синтез с использованием электронных пучков ускорителя ЭЛВ-6 и твердофазный высокотемпературный синтез.

Горячее прессование проводили при 1600-1900 °С и давлении прессования 20-42 МПа. Получение керамических образцов осуществляли в среде инертного газа (аргон) либо в вакууме (давление $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ торр). Были получены образцы керамики диаметром 30 и 50 мм плотностью до 4,62 г/см³ (98,3% от теоретической). В ходе работы удалось масштабировать показатели плотности керамики с образцов диаметром 10 мм до диаметра 50 мм, что позволит изготавливать катодные узлы для установок с большой поверхностью катода.

Испытания катодов проведены на специализированном стенде в ИЯФ СО РАН. Параметры эксперимента: 1800 °С в поле 1-6 кВ. По результатам измерения построены графики Шоттки $\lg(i)$ от $V^{0,5}$. По формуле Ричардсона вычислена работа выхода для поликристаллических катодов LaB₆, которая составила – 2,69-2,78 эВ.

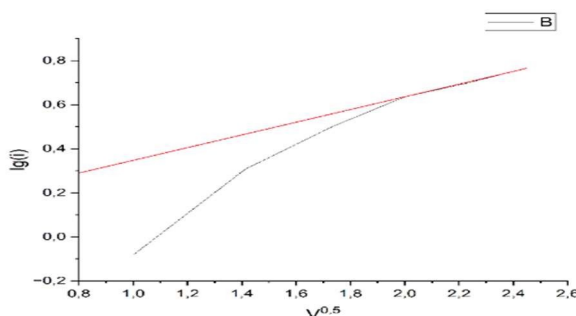


Рис. 1. График $\lg(i)$ от $V^{0,5}$

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-72-00060. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Работа выполнена в ИЯФ СО РАН на установке «УНУ Стенд» ЭЛВ-6 на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-8.

Литература:

[1] H. Hama, F. Hinode, K. Kasamsook, M. Kawai, T. Tanaka // Featuring the Characteristics of the Super Coherent Terahertz Photon Ring. 2005.

Возможности сканирующего микро-РФА-СИ в решении задач тефрохронологии

Дарьин А.В.¹, Новиков В.С.^{1,5}, Пруцков Г.В.², Дарьин Ф.А.^{3,4}, Ракшун Я.В.^{1,4}, Wu J.⁵, Zhu Z.⁵,
Li Qi.⁵, Sun Q.⁶, Chu G.⁵

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

2 - НИЦ "Курчатовский институт", ККСИИ, Москва, Россия

3 – Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ,
Новосибирск, Россия

4 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

5 - Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

6 - National Research Center of Geoanalysis, Beijing, China

E-mail: AVD@igm.nsc.ru

Озёрные отложения Камчатки являются высокоразрешающим архивом, фиксирующим историю вулканической активности региона. Пепловые слои (тефра) в донных осадках служат реперными изохронными маркерами для геохронологии и палеоклиматических реконструкций.

Целью работы является разработка методики исследования кернов донных осадков с использованием сканирующего микро-РФА-СИ для обнаружения и идентификации тефровых слоев.

Образцы твердых препаратов керна донных осадков оз. Чаша (рис.1) исследовались в центрах синхротронного излучения России (ВЭПП-3, Новосибирск; КИСИ-Курчатов, Москва) и Китая (SSRF, Шанхай) с использованием пучков различной энергии.



Рис. 1. Керна донных осадков оз.Чаша. Показан отбор образцов для сканирующего анализа.

Быстрый неразрушающий скрининг керна с пространственным разрешением 1 мм выявил геохимические аномалии, соответствующие тефровым прослоям (1). Детальные исследования фокусированными пучками с размерами 10-15 мкм использованы для идентификации тефровых слоев путем сравнения состава с базами данных.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках ГЗ ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 42030507, 42372352, 42302344, 42471175). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН. Исследования выполнены с использованием УНУ «Курчатовский источник синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» НИЦ «Курчатовский институт».

Литература:

[1] Darin, A.V. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **88** (Suppl 1), S85–S88 (2024).
<https://doi.org/10.1134/S1062873824708845>

Аналитическая микростратиграфия (скан.μРФА-СИ) керна донных осадков озера Чеко (Тунгусский природный заповедник).

Дарьин А.В.¹, Бабич В.В.¹, Маркович Т.И.¹, Ракшун Я.В.^{1,2}, Дарьин Ф.А.^{2,3}, Сороколетов Д.С.^{2,3},
Рогозин Д.Ю.⁴

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

4 – Институт биофизики СО РАН, г.Красноярск, Россия

E-mail: AVD@igm.nsc.ru

В ходе полевых работ 2016, 2025 гг. сотрудниками ИГМ СО РАН, ИБФ СО РАН и ГПЗ «Тунгусский» проведены исследования оз.Чеко, расположенного в районе эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (ТКТ) в 1908 г. В наиболее глубокой части озера было отобрано несколько кернов донных осадков, имеющих визуально выделяемую слоистость толщиной 3-5 мм. Твердые препараты донных осадков исследованы с использованием сканирующего μРФА-СИ по методикам [1] с одновременным определением микро- и породообразующих элементов: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo. Сканы проводились на энергиях возбуждения 21, 23 кэВ с фокусированным и коллимированным пучками с шагом 0,2 - 0,25 мм и 1,0 мм. В профилях сканирования прослеживается ритмичность в вариациях содержаний ряда элементов, наиболее ярко проявленная в Br, Rb, Sr и их отношениях.

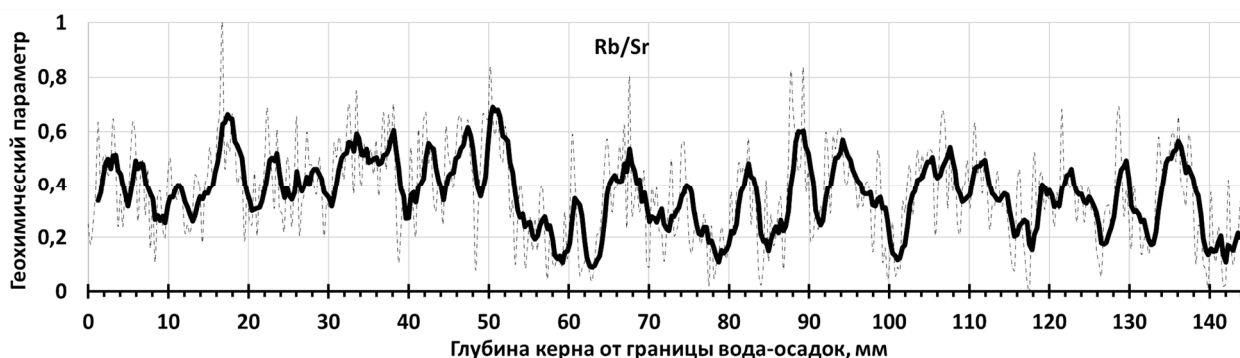


Рис. 1. Распределение отношения аналитических пиков Rb/Sr по глубине керна Чеко-2025(3).

Для выделения сигнала от отдельных слоев использованы методы математической статистики, позволяющие уменьшить шумовую компоненту. Рассчитанная скорость осадконакопления позволила оценить интервал нахождения слоя, образовавшегося после взрыва ТКТ 1908 г., что позволит провести поиски возможного вещества ТКТ.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ: ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), при финансовой поддержке РНФ (грант 22-17-00185-П). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Литература:

[1] Дарьин А.В. и др. // Изв.РАН. Серия физическая, 2015. Т.79. №1. С. 137.

ПО для обработки рентгенофлуоресцентных спектров геологических образцов методом фундаментальных параметров

Сороколетов Д.С.^{1,3}, Ракшун Я.В.^{1,2}, Дарьин А.В.²

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

E-mail: D.S.Srkv@yandex.ru

Задача определения элементного состава в рамках рентгенофлуоресцентного анализа в ряде случаев может потребовать применение нестандартных подходов. Например, она может характеризоваться недостатком точной информации об основных свойствах образца и его окружения, что негативно влияет на точность определения концентраций химических элементов способом фундаментальных параметров (т.н. проблема “темной” матрицы). При этом расчет обратной задачи СФП методом перебора вариантов для данных параметров (как с фиксированной, так и с более сложной, адаптивной сеткой подбираемых значений [1]) может быть достаточно долгим. Помимо этого, преобладание лёгких элементов в матрице основного состава приводит к необходимости учёта рассеянного и переизлученного излучения при определении концентраций, особенно элементов с $Z < 12$ [2, с. 23]. Микроморфологические неоднородности в объеме или на поверхности пробы, а также нестандартная геометрия эксперимента (например, необходимость учёта вклада флуоресценции с боковых участков) также могут вносить существенные погрешности в выражения [2, с. 77, 80], используемые для определения концентраций химических элементов. Все это приводит к необходимости разработки специализированного ПО - с вычислительными процедурами, оптимизированными под конкретные случаи.

Нами был разработано ПО в виде набора функций-скриптов в среде Matlab, реализующее расчет прямой и обратных задач СФП - как в стандартном, так и в ряде специфических случаев. Внутренние процедуры, доступные для выбора, реализуют все вышеперечисленные “проблемные” случаи, которые, в частности, могут быть свойственны исследованиям по микро-РФА минеральных образцов. Были показаны значительные преимущества работы нашего ПО в нескольких подобных случаях по сравнению со стандартными подходами.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), выполнения проекта 075-15-2025-510 при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература:

[1] Forste F., et all. // J. Anal. At. Spectrom. 2022, V. 37, P. 1687-1695.

[2] Лосев Н. Ф. Основы рентгено-спектрального флуоресцентного анализа. М. : Химия, 1982. 208 с

Методы обработки спектрометрических данных “поточкового” анализа при исследовании стратифицированных геологических образцов.

Сороколетов Д.С.^{1,3}, Ракшун Я.В.^{1,2}, Дарьин А.В.², Скляр А.Н.², Дарьин Ф.А.³

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

E-mail: D.S.Srkv@yandex.ru

Проблема определения пространственного распределения минерального (основного, матричного) состава с приемлемой точностью при недостаточно известных характеристиках исследуемого “широкого” протяженного образца (керна) с “лёгкой” матрицей основного состава при применении неразрушающих методов элементного и химического состава может оказаться достаточно существенной [1]. Помимо всего прочего, она также способна значительно снизить точность определения локальных концентраций в рамках метода микро-РФА для всех остальных химических элементов, присутствующих в образце (т.н. “проблема темной матрицы”). Все это приводит к необходимости более полного использования всей имеющейся информации об образце, в том числе, в рамках алгоритмов искусственного интеллекта (к примеру, таких, как в [1-3]) и поиску новых эффективных методологических подходов.

В настоящее время нами разрабатывается подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей (ИИС) при определении минерального состава в образцах подобного типа, для чего, в частности, необходимо их обучение на обширном количестве материала с последующим сравнением полученного ими результата со спектрами от серии образцов с полным составом (включая минералообразующие) и остальными характеристиками, заданными с высокой точностью. Для возможности реализации последнего нами было осуществлено изготовление и измерение элементного состава в большой серии (около 200) образцов, состоящих из различных веществ со стандартизованным составом, смешанных в различных пропорциях и прессованных в таблетки. Помимо этого, к отдельным полученным спектрам была применена разработанная нами процедура СФП, с приемлемым согласованием экспериментального и теоретически предсказанного спектров. Это позволит дополнить имеющиеся данные и, возможно, рассмотреть возможность обучения ИИС на вычисленных концентрациях, а не непосредственно на необработанных спектрометрических данных, что, возможно, повысит эффективность ее обучения и работы.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), выполнения проекта 075-15-2025-510 при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература:

[1] Kim J.J., et.al. // Computers & Geosciences. 2021, V. 156, P. 104898.

[2] Tung P. K. M., et.al. // Energies. 2022, V. 15, P. 5326.

[3] Kalambuka-Angoyo H., Gari S. // Applied Radiation and Isotopes. 2022, V. 186, nr 6, P. 110274.

Подготовка тестовых образцов и рентгеноконтрастных фантомов.

Сороколетов Д.С.¹, Ракшун Я.В.^{1,2}, Дарьин Ф. А.^{1,3}, Хомяков Ю.В.^{1,3}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

E-mail: D.S.Srkv@yandex.ru

Разработке конкретных методологических подходов и стандартизированных процедур в подготовке как образцов для исследования, так и тестовых объектов для юстировки оборудования, может предшествовать предварительная комбинация большого количества поисковых работ и расчетов. В частности, в результате этих действий оптимальная форма тест-объекта может оказаться неожиданно сильно отличающейся от той, что предполагалась заранее. В качестве примеров, подчеркивающих актуальность описанной ситуации, можно привести принятую геометрию известного объекта-звездочки для выставки рентгенооптического оборудования субмикронного разрешения, ряда фантомов сложных и необычных форм для абсорбционной проекционной томографии [1-2], объектов и щупов для измерения механических [3-4], электрических и др. [5] характеристик поверхности.

Нами был предложен ряд идей, касающихся развития способов пробоподготовки тестовых образцов для ряда рентгеновских методов, использующих синхротронное излучение. В частности, наибольшее внимание было уделено процессам изготовления кернов с контролируемыми характеристиками, а также пробных объектов и рентгеноконтрастных фантомов различной формы и состава - с точностью в сотни мкм и менее. Также было выдвинуто предположение, что использование в ряде случаев такого современного мобильного оборудования, как ультразвуковые ножи, сверлильных и шлифовальных миниголовок различного принципа действия, компактных министанин и стабилизаторов движения, позволит успешно осуществлять большое количество необходимых работ, в том числе, при необходимости, в текущих (и, возможно, полевых) условиях.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), выполнения проекта 075-15-2025-510 при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература:

[1] <https://www.doza.ru/files/rentgen.fantom.pdf>

[2] <https://www.doza.ru/files/ct-phantoms.pdf>

[3] Орешко Е. И. и др // Авиационные материалы и технологии. 2021. №1 (62).

[4] Трошин А. А., Захаров О. В. // Транспортное машиностроение. 2020. №2 (87).

[5] Михеев В.П., Просандеев А.В.// Датчики и детекторы: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2007. 172 с

Система монохроматизации в мягком рентгеновском диапазоне для метрологической станции Курчатовского источника синхротронного излучения

Сурикова Е.Е., Чумаков Р.Г.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: sur-nrcki@yandex.ru

Метрологические исследования в вакуумном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах предъявляют жесткие требования к характеристикам излучения, включая управляемую яркость, временную стабильность, возможность перестройки энергии фотонов. В условиях отсутствия лабораторных источников с требуемыми параметрами используется синхротронное излучение, обладающее высокой яркостью, стабильностью и широким непрерывным спектром. Развитие метрологических исследований на источниках синхротронного излучения позволяет решать задач в области разработки фотоприемных устройств (кремниевых фотодиодов, ПЗС-матриц и др.), рентгеновской оптики и литографии [1]. Особое значение данные исследования имеют для микроэлектронной промышленности и аэрокосмической отрасли, включая калибровку бортовой аппаратуры космических телескопов и систем мониторинга солнечной активности.

Отличительной особенностью метрологических оптических схем является требование к спектральной чистоте, спектральной ширине и потоку фотонов, определяющим точность измерений. Эти параметры должны быть управляемыми в процессе эксперимента. Наиболее эффективно данные требования реализуются в схеме монохроматора с плоской дифракционной решеткой (PGM) [2], позволяющей варьировать коэффициент c_{ff} и, соответственно, спектральное разрешение и интенсивность излучения.

Для реализации системы монохроматизации в составе станции «Метрология» Курчатовского источника синхротронного излучения был проведен расчет геометрических параметров принципиальной схемы (см. рисунок 1). Разработанная схема монохроматора была исследована методом трассировки лучей, что позволило проанализировать выходящее излучение в рассмотренной оптической схеме.

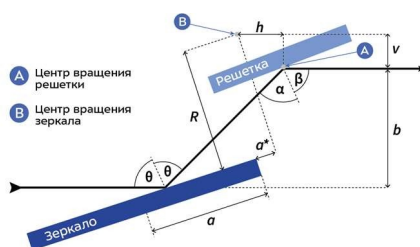


Рис. 1. Принципиальная схема работы PGM-монохроматора

Литература:

- [1] Gottwald, A., Krumrey, M., Scholze, F., & Richter, M. Metrology with synchrotron radiation at PTB // The European Physical Journal Plus 2022, №137(11). P.1238.
- [2] Sjöblom P., Todorescu G. and Urpelainen S. Understanding the mechanical limitations of the performance of soft X-ray monochromators at MAX IV laboratory//Synchrotron Rad. 2020 №27. P.272-283.

Применение метода рентгеновской рефлектометрии для характеристики тонких пленок, полученных при разных режимах вакуумного напыления

Коченева А.Г.^{1,2}, Шарафутдинов М.Р.^{2,3}, Лемзяков А.Г.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

3 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: anna.kocheneva@gmail.com

В работе представлено исследование зависимости свойств получаемых золотых покрытий от параметров магнетронного напыления. Установление таких зависимостей позволяет подбирать режимы напыления для получения покрытий с заданными свойствами (например, с определенной шероховатостью поверхности).

Экспериментальные образцы представляют собой золотые пленки, нанесенные на стеклянные подложки методом магнетронного напыления. Напыление производилось при различных режимах: с вариацией либо температуры подложки, либо давления рабочего газа - аргона.

Изготовленные образцы характеризовались различными методами неразрушающего контроля. Основным методом исследования был выбран метод рентгеновской рефлектометрии с использованием синхротронного излучения на экспериментальной станции "Дифракционное кино" на накопителе ВЭПП-3. Метод основан на измерении отражательной способности рентгеновского излучения поверхностью вблизи критического угла полного внешнего отражения и позволяет определять толщину и плотность покрытия, а также шероховатость поверхности и межслоевого интерфейса. В дополнение, полученные результаты сопоставлялись с результатами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и плазмонной рефрактометрии.

В результате получены экспериментальные зависимости шероховатости золотых покрытий от температуры подложки и давления рабочего газа. Проведено сопоставление результатов рентгеновской рефлектометрии с результатами АСМ и терагерцовой плазмонной рефрактометрии для подтверждения достоверности полученных результатов.

Полученные данные могут быть использованы для выбора подходящего режима магнетронного напыления при создании покрытий с заданными параметрами. Они могут применяться для решения многих научных задач, например, для проведения экспериментов в области терагерцовой оптики или при создании многослойных рентгеновских зеркал.

Предложен метод определения критического тока в Nb-Ti сверхпроводниках в диапазоне «гелиевых» температур

Бродников А.Ф.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail:

E-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

Рассмотрены метод и измерительная установка для определения действительных значений) критического тока в сверхпроводниках, при гелиевых температурах, поступающих на рынок от отечественных и зарубежных производителей композиционной проволоки, круглого или прямоугольного сечения, на основе сплава Nb-Ti. В настоящее время федеральные законы «О техническом регулировании» и «О стандартизации» имеют статус «добровольного применения» [1], поэтому отечественные предприятия, включая зарубежные, поставляющие на рынок различные материалы, не имеют обязательств и возможностей осуществлять выходной контроль по колоссальному числу существующих свойств, да еще и в диапазоне криогенных температур.

Для опробования установки по определению вольтамперных характеристик (ВАХ) в сверхпроводниках при гелиевых температурах, были проведены испытательные измерения по методике МВИс 400-423/8-2018 разработанной АО «ВНИИНМ» [2] которая имеет, на наш взгляд, некоторые недостатки, поэтому были внесены изменения при реализации метода измерений.

Работоспособность измерительной установки для определения действительных значений критического тока подтверждена, полученные нами значения составили менее 2% [3] а получение более точного результата измерений позволит современная прецизионная цифровая измерительная аппаратура, с допускаемой основной абсолютной погрешностью $\pm 0,0025\% + 0,02$ нВ.

Литература:

- [1] Рыбак Н.И., Черепанов В.Я., Шейнин Э.М., Ямшанов В.А. Правовой статус национальных стандартов единства измерений // Стандарты и качество. — 2015. — № 12. С. 44 – 47.
- [2] МВИс 400-423/8-2018 // Методика измерения критического тока и определения показателей кривизны вольтамперной характеристики сверхпроводящих проводов на основе сплава Nb-Ti // АО «ВНИИНМ» -2018 г.
- [3] Сотников Д. В., // Исследование токонесущих свойств перспективных высокотемпературных сверхпроводящих материалов для электротехнических устройств // ОАО «Всероссийский Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Кабельной Промышленности» - 2016 г.

Разработка детектора прямого счета фотонов SciCODE с энергетическим разрешением

В.М.Аульченко, В.Е.Бурдин, В.В.Жуланов, С.В.Иваненко, В.Н.Кудрявцев, В.М.Титов,
Л.И.Шехтман, А.А.Юровская, М.А.Ярцева

e-mail: V.E.Burdin@inp.nsk.su

Для обеспечения научно-исследовательской программы секции «Плазма» (станция 1-3 «Быстропротекающие процессы», ЦКП «СКИФ») в ИЯФ СО РАН ведется разработка первого в России детектора прямого счета фотонов SciCODE с полупроводниковым сенсором.

Для регистрации сигналов разрабатывается специализированная микросхема, предусматривающая возможность работы с обеими полярностями входного сигнала. Это обеспечивает совместимость с различными типами полупроводниковых сенсоров, в частности кремниевыми (Si) и арсенид-галлиевыми (GaAs).

В настоящее время проводятся испытания прототипа детектора на 512 каналов. Полномасштабная версия прибора будет включать 1024 канала регистрации.

Проведены измерения микросхемы регистрации, которые выявили ряд проблем, в частности большой разброс сигналов в каналах при одинаковом уровне входного сигнала, а также самовозбуждение регистрирующего тракта при подключении большой емкости на вход. Данные недостатки планируется устранить в следующей итерации разработки. Текущая версия микросхемы была использована в составе прототипа для измерения его базовых характеристик, результаты которых будут представлены в настоящем докладе.

Расчёт и оптимизация параметров канала вывода излучения станции «ИК-диагностика» синхротронного источника СКИФ

Ташкеев Н.А.^{1,2,3}, Жимулева Е.С.⁴, Солдатенко А.В.⁴, Золотарев К.В.¹⁵, Вебер С.Л.^{1,2}

*1 – Центр коллективного пользования «СКИФ» Института катализа им. Г.К. Борескова
СО РАН, Кольцово, Россия*

2 – Институт «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*4 – Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
Новосибирск, Россия*

5 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: nikita.tashkeev@tomo.nsc.ru

Синхротронные источники третьего и четвертого поколений позволяют получать излучение с высокой яркостью в широком спектральном диапазоне [1]. Данное преимущество сохраняется и в инфракрасной области, где яркость синхротронного излучения на 2-3 порядка превышает яркость лабораторных источников ИК излучения, что обуславливает создание специализированных ИК-станций [2].

В качестве источника для таких станций, как правило, используется поворотный магнит накопительного кольца. Большой угол расходимости излучения в ИК- и ТГц-диапазонах предъявляет жесткие требования к параметрам первого зеркала, геометрии вакуумной камеры и оптического тракта, обеспечивающего транспортировку пучка до экспериментального оборудования. Для станции «ИК-диагностика» синхротронного источника СКИФ актуальной задачей является расчёт потока фотонов с учетом реальных геометрических размеров элементов канала вывода.

В работе представлены расчёты распространения излучения до экспериментального зала в диапазоне длин волн 1-1000 мкм. Для расчетов использованы программные пакеты Ansys Zemax OpticStudio и Synchrotron Radiation Workshop (SRW): первая - для моделирования распространения излучения в рамках геометрической оптики, вторая - для учёта волновых эффектов и корректного описания излучения на больших длинах волн [3,4].

В работе определены поперечные размеры пучка в области расположения ключевых оптических элементов, подобраны типы зеркал с оптимальными параметрами, и проведено сравнение потерь мощности излучения при различных вариантах покрытий зеркал, в частности дюралюминиевой поверхности и золотого напыления. На основе полученных результатов выбрана конфигурация оптического канала, обеспечивающая минимальные потери излучения при транспортировке до экспериментального зала.

Полученные результаты будут использованы при проектировании станции «ИК-диагностика» синхротронного источника СКИФ.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 25-13-20039, и Новосибирской области, соглашение № 30-25-000858.

Литература:

- [1] Evans J. Brilliant opportunities across the spectrum // Physical Chemistry Chemical Physics. 2006. Vol. 8. P. 3045–3058. DOI: 10.1039/B604369K.
- [2] Miller L.M., Dumas P. Chemical imaging of biological tissue with synchrotron infrared light // Biochimica et Biophysica Acta. 2006. Vol. 1758. P. 846-857.
- [3] Synchrotron Radiation Workshop (SRW) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://github.com/ochubar/SRW>
- [4] Ansys Zemax OpticStudio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio>

Синхротроны и лазеры на свободных электронах для промышленной EUV/BEUV литографии

Дорофеев В.П.¹

*1 – Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Москва, Россия*

E-mail: Dorofeev.VP@phystech.edu

Современные системы фотолитографии компании компании ASML используют EUV-излучение с длиной волны 13,5 нм при помощи полученной при помощи лазера плазмы (laser-produced plasma, LPP) из олова и работают в промышленном масштабе с 2018 [1]. В качестве альтернативного источника излучения идёт исследование возможностей использования лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) и синхротронов [2], [3].

В данной работе проведён обзор текущих исследований по использованию ЛСЭ и синхротронов для EUV-литографии в ведущих исследовательских центрах России (Сибирь-2), Германии (ЛСЭ FLASH), Японии (KEK), Китае (SHINE). Проведён параметрический анализ ориентированных на промышленную эксплуатацию проектов компаний Substrate, xLight, технологии устойчивого формирования микросгустков пучков в синхротронах (Steady-State Microbunching, SSMB) и их сравнительный анализ с технологией LPP. Прогноз по развитию источников излучения для промышленной литографии приведён в таблице 1.

Горизонт планирования	Доминирующая технология	Основные конкуренты / альтернативы
2026-2030	ASML EUV (Low-NA и High-NA)	xLight (начало испытаний), Substrate (первые чипы?)
2030-2035	ASML EUV (Hyper-NA) + xLight FEL (источники)	SSMB (прототипы), Substrate (нишевое применение?)
2035-2040	SSMB (прототипы), Substrate (нишевое применение?)	Рентгеновская литография (Substrate или аналоги)

Таблица 1. Прогноз развития источников излучения для промышленной литографии.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 "Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах" (1023032100070-3-1.2.1)..

Литература:

- [1] Miyazaki J., Yen A. EUV lithography technology for high-volume production of semiconductor devices //Journal of Photopolymer Science and Technology. – 2019. – Т. 32. – №. 2. – С. 195-201.
- [2] Hosler E. R. et al. Considerations for a free-electron laser-based extreme-ultraviolet lithography program //Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI. – SPIE, 2015. – Т. 9422. – С. 80-94.
- [3] Jiang B. et al. A synchrotron-based kilowatt-level radiation source for EUV lithography //Scientific reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 3325.

Концепция станции «БелРос-СИ» ЦКП «СКИФ»

Бурдилов А.А.^{1,2}, Довженко Г.Д.^{1,2}, Платунов М.С.¹, Карпинский Д.В.³, Гилеп А.А.⁴, Труханов А.В.³,
Зубавичус Я.В.¹, Бухтияров А.В.¹

1 – ЦКП «СКИФ», Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

3 – ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

4 – ГНУ «Институт биоорганической химии НАН Беларуси», Минск, Беларусь

E-mail: burdilov12@gmail.com

В данной работе представлена концепция экспериментальной станции на поворотном магните источника СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ». Данная станция разрабатывается как совместный проект между НАНБ и ЦКП «СКИФ» и ориентирована на решение научных, научно-промышленных, и образовательных задач Союзного государства.

Станция «БелРос-СИ» будет ориентирована на комплексный анализ синтетических и природных материалов, отдельных узлов и устройств с применением передовых структурных и спектральных методов исследования на базе СИ. Ключевыми экспериментальными методиками станции будут порошковая дифракция, монокристаллическая дифракция, и спектроскопия поглощения.

Учитывая широкий набор экспериментальных задач, для станции «БелРос-СИ» была выбрана универсальная оптическая схема «зеркало – монохроматор – зеркало» (рис. 1). Данная схема позволяет получать сфокусированный или несфокусированный пучок на образце размерами от 30×30 мкм² до 20×200 мм² (верт. $\times$ гор.). Диапазон рабочих энергий станции 5 – 30 кэВ. Оптическое моделирование станции проводилось в пакете XRT [1].

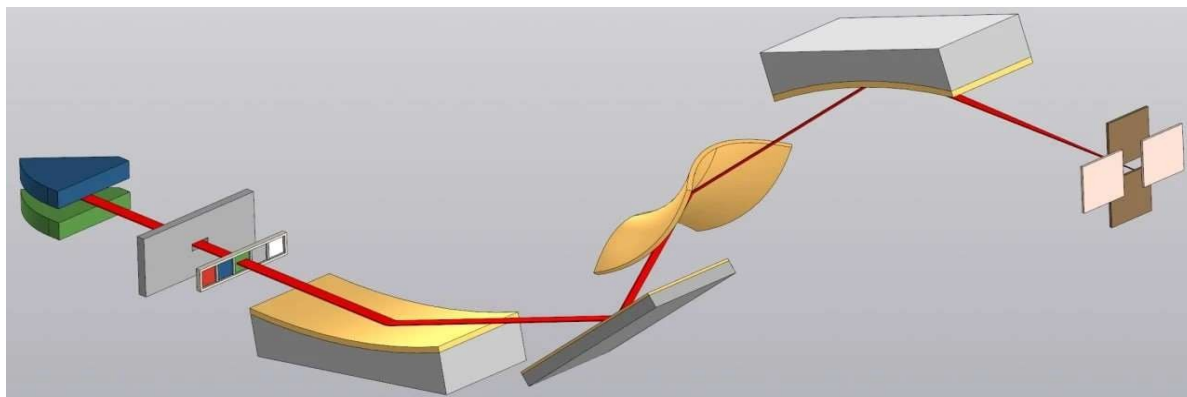


Рис. 1. Оптическая схема станции БелРос-СИ

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2026-0002).

Литература:

[1] Klementiev K., Chernikov R. // Advances in Computational Methods for X-Ray Optics III. 2023. Т.1. С. 23-27.

Разработка проекта системы диагностики пучка на установке «СИЛА»

Павлов В.М.¹, Мезенцев А.А.¹, Ким В.Л.¹, Вуколов А.В.¹, Шкитов Д.А.^{1,2}, Шевелёв М.В.¹,
Ефимов Ю.В.²

1 – Томский политехнический университет, Томск, Россия

2 – НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: shkitovda@tpu.ru

В России начато строительство новой установки для генерации синхротронного излучения — проект «СИЛА», который включает синхротрон и лазер на свободных электронах, с максимальной энергией электронов 6 ГэВ. В настоящее время активно осуществляется проектирование всех систем установки. С учетом развития научной инфраструктуры России, эта установка обладает уникальными характеристиками, что делает крайне важным создание системы диагностики пучка (СДП) на основе современных методов и технологий, развитых к настоящему времени. Система диагностики пучка является незаменимой для функционирования современных ускорителей. Её работа критически важна для обеспечения функционирования всего ускорительно-накопительного комплекса и в итоге для успешной генерации синхротронного излучения.

В данной работе представлено описание системы диагностики пучка для всего ускорительно-накопительного комплекса (УНК), включая электронную пушку, линейный ускоритель (ЛУЭ), лазер на свободных электронах (ЛСЭ), накопительное кольцо (НК), канал перепуска (КП). Система диагностики пучка предназначена для мониторинга параметров УНК, обеспечения стабильности работы установки и автоматизации операций управления.

СДП будет включать в свой состав следующие диагностические подсистемы: диагностики поперечного профиля и эмиттанса электронного пучка в ЛУЭ; диагностики продольного профиля сгустка на основе высокочастотного дефлектора в ЛУЭ; диагностики положения пучка в ЛУЭ и в НК; диагностики среднего тока пучка в НК; диагностики заряда сгустка; диагностики продольного профиля пучка по когерентному излучению в ЛУЭ; диагностики продольного профиля пучка в НК; диагностики поперечного профиля, эмиттанса и колебаний пучка в НК; диагностики потерь пучка газоразрядными детекторами; диагностики потерь пучка оптоволоконными мониторами; диагностики энергии пучка ЛУЭ; диагностики частот бетатронных колебаний в НК.

Ключевыми задачами проекта, реализованного в 2024-25 годах, являлись выбор и обоснование методов измерения параметров пучка, разработка алгоритмов обработки получаемых данных и интеграция СДП с другими существующими системами управления установки. Успешная реализация данного проекта СДП и реализация всей установки «СИЛА» будет способствовать развитию новых направлений исследований в России.

Благодарности: Работы выполнены в рамках НИОКР в целях создания принципиально нового перспективного источника, превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения (СИЛА).

Восстановление уравнения состояния взрывчатых веществ с использованием малоуглового рентгеновского рассеяния в локальной области зоны химической реакции

Толочко Б.П.¹, Чернышев А.П.¹, Тен² К.А., Рубцов² И.А.

1 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: bptolochko@yahoo.com

Для адекватного прогнозирования характеристик детонации и калибровки реакционно-гидродинамических моделей требуется точное уравнение состояния (УС) продуктов взрыва. Традиционные контактные и оптические методы (ПДВ, магнитные датчики, импедансный анализ) обеспечивают высокую временную разрешающую способность, но дают интегральные характеристики фронта детонации и не позволяют напрямую зондировать локальную плотность, давление и внутреннюю энергию внутри зоны химической реакции (ЗХР). Длина ЗХР составляет доли миллиметра, а характерное время реакций — единицы-сотни наносекунд, что ставит сложные экспериментальные задачи. Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) открывает уникальную возможность отслеживать *in situ* эволюцию наноразмерных структур (углеродные кластеры, металлические добавки, микронеоднородности) в условиях ударно-волнового сжатия и быстрого энергосвечения [1].

В основе предлагаемого подхода лежит метод зондирования ЗХР с помощью наночастиц. Количественный анализ контраста МУРР между электронной плотностью наночастиц и окружающей среды в приближении Гинье можно определить из следующего соотношения:

$$I(q) = I_e N V^2 (\Delta\rho)^2 \exp\left(-q^2 R_g^2/3\right),$$

где $\Delta\rho$ — контраст, напрямую зависящий от локальной степени сжатия детонирующего вещества. Прохождение детонационной волны изменяет плотность окружающей наночастицы среды ρ_0 , что фиксируется по динамике интенсивности рассеяния. Используя законы сохранения массы и импульса на фронте ударной волны, а также калорические УС (в частности, в форме Джонса–Уилкинса–Ли), экспериментально определяемые параметры МУРР связываются с локальными термодинамическими переменными. Ключевым этапом является восстановление степени сжатия $\delta = \rho/\rho_0$ из временных профилей МУРР, что позволяет рассчитать давление и внутреннюю энергию в заданной точке ЗХР.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 23-72-00060.

Литература:

[1] Rubtsov I.A., Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O., Tolochko B.P., Zhulanov V.V., Shekhtman L.I., Piminov P.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 754. P. 052004 (6).

Исследование широкополосного поглощения в структуре металл-диэлектрик-металл в терагерцевом диапазоне спектра

В.В. Герасимов^{1,2}, С.А. Кузнецов^{1,2,3}, А.Г. Лемзяков¹, А.А. Рыбак⁴,
В.А. Степанов⁵, Д.В. Фромичев⁵

1 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

2 - Новосибирский государственный университет

3 - Филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН "КТИПМ"

4 - Институт автоматики и электрометрии СО РАН

5 - Новосибирский завод полупроводниковых приборов «НЗПП Восток»

Аннотация

В докладе представлены результаты теоретического анализа взаимодействия излучения с трехслойной структурой «металл–диэлектрик–металл», используемой в пироэлектрических детекторах, для определения условий максимизации коэффициента поглощения в широкой спектральной полосе частот. Используя метод линий передач, получены простые аналитические выражения для оптимальных значений импеданса металлических электродов с учетом оптических параметров диэлектрического слоя. Эти выражения позволяют максимизировать поглощение и исключить интерференцию в пироэлектрической плёнке для типичной ситуации, когда частота столкновений свободных электронов в металле значительно выше частоты детектируемого излучения. Достоверность аналитических выражений подтверждается измерениями в диапазоне частот 0,1–10 ТГц с использованием импульсного терагерцового (TDS) и Фурье спектрометров для модельных образцов, содержащих нихромовые пленки, нанесенные на подложки из кристаллического кварца и высокоомного кремния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-20008 и при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области (<https://rscf.ru/project/25-22-20008/>).

Реконструкция станции «Аномальное Рассеяние» на канале №2 источника СИ ВЭПП-3

Шмаков А.Н.^{1,2}, Папко С.С.³, Балаш И.И.^{1,2,4}, Евдоков О.В.⁴, Гольденберг Б.Г.^{1,2}

1 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный исследовательский центр "Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук", Новосибирская область, р.п. Кольцово, 630559, Россия

2 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия

3 – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, 630073, Россия

4 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: A.N.Shmakov@inp.nsk.su

Станция «Аномальное Рассеяние» в Сибирском Центре Синхротронного и Терагерцового Излучения была создана на канале вывода СИ №2 в бункере СИ накопителя электронов ВЭПП-3 в 1991 году и с тех пор значительных изменений и усовершенствований не претерпевала за исключением системы автоматизации. Высокое инструментальное разрешение дифрактометра, установленного на станции, и возможность произвольного выбора рабочей энергии излучения в диапазоне 5-20 кэВ делали станцию одной из наиболее востребованных и загруженных. В 2023 году было принято решение о глубокой модернизации станции с целью улучшения ее характеристик и пропускной способности, а также для отработки некоторых технических решений, которые будут применены на станциях создаваемого источника синхротронного излучения СКИФ.

В настоящее время реконструкция станции завершена. Станция включает в себя первичный коллиматор, ограничивающий вертикальный размер пучка, с возможностью мониторинга положения первичного пучка по вертикали; кристалл-монокроматор Si(111) типа channel-cut с отклонением пучка вверх, офсет 5 мм; монитор входной интенсивности. Все элементы расположены в вакууме. На станции установлен дифрактометр на базе гониометра Microcontrol RT660 с трехканальной системой регистрации рентгенограмм. Каждый канал представляет собой кристалл-анализатор Ge(111) и кремниевый фотоумножитель со сцинтиллятором LaBr₃(Ce). Угловой интервал между каналами 5°. Система позиционирования образца собрана на основе элементов прецизионной механики Standa и включает в себя гониометр образца, трёхкоординатный столик и поворотную платформу для вращения образца вокруг нормали к поверхности. Обновленный вариант системы управления обеспечивает контроль двигателей и детекторов в произвольном сочетании.

Дифракционные исследования функциональных и конструкционных материалов в СЦСТИ

Шмаков А.Н.^{1,2}, Герцель И.С.^{1,3}, Маликов А.Г.³, Денисов В.В.⁴, Сыртанов М.С.⁵,
Подъячева О.Ю.⁶, Пригородова А.Н.⁷, Низовский А.И.⁶

- 1 – Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов"
Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный
исследовательский центр "Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения
Российской академии наук", Новосибирская область, р.п. Кольцово, 630559, Россия
- 2 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной
физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск,
630090, Россия
- 3 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, 630090, Россия
- 4 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Россия
- 5 – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, 634050, Россия
- 6 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный
исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения
Российской академии наук», Новосибирск, 630090, Россия
- 7 - Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»,
Кемерово, 65000, Россия

E-mail: A.N.Shmakov@inp.nsk.su

Исследования структуры, фазового состава функциональных и конструкционных материалов и их эволюции в условиях воздействия высоких температур и реакционных сред методами рентгеновской дифракции были проведены на станциях СИ «Дифрактометрия при высоких давлениях», «Прецизионная Дифрактометрия II» источника СИ ВЭПП-3 и «Жесткая рентгеноскопия» источника СИ ВЭПП-4М в СЦСТИ.

Станция «Дифрактометрия при высоких давлениях» смонтирована на канале СИ №4 источника СИ ВЭПП-3 и предназначена для проведения исследований методом рентгеновской дифракции с использованием излучения с энергией фотонов 33.7 кэВ, позволяющего получать структурную информацию об объектах исследования, находящихся как в нормальных внешних условиях, так и в условиях ограниченного объема при высоких температурах и давлениях. На станции были выполнены эксперименты по исследованию фазового состава биоминералов, углеродных наноматериалов, катализаторов гидрирования CO₂ в метан и муравьиную кислоту.

Станция «Прецизионная Дифрактометрия II» смонтирована на канале СИ №6 источника СИ ВЭПП-3 и предназначена для проведения исследований структуры и структурно-фазовых

превращений в материалах под воздействием высоких температур и реакционных сред. На станции были выполнены эксперименты по исследованию влияния процессов высокотемпературной обработки на фазовый состав сплавов и сварных швов, поведения при высоких температурах покрытий различного состава. С использованием специально разработанного и изготовленного вакуумного электрон-ионно-плазменного стенда (ВЭИПС) выполнены работы по In Situ дифракционной диагностике процессов нанесения покрытий из плазмы газового разряда и воздействия потоков высокоэнергетических частиц на поверхность материалов.

Станция «Жесткая Рентгеноскопия» смонтирована на канале №8 источника СИ ВЭПП-4М и использует излучение в диапазоне энергий 30-110 кэВ. Высокая проникающая способность жесткого излучения и короткая длина волны позволяют в небольшом интервале углов дифракции получать экспериментальные данные в широком диапазоне векторов рассеяния, в том числе для использования метода функций радиального распределения электронной плотности. На станции были проведены исследования структуры таких слабоорганизованных объектов как оксидные носители и металлические катализаторы с высокой удельной поверхностью, а также фазового состава почечных камней.

Модернизация пироэлектрических детекторов на основе пленок тетрааминодифенила для работы в терагерцевом диапазоне частот

Н.М. Шемягин¹, В.В. Герасимов^{2,3}, С.А. Кузнецов^{2,3,4}, В.А. Степанов¹, Д.В. Фромичев¹

1 - Новосибирский завод полупроводниковых приборов «НЗПП Восток»

2 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

3 - Филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН "КТИПМ"

4 - Новосибирский государственный университет

Аннотация

В докладе будут представлены результаты оптимизации в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот поглощающей структуры пироэлектрических детекторов на основе органических пленок тетрааминодифенила, выпускаемые Новосибирским заводом полупроводниковых приборов «НЗПП Восток». Была отработана технология изготовления поглощающей структуры с использованием нихромовых электродов с оптимальным поверхностным сопротивлением и изготовлена серия образцов. Образцы были протестированы на отдельных частотах в диапазоне 0.14 – 4 ТГц с использованием коммерчески доступных источников на основе диодов Шоттки (МВэЙв) и ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах. Результаты продемонстрировали увеличение чувствительности детекторов с оптимизированными параметрами более чем на порядок по сравнению с ранее выпускаемыми детекторами для инфракрасного диапазона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-20008 и при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области (<https://rscf.ru/project/25-22-20008/>).

Пятиполюсный сверхпроводящий шифтер с полем 5.5 Тесла для КИСИ-2

Хрущев С.В.¹, Шкаруба В.А.¹, Мезенцев Н.А.¹, Сафронов А.Н.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН разработан сверхпроводящий пятиполюсный шифтер для генерации синхротронного излучения в целевом спектральном диапазоне 10 – 150 кэВ на станции СИТОМ модернизируемого источника КИСИ-Курчатов. Магнитная структура шифтера, состоящая из короткого центрального полюса с максимальным уровнем поля 5.5 Тл и двух пар длинных боковых полюсов с низкими уровнями поля, формирует орбиту электронного пучка, обеспечивающую неподвижность центральной точки излучения во всём диапазоне рабочих полей. Конфигурация центрального полюса была оптимизирована для получения высокой продольной однородности магнитного поля, обеспечивающей излучение в широкий горизонтальный угол 7.5 мрад и засветку широких образцов с равномерностью не хуже 5% на энергии фотонов 100 кэВ. Величины магнитных полей на боковых полюсах были минимизированы для смещения излучения в мягкую область спектра.

В статье рассматривается конструкция магнитной системы шифтера, обосновывается выбор параметров сверхпроводящих обмоток, приводятся расчетные параметры шифтера.

Выявление геохимически контрастных ритмов в спелеоотложениях Денисовой пещеры методами статистического анализа (по данным РФА СИ)

Кириченко И.С.¹, Козликин М.Б.², Сокол Э.В.^{1,2}, Некипелова А.В.^{1,2}, Шуньков М.В.²

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

2 – Институт археологии и этнографии СО РАН

E-mail: iskirichenko@igm.nsc.ru

При изучении пещерных памятников расчленение осадочных толщ на индивидуальные горизонты является одной из ключевых задач, поскольку на эту базу опираются последующие хронологические, палеоэкологические и археологические интерпретации. Анализ сплошных колонок осадков с применением высокоразрешающих методов позволяет уточнить механизмы формирования пещерных отложений и выявить их тонкую ритмику, обусловленную вариациями источников поступления вещества, режимом его аккумуляции и интенсивностью седиментации. Применение рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) при исследовании непрерывных колонок отложений Денисовой пещеры (СЗ Алтай) и референсных дублей порошкового материала отдельных проб впервые позволило получать количественные профили распределения (*от К до Мо (общее количество 22)*) макро- и микроэлементов с пространственным разрешением (1мм). Для иллюстрации возможностей метода были проанализированы непрерывные колонки осадков контрастных по химическому и фазовому составу (слои 9.1 - 8).

Денисова пещера представляет собой уникальный археолого-геологический объект, где сформирована многометровая толща стратифицированную отложений. Осадочные последовательности центрального зала и двух галерей содержит многочисленные артефакты – свидетельства различных этапов человеческой деятельности [1], а также индикаторы палеоклиматических и седиментационных обстановок, существовавших на северо-западе Алтая во второй половине среднего и в верхнем плейстоцене [2].

В данной работе продемонстрирована эффективность метода РФА-СИ в варианте микросканирования (микропрофилирования) для: (i) выявления в непрерывных осадочных профилях гомогенных интервалов и микронеоднородностей (с шагом сканирования/разрешением 1 мм); (ii) выявления серий (групп, комплексов) парагенетических ассоциаций химических элементов, связанных с единым источником материала; (iii) определение соотношения между различными источниками материалов в составе пещерных осадков и (iv) анализа изменения этих соотношений в процессе формирования непрерывной осадочной колонки.

Полученные данные составили базу для многомерного статистического анализа (методами кластеризации и факторного анализа).

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 24-78-10006.

Литература:

- [1] Jacobs Z. et al. Timing of archaic hominin occupation of Denisova Cave in southern Siberia //Nature. – 2019. – Т. 565. – №. 7741. – С. 594-599.
- [2] Agadzhanyan A. K., Shun'kov M. V., Kozlikin M. B. Small vertebrates from the Pleistocene sediments of the East Chamber of Denisova Cave, northwestern Altai Mountains //Paleontological Journal. – 2021. – Т. 55. – №. 3. – С. 331-342.

Моделирование генерации дифракционного излучения, несущего орбитальный угловой момент, от секторной спиральной мишени

Шкитов Д.А.¹, Бердников Н.С.¹

1 – Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: shkitovda@tpu.ru

Излучение с винтовым волновым фронтом (закрученное излучение, излучение, несущее орбитальный угловой момент) может стать полезным инструментом в системах визуализации или предоставить новую ценную информацию о веществе при использовании источников закрученного излучения [1]. В работе [2] показано, что переходное излучение, возникающее при взаимодействии релятивистского электронного пучка с покрытой золотом кремниевой пластиной, может нести орбитальный угловой момент.

В данной работе, в развитие результатов [3], представлены результаты моделирования пространственных, спектральных, поляризационных и фазовых характеристик когерентного дифракционного излучения, возникающего при взаимодействии кулоновского поля электронного пучка с энергией 5.7 МэВ и длительностью около 10–15 пс с мишенью в виде секторного геликоида. С точки зрения геометрии эта мишень является аналогом спиральной фазовой пластины с различным топологическим зарядом. Моделирование проведено для мишени диаметром 200 мм и в условиях близких к планируемым в эксперименте на микротроне ТПУ. Также в работе дана оценка выхода мощности излучения для различных энергий электронного пучка.

Предполагается, что секторная спиральная мишень может стать непосредственным источником закрученного излучения с разным топологическим зарядом.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание "Наука" № FSWW-2026-0046).

Литература:

- [1] Князев Б.А., Сербю В.Г. // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. №. 5. С. 508-539.
- [2] Takabayashi Y. et al. // Physical Review A. 2025. V. 111. P. L061501. DOI: 10.1103/gxwj-yvdj.
- [3] Бердников Н.С., Шкитов Д.А., Лазаренко Г.Ю. // Материалы RuPAC'25, 2025. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/403116500> (дата обращения 25.03.2026)

Станция второй очереди «Метрология и спектроскопия в мягком рентгеновском диапазоне». Состояние проекта.

К.В. Золотарев^{1,2}, С. В. Кузин⁵, А.Д. Николенко^{1,2,6}, А.Д. Федоренко^{1,7}, М.С. Платунов¹, А.Г. Шмаков³, С.С. Папко⁶

1 - ЦКП СКИФ, Кольцово

2 - ИЯФ СО РАН, Новосибирск

3 - ИХКиГ СО РАН, Новосибирск

5 - ИСЗФ СО РАН Иркутск

6 - НГТУ, Новосибирск

7 - ИНХ СО РАН, Новосибирск

В работе описывается станция, позволяющая работать с излучением в диапазоне 5÷10 000 эВ и решать ряд прикладных и фундаментальных задач, связанных с метрологией и спектроскопией в названных диапазонах. Планируется, что станция будет создана на строящемся источнике синхротронного излучения СКИФ и будет использовать излучение из его «мягкого» поворотного магнита ($B=0.5$ Тл). В настоящее время единственной станцией СИ, реально работающей в этом диапазоне, является станция «Космос», использующая излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4. На новой станции, как ожидается, частично будет использована аппаратура станции «Космос» после ее глубокой модернизации. Кроме того, будут изготовлены новые элементы, существенно расширяющие ее функционал. Новая станция, как ожидается, позволит продолжить развитие методик, отработанных на станции «Космос», но с использованием более современной аппаратуры и более высокими потоками фотонов, поэтому второе рабочее название станции – «Космос-2». Среди станций первой очереди ЦКП «СКИФ» в 2026 году будет запущена в эксплуатацию станция 1-6 «Электронная структура», которая будет функционировать в диапазоне 5-2000 эВ и решать различные задачи с использованием методов фотоэлектронной спектроскопии. Станция «Космос-2» существенно дополнит возможности этой станции. Так, в дополнение к функционалу станции 1-6 «Электронная структура» станция «Космос-2» будет обеспечивать:

- возможность работы с «белым» и «розовым» пучком;
- измерение спектров поглощения и флуоресценции в диапазоне 0.5-5 кэВ;
- метрологические измерения в ВУФ и МР диапазонах;
- измерения рентгеновских эмиссионных спектров;
- спектроскопические измерения в ВУФ диапазоне;
- исследование процессов горения и пиролиза методом фото-индуцированной масс-спектрометрии с возбуждением в ВУФ диапазоне.

В докладе описана компоновка станции «Космос-2», состав ее аппаратуры, основные параметры и портфель экспериментальных задач. Описание системы монохроматоров станции вынесено в отдельный доклад, тезисы которого входят в состав настоящего сборника.

Система монохроматоров станции «Космос-2»

А.Д. Николенко^{1,2,4}, А.Д. Федоренко^{1,5}, М.С. Платунов¹, А.Г. Шмаков³

1 - ЦКП СКИФ, Кольцово

2 - ИЯФ СО РАН, Новосибирск

3 - ИХКиГ СО РАН, Новосибирск

4 - НГТУ, Новосибирск

5 - ИНХ СО РАН, Новосибирск

«Космос-2» - рабочее название станции второй очереди сторонящегося источника синхротронного излучения СКИФ. Официальное наименование станции «Метрология и спектроскопия в мягком рентгеновском диапазоне». Описание станции приведено в одном из докладов настоящей конференции, тезисы которого входят в состав настоящего сборника. Рабочий диапазон станции – 5 – 10 000 эВ. Для покрытия столь широкого диапазона на станции предусмотрена установка монохроматоров трех типов, каждый из которых вводится в пучок последовательно, в зависимости от задачи. Рентгеновский диапазон на станции подразделяется на два поддиапазона: «ультрамягкое рентгеновское излучение» с энергией 100–3000 эВ и «мягкое рентгеновское излучение» (MP) с энергией 2000–8000 эВ. В англоязычной литературе для обозначения последнего диапазона используется термин tender X-ray. Для выделения монохроматического излучения ВУФ-диапазона из белого пучка синхротронного излучения применяется монохроматор на основе VLS-решётки (спектральное разрешение $\Delta E/E \sim 0.01\%$); для ультрамягкого рентгеновского диапазона используется гибридный монохроматор (многослойное зеркало + кристалл, спектральное разрешение $\Delta E/E \sim 0.1\%$); для диапазона мягкого рентгеновского излучения — двухкристальный монохроматор (спектральное разрешение $\Delta E/E \sim 0.01\%$). Система также предусматривает фокусировку пучка с помощью тороидальных зеркал и подавление кратных гармоник посредством зеркал полного внешнего отражения. Приведены результаты исследования оптических схем монохроматоров методом лучевой трассировки.

Детекторы мягкого рентгеновского диапазона для станции синхротронного излучения «Космос»

В.В. Забродский¹, С. В. Кузин², А.Д. Николенко^{3,4}

1 - ФТИ РАН, Москва

2 - ИСЗФ СО РАН Иркутск

3 - ЦКП СКИФ, Кольцово

4 - ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Станция СИ «Космос» использует излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4. Для регистрации излучения на станции используются рентгеновские детекторы различного назначения. Основным детектором является фотодиод типа ФДУК-100 УВ. Два экземпляра этих фотодиодов прошли калибровку в Германском метрологическом центре Physikalisch-Technische Bundesanstalt и используются как эталонные детекторы при проведении метрологических работ. Также эти фотодиоды применяются для регистрации мягкого рентгеновского излучения при проведении спектроскопических измерений методом XAFS в диапазоне 1 – 10 кэВ в режиме пропускания образцов. В случае, если образцы нанесены на непрозрачную подложку или имеют недостаточную прозрачность, проводятся измерения полного выхода флуоресценции в геометрии обратного рассеяния. В этом случае регистрируемое рассеивается в полный телесный угол 4π , и возникает задача сбора излучения с максимально большого телесного угла. С этой целью в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН был разработан и изготовлен многокомпонентный рентгеновский детектор РМД, представляющий собой сборку из 20 чувствительных элементов ФДУК-100УВ, собранных на единой плате. Приведена конструкция детектора и результаты его применения для измерения спектров.

В случае получения низкого сигнала на детекторе, с целью повышения точности измерений, применена методика измерения, близкая по своей сути к методике синхронного детектирования и предусматривающая регулярное, с периодом порядка 6 секунд, перекрывание пучка с целью снижения влияния дрейфа нулевой линии. В докладе описана процедура обработки полученного сигнала и оценка повышения точности измерения за счет ее применения.

Для регистрации фотонов с энергией менее 1 кэВ на станции применяется пропорциональный счетчик в счетном режиме. Приведены оценки его эффективности для различных энергий фотонов, а также оценки влияния на точность измерений особенности источника синхротронного излучения, а именно его временной структуры, представляющей собой короткие яркие вспышки (0.5 нс), следующие через относительно длительные, порядка 600 нс, интервалы времени.

Для визуализации пучка применяется двухкоординатный детектор разработки ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, разработанный на основе ПЗС-матрицы производства e2v (Великобритания).

Использование рентгеновской томографии для исследования зернограницной структуры системы Al-Ga-In

Низовский А.И.¹, Шмаков А.Н.², Гогин А.А.³, Клещев И.М.³, Бухтияров В.И.¹

1 – Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – «СКИФ», Кольцово, Россия

3 – НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: alex niz@inbox.ru

Удобным способом получения водорода на месте потребления в требуемом количестве является его производство в химических реакциях, например, в реакциях металлического алюминия или сплавов на его основе с водными растворами. В данной работе в качестве исходных материалов использовали промышленные конструкционные алюминиевые сплавы. Метод активирования заключался в обработке поверхности массивных образцов из конструкционных алюминиевых сплавов Д1Т, Д16Т и др. эвтектикой Ga-In (76–24 мас. %, $T_{пл.} = 15,9^{\circ}\text{C}$). Высокая реакционная способность полученных продуктов достигалась за счет эффекта Ребиндера, связанного с диффузией компонентов эвтектики по межзеренным границам исходного сплава. Эффективность выделения водорода в реакции активированного эвтектикой Ga-In материала с водой существенно зависела от морфологии исходного промышленного сплава.

Установлено, что эффективность взаимодействия Ga-In эвтектики с алюминиевыми сплавами зависела от их морфологии. Высокая реакционная способность получаемых в процессе активирующей обработки сплавов связана с формированием наноструктурированного материала, в котором компоненты Ga-In эвтектики равномерно распределены по границам зерен всей массы материала, причем в жидком состоянии.

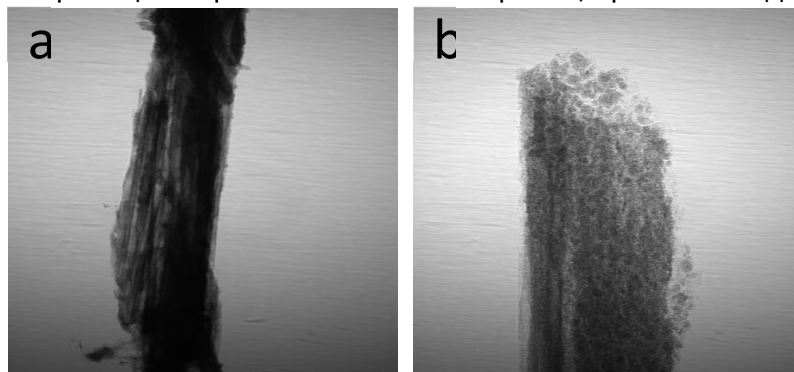


Рис. 1. Теневые проекции сплава Д16Т, обработанного Ga-In эвтектикой: а – высокоактивный; б – дезактивированный при длительном хранении в атмосферных условиях.

При длительном хранении при атмосферных условиях активированный материал терял реакционную способность. Показано, что потеря активности связана с окислением Ga, входящего в Ga-In эвтектику, и последующим нарушением зернограницной структуры материала.

Моделирование и оптимизация ондуляторной линии лазера на свободных электронах «СИЛА» жесткого рентгеновского диапазона

Аккуратов В.И.¹, Тютюкин А.А.¹, Комлев А.С.¹, Клочков Н.С.¹, Таргонский А.В.¹

1 – НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: akkuratov.val@gmail.com

На экспериментальных станциях лазера на свободных электронах (ЛСЭ) исследовательской установки «СИЛА» предполагается использование жесткого (3 – 12 кэВ) рентгеновского излучения. Для генерации фемтосекундных импульсов жесткого когерентного рентгеновского излучения с высокой спектральной яркостью как правило используется ЛСЭ в режимах самоусиления спонтанного излучения (англ. SASE, Self-Amplified Spontaneous Emission) [1] и самозатравки (Self-seeding). Данные подходы для генерации излучения применяются во многих современных ЛСЭ, например, LCLS, SACLA и EuXFEL.

В докладе представлены рассчитанные параметры рентгеновских импульсов ондуляторной линии жесткого рентгеновского диапазона (6.7 – 12.2 кэВ) для работы лазера на свободных электронах «СИЛА» в SASE и Self-seeding режимах при помощи открытого программного обеспечения SIMPLEX [2] и Genesis [3]. Для расчетов использованы параметры in-vacuum ондуляторов с гибридной структурой (состоящие из постоянных магнитов и магнитномягких концентраторов магнитного потока) с магнитным периодом 18 мм, разрабатываемых в НИЦ «Курчатовский Институт», а также расчетные параметры электронного пучка линейного ускорителя ЛСЭ «СИЛА». Для SASE режима рассчитаны кривые усиления и спектры рентгеновских импульсов на выходе ондуляторной линии на границах доступного диапазона энергии фотонов. Установлено, что длина ондуляторной линии с 25 сегментами (125 м) позволяет успешно генерировать рентгеновское излучение в SASE режиме с насыщением. Для Self-seeding режима определено оптимальное место установки секции с алмазным монохроматором, а также рассчитаны кривые усиления и спектры рентгеновских импульсов на выходе ондуляторной линии.

Литература:

- [1] Derbenev Ya.S. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. V. 193. 1982. P. 415-421.
- [2] Tanaka T. // Journal of Synchrotron Radiation. V. 22. 2015. P. 1319-1326.
- [3] Reiche S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999. T. 429. № 1. C. 243-248.

Исследование качества и устойчивости мультимодальных алгоритмов совмещения трехмерных изображений

Коляскин Л.Ю.^{1,2,3}, Гильманов М.И.^{2,3}, Чукалина М.В.^{3,4}

1 – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

2 – Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва, Россия

3 – ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

E-mail: koliaskin.li20@physics.msu.ru

Приведение трёхмерных изображений, полученных различными методами томографии, к единой системе координат критически важно для комплексного анализа в медицине, материаловедении и других приложениях, однако фундаментальные различия в физических принципах формирования контраста существенно осложняют задачу их автоматического совмещения. Существует ряд методов автоматического мультимодального совмещения, но корректно сравнить их обобщающую способность по отношению к модальностям данных затруднительно из-за отсутствия доступных инструментов оценки универсальности [1].

В данной работе проведён анализ стабильности и качества трёхмерного совмещения открытыми алгоритмами на мультимодальных томографиях различных недеформируемых объектов. Экспериментальные данные включали рентгеновскую компьютерную томографию, магнитно-резонансную томографию, синхротронную и нейтронную томографии, а также вокселизированные CAD-модели. Для исследования были выбраны и реализованы известные алгоритмы на основе разных подходов: оптимизация вычисляемых метрик сходства по всему объёму изображения [2], выделение и сопоставление особых точек объёмов [3], совмещение на основе свойств самоподобия [4].

Исследование показало, что заявленные мультимодальные алгоритмы работают неустойчиво при существенных различиях модальностей трёхмерных изображений. Устойчивость совмещения напрямую зависит от сходства данных: она высока в близком к мономодальному случае (рентгеновская томография на разных энергиях), но резко падает при сильном изменении свойств сигнала в выделенных модальностях, например при сопоставлении данных нейтронной и синхротронной томографии.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИППИ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Литература:

[1] Velesaca H.O., Bastidas G., Rouhani M. et al. // Multimed Tools Appl. 2024. V. 3, P. 63919–63947.

[2] Lowekamp B.C., Chen D.T., Ibáñez L., et al. // Front. Neuroinform. 2013. V 7. P. 45.

[3] Rister B., Horowitz M.A., Rubin D.L. // IEEE Trans Image Process. 2017. V 26(10). P. 4900–4910.

[4] Heinrich M.P., Jenkinson M., Brady M., Schnabel J.A. // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2013. V. 32(7), P. 1239–1248.

Рентгеновский детектор на основе электронно-оптического преобразователя

Терещенко О.Е.^{1,2}, Меркулин К.В.¹, Шайблер Г.Э.¹, Бакин В.В.¹, Мараховка И.И.³, Кислых Н.В.³, Коптилов А.В.³, Демин А.Ю.³, Куликов Д.М.³, Ярмошенко Ю.М.⁴, Кантур И.Э.⁴, Кузнецова Т.В.⁴

1 – Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», 630559, Кольцово, пр. Никольский, 1, Новосибирск, Россия

3 – ЗАО Экран ФЭП, ул. Зеленая горка, д. 1, Новосибирск

4 – Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН Россия, Екатеринбург

E-mail: teresh@isp.nsc.ru

Нами изготовлен рентгеновский детектор на базе электронно-оптического преобразователя с CsI фотокатодом и входным бериллиевым окном (Рис.1 а), который продемонстрировал возможность детектирования гамма-квантов с энергиями 60 кэВ от радиоактивного источника америция (Am 241) (Рис.1 б). На рис. 1 с,d представлены также результаты измерений рентгеновских эмиссионных спектров в виде изображения и графика зависимости интенсивности от энергии. Возможное окно работы рентгеновского детектора не ограничивается диапазоном 2–60 кэВ и требует проведения калибровочных измерений.

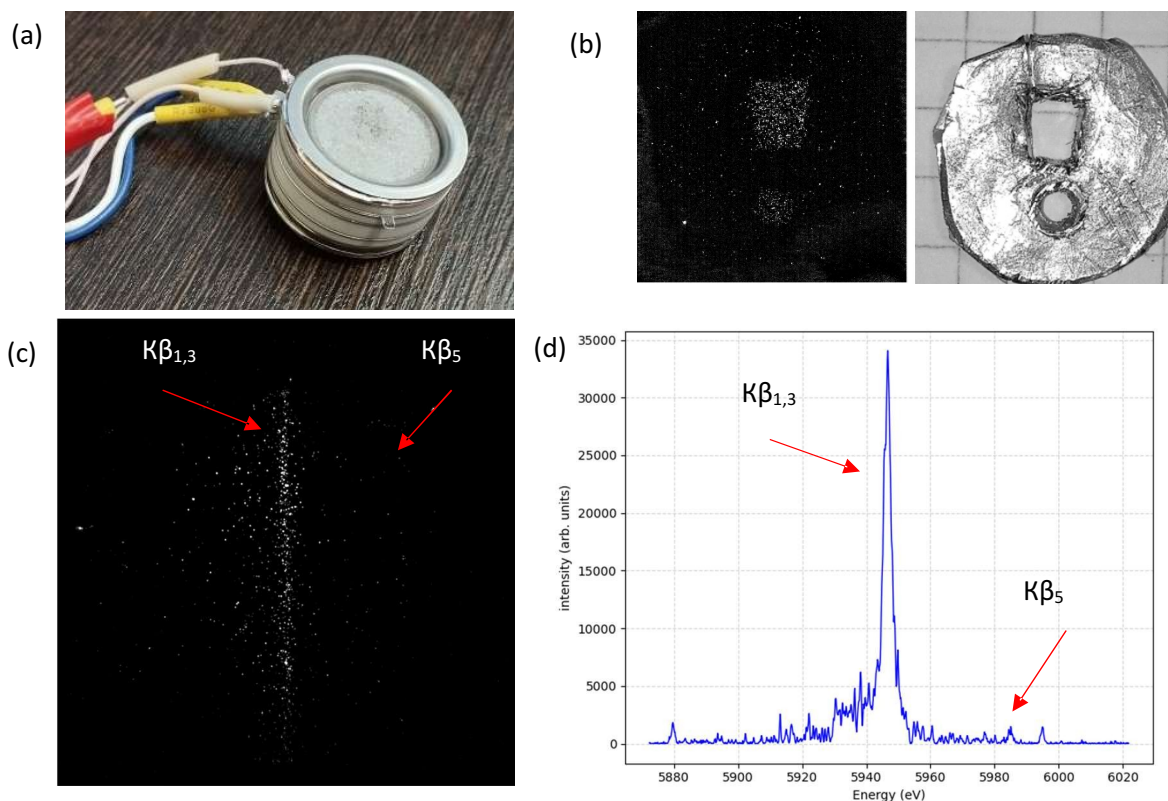


Рис.1 (а) Фотография Х-ЭОП. (б) Пространственная регистрация гамма-квантов с энергией 60 кэВ с использованием свинцовой маски. (с,d) Результаты измерений рентгеновских эмиссионных спектров Sr вблизи линии: $K\beta_{1,3}$. Длина волны $\lambda = 2.08487 \text{ \AA}$. Энергия $E = 5.94671 \text{ eV}$. Регистрация спектра выполнена на спектрометре с фокусировкой по Иоганну во втором порядке отражения. Время накопления составило 5 минут.

Литература:

[1] Ю. М. Ярмошенко // ПТЭ 2023, № 3, с. 91–97.

Сравнение стандартных образцов горных пород России и Китая методом РФА-СИ

Дарьин А.В.¹, Sun Q.², Маркович Т.И.¹, Кириченко И.С.¹, Новиков В.С.^{1,3}, Ракшун Я.В.^{1,4},
Скляр А.Н.¹, Дарьин Ф.А.^{4,5}, Сороколетов Д.С.^{4,5}, Хомяков Ю.В.^{4,5}, Wu J.³, Zhu Z.³, Li Qi.³,
Chu G.³

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

2 - National Research Center of Geoanalysis, Beijing, China

3 - Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

4 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

5 – ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» СКИФ, Новосибирск, Россия

E-mail: AVD@igm.nsc.ru

Для проведения РФА-СИ использованы стандартные образцы горных пород России и Китая – магматические и метаморфические породы, морские, речные и озерные донные осадки, почвы, соли. Были подготовлены прессованные препараты (таблетки) одинаковой поверхностной плотности – 0,64 мг/мм² (50 мг в таблетке диаметром 10 мм). Измерения проводились на станции «Элементный и сканирующий микроанализ» ЦКП «СЦСИТИ» ИЯФ СО РАН (ВЭПП-3), на энергии возбуждения 23 кэВ, коллимированным пучком диаметром 3 мм. Ток в ВЭПП-3 изменялся в диапазоне от 60 до 30 мА, нагрузка спектрометрического тракта составляла 8-3 кГц, время измерения образца 120 – 200 с.

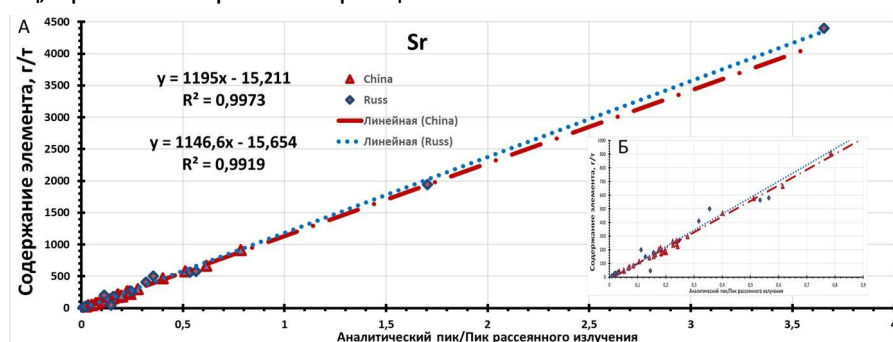


Рис. 1. Графики аналитический пик – содержание Sr для российских и китайских стандартов. А – для всего диапазона измерений, Б – до 1000 г/т.

Обработка РФА спектров с выделением площадей пиков породообразующих (K, Ca, Ti, Mn, Fe) и микро-элементов (V, Cr, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, Th, U) проводилась с использованием программы AXIL. Для сравнения стандартов и определения метрологических характеристик строились графики отношение аналитического пика элемента/пик рассеянного на образце излучения – от паспортного значения содержания элемента в образце (рис.1).

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках ГЗ ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0042), ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0011, FWZN-2026-0018), Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 42030507, 42372352, 42302344, 42471175). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Диэлектрические свойства наноплёнок титаната-стронция в терагерцовом диапазоне

Грибанов Д.С.^{1,2,3}, Николаев Н.А.^{1,2}, Павленко А. В.⁴

1 – Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: gribanov1902@gmail.com

Квантовый параэлектрик титанат стронция SrTiO_3 (STO) является перспективным материалом, обладающий широким кругом применений. Он может проявлять высокие значения электрооптического коэффициента при криогенных температурах, что критически важно для передачи данных в системах квантовых вычислений и генераторов пар запутанных фотонов [1].

STO обладает низкочастотным фоновым резонансом – мягкой модой, характеристики которой связаны с фазовым переходом материала параэлектрик-сегнетоэлектрик. Мягкая мода определяется колебаниями иона стронция, смещение которого (поляризация) определяет электрооптический коэффициент. Поскольку частота мягкой моды при температуре 300 К лежит в окрестности 2,7 ТГц, применение излучения терагерцового диапазона (ТГц) открывает возможности изучения STO. Актуальность подчёркивается так же сообщениями о нелинейном взаимодействии мягкой моды с высокочастотными фононами STO при воздействии интенсивных терагерцовых полей на материал [2].

Данная работа посвящена изучению свойств нанометровых плёнок STO при комнатной температуре в ТГц-диапазоне частот методами ИК-фурье- и импульсной ТГц-спектроскопии. Были исследованы 8 образцов плёнок STO с толщинами 12, 30, 42, 45, 51, 60, 120 и 270 нм, осаждённых на сапфировых (Al_2O_3) подложках среза (001). Спектры пропускания и отражения аппроксимировались факторизованной моделью диэлектрической проницаемости, что позволило определить зависимость от толщины спектра комплексной диэлектрической проницаемости плёнок в диапазоне 0,3-10 ТГц. Полученная зависимость носит нелинейный характер. Обсуждаются полученные результаты и перспективы применения плёнок STO в терагерцовой фотонике и оптоэлектронике.

Благодарности: В работе использовалось оборудование, предоставленное ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН (импульсный терагерцовый спектрометр) а также ЦКП «ВТАН» НГУ (ИК-фурье-спектрометр).

Литература:

[1] Muller K. A., Burkard H. SrTiO_3 : An intrinsic quantum paraelectric below 4 K //Phys. Rev. B. – 1979. – Т. 19. – №. 7. – С. 3593-3602.

[2] Kozina M. et al. Terahertz-driven phonon upconversion in SrTiO_3 //Nature Physics. – 2019. – Т. 15. – №. 4. – С. 387-392.

**Исследования процессов синтеза покрытий на поверхности
инструментальных материалов методом in situ - дифрактометрии на канале
№ 6 источника СИ ВЭПП-3**

Денисов В.В.¹, Леонов А.А.¹, Денисова Ю.А.¹, Савчук М.В.¹, Островерхов Е.В.¹, Шмаков А.Н.²,
А. Н. Залого³, П. С. Дубинин³, И. С. Якимов³

1 – Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

E-mail: volodyadenisov@yandex.ru

Вакуумный электронно-ионно-плазменный стенд «ВЭИПС-1», установленный на канале № 6 источника СИ ВЭПП-3, объединяет возможности методов пучково-плазменной инженерии поверхности, включая вакуумно-дуговое плазменно-ассистированное напыление покрытий, азотирование в плазме разрядов низкого давления и др., и метод in situ - дифрактометрии с использованием синхротронного излучения. В процессе ионно-плазменной модификации поверхности в режиме реального времени получается информация о фазовом составе формируемых слоев и покрытий. Существует возможность управления фазовым составом растущих слоёв путем изменения параметров процесса (состава и давления рабочей газовой смеси, тока газового разряда и источников металлической плазмы и др.).

В работе представлены результаты исследования закономерностей процессов синтеза композиционных покрытий и слоёв, сформированных на поверхности штамповой стали и твердого сплава.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания, проект № FWRM-2025-0001.

Использование синхротронного излучения для исследования процесса роста пленок сплава Ti-Zr

Ю.Ф. Иванов¹, Н.А. Прокопенко¹, Е.А. Петрикова¹, Ю.Х. Ахмадеев¹, О.В. Крысина¹,
Н.Н. Коваль¹, А.Н. Шмаков²

1 – Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

2 – Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: elizmarkova@yahoo.com

Сплав Ti-Zr — это биосовместимый и высокопрочный материал, широко используемый в медицине благодаря превосходной коррозионной стойкости и способности к остеоинтеграции, обладающий более высокой прочностью, чем чистый титан, что позволяет создавать тонкие и надежные имплантаты, наносить пленки и покрытия.

Цель работы - исследование *in situ* методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения процесса формирования пленок сплава Ti-Zr.

Материалом исследования являлись тонкие (2-3 мкм) пленки сплава Ti-Zr состава, близкого к эквиаtomному. Процесс формирования структуры тонких пленок *in situ* с высоким временным разрешением изучали, используя источник синхротронного излучения — накопитель электронов ВЭПП-3, ИЯФ СО РАН. Исследование проводили при нормальных условиях, используя сканирующий дифрактометр высокого разрешения (ИЯФ СО РАН); программное обеспечение — комплекс для структурного анализа MAUD (Material Analysis Using Diffraction), программа для обработки результатов измерений Fitykv.1.3.1. Характеристики синхротронного излучения: рабочая длина волны излучения $\lambda = 0.101$ нм; диапазон углов дифракции 2θ : (20-80) градусов. Съемка и запись рентгенограмм осуществлялись в непрерывном режиме каждую минуту. Подложкой являлись образцы титана BT1-0 и твердого сплава BK8 (WC-8%Co) размерами 10x10x5 мм. Пленки формировали осаждением из газо-металлической плазмы, созданной при одновременном вакуумно-дуговом испарении катодов состава Ti и Zr в режиме с плазменным ассистированием (Ar) на установке ВЭИПС-1 [1].

Анализ рентгенограмм, полученных на различных стадиях формирования системы «пленка/подложка» в вакууме дает основание сказать, что пленка является рентгеноаморфным (аморфно-кристаллическим) материалом, основными фазами которого являются α -фаза (TiZr) и ω -фаза. Методами дифракционной электронной микроскопии установлено, что пленка является нанокристаллическим материалом с размером кристаллитов (2-5) нм.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 24-69-00074.

Литература:

[1] Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.H., Prokopenko N.A., Koval N.N., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Krysin O.V., Tolkachev O.S. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. T. 87. C. 250-256.

Рентгенофлуоресцентный анализ в области низких энергий на канале вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4М

Гольденберг Б.Г.^{1,2}, Копылов А.Д.^{1,2}, Копалкин И.П.^{1,2}, Амброс Е.В.³

1 – ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – ЦСБС СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: b.g.goldenberg@srf-skif.ru

Рентгенофлуоресцентный элементный анализ на синхротронном излучении давно используется в ЦКП СЦСТИ для анализа элементного состава объектов различной природы на станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» на ВЭПП-3 и «Жесткая рентгеноскопия» на ВЭПП-4М. На этих станциях исследования проводятся в условиях нормальной атмосферы при использовании энергии возбуждения более 12 кэВ и нацелены на анализ содержания элементов от К до U. Существует ряд задач, в которых необходимо определять концентрацию более легких элементов – от Al до К, играющие важную роль, например, в развитии растений. Энергии характеристического излучения этих элементов лежат в области 1.5 – 3.5 КэВ.

Для реализации исследований в этом энергетическом диапазоне потребовалось создать вакуумируемую установку с возможностью создания гелиевой атмосферы, подобрать энергию возбуждения. Было создано программное обеспечение для дистанционной настройки параметров пучка СИ, смены образцов и управления энергодисперсионным детектором, размещенных в вакуумируемой камере.

Методика исследования содержания легких элементов разрабатывалась для исследования распределения содержания этих элементов в различных органах растений при различных условиях культивирования, в том числе при исследовании действия новых биостимуляторов на рост и развитие растений. В качестве модельного объекта рассматривались образцы земляники садовой, предоставленной ЦСБ СО РАН, а в качестве стандарта использовался российский стандартный образец травосмеси Тр-1 (ГСО 8922-2007; СО КОOMET 0066-2008-RU). Установлено различие содержания исследуемых элементов в корнях, листьях и плодах, а также между растениями, полученными с применением обработки биостимулятором и необработанными.

Исследования на синхротронном излучении проводились в ЦКП СЦСТИ. Работа в части создания программного обеспечения и обработки данных выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП "СКИФ" Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0040).

Разработка сверхпроводящего спирального ондулятора для станции “Наноскопия” на “СКИФ”

Седов А. А.¹, Мезенцев Н. А.¹, Ракшун Я. В.^{1,2}, Сафронов А. Н.¹, Хомяков Ю. В.^{1,3},
Чернов В. А.¹, Шкаруба В. А.¹

1 - Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 - Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

*3 - Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”,
Кольцово, Россия*

Новый источник синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ ЦКП «СКИФ» с ультранизким эмиттансом [1], который построен в наукограде Кольцово, позволит получать сверхъяркие высококогерентные пучки мягкого рентгеновского излучения при использовании ондулятора. Таким образом, в диапазоне до 2 keV появляются широкие возможности как для реализации задач микроскопии, так и для отработки технологий ЭУФ и рентгеновской литографии. Станция Наноскопия предполагает реализацию задач в широком диапазоне: от рабочих длин волн существующих литографов (91.9 eV) [2] до К-края кремния (1.8 keV). При этом особый интерес представляет диапазон «окна прозрачности воды» между К-краями углерода и кислорода (284-543 eV), в котором благодаря высокому естественному контрасту доступна дозоэффективная микроскопия биологических клеток и вирусов [3].

Для решения указанных задач на станции предлагается использовать длинный (~4 м) двухпериодный сверхпроводящий спиральный ондулятор. В данной работе описаны магнитные и криогенные системы ондулятора, а также система коррекции орбиты электронного пучка. Представлены расчеты и оптимизация параметров магнитной системы. Приведены оценки спектральных и геометрических характеристик генерируемого излучения. Разработана система намотки прототипа сверхпроводящего ондулятора.

Литература:

- [1] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. Phys. Rev. Accel. Beams, 24(12), 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
- [2] Fomenkov, I., Brandt, D., Ershov, A., Schafgans, A., Tao, Y., Vaschenko, G., Rokitski, S., Kats, M., Vargas, M., Purvis, M. and Rafac, R., 2017. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling. Advanced Optical Technologies, 6(3-4), pp.173-186.
- [3] Malyshev, I.V., Chernov, V.A., Khomyakov, Y.V., Rakshun, Y.V., Chkhalo, N.I., Toropov, M.N., Reunov, D.G., Polkovnikov, V.N., Pestov, A.E. and Shchelokov, I.A., 2023. Project of Scanning and Projection Microscopes for the Nanoscopy Station for Biological Research in the “Water Transparency Window”. Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniâ, (5), pp.3-15.

Вклад Института сильноточной электроники СО РАН в разработку научно-технологического оборудования станций первой очереди ЦКП «СКИФ»

Бескончин К.В., Денисов В.В., Сыртанов М.С., Ковальский С.С., Панченко Ю.Н., Андреев М.В.,
Дульцев К.И., Назаров А.С.

1 - Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: beskonchin@mail.ru

В настоящий момент разработка сложного научно-технологического прецизионного рентгенооптического оборудования является актуальной задачей ввиду активного строительства и развития отечественных источников синхротронного излучения (СИ), таких как «СКИФ», «СИЛА» и «РИФ». В связи с существующими ограничениями приобретения зарубежного уникального научного оборудования на современные источники СИ критически важным становится разработка отечественной приборной базы, а также развитие профессиональных компетенций по изготовлению и оснащению экспериментальных станций специализированными рентгенооптическими устройствами.

В данной работе представлены элементы, входящие в состав научно-технологического оборудования станций первой очереди 1-2 «Структурная диагностика» и 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» ЦКП «СКИФ» и разработанные сотрудниками Института сильноточной электроники совместно с коллективами из Балтийского федерального университета им. Канта, Новосибирского государственного технического университета, Института физики микроструктур РАН, Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН и других научных, образовательных и производственных организаций РФ. В докладе представлено описание дифрактометра высокого разрешения, охлаждаемого и неохлаждаемого трансфокаторов, мониторов положения пучка, аттенюатора подавления высших гармоник и других элементов. Представлены основные параметры разработанных рентгенооптических устройств, результаты испытаний без использования пучка синхротронного излучения, а также методика юстировки оборудования с применением лазерного и синхротронного излучений.

Синхротронное излучение как источник флуоресценции для исследования элементного состава биопсийного материала методом РФА-СИ

В. А. Трунова^{1,2}, М.С. Войтко³, Т.И. Поспелова³

1 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

*2 – Новосибирский национальный государственный исследовательский университет,
Новосибирск, Россия*

3 – Новосибирский государственный медицинский университет, Новосибирск, Россия

E-mail: valna-t@mail.ru

Исследование элементного состава биопсийного материала имеет важное значение для диагностики и лечения современных заболеваний различных групп органов. Недеструктивность, низкие пределы обнаружения элементов и возможность работы с образцами малой массы являются важными преимуществами рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ). Проведено [1] систематическое исследование элементного состава отделов тканей сердечно-сосудистой системы, легких и печени. Последние исследования посвящены элементному анализу аспирата красного костного мозга у пациентов ($n = 83$) с онкогематологическими заболеваниями (злокачественные опухолевые заболевания кроветворной и лимфатической системы: острые лейкозы, гемобластозы, лимфома Ходжкина) до и после химиотерапии для определения предикторов указанных заболеваний. Образцы биопсийного материала подвергались экспозиции в пучке синхротронного излучения в диапазоне энергий 14-23 кэВ. В результате использования разработанных методик определены концентрации 22 химических элементов (P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Mo) в тканях и органах с различным матричным составом. На экспериментальных животных показано [1] участие в метаболических процессах как печени, так и легких 10 элементов (V, Cr, Ni, Mn, Br, Rb, Sr, As, Zr, Mo) при пищевом ожирении. При сердечно-сосудистых патологиях впервые рассмотрена роль рубидия в качестве маркера дилатационной кардиомиопатии.

Благодарности: Работа проведена в рамках государственного задания ИНХ СО РАН.

Литература:

[1] Трунова В.А. Рентгенофлуоресцентный анализ с возбуждением синхротронным излучением – методология для исследования специфических объектов : диссертация ... доктора химических наук: 02:00:02 / В.А. Трунова ; ИГУ. — Иркутск, 2017. — 215 с.

Автоматизация измерения поперечных параметров электронного пучка на Новосибирском ЛСЭ

Горбачев Я.И.¹, Середняков С.С.^{1,2}, Шевченко О.А.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 –Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

E-mail: S.S.Serednyakov@inp.nsk.su

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны в достаточно широком диапазоне. На параметры генерируемого излучения влияет много параметров, и в первую очередь – параметры электронного пучка – его энергия, средний ток, а также продольные и поперечные размеры пучка и эмитанс.

Один из способов измерения эмитанса пучка основан на анализе изменения его поперечных размеров при изменении параметров фокусировки(дефокусировки) пучка элементами магнитной системы. В данной статье представлена реализация данного метода.

Литература:

- [1] N.A. Vinokurov et al. Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. Proceedings of FEL2009, TUOD01
- [2] Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. – Новосибирск: Параллель, 2009.-С. 223-225.
- [3] 'Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility Getmanov Ya.V., Shevchenko O.A., Vinokurov N.A. at al. *Journal of Instrumentation*, Том. 15, № 6, T06004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/T06004>
- [4] <https://docs.baslerweb.com/aca1920-40gm>
- [5] CONTROL SYSTEM FOR MAGNET POWER SUPPLIES FOR NOVOSIBIRSK FREE ELECTRON LASER Velikanov Yu.M., Veremeenko V.F., Vinokurov N.A. et al. В сборнике: Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Proceedings of the 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. 2011. С. 480-482.
- [6] Jeffrey O.Hill. EPICS R3.14, Channel Access Reference Manual, <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>
- [1] N.A. Vinokurov et al. // Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. Proceedings of FEL2009, TUOD01
- [2] Дементьев Е.Н., Винокуров Н.А., и др. // СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛСЭ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ. Приборы и техника эксперимента. 2025. S8. С.59-65.
- [3] <https://github.com/epicsdeb/channelarchiver>

Поляризационная спектроскопия рентгеновского поглощения для выполнения фундаментальных исследований современных магнитных материалов

М.С. Платунов

1 - ЦКП "СКИФ", ФИЦ ИК СО РАН, р.п. Кольцово, Россия

E-mail: msplatunov@gmail.com

Появление современных источников синхротронного излучения дало мощный импульс развитию рентгеновской спектроскопии, что демонстрируется созданием множества новых экспериментальных методов, основанных на использовании поляризационных свойств рентгеновского излучения. Особенно это касается рентгеновского магнитного кругового дихроизма (XMCD), который стал ключевым инструментом в современном магнетизме, позволяя глубже понять микроскопическую природу магнитного состояния вещества с элементной и орбитальной чувствительностью [1].

Показательной иллюстрацией потенциала метода XMCD является исследование ферримагнетика $\text{Co}_2\text{FeO}_2\text{BO}_3$, в котором элементно-чувствительный анализ при помощи XMCD в мягком и жёстком рентгеновском диапазоне позволил установить вклады спиновых и орбитальных магнитных моментов ионов Co^{2+} и Fe^{3+} . Было обнаружено, что высокая коэрцитивность (более 7 Тл при низких температурах) обусловлена как сильным антиферромагнитным взаимодействием между Co и Fe, так и выраженной анизотропией Co^{2+} . Эти результаты продемонстрировали, как за счёт управляемого зарядового упорядочивания и контролируемого распределения катионов по кристаллографическим позициям можно проектировать магнитные материалы без редкоземельных элементов с сильными магнитными свойствами, перспективными для соответствующего применения [2,3]. В дополнение к XMCD, активно развивается метод рентгеновского естественного кругового дихроизма (XNCD), позволяющий визуализировать пространственное распределение хиральных доменов в мультиферроиках. В частности, на монокристалле $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ был продемонстрирован метод картирования структурных двойников [4]. Эти результаты показали, что XNCD может использоваться как чувствительный инструмент для изучения доменной структуры, а также механизмов магнитоэлектрической связи в редкоземельных ферроборатах.

В докладе будут приведены дополнительные примеры использования этих методов [5]. Кроме того, будет рассмотрен эффект рентгеновского магнитохирального дихроизма (XMχD) [6], проявляющийся в магнитоэлектрических системах или в хиральных молекулярных магнитах. Кратко будет представлена концепция универсальной исследовательской станции диагностики функциональных магнитных материалов с использованием поляризованного рентгеновского излучения, разрабатываемая в рамках проекта синхротрона СКИФ [7].

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0040).

Литература:

- [1] Rogalev A., Wilhelm F. The physics of metals and metallography. – 2015. – Vol. 116. – P. 1285–1336.
- [2] Platunov M.S., Platunov A.M. Origin of large coercivity in charge-ordered lanthanide-free magnets // *Materialia*. – 2025. – Vol. 39. – P. 102316.
- [3] Platunov M.S. High-coercivity ferrimagnet $\text{Co}_2\text{FeO}_2\text{BO}_3$: XMCD insights into charge ordering and cation distribution // *Inorganics*. – 2025. – Vol. 13, No. 1. – P. 24.
- [4] Platunov M.S., Gudim I.A., Ovchinnikova E.N., Kozlovskaya K.A., Wilhelm F., Rogalev A., Hen A., Ivanov V.Yu., Mukhin A.A., Dmitrienko V.E. X-ray natural circular dichroism imaging of multiferroic crystals // *Crystals*. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – P. 531(1-14).
- [5] Perlepe P., Oyarzabal I., Mailman A., Yquel M., Platunov M., Dovgaliuk Y., Rouzières M., Négrier Ph., Mondieig D., Suturina E.A., Dourges M.-A., Bonhommeau S., Musgrave R.A., Pedersen K.S., Chernyshov D., Wilhelm F., Rogalev A., Mathonière C., Clérac R. Metal-organic magnets with large coercivity and ordering temperatures up to 242°C // *Science*. – 2020. – Vol. 370, No. 6516. – P. 587–592.
- [6] Mitcov D., Platunov M., Buch C.D., Reinholdt A., Dossing A.R., Wilhelm F., Rogalev A., Piligkos S. Hard X-ray magnetochiral dichroism in a paramagnetic molecular 4f complex // *Chemical Science*. – 2020. – Vol. 11, No. 13. – P. 8306–8311.
- [7] Платунов М.С., Зубавичус Я.В., Овчинников С.Г., Золотарев К.В. Концепция универсальной исследовательской станции диагностики функциональных материалов с использованием поляризованного рентгеновского излучения // Технологическая инфраструктура Сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ». В 3 т. Т. 3: Устройства генерации и фронтенды, системы управления и ИТ-обеспечения экспериментальных станций первой очереди; предварительные проекты экспериментальных станций второй очереди. – Новосибирск: ИК СО РАН, 2022. – С. 313–332. – ISBN 978-5-906376-43-5.

Проект автоматической системы управления экспериментом на станции 1-7 ЦКП «СКИФ»

Довженко Г.Д.¹, Гольденберг Б.Г.¹, Копылов А.Д.¹, Копалкин И.П.¹

1 ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: g.d.dovjenko@srf-skif.ru

АСУ эксперимента станции СИ — это интерфейс, позволяющий решать научные задачи пользователей с помощью оборудования станции. Ключевой целью создания АСУ является предоставление простого и понятного специалистам из смежных областей пользовательского интерфейса к разнородному и, как правило, физически недоступному, во время эксперимента, оборудованию, распределенному вдоль оптического канала станции СИ.

Станция 1-7 ЦКП «СКИФ» [1] использует в качестве источника излучения поворотный магнит. Это позволит начать экспериментальную работу на станции до того, как в эксплуатацию будут введены вставные устройства кольца накопителя. Таким образом, станция 1-7 станет испытательным полигоном для отработки экспериментальных сценариев и тестирования оптических элементов, которые впоследствии будут использоваться на других станциях ЦКП «СКИФ».

Первые научные задачи станции 1-7 связаны со спектроскопией поглощения, монокристалльной и порошковой дифракцией. Решение этих задач требует синхронизированного управления наборами элементов станции. Также ожидается что пользователи будут проводить эксперименты со специально созданными *in situ* ячейками, контроль над которыми также будет производиться с АСУ эксперимента. Таким образом, необходимыми требованиями к АСУ эксперимента являются распределённость (оборудование станции распределено по трём радиационно защищённым помещениям), расширяемость (на этапе проектирования невозможно предусмотреть все будущие экспериментальные нужды), и простота в эксплуатации (время работы одной группы пользователей на станции составляет 1-3 дня, время обучения новых пользователей не должно превышать несколько часов). В связи с этими требованиями в качестве основы для АСУ эксперимента была выбрана SCADA-система TANGO [2] с расширениями Sardana, Spock и Taurus реализующими пользовательский интерфейс.

В работе представлена концептуальная схема АСУ станции, предложения по организации архитектуры ПО, а также результаты тестирования разработанных прототипов отдельных элементов ПО для управления элементами станции.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2026-0002).

Литература:

- [1] Bulavchenko O. A. et al. Concept Design of the CCU Skif–NSU Experimental Station 1-7 “Basic Methods of Synchrotron Diagnostics for Educational, Research, and Innovative Activities of Students” //Journal of Structural Chemistry. – 2023. – Т. 64. – №. 7. – С. 1329-1340.
- [2] Chaize J. M. et al. TANGO: An Object Oriented Control System Based on CORBA. – 1999.

Компенсация температурных эффектов датчика Холла в магнитных измерениях сверхпроводящего ондулятора

Каноник П.В., Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Гусев Е.А., Казанцев Ф.П., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М.

1 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Настройка магнитного поля сверхпроводящих ондуляторов требует высокой точности измерений, поскольку даже незначительные отклонения от периодичности магнитной структуры приводят к потере когерентности и ухудшению характеристик синхротронного излучения. Одной из ключевых задач при калибровке магнитного поля является обеспечение достоверности данных, получаемых с использованием датчиков Холла. Камера криостата, в которой производится измерение магнитного поля, имеет выраженный температурный градиент: от 300 К на входе до ~70 К в центральной части. Поскольку чувствительность датчиков Холла зависит от температуры, необходимо выполнять температурную коррекцию измеренных значений.

Данная работа посвящена разработке методики коррекции температурной зависимости сигнала датчика Холла. По данным измерений температуры и сигнала датчика с использованием метода наименьших квадратов были определены линейные и квадратичные поправочные коэффициенты к коэффициенту Холла. Кроме того, с помощью математических инструментов (Mathcad) была получена температурная зависимость нуля Холла, также аппроксимированная линейными и квадратичными функциями. Реализация данной методики позволила устранить температурную зависимость сигнала и снизить систематическую ошибку измерений магнитного поля на уровне 5–7 мТл, что существенно, учитывая, что корректирующая система вносит изменения порядка 10–15 мТл.

РФА-СИ на накопительном кольце ВЭПП-4М

Легкодимов А.А.^{1,2}, Лапшин К.А.^{1,2}, Золотарёв К.В.^{1,2}, Назьмов В.П.¹, Кочнева Г.В.³

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор»

Роспотребнадзора, р.п. Кольцово, Новосибирская область, Россия

E-mail: A.A.Legkodymov@srf-skif.ru

Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) является высокочувствительным методом определения элементного состава в различных образцах. В работе рассмотрены основные методики РФА-СИ которые в настоящее время используются на станции синхротронного излучения накопителя ВЭПП-4М, функционирующей в Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения (СЦСТИ). Рассматриваются фоновые факторы (комптоновское и многократное комптоновское рассеяние) ограничивающие обнаружение следовых концентраций (менее ppm) тяжелых и редкоземельных элементов ($Z > 60$) по их К-линиям флуоресцентного спектра. Также приводятся экспериментальные результаты использования рефракционных полимерных рентгеновских линз для фокусировки высокоэнергетического монохроматического рентгеновского излучения.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

Литература:

[1] А.А. Легкодимов, К.Э. Купер, Ю.П. Колмогоров, Г.Н. Баранов. // Известия РАН. Серия Физическая. 2019. Т83. С.158-162.

[2] Семенова, А.В., Гражданцева, А.А., Сиволобова, Г.Ф. и др. // Биотехнология. 2023. Т. 39. С. 97-107.

Анализ сильно перекрывающихся EXAFS сигналов на примере каталитических систем

Хаметова Э.Ф.¹, Бакиева О.Р.¹, Кривенцов В.В.²

1 – Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

2 – ЦКП "СКИФ", Кольцово, Россия

E-mail: elinaphanilevna851@gmail.com

На сегодняшний день EXAFS-спектроскопия (Extended X-ray Absorption Fine Structure) является мощным инструментом для анализа локальной атомной структуры. Понимание этой структуры необходимо для целенаправленного формирования новых материалов с заданными физико-химическими свойствами — от высокоэффективных катализаторов и полупроводников до биомедицинских имплантов и функциональных наноструктур. Метод EXAFS позволяет получить информацию о локальном атомном окружении поглощающего атома: межатомное расстояние, координационное число и параметр тепловой дисперсии атомов. Однако при исследовании сложных материалов методом EXAFS-спектроскопии возникает проблема наложения одного сигнала поглощения на другой. Зачастую это случается, если в исследуемой системе присутствуют химические элементы с близкими значениями атомного номера (Z), края поглощения которых расположены близко друг к другу в энергетическом спектре. К таким системам можно отнести катализаторы на основе Au-Pt. При анализе биметаллических наночастиц на основе Au-Pt L3-края поглощения (Au: 11 918 эВ, Pt: 11 564 эВ) расположены близко, что затрудняет раздельное изучение локального окружения каждого элемента без специальных методик. Другим примером может служить катализатор Re-W/Al₂O₃, где рений и вольфрам также имеют близкие значения энергий поглощения для L3-краев (Re: 10 535 эВ, W: 10 207 эВ).

В данной работе предложена методика количественного анализа EXAFS-спектров, содержащих в одном диапазоне наложение нескольких краев поглощения. Метод был применен к нескольким системам с большим процентом перекрытия: Au₂Pt₃ (расстояние между краями составляет 354 эВ, диапазон перекрытия экспериментальных данных – 64 %) и Re-W/Al₂O₃ (расстояние между краями составляет 328 эВ, диапазон перекрытия экспериментальных данных – 65 %).

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 124021900017-1). Использовалось оборудование ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН. Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП ""СКИФ"" Института катализа СО РАН.

Статус экспериментальной станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ»

Шарафутдинов М.Р.^{1,2}, Я.В. Ракшун^{2,3}, А.С. Гоголев⁴, А.В. Дарьин², Ф.А. Дарьин¹,
С.В. Ращенко², Ю.В. Хомяков^{1,3}, В.А. Чернов³

1 – ЦКП "Сибирский кольцевой источник фотонов", Кольцово, Россия

2 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: marat@solid.nsc.ru

В Новосибирской области завершается создание источника синхротронного излучения с ультратонким эмиттансом ЦКП «СКИФ». Первая очередь включает в себя шесть экспериментальных станций, одной из которых является станция 1-1 «Микрофокус», предназначенная для исследования образцов с высоким пространственным разрешением в диапазоне энергий 10 – 31 кэВ.

Источник СИ для станции - 128-периодный сверхпроводящий ондулятор с периодом 15,6 мм, максимальным магнитным полем на оси 1,25 Тл. Фронтенд содержит два алмазных водоохлаждаемых вакуумных окна толщиной по 400 мкм как первичные фильтры. При помощи двухзеркального (ДЗМ, на основе многослойных зеркал Mo/B₄C, W/B₄C и Cr/Be) и двухкристального (ДКМ, Si(111)) монохроматоров на образце могут быть получены пучки «розового» с $\Delta E/E \sim 10^{-2}$ и монохроматического с $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ излучения соответственно [1]. ДЗМ устанавливается перед ДКМ для уменьшения тепловых нагрузок и во всех режимах экспериментов находится в пучке. При необходимости используются фильтры SiC. Фокусирующая оптика содержит два блока Ве линз - охлаждаемый и неохлаждаемые трансфокаторы. Первый блок при необходимости должен формировать вторичный источник на расстоянии 47 м от источника излучения. Для достижения субмикронных размеров фокуса используется система Киркпатрика-Баеза с зеркалами ПВО. Таким образом, на станции 1-1 «Микрофокус» возможна работа с пучками излучения ~ 1 мм, 10 мкм, 1 мкм и 0,1 мкм. Реализуемые методы используют различные системы окружения образца (СОО): ячейки высокого давления на основе алмазных наковален (монокристаллическая микродифракция при высоком давлении) и конфокальный рентгеновский микроскоп (μ -XRF, а также комбинация μ -XRF и STXM, μ -XRF и μ -XANES, а также комбинация конфокального μ -XRF и птохграфии).

В настоящее время завершены защитные конструкции станции, установлены инженерные системы, подготовлен оптический стол для монтажа оптики финального фокуса и СОО.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

Литература:

[1] Ракшун Я.В., Хомяков Ю.В., Глушков Е.И., Гоголев А.С., Горбачев М.В., Дарьин А.В., Дарьин Ф.А., Долбня И.А., Ращенко С.В., Чернов В.А., Чхало Н.И., Шарафутдинов М.Р. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т.336. №5. С.229-251.

XANES и РФЭС исследование магнитных комплексов Re(IV)

Федоренко А.Д.¹, Асанов И.П.¹, Бердюгин С.Н.¹, Николенко А.Д.^{2,3}

1 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

3 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: fedorenko@niic.nsc.ru

В настоящее время актуальной проблемой является поиск материалов, перспективных для создания молекулярных магнетиков. Создание таких материалов позволит получить устройства с очень высокой плотностью хранения информации. Для понимания и предсказания свойств магнитных материалов необходимо определять факторы, влияющие на параметры электронной структуры, связанные с магнетизмом, и понимать механизм их влияния. Перспективным является использование соединений 5d переходных металлов из-за их сильных спин-орбитальных взаимодействий, что приводит к анизотропии даже в симметричных комплексах. Одними из многообещающих материалов являются галогенидные комплексы Re(IV), проявляющие уникальные магнитные свойства, присущие одноядерным молекулярным магнетикам, такие как медленная релаксация и квантовое туннелирование намагниченности. Результаты анализа электронной структуры указывают на сильное влияние спин-орбитального взаимодействия на ян-теллеровское искажение октаэдрического окружения Re(IV). Литературные данные показывают, что при низких температурах в галогенидных комплексах Re(IV) наблюдаются структурные и магнитные переходы. Магнитные свойства октаэдрических галогенидных комплексов Re(IV) определяются суперобменным взаимодействием между парамагнитными центрами Re(IV) в решетке кристалла, что приводит к переходу из парамагнитного в антиферромагнитное состояние при температурах 11-13 К. Замещение катиона в октаэдрических комплексах 5d металлов также значительно влияет на магнитные свойства. Моделирование спектров поглощения краев Re $L_{2,3}$ показывает чувствительность формы линии к параметрам ближайшего окружения. Измерение отношения интенсивностей белой линии L_3/L_2 краев рентгеновского поглощения дает возможность определить значение величины параметра спин-орбитального взаимодействия LS и число электронных дырок в системе. Re L_1 край более чувствителен к геометрической структуре и магнитному упорядочению. XANES спектры Cl K края чувствительны к перераспределению электронной плотности и искажению структуры ближайшего окружения центрального атома Re.

Целью работы является исследования изменения электронного строения методом XANES и РФЭС октаэдрических гексагалогенидных комплексов $(\text{NH}_4)_2[\text{ReX}_6]$ ($X = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$), $(\text{Et}_4\text{N})_2[\text{ReCl}_6]$ и $[\text{Cu}(\text{En})_2][\text{ReCl}_6]$ с электронной конфигурацией иона Re $5d^3$. Представлены данные об изменении магнитного состояния комплексов при низкой температуре и исследованы факторы, влияющие на магнитные свойства при катионном замещении в комплексах Re(IV).

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 25-22-00228.

Проект станции второй очереди HAXPES на источнике ЦКП «СКИФ»

Федоренко А.Д.¹, Асанов И.П.¹, Зенкевич А.В.², Мезенцев Н.А.³, Полковников В.Н.⁴,
Ракшун Я.В.^{3,5}, Хомяков Ю.В.^{3,6}, Чернов В.А.³

1 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

3 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

5 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

6 – ЦКП "Сибирский кольцевой источник фотонов", Кольцово, Россия

E-mail: fedorenko@niic.nsc.ru

Глубина анализа лабораторного метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии ограничена длиной свободного пробега фотоэлектрона и в среднем составляет ~ 5 нм. Для исследования электронной структуры и химических свойств соединений в более глубоких (или скрытых) слоях материалов и границ раздела в многослойных структурах, необходимо повысить кинетическую энергию фотоэлектронов, используя возбуждение фотонами в более жестком рентгеновском диапазоне (высокоэнергетическая рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия/Hard XPS/HAXPES). Например, при повышении энергии фотонов возбуждения до ~ 6 кэВ глубина выхода нерассеянных фотоэлектронов может быть увеличена вплоть до ~20 – 30 нм. HAXPES обеспечивает неразрушающий анализ химических состояний в объеме образца, исследование электронной структуры наногетероструктур и функциональных многослойных систем. При этом, анализ профилей концентрации элементов по глубине структур возможно при анализе угловых зависимостей интенсивности. Исследование атомной структуры и распределения потенциала в гетероструктурах возможно с использованием методик отражения от подложек с большим атомным номером и возбуждения брэгговских рентгеновских стоячих волн. Особую ценность представляет то, что использование синхротронного излучения высокой интенсивности, сфокусированного в малых областях (~ мкм) дает возможность проводить анализ на образцах малой площади. Объектами исследований могут быть монокристаллы и массивные образцы, порошки, аморфные и нанокристаллические материалы, наноструктурированные системы, тонкие плёнки, многослойные структуры и сверхрешётки. Использование зондирующего рентгеновского пучка размером ~мкм дает возможность моделирования работы прототипов реальных устройств *in operando* для исследования их применимости в области катализа, материаловедения, электрохимии, микроэлектроники.

В работе рассмотрена концепция станции второй очереди HAXPES ЦКП «СКИФ». Источником излучения является короткопериодный сверхпроводящий ондулятор с периодом 12 мм и магнитной длиной ~ 2 м. Фундаментальная гармоника ондулятора может быть перестроена в диапазоне энергий 5800-7100 эВ. Описана рентгенооптическая схема, приведены оценки параметров пучка излучения (поток, спектральные и геометрические характеристики) на образце, режимы работы экспериментальной станции.

Анализ локальной атомной структуры пленок Ti-O с разрешением по глубине методом EXELFS

Гусейнов Т.З., Бакиева О.Р.
1 - УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия
E-mail: bakieva@udman.ru

Развитие современной вычислительной электроники связано с переходом на мемристивные технологии – элементов, способных имитировать работу биологических синапсов. В основе работы мемристивных устройств лежит способность менять сопротивление в зависимости от величины приложенного напряжения. Эффект резистивного переключения происходит из-за перемещения кислородных вакансий внутри материала, что перестраивает пути протекания тока между электродами.

Оксиды металлов считаются оптимальным материалом для создания мемристоров. Они сочетают в себе высокую повторяемость циклов резистивного переключения и широкий диапазон изменения сопротивления. Оксиды титана стали первым материалом, на котором был реализован мемристивный эффект, и остаются наиболее популярной и широкоиспользуемой моделью для мемристивных устройств. Однако, теоретической модели, которая бы описывала механизмы формирования и разрушения токопроводящих путей внутри материала, в данный момент нет.

В рамках данной работы был выполнен анализ локального атомного строения наноразмерных пленок системы Ti-O на различной глубине методом EXELFS-спектроскопии (Extended Energy Electron Loss Fine Structure). Это XAFS-подобный метод, позволяющий определять парциальные длины химических связей, координационные числа и параметры Дебая-Валлера. Для $M_{2,3}$ -края поглощения титана и K-края кислорода были зарегистрированы экспериментальные спектры потерь энергии электронов. Энергия падающего электронного потока варьировалась таким образом, чтобы глубина анализа титана и кислорода совпадала. В результате обработки полученных данных установлены количественные характеристики локального окружения для Ti-Ti, O-O и Ti-O (парциальные координационные числа, длины химической связи, параметры Дебая-Валлера).

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 124021900017-1). Использовалось оборудование ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

Оптимизация финишной очистки вакуумных камер накопительного кольца источника синхротронного излучения СКИФ

Жуков А.А.^{1,2}, Кайгородцев В.А.^{1,2,3}, Краснов А.А.^{1,2,3}, Лемзяков А.Г.^{1,2}, Мамошкина Е.В.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: V.A.Kaygorodtsev@inp.nsk.su

В работе приводятся исследования различных методов химической очистки поверхности вакуумных камер накопительного кольца ЦКП «СКИФ». Накопительное кольцо СКИФ состоит из 16 сегментов, каждый из которых представляет собой линейный промежуток длиной 6 метров и арку длиной 23,75 метров. В линейных сегментах накопительного кольца, где применяются нераспыляемые геттеры, сверхвысокий вакуум достигается сразу после прогрева [1–3]. В арочных сегментах для достижения сверхвысокого вакуума требуется предварительная тренировка поверхности синхротронным излучением [4–6].

Для обеспечения сверхвысокого вакуума, а также для повышения стабильности электронного пучка в накопителе, проводится финишная очистка.

Основная причина газовыделения в вакуумных камерах источников СИ при наличии пучка в ускорителе — это фотостимулированная десорбция. Поскольку фотостимулированная десорбция тесно связана с фотоэффектом [7], и, как следствие, с электронно-стимулированной десорбцией, то для нахождения оптимального метода финишной очистки, который позволил бы быстрее выйти ускорителю на проектный режим работы, было проведено исследование десорбции с поверхности образца вакуумной камеры при облучении его электронами.

В работе были проведены исследования 15 образцов, проведена обработка полученных данных. По предварительным результатам, наилучший метод очистки — химическое травление, пассивация и следующая за этим финишная очистка готового изделия ультразвуком в дистилляте (< 5 мкСм/см) при комнатной температуре.

Благодарности: Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2025-0004).

Литература:

- [1] Анашин В.В. и др. // Наноиндустрия, 2023, Т.16 С. 462-457
- [2] Benvenuti C., Chiggiato P., Cicoira F., Ruzinov V. // Vacuum, 1998, Vol.50, P. 57
- [3] Collins I.R., et al. // Proc. of EPAC-2002, P. 2550-2552.
- [4] Kobari T., Halama H.J. // J. Vac. Sci. Technol., 1987, Vol.5 P. 2355-2358
- [5] Halama H.J., Foerster C.L. // Vacuum, 1991, Vol.42 P. 185-188
- [6] Анашин В.В., Кайгородцев В.А., Краснов А.А. // Труды 30-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2023», С. 403-407
- [7] Madey T.E., Doering D.L., Bertel E., Stockbauer R. // Ultramicroscopy, 1983, Vol.11 P. 187-198

Возможности метода РФЛА-СИ для определения концентраций Ni и Ti в биопсийном материале животных с NiTi-имплантатами

Крупович Е.С.^{1,2}, Трунова В.А.¹, Смирнов Я.М.³, Владимиров С.В.³, Бородин В.П.³,
Крайнова Е.О.³, Маджара Н.Е.³

1 – Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», Новосибирск, Россия

3 – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации

E-mail: elena.kru42@gmail.com

Определение концентраций металлов в биологических тканях пациентов с имплантатами является актуальной задачей в клинической практике. На данный момент наиболее оптимальными для определения уровня Ti в плазме являются такие методы как масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES). Однако, высокие уровни P, Ca, Mo и других элементов могут создавать перекрывающиеся с Ti линии, что может вызывать дополнительные погрешности при определении концентраций [1].

Проведено определение концентраций 14 химических элементов, включая Ni и Ti методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФЛА-СИ) в послеоперационном материале кроликов (сонная артерия, аорта, печень, мышцы, когти) с аортальным имплантом из нитинола. Особым преимуществом РФЛА-СИ является возможность работы с образцами малой массы (>0.5 мг), так как биопсийный материал часто поступает на анализ в малых количествах. В данной работе масса пробы в сухом виде варьировалась от 2 до 10 мг. Экспозицию образцов проводили на станции №3 ускорительного комплекса ВЭПП-3 (ЦКП СЦСТИ, ИЯФ СО РАН) при энергии возбуждающих квантов 14 кэВ. Расчет концентраций Ti проводился с помощью способа внешнего стандарта по международным стандартным образцам волос с известным содержанием Ti (NCS ZC DC 73347, NCS ZC HH-81002b) и относительно соседних K α -линий (Ca, Mn) в стандартных образцах мышц и печени (NIST 1566a, NIES №6, NIST 1577).

Содержание Ti в образцах составило от 0.8 до 18 мкг/г в зависимости от типа ткани, с пределом обнаружения 0.8 мкг/г, что доказывает применимость метода РФЛА-СИ для определения концентраций микроэлементов в биопсийном материале с малой массой и использованием недеструктивной пробоподготовки.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта № 25-15-20002 (соглашение № 25-15-20002 от 21.05.2025 с Российским научным фондом и соглашение № 30-2025-000854 от 21.04.2025 с министерством науки и инновационной политики Новосибирской области.

Литература:

[1] Yao J.J. et al. // Biological Trace Elements Research. 2020. Т. 196(1) Р. 20-26.

Локальная атомная структура оксида железа, сформированного при окислении магнетронно-осажденных металлических пленок

Валеев Р.Г.¹, Петков А.А.¹, Кривенцов В.В.²

1 - УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

2 - ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН, Кольцово, Россия

E-mail: rishatvaleev@udman.ru

Тонкопленочные оксиды переходных металлов привлекают внимание исследователей благодаря своей фотохимической стабильности. В частности, покрытия на основе оксидов переходных металлов IV, V групп нашли применение в производстве микроэлектронных и оптических компонентов, в качестве защитных и биосовместимых слоев [1].

Пленки оксида железа (III) обладают рядом преимуществ [2] для фотокаталитического разложения воды с получением водорода. Данный материал устойчив в водных средах при pH выше 3 и характеризуется шириной запрещенной зоны около 2-2,2 эВ, что позволяет поглощать до 40% солнечного излучения. Магнетит (Fe_3O_4) на протяжении долгих лет используется как один из ключевых магнитных материалов. В частности, модифицированные тонкие пленки Fe_3O_4 демонстрирует улучшенные электрические и магнитные характеристики по сравнению с не модифицированными [3].

Поскольку условия синтеза различных фаз оксида железа требуют тщательного контроля с применением методов структурного и химического анализа, основная цель настоящей работы заключается в изучении локального атомного строения в зависимости от режимов окисления магнетронно-осажденных пленок железа.

Спектры XANES/EXAFS (Fe-K) исследованных образцов были записаны на станции EXAFS спектроскопии (СЦСТИ, Новосибирск). Атомное окружение и локальная структура образцов анализировались методом XAFS (XANES/EXAFS) по флуоресцентному выходу с селективным подавлением фона. Определены межатомные расстояния и соответствующие координационные числа. Детально рассмотрены возможные варианты структурных моделей.

Благодарности: Исследование частично поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0040).

Литература:

- [1] Rest, A. Polyene and linearly conjugated dyes. In Coyle, J. D., Hill, R. R. and Roberts, D. R. (eds.), Light, Chemical Change and Life: A Source Book in Photochemistry, Milton Keynes, Open University, 1982.
- [2] Kay A., Cesar I., Gratzel M. New Benchmark for Water Photooxidation by Nanostructured $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Films // Journal of the American Chemical Society. – 2006. – Vol. 128. - № 49. – P. 15714 – 15721.
- [3] Wang, X., Liao, Y., Zhang, D., Wen, T., & Zhong, Z. A review of Fe_3O_4 thin films: Synthesis, modification and applications // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. - Vol.34. – № 8. - P. 1259–1272.

Анализ структурных изменений магнетронно осажденных пленок железа при термическом отжиге

Валеев Р.Г.¹, Петков А.А.¹

1 - УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

E-mail: rishatvaleev@udman.ru

Тонкопленочные оксидные структуры представляют собой класс материалов, прикладное значение которых выходит далеко за рамки фундаментальной исследовательской деятельности. Их уникальный набор свойств, включающий управляемую проводимость, каталитическую активность, специфические оптические характеристики и биосовместимость, делает их незаменимыми компонентами в широком спектре научно-технологических областей [1,2].

Оксиды железа образуют несколько стабильных и метастабильных фаз (α -Fe₂O₃ гематит, γ -Fe₂O₃ маггемит, Fe₃O₄ магнетит, ϵ -Fe₂O₃ и смешанные оксиды, такие как ZnFe₂O₄), которые могут быть получены в виде тонких пленок с настраиваемыми структурными, электронными, магнитными и оптическими свойствами. Их большое количество, низкая токсичность и химическая стабильность делают их привлекательными для катализа, преобразования энергии, спинтроники, сенсорики и создания защитных покрытий. Геометрия тонких пленок позволяет точно контролировать фазовый состав, размер зерен, толщину и границы раздела, что имеет решающее значение для интеграции устройств и разработки свойств [3-5].

В рамках данного исследования была проведена серия экспериментов, направленных на анализ структурных изменений в пленках железа при различных температурах. С использованием методов рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) были получены данные о фазовых превращениях, изменениях в кристаллической структуре и морфологии поверхности пленок.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2025-455 в части развития методик рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Литература:

- [1] Tereshkov M. et al. Metal oxide-based sensors for ecological monitoring: Progress and perspectives //Chemosensors. – 2024. – Т. 12. – №. 3. – С. 42.
- [2] Rim Y. S. Review of metal oxide semiconductors-based thin-film transistors for point-of-care sensor applications //Journal of Information Display. – 2020. – Т. 21. – №. 4. – С. 203-210.
- [3] Jeong J. H. et al. Epsilon iron oxide (ϵ -Fe₂O₃) as an electromagnetic functional material: Properties, Synthesis, and applications //Journal Powder Materials. – 2024. – Т. 31. – №. 6. – С. 465-479.
- [4] Wang X. et al. A review of Fe₃O₄ thin films: Synthesis, modification and applications //Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Т. 34. – №. 8. – С. 1259-1272.
- [5] Bosso P. et al. Plasma-assisted deposition of iron oxide thin films for photoelectrochemical water splitting //Plasma Processes and Polymers. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 2000121.

Терагерцовое техническое зрение на основе ЖК пространственного модулятора

Хасанов И.Ш.¹, Ю.В. Евдокимов², С.А. Кузнецов^{1,3,4}, В.И. Лапаник⁵, Халиков Р.Ф.¹

1 – Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

2 – АО «ОКБ «АСТРОН», Москва, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

4 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

5 – Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

E-mail: khasanov@ntcup.ru

Диапазон 0,1–0,5 ТГц представляет интерес для неразрушающего контроля диэлектрических и слабопроводящих материалов: пластиков [1], полимеров, древесины, композитов, строительных материалов, упаковки и сухих пищевых продуктов. ТГц излучение чувствительно к влаге, пустотам, расслоениям, инородным включениям и неоднородностям плотности; при этом пространственное разрешение таких систем ограничено длиной волны, а в субтерагерцовом диапазоне существенную роль играют дифракционные искажения.

Для задач быстрого диагностического анализа — обнаружения и классификации скрытых объектов, контроля однородности материала и оценки состояния изделия — не всегда требуется восстановление полного изображения. Поэтому особый интерес представляют однопиксельная визуализация, сжимающие измерения и сжимающее обучение, позволяющие получать информативные признаки по последовательности закодированных измерений с использованием пространственного модулятора и однопиксельного приёмника вместо дорогостоящих и ненадёжных матричных ТГц камер.

Эти измерительные парадигмы хорошо сочетаются с нейросетевыми методами: совместная оптимизация масок, оптической модели и архитектуры нейросети позволяет перейти от схемы «изображение для человека» к приборам, ориентированным на прямое извлечение диагностически значимой информации средствами искусственного интеллекта. В данной работе развивается такой подход на основе ТГц ЖК пространственного модулятора собственной разработки и алгоритмов, учитывающих дифракционное распространение. Это создаёт основу для компактных адаптивных систем ТГц технического зрения, которые на уровне программного обеспечения оптимизируются под конкретную диагностическую задачу.

Литература:

[1] Хасанов И.Ш., Благова Т.В. Исследование структуры пластиковых изделий, изготовленных методом 3D печати, в субтерагерцовом излучении // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 90–101.

Об энергоэффективности акустооптической модуляции поверхностных плазмон-поляритонов дальнего инфракрасного диапазона

Никитин П.А.

1 – Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

E-mail: nikitin.pavel.a@gmail.com

Поверхностные плазмон-поляритоны являются поверхностной электромагнитной волной, распространяющейся вдоль границы раздела сред с диэлектрическими проницаемостями противоположных знаков [1]. Существующие методы модуляции поверхностных плазмон-поляритонов можно разделить на два класса: 1) модуляция непосредственно при преобразовании объёмного пучка излучения в поверхностные плазмон-поляритоны [2]; 2) модуляция при распространении поверхностных плазмон-поляритонов [3]. При моделировании в работе сделан акцент на втором из указанных классов. Для модуляции использовался механизм акустооптического взаимодействия, когда поверхностные плазмон-поляритоны дифрагируют на поверхностной акустической волне [4].

Предполагалось, что поверхностные плазмон-поляритоны распространяются в трёхслойной структуре подложка-металл-диэлектрик. В качестве материалов подложки были выбраны плавленый кварц SiO_2 и полистерол PS, в качестве металла – тонкое напыление из золота Au, а в качестве диэлектрика – сжиженный гексафторид серы SF_6 и циклогексан. Использовались литературные данные по дисперсии диэлектрических свойств указанных материалов в диапазоне от 30 до 300 мкм. При расчётах угол Брэгга $\theta_B = 2,5^\circ$ предполагался постоянным, что позволило рассчитать необходимую частоту ультразвука. На основании указанных данных, а также физических свойств указанных материалов были определены параметры поверхностных плазмон-поляритонов, а также поверхностной акустической волны.

В результате моделирования построены зависимости энергоэффективности акустооптической модуляции поверхностных плазмон-поляритонов от длины волны излучения в широком диапазоне длин волн. Полученные графики позволяют определить оптимальную трехслойную структуру для реализации акустооптической модуляции дальнего инфракрасного диапазона для конкретной длины волны.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гос. задания НТЦ УП РАН с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием НТЦ УП РАН.

Литература:

- [1] Maier S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. NY: Springer, 2007. 224 p.
- [2] Zhang G., Liu J., Dong D., Chen C., Liu Y., Fu Y. // Optics Letters. 2023. V.48. № 16. P. 4296.
- [3] Hu X., Zhao X., Gu Y., Jin S., Shafqat H., Cui Y., Lu C. // Optics Communications. 2022. V.513. P. 128093.
- [4] Nikitin P.A. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2025. V. 61. № 5. P. 646–657.

Изучение режимов работы двухдорожечного ускорителя-рекуператора комплекса «Новосибирский лазер на свободных электронах»

Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Эптешев Е.С.^{1,2}, Горбачев Я.И.¹, Середняков С.С.^{1,2},
Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 – ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: Ya.V.Getmanov@inp.nsk.su

Уникальная научная установка «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) включает три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), ускоритель-рекуператор (УР) и каналы вывода излучения с пользовательскими станциями. В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая туда часть энергии, затраченной на их ускорение. Таким образом происходит рекуперация энергии отработанного электронного пучка. Ондюляторы всех трёх ЛСЭ установлены на разных дорожках одного и того же многооборотного УР. На сегодняшний день, комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом обеспечивающим генерацию ЛСЭ.

Второй лазер работает при энергии электронов около 20 МэВ в двухоборотной конфигурации УР. Первая генерация была получена в 2009 году, но до недавнего времени такая конфигурация комплекса не пользовалась популярностью у пользователей, ввиду сложности настройки режимов и поддержания стабильной генерации. Ситуация существенно изменилась с внедрением режима модуляции частоты следования электронных сгустков. В этом случае электронный ток в ускорителе представляется в виде двух периодически чередующихся макроимпульсов. Первый обеспечивает генерацию ЛСЭ, а второй, не участвующий в работе лазера, необходим для поддержания стабильной работы высокочастотной системы УР.

Режим модуляции электронного тока позволяет значительно снизить потери электронов. Благодаря этому время работы пользователей на втором ЛСЭ стало составлять существенную часть общей длительности работы комплекса. Востребованность второго лазера обеспечивается широким диапазоном генерации излучения – от 15 до 156 мкм, а также высокой пиковой мощностью (около 3 МВт). При этом в оптимальном режиме средняя мощность излучения в макроимпульсе составляла 2 кВт.

Рекордные параметры излучения были достигнуты благодаря использованию в ЛСЭ уникального ондулятора, сделанного на основе постоянных магнитов. Перестройка длины волны излучения осуществляется с помощью изменения периода ондулятора – сжатия или растяжения его магнитной структуры, а также вариации числа магнитных полюсов.

В работе изучаются режимы генерации излучения второго лазера комплекса НЛСЭ. Обсуждаются условия получения генерации высокой мощности и ограничения, связанные с такой конфигурацией.

Оптимизация магнитной структуры четырехдорожечного ускорителя-рекуператора для генерации коротких импульсов рентгеновского излучения на комплексе «Новосибирский лазер на свободных электронах»

Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Шевченко О.А.¹, Эптешев Е.С.^{1,2}, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 – ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: Ya.V.Getmanov@inp.nsk.su

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, использующих в качестве источников электронов одно-, двух- и четырёхдорожечные ускорители-рекуператоры (УР). Помимо ЛСЭ, одним из перспективных применений УР является генерация коротких рентгеновских импульсов излучения. Параметры такой установки могут обеспечивать высокую частоту повторений сгустков, равную нескольким МГц и пикосекундные длительности отдельных импульсов. Рентгеновские импульсы излучения можно формировать с помощью эффекта тормозного излучения, возникающего при прохождении электронного сгустка через фольгу, вводимую на орбиту ускорителя.

Ранее, эксперименты по генерации излучения проводились на четырёхдорожечном УР НЛСЭ и показали возможность генерации рентгеновских импульсов длительностью менее 1 нс. Основной проблемой являлись существенные потери электронов при прохождении транспортного канала ускорителя, возникающие из-за приобретения электронным пучком дополнительного углового разброса вследствие взаимодействия с фольгой. Полученные режимы работы обеспечивали прохождение около 80% от необходимого уровня тока электронного пучка.

В статье изучаются возможности оптимизации магнитной структуры четырехдорожечного УР НЛСЭ, позволяющей достичь необходимый для стабильной работы уровень прохождения электронного тока.

Ондуляторы с переменным периодом для рентгеновских лазеров на свободных электронах

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН была разработана оригинальная конструкция ондуляторов с переменным периодом на постоянных магнитах [1, 2]. Такой ондулятор был создан и успешно используется на уникальной научной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» [3]. Позднее мы разработали конструкцию ондуляторов с переменным периодом на постоянных магнитах с большим отношением рабочей апертуры к периоду [4]. В них используются С-образные блоки постоянных магнитов, охватывающие цилиндрическую вакуумную камеру.

В данной работе приведены оценки параметров рентгеновских лазеров на свободных электронах с использованием таких ондуляторов. Из-за относительно малого периода предлагаемые ондуляторы могут существенно упростить и удешевить лазеры на свободных электронах, особенно в длинноволновой части рентгеновского диапазона.

Литература:

- [1] Vinokurov N.A., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G. Variable-period permanent magnet undulators. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. - 2011. - Vol. 14, Is. 4. - Art.nr 040701. - DOI 10.1103/PhysRevSTAB.14.040701.
- [2] Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. *Успехи физических наук*. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.
- [3] Shevchenko O., Vinokurov N., Getmanov Ya.V. et al. Commissioning the First Free Electron Laser Based on a Variable-Period Undulator. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. - 2023. - Vol. 20, Is. 4. - P. 897-900. DOI 10.1134/S1547477123040611.
- [4] Davidyuk I., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A. Magnetic and mechanical design of large-aperture variable-period permanent magnet undulator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A*. - 2019. - Vol. 915. - P. 36-39. DOI 10.1016/j.nima.2018.10.168.

Полное поглощение и рассеяние на детекторе как механизмы формирования металлических артефактов в компьютерной томографии

Гильманов М.И.^{1,2}, Казимиров Д.Д.^{1,2,3}, Полевой Д.В.^{1,4,5}, Киркича А.А.^{1,2,5},
Коляскин Л.Ю.^{1,2,3}, Чукалина М.В.^{1,4}, Арлазаров В.В.^{1,4}

1 – ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия

2 – Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва, Россия

3 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

5 – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

E-mail: m.gilmanov@iitp.ru

Рентгеновская компьютерная томография (РКТ) – эффективный метод неинвазивного исследования внутренней структуры объектов. Одним из принципиальных препятствий для получения качественных реконструкционных РКТ изображений, являются артефакты, обусловленные наличием в объекте сильнопоглощающих включений. Важным этапом разработки методов подавления подобных артефактов является реалистичное моделирование проекционных данных. Существующие подходы к моделированию проекционных данных объектов с сильнопоглощающими включениями часто не воспроизводят ключевые характеристики шума и фонового сигнала, ограничивая масштабируемость разрабатываемых алгоритмов коррекции [1].

В рамках данной работы рассматривается влияния рассеяния на детекторе, или так называемого обратного рассеяния, характерного для широко используемых плоскостанельных детекторов рентгеновского излучения [2]. Этот эффект, незначительный в обычных условиях, становится критически важным в условиях полного поглощения фотонов в определенных областях проекционного кадра. При этом даже после выполнения темновых коррекций сигнал в ячейках детектора оказывается существенно ненулевым. Корректный учет этих эффектов в моделировании позволяет хорошо воспроизвести реальные проекционные данные и характерные артефакты реконструкции в рамках предложенной простой, но физически обоснованной сверточной модели формирования сигнала. Результаты работы имеют значение для разработки и валидации более точных методов подавления артефактов в РКТ и повышения качества томографической реконструкции.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИППИ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Литература:

- [1] M. Shutov, A. Ingacheva, D. Kazimirov, A. Yamaev, M. Gilmanov, A. Buzmakov, M. Chukalina, D. Nikolaev, D. Polevoy, V. Arlazarov, K. Bulatov // Sixteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2023). 2024. Vol. 13072. P. 130720Z.
- [2] Q. Cao, A. Sisniega, M. Brehler, J. W. Stayman, J. Yorkston, J. H. Siewerdsen, W. Zbijewski // Medical Physics, vol. **45**, №. 1. pp. 114–130. 2018.

Ограничение мощности генераторного лазера на свободных электронах при помощи магнитного группирователя

Винокуров Н.А.^{1,2}, Шевченко О.А.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Для осуществления рекуперации энергии отработанного пучка лазера на свободных электронах (ЛСЭ) энергетический разброс пучка не должен превышать энергетический акцептанс ускорителя рекуператора. Большой энергетический разброс пучка в ЛСЭ появляется при генерации излучения с большой мощностью. Одним из способов ограничения мощности является установка группирователя в середине ондулятора, то есть использование схемы оптического клистрона с небольшой продольной дисперсией. В работе изучается зависимость параметров отработанного электронного пучка и излучения ЛСЭ от параметров такого группирователя.

Моделирование продольной динамики электронного пучка в Новосибирском лазере на свободных электронах и сравнение с результатами измерений

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Эптешев Е.С.^{1,2}, Борин В.М.^{1,2,3}, Рева С.В.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Новосибирский лазер на свободных электронах (Новосибирский ЛСЭ) является уникальной научной установкой [1] и включает в себя три лазера на свободных электронах (ЛСЭ). В качестве источника электронов для генерации излучения в ЛСЭ используется линейный ускоритель-рекуператор (УР). В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая при этом часть энергии, затраченной на их ускорение.

Работа ЛСЭ существенным образом зависит от таких параметров электронного пучка, как заряд и длительность, а также энергетический разброс. Эти параметры определяются особенностями продольной динамики электронного пучка в инжекторе, а также выбором фазы ускорения и дальнейшей продольной динамикой в УР. Правильный выбор ускоряющей фазы и продольной дисперсии также важен для рекуперации электронного пучка после его взаимодействия с излучением в ондуляторе ЛСЭ.

Непосредственное измерение всех продольных параметров, включая энергетический разброс, является довольно сложной технической задачей и требует использования дополнительного диагностического канала, для которого, как правило, нет свободного места. Относительно легко можно измерить продольное распределение тока пучка и его зависимость от фазы ускорения и продольной дисперсии. Сопоставление результатов этих измерений с численным моделированием позволяет определить продольный фазовый объем пучка и более точно описать его продольную динамику.

В данной работе представлены результаты моделирования продольной динамики пучка в УР второго ЛСЭ Новосибирского лазера на свободных электронах, а также проведено их сравнение с результатами измерений продольного распределения тока.

Литература:

[1] Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.

Измерение параметров электронного пучка в пушке Новосибирского лазера на свободных электронах

Шевченко О.А.¹, Горбачев Я.И.¹, Середняков С.С.¹, Абед Н.¹, Никифоров Д.А.¹, Федоров В.В.¹,
Иванов А.В.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Для расчета поперечной фокусировки электронного пучка в однопроводном ускорителе необходимо знать его начальные параметры на выходе из электронной пушки такие, как эмиттанс и вторые моменты функции распределения. Численное моделирование динамики пучка в электронной пушке является довольно сложной проблемой. При ее решении используется ряд допущений, что приводит к ограничению точности получаемых результатов. Поэтому непосредственное измерение параметров пучка и сравнение с результатами моделирования является актуальной задачей.

Один из методов нахождения поперечных параметров пучка основан на измерении зависимости его поперечных размеров от каких-либо параметров системы транспортировки (например, тока фокусирующего соленоида) [1]. Сравнение экспериментально измеренной зависимости с расчетной позволяет определить начальные параметры пучка на входе в систему транспортировки.

В данной работе представлены результаты измерения поперечных параметров пучка, а также его энергии на выходе из пушки Новосибирского лазера на свободных электронах. В работе также проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами расчета с использованием нескольких моделей.

Литература:

[1] Minty M.G., Zimmermann F. Measurement and Control of Charged Particle Beams. Berlin: Springer, 2003.

Расчет транспортной матрицы электронного пучка в пушке Новосибирского лазера на свободных электронах

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Один из способов определения поперечных параметров электронного пучка основан на измерении зависимости его размера от элементов транспортной матрицы, которые при данном измерении меняются контролируемым образом путем изменения токов в элементах магнитной системы [1]. В простейших случаях, например, для идеального квадрупольного градиента, независящим от продольной координаты, можно легко получить аналитическую зависимость элементов транспортной матрицы от тока. В реальности поля элементов ускорителя зависят от продольной координаты, причем поля отдельных элементов могут перекрываться друг с другом. В этом случае для расчета матрицы можно использовать численные методы. Такая ситуация, например, возникает при определении параметров пучка, вылетающего с катода электронной пушки.

В данной работе на примере электронной пушки Новосибирского лазера на свободных электронах описан численный расчет транспортной матрицы в аксиально симметричных электрических и магнитных полях.

Литература:

[1] Minty M.G., Zimmermann F. Measurement and Control of Charged Particle Beams. Berlin: Springer, 2003.

Калибровка ЖК модулятора в задаче однопиксельной визуализации при когерентном ТГц освещении

Благова Т.В.¹, Хасанов И.Ш.¹

1 – Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

E-mail: blagova.tv@ntcup.ru

В работе исследуется однопиксельная визуализация в ТГц диапазоне с использованием разработанного строкового отражательного ЖК-модулятора и когерентного источника 140 ГГц на основе лавинно-пролётного диода. Ранее было показано, что дифракционные искажения, неоднородность освещения и временные флуктуации требуют аппаратно-алгоритмической калибровки однопиксельных систем как необходимого этапа восстановления изображения [1–3]. При переключении пикселя ЖК модулятора может изменяться не только амплитуда, но и фаза, поляризационное состояние и локальное распределение поля. Предварительные измерения показывают, что скалярный сигнал синхронного детектирования приводит к нестабильной реконструкции по паттернам Адамара, поэтому рассматривается калибровка комплексного отклика системы $z = X + iY$, где X и Y — квадратуры модуляционного отклика. В общем виде измерение записывается как:

$$z_k = \sum_i M_{ki} q_i + \eta_k,$$

где q_i — одномерный профиль объекта, M_{ki} — комплексный измерительный оператор системы, η_k — шум. В простейшем случае $M_{ki} = A_{ki}c_i$, где A_{ki} — бинарный паттерн, а c_i — комплексный калибровочный отклик пикселя, включающий неоднородность освещения и фазо-амплитудный отклик ЖК-ячейки. Если это приближение выполняется, то реконструкция может проводиться по калиброванному комплексному оператору M .

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2025-0007 Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук.

Литература:

- [1] Благова Т.В., Хасанов И.Ш. Применение корреляционного анализа паттернов пространственного модулятора терагерцового излучения для повышения качества фантомных изображений // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2024. — № 5. — 2450401.
- [2] Yan S.-M., Sun M.-J., Chen W., Li L.-J. Illumination Calibration for Computational Ghost Imaging // Photonics. — 2021. — Vol. 8, № 2. — Article 59. — DOI: 10.3390/photonics8020059.
- [3] Wang H., Sun M., Song L. Illumination Temporal Fluctuation Suppression for Single-Pixel Imaging // Sensors. — 2023. — Vol. 23, № 3. — Article 1478. — DOI: 10.3390/s23031478.

Статус уникальной научной установки «Новосибирский лазер на свободных электронах»

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Арбузов В.С.¹, Чернов К.Н.¹, Дейчули О.И.¹, Дементьев Е.Н.¹, Довженко Б.А.¹, Горбачев Я.И.¹, Кондаков А.А.¹, Козак В.Р.¹, Козырев Е.В.^{1,2}, Крутихин С.А.¹, Кубарев В.В.¹, Кулипанов Г.Н.^{1,3}, Купцов И.В.¹, Куркин Г.Я.¹, Медведев Л.Э.¹, Мотыгин С.В.¹, Овчар В.К.¹, Осипов В.Н.¹, Пилан А.М.¹, Попик В.М.¹, Попик И.В.¹, Репков В.В.¹, Саликова Т.В.¹, Седляров И.К.¹, Середняков С.С.¹, Скринский А.Н.¹, Тарарышкин С.В.¹, Трибендис А.Г.¹, Ческидов В.Г.¹, Власенко М.Г.¹, Волков В.Н.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия (12 pt, курсив)

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Уникальная научная установка «Новосибирский лазер на свободных электронах» включает три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), ускоритель-рекуператор (УР) и каналы вывода излучения с пользовательскими станциями. В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая туда часть энергии, затраченной на их ускорение. Ондюляторы всех трёх ЛСЭ установлены на разных дорожках одного и того же многооборотного УР.

Новосибирский УР имеет три основных конфигурации включения магнитной системы - по одной на каждый из трех ЛСЭ. Первый ЛСЭ установлен под ускоряющей структурой. Поэтому после прохождения через ускоряющую структуру электронный пучок с энергией 11 МэВ поворачивается на 180 градусов в вертикальной плоскости. После использования в ЛСЭ пучок возвращается в ускоряющую структуру в замедляющей фазе. В данной конфигурации УР работает как однооборотная установка.

Для работы со вторым и третьим ЛСЭ необходимо включить два круглых поворотных магнита. Они поворачивают пучок в горизонтальной плоскости. После четырёх ускорений в основной ускоряющей структуре электронный пучок попадает в ондулятор третьего ЛСЭ. Энергия электронов в третьем ЛСЭ составляет 42 МэВ. Использованный пучок замедляется четыре раза и приходит в поглотитель, имея низкую энергию. Если включить четыре дополнительных магнита на второй дорожке УР, электроны, имеющие после двух прохождений ускоряющей структуры энергию 20 МэВ, проходят через второй ЛСЭ и после двукратного замедления в ускоряющей структуре попадают в поглотитель.

Несмотря на то, что установка работает на пользователей излучения (физиков, химиков и биологов) более двадцати лет, она до сих пор имеет самую высокую среднюю мощность узкополосного перестраиваемого когерентного излучения в своём диапазоне длин волн (8 – 400 микрон).

В докладе описаны регулярная работа установки на пользователей инфракрасного и субмиллиметрового излучения, специальные режимы работы и недавние модернизации подсистем.

Система рентгеновских зеркал для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ»

Разумов Н.И.¹, Бугаев С.В.², Чхало Н.И.³, Толочко Б.П.¹

1 – Лаборатория методов синхротронных исследований,

Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*3 – Отдел многослойной рентгеновской оптики, Институт физики микроструктур РАН,
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*

E-mail: BPTolochko@solid.nsc.ru

Для обеспечения работы станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» Лабораторией методов синхротронных исследований Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН разрабатывается оптический элемент «Узел зеркал» [1]. Прежде всего он должен улучшить работу на секции «Динамические процессы», для которой требуется излучение в диапазоне 20–40 кэВ [2]. Сверхпроводящий вигглер этой станции имеет угол расхождения СИ по вертикали $1/\gamma = 0,512 \text{ МэВ}/3 \text{ ГэВ} = 0,171 \text{ мрад}$ и по горизонтали $\pm 1,2 \text{ мрад}$ [3]. Фиксированная маска внутри фронтэнда и применение щелей позволяют сформировать пучок СИ размерами до $100 \times 10 \text{ мм} \times \text{мм}$ на расстоянии $\sim 120 \text{ м}$ от источника в месте размещения образца во взрывной камере в отдельном здании станции.

Использование рентгеновских зеркал в режиме полного внешнего отражения для формирования пучка СИ позволит обрезать жёсткий диапазон спектра. Применение сегментированного первого зеркала позволит концентрировать мощность пучка СИ по трекам от отдельных сегментов на необходимом расстоянии или формировать параллельный пучок с частичной коррекцией расхождения, обусловленного фиксированной маской внутри фронтэнда.

«Узел зеркал» предполагает возможность модульной замены сегментов. Так в настоящий момент Отдел многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН изготовил пару рентгеновских зеркал – параболическое и плоское – при размещении которых в качестве отражающих элементов в «Узле зеркал» произойдёт фокусировка изображения источника СИ непосредственно в точке размещения образца во взрывной камере станции.

Благодарности: Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН (Проект № 121032500071-6).

Литература:

- [1] Завьялов А. и др. // Книга тезисов. СИ и ЛСЭ. 2024. С. 105.
- [2] Рубцов И.А. и др. // Техн. инфр. «СКИФ». Т. 1. 2022. С. 115–135.
- [3] Шкаруба В.А. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4 (249). С. 999–1005.

Исследование структурных превращений в ходе первого гальваностатического разряда анодного материала CuSnO_3 для металл-ионных аккумуляторов с помощью метода рентгеновской дифракции на синхротронном излучении

Д.В. Новожилов¹, А.А. Шиндров¹, А.С. Улихин¹, А.П. Завьялов², Б.П. Толочко¹

1 - ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, 630090

2 - Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов"

E-mail: novozhilov@solid.nsc.ru

Высокая теоретическая ёмкость олова (994 мАч/г для литий-ионных аккумуляторов, 847 мАч/г для натрий-ионных аккумуляторов и 903 мАч/г для магниевых аккумуляторов) почти втрое превосходит теоретическую ёмкость графита, что делает анодные материалы на основе олова перспективной заменой коммерческого графитового анода. Однако, в ходе электрохимической реакции заряда-разряда, объемное расширение электрода составляет ~400%, что приводит к механической деградации, потере контакта электрод/токосъемник, и, в следствие, к снижению энергоемкости.

Из литературы известно, что уменьшение размера частиц, а также формирование каркаса, способного компенсировать механические напряжения, позволяют уменьшить падение ёмкости электрода. Для этих целей нами была предложена методика термического разложения предшественника $\text{CuSn}(\text{OH})_6$, в ходе которого образуется псевдоморфоза CuSnO_3 . В том числе, данный материал позволяет управлять свойствами конечной псевдоморфозы, поскольку на стадии синтеза можно провести легирование ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} с замещением меди, что можно рассматривать как упрочнение медной матрицы с образованием интерметаллидов меди с данными металлами в ходе первого цикла разряда. Псевдоморфоза представляет собой рентгеноаморфный материал, что затрудняет изучение его структурных превращений в ходе электрохимической реакции стандартными рентгеновскими методами.

Для изучения процессов, происходящих во время электрохимической реакции на первом цикле разряда, в данной работе исследовано поведение анодного материала CuSnO_3 в полужающей против металлического лития, в ходе первого гальваностатического разряда с помощью метода рентгеновской дифракции на синхротронном излучении.

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Изучение влияния генерации излучения на электронный пучок в двухдорожечном ускорителе-рекуператоре комплекса «Новосибирский лазер на свободных электронах»

Эптешев Е.С.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 - ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 - Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 - Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: e.epteshev@g.nsu.ru

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, использующих в качестве источников электронов одно-, двух- и четырёхдорожечные ускорители-рекуператоры (УР). На сегодняшний день, комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом, обеспечивающий генерацию ЛСЭ. Диапазон излучения ЛСЭ в двухоборотном режиме составляет 15 – 156 мкм.

Взаимодействие электронного пучка и световой волны при генерации ЛСЭ оказывает определяющее воздействие на работу комплекса НЛСЭ. Оно приводит к значительному изменению энергетического распределения электронов.

В статье изучается процесс взаимодействия с помощью численного моделирования движения электронных пучков в поле ондулятора в присутствии внешней электромагнитной волны. Производится сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации комплекса НЛСЭ.

**Изучение возможностей оптимизации магнитной структуры
двухдорожечного ускорителя-рекуператора комплекса «Новосибирский
лазер на свободных электронах»**

Эптешев Е.С.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

1 - ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 - Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 - Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: e.epteshev@g.nsu.ru

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, использующих в качестве источников электронов одно-, двух- и четырёхдорожечные ускорители-рекуператоры (УР). На сегодняшний день, комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом, обеспечивающий генерацию ЛСЭ. Диапазон излучения ЛСЭ в двухоборотном режиме составляет 15 – 156 мкм.

Использование схемы рекуперации энергии подразумевает торможение электронного пучка после генерации лазерного излучения в поле ВЧ-резонаторов. В конфигурации двухдорожечного УР, электронный сгусток тормозится дважды, после прохождения каждой дорожки, что приводит к увеличению относительного энергетического разброса.

Появление дополнительного энергетического разброса при прохождении электронов через ЛСЭ непосредственно связано с механизмом генерации ЛСЭ. Вообще, воздействие световой волны вызывает изменение его энергетического распределения, которое приводит к повышению потерь электронов, нагреву элементов вакуумной камеры и, как следствие, к ограничению максимальной средней мощности излучения.

В работе рассматриваются возможности модификации магнитной структуры двухдорожечного ускорителя-рекуператора НСЛЭ, основной целью которых является обеспечение работы в режиме генерации высокой средней мощности.

Развитие технологий создания высокоаспектных псевдометаллических микроструктур для терагерцовых приложений

Кузнецов С.А.^{1,2,3}, Генцелев А.Н.¹, Николаев Н.А.⁴, Баев С.Г.⁴, Тархов М.А.⁵, Филиппов И.А.⁵

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

4 – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

5 – Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва

E-mail: SAKuznetsov@nsu.ru

Развитие инструментальной базы ТГц фотоники тесно связано с развитием технологий создания микроструктурных оптических элементов субволновой топологии, которые обеспечивают требуемое управление электродинамическими характеристиками пучков ТГц излучения в заданной полосе частот, включая частотную фильтрацию, преобразование поляризации, фокусировку и т.д. Среди ТГц микроструктур следует выделить структуры высокоаспектного типа, которые характеризуются высоким отношением толщины t к минимальному топологическому размеру w в латеральной плоскости ($t/w \sim 10$). Такие структуры, будучи реализованным путём сквозного паттернирования толстого металлического слоя или же слоя диэлектрика/полупроводника с последующей полной металлизацией поверхности (т.н. «псевдометаллические» микроструктуры или ПММС), демонстрируют способность экспоненциального подавления низких частот вследствие эффекта волноводной отсечки микроотверстий структуры. Это делает их перспективными для использования в качестве ТГц фильтров высоких частот (ФВЧ) или же плоских линз (фокусаторов), для которых должная пространственная вариация фазы пропускания достигается за счёт соответствующей вариации локальных диаметров микроотверстий.

В настоящем докладе проведено сопоставление двух альтернативных технологических подходов к получению высокоаспектных ПММС: 1) посредством глубокой рентгеновской литографии слоя полиметилметакрилата (ПММА); 2) с использованием Bosch-процесса глубокого анизотропного травления кремния (Si). Продемонстрированы экспериментальные прототипы ФНЧ толщиной от 0,4 до 1 мм с частотами отсечек от 0,3 до 0,9 ТГц, а также планарные голографические фокусаторы на частоту 0,65 ТГц, созданные с использованием рассмотренных технологических подходов. Тестирование характеристик полученных ПММС посредством техники импульсной терагерцовой и ЛОВ-спектроскопии показало высокие операционные характеристики как для ПММА-, так и для Si-изделий, хорошо соответствуя результатам численного моделирования. Вместе с тем отмечено, что Bosch-технология больше подходит для формирования ПММС с более мелкомасштабным микрорисунком.

Благодарности: Авторы признательны за инструментальную и технологическую поддержку Центрам коллективного пользования: АТИЦКПНГУ Новосибирского государственного университета, «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН, «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» ИЯФ СО РАН.

Высокоэффективные амплитудные пространственные модуляторы субтерагерцового излучения на основе жидкокристаллических метаструктур

Кузнецов С.А.^{1,2,3}, Хасанов И.Ш.³, Лапаник В.И.⁴, Евдокимов Ю.В.⁵

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

4 – Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

5 – АО «ОКБ «АСТРОН», Москва, Россия

E-mail: SAKuznetsov@nsu.ru

Низкочастотная область терагерцового диапазона электромагнитного спектра (0,1–0,5 ТГц) представляет значительный практический интерес в контексте построения систем визуализации и неразрушающего контроля оптически непрозрачных диэлектрических объектов, обеспечивающих миллиметровое пространственное разрешение. Для подобных систем особую перспективу представляет метод “single-pixel imaging” или “ghost imaging”, который основан на корреляционном сопоставлении интегральной освещенности объекта, регистрируемой однопиксельным детектором, с набором двумерных масок – амплитудных паттернов, пространственно модулирующих волновой фронт излучения.

В настоящей работе представлены результаты масштабных физико-технологических исследований по созданию квазиоптических амплитудных модуляторов на основе электрически управляемых ЖК матриц под задачи однопиксельной субТГц-визуализации. В основе реализованных устройств применены резонансные поглощающие метаструктуры специального дизайна, интегрированные с ультратонким слоем уникальных нематических жидких кристаллов (ЖК). Рассмотрена физика работы метаструктур и продемонстрированы действующие прототипы модуляторов формата 64×64 с рабочим полем 80×80 мм, оптимизированные на работу в окрестности частот 100, 150 и 300 ГГц. Отмечено, что достоинством созданных устройств, принципиально выделяющих их на российском и зарубежном рынках терагерцовых и оптических технологий, является возможность достижения глубокой модуляции коэффициента отражения (95–98%) в сочетании с рекордно малой толщиной ЖК слоя, относительная величина которой достигает ~1/300 доли от рабочей длины волны. Ультратонкость ЖК слоя обеспечивает возможность генерации амплитудных 2D-паттернов с частотой кадров ~100 Гц, традиционно недостижимой для терагерцовых ЖК устройств альтернативных разработчиков.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-91-22005. Авторы благодарят Центр коллективного пользования АТИЦКПНГУ Новосибирского государственного университета за предоставленное измерительное оборудование.

Финальный цикл работ на станции EXAFS спектроскопии в ЦКП СЦСТИ

Кривенцов В.В.¹

1 – ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

E-mail: kriven@mail.ru

В заявленном докладе, на многочисленных примерах работ, выполненных за последние годы на станции EXAFS спектроскопии 8 канал ВЭПП-3 (СЦТСИ, Новосибирск) рассмотрены аппаратные и методические особенности измерений, методики обработки экспериментальных данных, подходы к анализу полученной структурной информации. Показаны, для широкого круга исследованных наносистем сложного состава, возможности рентгеновской спектроскопии поглощения (XAFS), в диапазоне энергий ~5-25 кэВ, как самостоятельного метода, так и в комплексе с другими физическими методами исследования (ПЭМВР, СЭМ, РФЭС, РФА СИ). Использованный метод XAFS спектроскопии наиболее эффективен, когда применение традиционных структурных методов заведомо проблематично, например, при изучении наноразмерных систем “сложного” состава с характерным размером ~1-10 нм и низким содержанием по исследуемому элементу. Показана перспективность примененного комплексного подхода для исследования наносистем сложного состава: капсулированных упорядоченных наноструктур, биологических наноматериалов, нанокомпозитных катализаторов, атомарно-диспергированных наноматериалов, медицинских и геологических образцов сложного состава. Доклад будет интересен для специалистов, работающих в области физико-химических исследований, материаловедения, нанотехнологических приложений.

Благодарности: Исследования с использованием СИ поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ». В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Разработка квазиоптических дихроичных фильтров мм/субмм-диапазонов спектра для космической обсерватории «Миллиметрон»

Кузнецов С.А.^{1,2,3}, Гельфанд А.В.³, Лазорский П.А.²,

Турыгин С.Ю.⁴, Худченко А.В.⁵, Чёрный Р.А.⁵, Голубев Е.С.⁵

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

5 – Астрокосмический центр ФИАН, Москва, Россия

E-mail: SAKuznetsov@nsu.ru

Российская космическая обсерватория «Миллиметрон» («Спектр-М») – активно разрабатываемый долгосрочный проект Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН). Проект нацелен на исследование различных объектов во Вселенной в миллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах длин волн от 0,07 до 10 мм посредством 10-метрового орбитального телескопа после его вывода в точку Лагранжа L2 (1,5 млн. км от Земли). В частности, работа обсерватории на миллиметровых волнах предполагает использование режима интерферометра со сверхдлинной базой «космос–Земля», который в сравнении с более длинноволновым радиодиапазоном позволяет реализовать рекордно высокое угловое разрешение (10^{-8} – 10^{-9} угл. сек.), перспективное для исследования окрестностей сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик, проверки теории гравитации в сверхсильных полях, поиска возможного существования космических «кротовых нор» и т.п.

Работа мм/субмм-телескопа предполагает изучение неба одновременно в нескольких спектральных поддиапазонах, разделение на которые в квазиоптической схеме телескопа должно обеспечиваться посредством соответствующих дихроичных фильтров. В настоящем докладе освещаются вопросы разработки таких фильтров для селекции излучения в области частот 30–500 ГГц в рамках задач проекта «Миллиметрон». Рассмотрены технологические решения с многослойными интерференционными структурами на основе самонесущих гальванических резонансных сеток, а также несамонесущих резонансных структур на керамопластиковых подложках, позволяющие реализовать малый ($\leq 0,5$ дБ) коэффициент вносимых потерь в пределах заданных спектральных поддиапазонов селекции. Рассматриваются аспекты электродинамической и механопрочностной оптимизации характеристик фильтров, а также их экспериментального тестирования, включая работу при криогенных температурах и вибрационную устойчивость.

Благодарности: Авторы благодарят Центр коллективного пользования АТИЦКПНГУ за предоставленное измерительное оборудование.

Эллипсометрия мм-диапазона длин волн для неразрушающего контроля оптически непрозрачных диэлектрических покрытий и материалов

Кузнецов С.А.^{1,2,3}, Федоринин В.Н.³, Гельфанд А.В.³,
Кравченко Ю.Л.³, Гусаченко А.В.³, Новгородов Б.Н.³

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: SAKuznetsov@nsu.ru

Эллипсометрия представляет собой неразрушающий бесконтактный метод исследования характеристик приповерхностного слоя материала, основанный на измерении изменений состояния поляризации электромагнитного излучения при отражении от исследуемой поверхности. Использование миллиметровых (мм-) волн позволяет значительно увеличить глубину проникновения зондирующего излучения в материал в сочетании с приемлемым (~неск. мм) пространственным разрешением изучаемого объекта, что делает мм-эллипсометрию перспективным направлением неразрушающего контроля оптически непрозрачных и рентгено-неконтрастных диэлектрических материалов и покрытий (в частности, композитных), особенно востребованным в промышленности.

В докладе изложены основные положения метода эллипсометрии и представлены результаты разработки экспериментальных прототипов эллипсометров, работающих на частоте излучения 140 ГГц ($\lambda = 2,14$ мм), обеспечиваемой монохроматическими источниками на основе IMPATT-диодов, с регистрацией сигнала пироэлектрическими детекторами. Рассмотрены фотометрическая и нуль-схемы эллипсометров, а также их аппаратная реализация с ручной и автоматизированной настройкой оптических элементов и соответствующей системой регистрации. Ключевая особенность реализованных приборов заключалась в применении в их конструкции плоских тонкоплёночных квазиоптических элементов на основе плазмонных метаповерхностей для преобразования поляризации излучения, что позволило минимизировать аппаратные габариты: длина рабочего хода составила ~200–250 мм.

Представлены результаты апробации разработанных эллипсометров для измерения толщины и показателя преломления жаропрочных керамических покрытий на основе оксидов ZrO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Gr_2O_3 , наносимых методами плазменного и детонационного напыления на лопатки газовых турбин для их антикоррозионной защиты, а также для измерений оптических констант композиционных материалов на основе углеродных волокон с демонстрацией возможности обнаружения расслоений в структуре композита.

Благодарности: Авторы благодарят Центр коллективного пользования АТИЦКПНГУ за предоставленное измерительное оборудование.

Комплексное XAFS исследование модифицированных наносистем платиноид/углерод

Кривенцов В.В.¹

1 – ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

E-mail: kriven@mail.ru

В заявленной работе представлены результаты исследования методом рентгеновской спектроскопии поглощения XAFS (XANES/EXAFS) особенностей состояния и локальной структуры Me-модифицированных (Me=Fe, Ni, Co) металл-углеродных нанокомпозитов, содержащих наноразмерные формы платиноидов. Известно, что каталитические наносистемы, содержащие платиноиды, нанесенные на различные углеродные носители, вызывают большой интерес исследователей, вследствие своей практической значимости; возможности варьирования каталитических свойств и применения для широкого ряда процессов конверсии промышленных субстратов, гидрирования, дебензилирования аминов, низкой стоимости конечных продуктов, легкости утилизации и извлечения дорогостоящих компонентов из отработавших катализаторов. Модельные образцы были приготовлены, из предшественников различной природы, при варьировании способов синтеза и формирования нанесенного компонента, режимов восстановления и активации. Спектры XANES/EXAFS (Ir-L₃, Pt-L₃, Pd-K, Fe-K, Ni-K, Co-K) исследованных образцов были записаны на УНУ станция EXAFS спектроскопии (СЦСТИ, Новосибирск). Состояние и локальная атомная структура платиновых металлов в катализаторах исследовались методом XAFS (XANES/EXAFS) спектроскопии по выходу флуоресценции с селективной отсечкой фона. Установлены длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. Дополнительно методами РФЭС, ПЭМВР, РФА исследовались химический и фазовый составы, морфология образцов. Данные, полученные различными методами хорошо согласуются между собой. Подробно рассмотрены возможные варианты структурных моделей. Установлены корреляции между строением активного компонента и каталитическими свойствами исследованных образцов. Продемонстрирована перспективность предлагаемого подхода для исследования модифицированных наносистем платиноид/углерод.

Благодарности: Исследования с использованием СИ поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ». В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Применение резонансной фотоэмиссионной спектроскопии для исследования многокомпонентных R-T соединений

Кузнецова Т.В.¹ Пономарева Е.А.¹, Чумаков Р.Г.²

1 - Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН Екатеринбург, Россия

2 - НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

E-mail: kuznetsova@imp.uran.ru

Методом резонансной фотоэмиссионной спектроскопии с использованием синхротронного излучения исследованы электронные состояния в многокомпонентных R-T соединениях, где R- редкоземельный металл, T- переходный металл. Проведен сравнительный анализ резонансов на атомах редкоземельных и переходных металлов, исследованы особенности взаимодействия d- и f-оболочек в мягком рентгеновском диапазоне. Данный метод позволяет селективно усилить вклад 3d-электронных состояний переходных металлов или 4f-состояний редкоземельных элементов в валентной полосе, разделять упругие и неупругие каналы распада путем изменения энергии возбуждающего синхротронного излучения вблизи края поглощения. Изучены основные сценарии фотоэмиссии валентных электронов до и после резонанса, в частности интерференция прямого канала с непрямым каналом, открывающимся после возбуждения электрона основного уровня в промежуточное состояние, неупругий оже-распад дырки основного уровня, сопровождающийся эмиссией электронов и образованием двух дырок в валентной зоне и другие неупругие потери.

Таким образом, резонансная фотоэмиссия позволяет получать информацию о гибридизации 3d-4f состояний, что определяет магнитные и структурные свойства многокомпонентных R-T соединений.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 23-72-0006.

Технологии искусственного интеллекта для обработки данных и управления экспериментов на станции синхротронного центра

Солдатов А.В., Гуда А.А., Проценко Б.О., Гуда С.А., Панкин И.А.

1 - Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: soldatov@sfedu.ru

Современные методы структурной диагностики материалов, такие как спектроскопия рентгеновского поглощения и рассеяние рентгеновских лучей в малых и широких углах, являются мощными инструментами для исследования локальной атомной и электронной структуры, а также морфологии наноразмерных систем. Однако качественная интерпретация полученных экспериментальных данных представляет собой сложную многоступенчатую задачу, требующую высокой квалификации исследователя, итерационного сравнения с теоретическими моделями и использования специализированного программного обеспечения.

В рамках данной работы был разработан универсальный интеллектуальный агент, предназначенный для комплексного анализа данных, полученных методами рентгеновской диагностики. Данный программный продукт объединяет в себе передовые алгоритмы обработки спектров, базы данных эталонных спектров и возможности искусственного интеллекта для взаимодействия с пользователем в естественном диалоговом режиме.

Программная реализация интеллектуального агента выполнена на языке программирования Python, который благодаря обширной экосистеме библиотек является де-факто стандартом в области научных вычислений. В качестве основы для обработки данных XAS использована специализированная библиотека PyFitIt, предоставляющая инструменты для обработки и подгонки спектров, машинного обучения и работы с дескрипторами.

Разработанный программный комплекс представляет собой универсального интеллектуального агента, который осуществляет автоматическую обработку и интерпретацию экспериментальных данных на стороне сервера.

Физический ввод станции малоуглового рассеяния КИСИ НИЦ Курчатовский Институт, работающей с использованием технологий искусственного интеллекта, и оснащенной инфраструктурой для operando диагностики материалов позволит проводить исследования в условиях, воспроизводящих реальные технологические процессы, что критически важно для понимания механизмов химических реакций, фазовых переходов и самоорганизации наноструктур, а это несомненно откроет новые возможности для разработки широких классов новых уникальных стратегически важных материалов.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение No 075-15- 2025-509).

Специализированная вакуумная камера поворотного магнита СКИФ для эффективного вывода синхротронного излучения инфракрасного диапазона

Вебер С.Л.^{1,2}, Мельников А.Р.^{1,2}, Ташкеев Н.А.^{1,2,3}, Байструков М.А.^{2,4}, Жимулева Е.С.⁵,
Солдатенко А.В.⁵, Винокуров Н.А.⁴, Краснов А.А.^{2,3,4}, Пиминов П.А.^{2,4}, Золотарев К.В.^{2,4},
Зубавичус Я.В.²

1 – Институт «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Центр коллективного пользования «СКИФ» Института катализа им. Г.К. Борескова
СО РАН, Кольцово, Россия

3 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

4 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

5 – Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: sergey.veber@tomo.nsc.ru

Синхротронные источники третьего и четвертого поколений позволяют получать рентгеновское излучение, которое по яркости превосходит компактные лабораторные источники на 10–12 порядков [1]. Данное преимущество синхротронного излучения сохраняется и в инфракрасном диапазоне, обеспечивая яркость, на три порядка превышающую яркость стандартных источников ИК-излучения [2], что обуславливает создание специализированных ИК-станций на многих синхротронных источниках.

В качестве источника инфракрасного синхротронного излучения как правило используется стандартный поворотный магнит кольца-накопителя. Большой угол расходимости синхротронного ИК-излучения требует реализации специализированной вакуумной камеры, обеспечивающей эффективный сбор на первом отклоняющем зеркале и последующий вывод ИК-излучения в оптический канал станции. Данной проблеме уделяется особое внимание на накопителях четвертого поколения, где вакуумная камера изначально оптимизирована под вывод излучения рентгеновского диапазона, имеющего малый угол расходимости [3].

В работе представлена конструкция специализированной вакуумной камеры для вывода инфракрасного излучения из поворотного магнита BDA-4 накопительного кольца сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). Приведены расчеты распределения ИК-излучения на первом отклоняющем зеркале в инфракрасном и терагерцовом диапазонах, указаны ключевые оптические элементы проектируемого оптического канала. Отдельное внимание уделено влиянию разработанной специализированной вакуумной камеры на импедансные характеристики накопительного кольца СКИФ.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 25-13-20039, и Новосибирской области, соглашение № 30-25-000858.

Литература:

- [1] Evans J. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2006. Vol. 8. P. 3045-3058.
- [2] Smith T.I. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2002. Vol. 483, No. 1. P. 565-570.
- [3] Santos T.M.et.al. // Journal of Synchrotron Radiation. 2024. Vol. 31. P. 547-556.

Изображающий спектрометр мягкого рентгеновского излучения на основе кремниевых коммерческих КМОП-матриц

Кириченко А.С.¹, Кузин С.В.¹, Перцов А.А.¹, Золотов Д.А.¹,

Васильев А.Л.², Артёмов В.В.¹, Лобода И.П.¹, Рева А.А.¹, Богачёв С.А.¹, Червинский В.И.¹

1 – Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

2 – Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" - КиФ (ФГУФНИЦ "Кристаллография и фотоника"), Москва, Россия

E-mail: kirichenko@cosmos.ru

Рентгеновское излучение и методы, построенные на его регистрации, являются основными инструментами в вопросах исследования состава и структуры объектов различного характера. Соответствующие технологии используются в дефектоскопии, определении элементного состава, неразрушающем анализе структуры археологических и биологических образцов и других научных и прикладных исследованиях [1]. При этом необходима как пространственная, так и спектральная информация. В работе представлены результаты разработки устройства на базе коммерческих КМОП-матриц [2], которое позволяет одновременно получать как изображения объектов в рентгеновском диапазоне, так и спектры излучения (пример спектра показан на рисунке 1). Приводятся основные характеристики созданной системы и анализ ее применимости при решении различных задач. Отдельно рассмотрены вопросы эффективности регистрации детекторов, а также их радиационной стойкости.

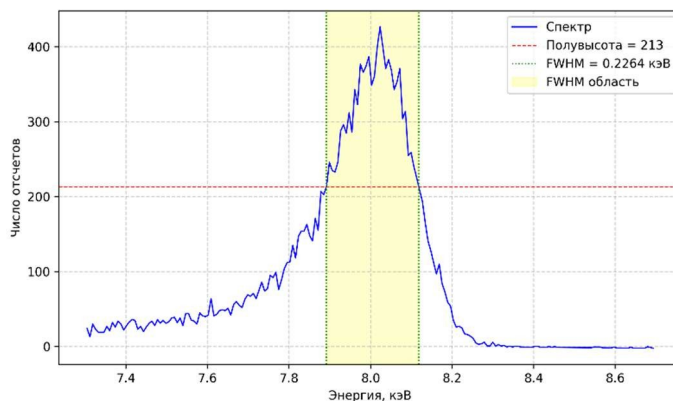


Рис. 1. Спектр мягкого рентгеновского излучения (линия Ka меди), построенный с помощью матрицы SONY IMX265.

Благодарности: Результаты исследования получены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (по соглашению № 075-15-2025-458 от 27.05.2025) в рамках реализации отдельных мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 г.

Литература:

- [1] Bunaciu A. A., UdrişTioiu E. G., Aboul-Enein H. Y. // Critical reviews in analytical chemistry. 2015. V. 45. №. 4. С. 289-299.
- [2] Kuzin S.V., Kirichenko A.S., Pertsov A.A. et al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2025. V. 19. № 4. P. 935–941.

Новые горизонты станции X-техно

Назьмов В.П.^{1,2,3}, Генцелев А.Н.¹

- 1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*
2 – Сибирский центр коллективного пользования «СКИФ» СО РАН, Новосибирск, Россия
3 – Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: V.P.Nazmov@inp.nsk.su

В целях минимизации тепловых нагрузок на оптические элементы канала вывода синхротронного излучения и станции, а также с учётом мнения потенциальных пользователей проект станции X-Техно [1] был доработан. Основные результаты доработки следующие.

Во-первых, в качестве источника излучения рассматривается мягкий поворотный магнит (величина магнитного поля 0,55 Тл) вместо жёсткого поворотного магнита (величина магнитного поля 2 Тл) в предыдущей версии. В результате диапазон используемого актиничного излучения сконцентрирован в области энергий квантов 2 - 20 кэВ. Тем не менее, остаётся возможность проведения исследования с использованием материалов с большим атомным номером с участием *L*- и *M* – оболочек атомов, а также одноэтапное микроstructuring до толщины около 10 мкм с использованием материалов с высоким атомным номером.

Во-вторых, вновь введён эвакуируемый модуль для проведения исследований материалов и разработки технологии наноструктурирования в диапазоне мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Рассматриваются варианты использования модуля как в режиме с вакуумно-плотными окнами, например, из алмаза или лейкоапфира, так и без окон. Для формирования потока квантов в необходимом спектральном диапазоне планируется применение монохроматора как на базе многослойного зеркала, так и фольг пропускания, выполненных из различных материалов.

Литература:

[1] Назьмов В.П., Гольденберг Б.Г. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2023, № 11, с. 1–6.

Искажение топологии при переносе размеров с «толстой» рентгеновской маски

Назьмов В.П.^{1,2,3}, Неустроева А.А.¹, Гольденберг Б.Г.^{1,2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Сибирский центр коллективного пользования «СКИФ» СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: V.P.Nazmov@inp.nsk.su

Принято считать, что рентгеновская маска должна быть достаточно тонкой, чтобы как можно лучше пропускать рентгеновское излучение, однако с увеличением энергии квантов сечение фотопоглощения материалов снижается, что ослабляет ограничение на толщину мембраны маски [1]. В то же время с ростом толщины возрастает доля рассеянного мембраной излучения (неупругое рассеяние), которое экспонирует теневые участки резиста, вызывая нежелательное искажение размеров переносимой топологии.

В настоящей работе численными методами моделировали дозу рассеянного излучения мембраной, изготовленной из различных материалов. Для обеспечения надёжности анализа расчёт проводили с использованием пакетов Geant4 и G4Beamline. Спектр применяемого излучения соответствовал спектру синхротронного излучения источника СИ ВЭПП-3. Для сравнения образцы сверхвысокомолекулярного ПММА облучали синхротронным излучением сквозь отверстия в рентгеновской маске.

Профиль полученных после проявления резиста ПММА структур сравнивали с расчётным. Наблюдается удовлетворительное согласие расчётного и экспериментального профилей. В результате сравнения выработаны ограничения к толщине и материалу мембраны рентгеновской маски.

Литература:

[1] LIGA and its applications / ed. by V.Saile et al. - Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2009. - (Advanced micro & nanosystems; Vol.7).

Допированный вольфрамом нанорезист

Назьмов В.П.^{1,2,3}, Генцелев А.Н.¹, Варанд А.В.¹

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Сибирский центр коллективного пользования «СКИФ» СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: V.P.Nazmov@inp.nsk.su

С развитием метода нанолитографии – базового при формировании сверхбольших интегральных схем компьютеров – должна развиваться база материалов, в том числе нанорезистов. При этом резисты для нанолитографии должны обладать одновременно как высоким пространственным разрешением, так и высокой контрастностью и высокой чувствительностью к актиничному излучению [1-2]. Для решения этой проблемы разрабатываются резисты на основе полимеров, допированных тяжёлыми металлами [3], халькогенидов. В частности, ПММА обладает высоким пространственным разрешением, однако недостаточной чувствительностью к рентгеновскому излучению. В настоящей работе исследуется материал, синтезированный из метилметакриловой кислоты с добавлением соединения вольфрама. Анализ спектров поглощения в видимом и ИК-диапазонах спектра позволяет установить факт внедрения вольфрама в полимерную матрицу. Характеристические кривые в диапазоне энергий квантов 2 – 5 кэВ для различной концентрации вольфрама показывают увеличение чувствительности материала к рентгеновскому излучению чувствительностью ПММА без включений, а также линейную зависимость роста чувствительности к рентгеновскому излучению от концентрации последнего. Экспериментально измеренное пространственное разрешение материала ограничивается методикой измерения и составляет величину не хуже 30 нм.

Литература:

- [1] P.Naulleau, C.Anderson, W.Chao, S.Bhattarai, A.Neureuther, K.Cummings, S.Jen, M.Neisser, B.Thomas, J.Photopolym.Sci.Technol., 2014, V.27., N.6, p.725-730.
- [2] A Oshima, T. Hinata, H. Nakamura, T Oka, N. Oshima, B.E.O'Rourke, R.Suzuki, M.Washio. S.Tagawa, 2016, Proc. of SPIE Vol. 9051, pp. 905107-1 - 905107-6
- [3] L.Li, S.Chakrabarty, K.Spyrou, C.K.Ober, E.P.Giannelis, Chem. Mater. 2015, v.27, N.14, pp.5027-5031.

Пространственное разрешение после LIGA-растров

Назьмов В.П.^{1,2,3}, Неустроева А.А.¹, Салошенко Т.В.⁴

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Сибирский центр коллективного пользования «СКИФ» СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

4 – ООО «АРТА-ДЕНТ», Новосибирск, Россия

E-mail: V.P.Nazmov@inp.nsk.su

Для подавления рассеянного излучения при микротомографии обычно применяются коллиматоры и двухкоординатные сетки – растры, позволяющие снижать фон и, тем самым, увеличивать контраст изображения микрообъектов. Характерным для растра является высокое аспектное отношение, т.е. отношение толщины растра к поперечному размеру каналов, сквозь которые излучение от объекта попадает на детектор. Причём с воспроизведением такой геометрии технология ЛИГА справляется намного лучше, чем какие-либо другие методы [1-2]. В работе исследованы условия формирования растров из золота толщиной до 100 мкм с диаметром каналов до 10 мкм.

Изготовленные растры применяли для исследования переноса изображения с помощью визиографического комплекса SIRONA с напряжением на рентгеновской трубке 60 кВ и максимумом в спектре излучения ок. 40 кэВ с матричным ПЗС-детектором.

В то же время, искажение изображения с учётом рассеяния рентгеновского излучения объектом и растром рассчитывали численно посредством пакетов Geant4 и G4Beamline.

Сравнение трассировок цифровых снимков показывает, что пространственное разрешение и отношение сигнал/шум не улучшается с уменьшением диаметра каналов менее 25 мкм, что, вероятно, связано с величиной пикселя ПЗС-матрицы.

Литература:

[1] Nazmov V.P., Palchikov E.I., Krivtsov T.S. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 238.

[2] Б.Г. Гольденберг, В.П. Назьмов, Е.И. Пальчиков, А.Г. Лемзяков, А.В. Долгих, С.И. Мишнев. Известия РАН. Серия физическая. 2019, том 83, № 2, с. 145–149.

Статус экспериментальной станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ

Рубцов И.А.¹, Бухтияров А.В.¹, Зубавичус Я.В.¹, Купер К.Э.¹, Прууэл Э.Р.², Студенников А.А.²,
Тен К.А.², Толочко Б.П.³, Шмаков А.Н.¹

1 – ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: i.a.rubtsov@srf-skif.ru

На сегодняшний день в наукограде Кольцово (Новосибирская область) запускается источник синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ». В рамках научной программы первой очереди создано семь станций, одной из которых является станции 1–3 «Быстропротекающие процессы».

Экспериментальная Станция 1-3 ЦКП «СКИФ» предназначена для исследования быстропротекающих процессов и состоит из двух секций, работающих последовательно: «Динамические процессы» и «Плазма». Основная задача Станции – исследование быстропротекающих процессов с характерными масштабами изменения процесса от пикосекунд до миллисекунд. В качестве источника синхротронного излучения на Станции используется сверхпроводящий вигглер с энергией фотонов до ≈ 40 кэВ. Станция создается в рамках Государственного контракта с ИГиЛ СО РАН с 2022 года.

Основные методики, которые позволят решить поставленные научные задачи – это динамические методики, обладающие высоким временным разрешением: скоростная радиография (абсорбционная, фазоконтрастная), малоугловое рентгеновское рассеяние с высоким временным разрешением, дифракция с высоким временным разрешением. Все методики являются методиками *in situ* и *operando*. Минимальный интервал между кадрами будет составлять до 2,8 нс, а экспозиция порядка 50 пс.

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

Расширение методов спектроскопии и микроскопии функциональных материалов в ультрамягкой рентгеновской области синхротронного излучения

Турищев С.Ю.¹, Паринова Е.В.¹, Чувенкова О.А.¹, Титова С.С.¹, Фатеев К.А.¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

E-mail: tsu@phys.vsu.ru

Разработки в области функциональных материалов и структур уже давно невозможно представить без высокоточной диагностики позволяющей восстановить фундаментальные свойства изучаемой системы на атомном или субатомном уровне. Методы электронной микроскопии, такие как просвечивающая и растровая электронная микроскопия являются обязательными для диагностики материалов и структур пониженной размерности. Важными являются и методы, чувствительные к структуре вещества, такие как дифракция рентгеновских лучей или электронов.

Применение синхротронного излучения чрезвычайно высокой интенсивности, коллимированности и вариабельности длины волны в современных приложениях методов рентгеновской и электронной спектроскопии и микроскопии крайне востребовано. В самом деле, такие взаимодополняющие друг друга методы, как спектроскопия рентгеновского поглощения и фотоэлектронная спектроскопия обладают высокой чувствительностью к локальному атомному окружению, химической связи даже в случае малых количеств изучаемого материала, существенно структурного разупорядочения. Это безусловно важно для понимания фундаментальных причин проявления свойств изучаемых структур, оптимизации их функционального назначения, отработке технологических аспектов формирования.

С точки зрения диапазона энергий квантов (длин волн) ультрамягкое рентгеновское излучение крайне важно для материалов, особые свойства которых продиктованы или находятся в прямой зависимости от чрезвычайно развитой поверхности - материалов нанометрового диапазона и структур на их основе. Использование синхротронного излучения в этом диапазоне привело к усовершенствованию и существенному расширению возможностей методов рентгеноэлектронной спектроскопии, в том числе в связке с методами, реализуемыми в лабораторных условиях.

Будут приведены примеры совместного использования синхротронных и лабораторных методов рентгеноэлектронной спектроскопии и их расширений для диагностики функциональных наноматериалов включая био-наногибридные.

Благодарности: Работа подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2025-455. Часть исследований биогибридных материалов поддержана Российским научным фондом (Проект № 25-12-00413). Часть результатов получено при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FZGU-2026-0009) в части характеристики сенсорных материалов.

Статус работ по станции 1-2 «Структурная диагностика» в ЦКП «СКИФ»

Винокуров З.С.¹, Зубавичус Я.В.¹, Шмаков А.Н.¹, Мищенко Д.Д.¹, Селютин А.Г.¹, Сыртанов М.С.², Гоголев А.С.², Денисов В.В.³, Тересов А.Д.³, Панченко Ю.Н.³, Ковальский С.С.³, Бескончин К.В.³, Киселев В.Н.³, Евдокимов А.А.³, Андреев М.В.³

1 – ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

3 – Институт Сильноточной Электроники, Томск, Россия

E-mail: z.s.vinokurov@srf-skif.ru

В докладе будет представлен ход работ по сборке и наладке синхротронной станции 1-2 «Структурная диагностика» ЦКП «СКИФ», на которой планируется реализовать методы *in situ* порошковой дифракции высокого разрешения и макромолекулярной кристаллографии. Для генерации фотонов на станции будет использоваться криоохлаждаемый вакуумный ондулятор. В качестве основных оптических элементов предполагается использование криоохлаждаемого двухкристального монохроматора с фиксированным выходом для выделения нужного спектра по энергии, а также составных преломляющих бериллиевых линз для коллимации и фокусировки. В докладе будут обозначены текущий статус всех систем и оборудования станции, а также план график работ на ближайшее время.

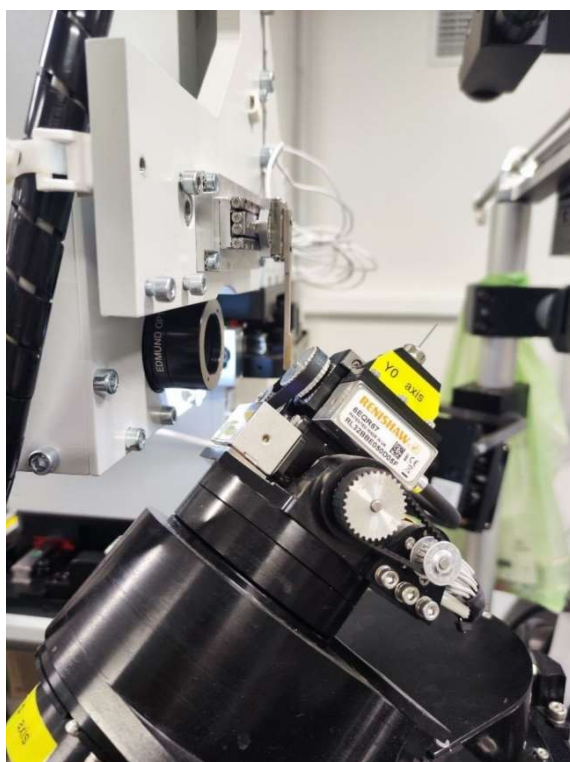


Рис. 1. Дифрактометры секций по макромолекулярной кристаллографии – слева и дифрактометрии высокого разрешения – справа станции 1-2.

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

Комплексное исследование слоистых двойных $\text{Ni}(2+)\text{--Al}(3+)$ и $\text{Zn}(2+)\text{--Al}(3+)$ гидроксидов методами синхротронного излучения

Кривенцов В.В.¹, Завьялов А.П.¹, Тхи Ван Ань Нгуен², Толочко Б.П.²

1 - ЦКП СКИФ, Новосибирск, Россия

2 - ИХТТМ СО РАН, Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: kriven@mail.ru

Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) находят широкое применение в качестве адсорбентов и прекурсоров благодаря возможности гибко управлять составом межслойных анионов путём контроля процесса синтеза, а в последнее время также рассматривается их применение в роли антипиренов таких легковоспламеняемых материалов, как, например, полиуретаны. Задача характеристики структуры получаемых СДГ не всегда может быть успешно решена методом рентгеновской дифракции из-за низкой кристалличности получаемого продукта. В этом случае становится особенно актуально применение методик, позволяющих исследовать локальную атомную структуру. В настоящей работе методами рентгеновской дифракции и EXAFS-спектроскопии исследованы СДГ на основе $\text{Ni}^{2+}\text{--Al}^{3+}$ и $\text{Zn}^{2+}\text{--Al}^{3+}$, полученные методом соосаждения в растворе гидроксида натрия.

Съемка спектров EXAFS проведена вблизи К-края поглощения никеля Ni (8333 эВ) и цинка Zn (9659 эВ) по методике выхода флуоресценции на экспериментальной станции «EXAFS-спектроскопия» канала 8 накопительного кольца ВЭПП-3 в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) на базе Уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП2000» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН [1]. В качестве монохроматора использовали разрезной моноблочный кристалл-монохроматор Si(111). Шаг при измерениях составлял ~0.5-1.5 эВ. Обработку XANES-спектров проводили с помощью программного комплекса VIPER [2] и XANES dactyl scope [3].

Показано, что полученные кривые PPA (RDFs) однотипны для исследованных систем. Установлены длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. На основе данных EXAFS выполнено уточнение структурных параметров методом рентгеновской дифракции. Полученные различными методами результаты хорошо согласуются между собой. Подробно рассмотрены возможные варианты структурных моделей. Продемонстрирована перспективность предлагаемого подхода комбинации методов EXAFS и рентгеновской дифракции для исследования частично (плохо) окристаллизованных систем, на примере слоистых двойных гидроксидов (СДГ).

Благодарности: Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» и за финансовую поддержку в рамках Государственного задания Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН (Проект № 121032500071-6). Частично гранту РНФ 23-72-00060. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Литература:

- [1] Zolotarev K.V., Ancharov A.I., Vinokurov Z.S., Goldenberg B.G., Darin F.A., Kriventsov V.V., et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. V.87. N5. P.541–551. DOI: 10.3103/s1062873822701635
- [2] Klementiev K.V. VIPER. (Visual Processing in EXAFS Researches) for Windows. Users Manual and Tutorial with Comments on Analysis Methods in EXAFS. Version of manual 2.20. Version of program 11.00. Barcelona, Spain: 2012 54 p.
- [3] Klementiev K.V. XANES Dactyl scope. A Program for Quick and Rigorous XANES Analysis for Windows. Users Manual and Tutorial. Version of manual 1.10. Version of program 6.00. Barcelona, Spain: 2012 23 p. <https://intranet.cells.es/Beamlines/CLAESS/software/XDmanual110.pdf>

Исследования с использованием синхротронного излучения в Новосибирском центре синхротронного и терагерцового излучения.

З.С. Винокуров, Б.Г. Гольденберг, Ф.А. Дарьин, К.В. Золотарев*, В.В. Кривенцов, Г.Н. Кулипанов, К.Э. Купер, А.А. Легкодымов, К.А. Тен, Б.П. Толочко, М.Р. Шарафутдинов, А.Н. Шмаков, А.Д. Николенко, П.А. Пиминов, Е.Б. Левичев, И.А. Рубцов, В.П. Назьмов

Центр коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) создан более 50 лет назад на базе Института ядерной физики им. Г.И Будкера (ИЯФ СО РАН).

Центр предоставляет возможность пользователям из различных организаций применять современные аналитические методики с использованием синхротронного излучения (СИ) из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М для проведения широкого класса исследовательских работ.

На базе Центра организовано развитое пользовательское сообщество, объединяющее в себе исследователей из научных организаций и ВУЗов из разных регионов России.

Помимо непосредственного проведения экспериментов в Центре проводится постоянная работа по совершенствованию существующих методик и разработке новых подходов. Наибольшую важность данное направление имеет в свете создания экспериментальных станций в проекте Сибирского кольцевого источника фотонов («СКИФ»).

Данный доклад является кратким обзором истории и существующего состояния дел по выше обозначенным темам.

Импульсные магнитные измерения сверхпроводящего ондулятора станции 1-1 ЦКП «СКИФ»

Ф. П. Казанцев¹, П. В. Каноник¹, Н. А. Мезенцев^{1, 2}, А.А. Седов¹, С. В. Хрущев^{1, 2}, В. М. Цуканов¹,
², В. А. Шкаруба^{1, 2}

1 – Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

E-mail: F.P.Kazantsev@inp.nsk.su

В статье рассмотрен метод измерения магнитных полей ондуляторов на основе проволоки с импульсным током. Этот метод является привлекательной основой для создания системы настройки ондуляторов, которая может работать в оперативном режиме, поскольку однократное измерение занимает всего несколько секунд. Испытания проводились на сверхпроводящем ондуляторе станции 1-1 ЦКП «СКИФ» с магнитным полем 1,25 Тл и периодом 15,6 мм. Из полученных данных затем рассчитывается фазовая ошибка [1].

Литература:

[1] Каноник П. В., Шкаруба В. А., и др.// Известия РАН. Серия физическая. 2023. № 87 (5). С. 640–645.

Скорость термического разложения триаминотринитробензола после облучения электронами

Михайленко М.А.¹, Толочко Б.П.^{1,2}, Герасимов К.Б.¹, Брызгин А.А.²,

Гармашев А.Ю.³, Смирнов Е.Б.³, Станкевич А.В.³, Чемагина И.В.³

1 - Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

2 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

3 - Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск

E-mail: bptolochko@solid.nsc.ru

Проведено исследование влияния радиации на физико-химические свойства триаминотринитробензола (ТАТБ) после облучения релятивистскими электронами дозами до 450 кГр на установке ИЛУ-6 (ИЯФ СО РАН).

При облучении электронами с энергией 2.4 МэВ в ТАТБ образуются треки длиной порядка 10 мм и диаметром, определяемым энергией образующихся вторичных электронов (~100 эВ). Облучение приводит к разогреву ТАТБ внутри треков до тысяч градусов, при ничтожно малом росте температуры образца, с образованием парамагнитных центров (ПМЦ) и образованию дефектов кристаллической решетки.

Исследование количества ПМЦ методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показало линейную зависимость от дозы, насыщения не наблюдалось. ПМЦ в облученных кристаллах ТАТБ обладают высокой стабильностью, выдержка при 200 С в течение 24-30 часов не приводила к изменениям интенсивности и формы спектров ЭПР.

Накопление значительного числа ПМЦ приводит к искажению кристаллической структуры ТАТБ проявляющееся в увеличении межслоевого расстояния и относительному изменению интенсивности рефлекса 002.

Изменения кристаллической структуры и накопления дефектности приводят к наблюдаемому увеличению летучести ТАТБ обработанного ускоренными электронами и снижению температуры начала интенсивного разложения на 20 С. Исследование термического разложения проводилось как в режиме нагрева, так и путем выдержки при заданной температуре. Разложение исходного ТАТБ при выдержке при температурах ниже 280 С носит затухающий характер, а выше – ускоряющийся. После воздействия ионизирующего излучения на ТАТБ ускоряющийся характер термического разложения начинается при более низких температурах, что свидетельствует об изменении константы скорости реакции.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-72-00060. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

ЦКП СКИФ, статус и перспективы

Бухтияров А.В., Левичев Е.Б., Бухтияров В.И.

*ЦКП «СКИФ» Институт катализа Сибирского отделения Российской академии наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
полупроводников*

им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

E-mail: avb@catalysis.ru

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

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

В составе первой очереди запланировано создание 7 экспериментальных станций: 1-1 «Микрофокус», 1-2 «Структурная диагностика», 1-3 «Быстропротекающие процессы», 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм», 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне», 1-6 «Электронная структура» и 1-7 «Базовые методы синхротронной диагностики». Первые эксперименты на станциях первой очереди с синхротронными пучками запланированы на конец 2026 года. Полномасштабная работа на пользователей начнется в 2027 году. Программа инфраструктурного развития ЦКП «СКИФ» подразумевает создание еще 23 экспериментальных станций к 2035 году. В докладе будет представлен текущий статус создания ЦКП «СКИФ», описан функционал экспериментальных станций первой очереди, основные направления Научной программы ЦКП «СКИФ», а также разрабатываемые механизмы подачи заявок на проведение исследований.

Структурные исследования трансформаций фазового состава в наноструктурированной системе Me-Pt

Пригородова А.Н.¹, Захаров Н.С.¹, Кривенцов В.В.², Шмаков А.Н.², Пугачев В.М.¹, Адодин Н.С.¹

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

2 – ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

E-mail: h991@yandex.ru

Практически актуальные магнитные свойства наносплавов Me-Pt определяются формированием упорядоченных состояний, интерметаллидов (ИМ), в ходе термических трансформаций. В ходе работы проводился анализ эволюции фазового состава и локальной атомной структуры наноструктурированных систем Me-Pt (Me = Fe, Co, Ni) сочетанием структурных методов XAFS-спектроскопии (Pt-L₃ край) и синхротронной дифрактометрии ($\lambda=0.17836$ Å). Исходные образцы, синтезированные жидкофазным совместным восстановлением, представляют собой ГЦК-твердый раствор. В частности, для системы Fe-Pt установлен предел растворимости Fe ~ 11 ат.%, при этом избыток Fe формирует дифракционно-нерегистрируемую ультрадисперсную фазу (ДНФ). Количественный анализ методом Ритвельда с использованием программы GSAS-II показал, что нагрев до 500 °С вызывает упорядочение ДНФ с образованием фазы FePt₃ (структура L1₂) без изменения состава основного твердого раствора. Анизотропия размеров ОКР, зафиксированная при моделировании профилей, свидетельствует о преимущественном аксиальном росте наночастиц. Методом EXAFS установлено, что во всех образцах платина находится преимущественно в металлическом состоянии (Pt⁰), окисленные формы не обнаружены, таким образом локальная структура относительно платины практически однотипна. Положения пиков Pt-Pt соответствуют реперной фольге, однако амплитуды значительно отличаются в области расстояний до 6 Å, что вероятно связано с существенными структурными искажениями, возрастающими при термообработке. Полученные данные показывают, что каскад твердофазных реакций запускается за счет упорядочения аморфных кластеров, обогащенных менее благородным металлом.

Благодарности: Получение образцов выполнено в рамках реализации проекта ГЗ 2026 - 2028 ФИЦ УУХ СО РАН № 126031018539-3 с использованием оборудования ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН и «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН. Исследования с использованием СИ поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН.

Сверхпроводящие устройства генерации синхротронного излучения на ЦКП «СКИФ»

Шкаруба В.А.¹

1 - Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: V.A.Shkaruba@inp.nsk.su

Основными устройствами генерации синхротронного излучения на источнике ЦКП СКИФ являются сверхпроводящие вставные устройства. В ИЯФ СО РАН изготовлено пять сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, оптимизированных для проведения экспериментов на нескольких исследовательских станциях первой очереди накопителя. Сверхпроводящий вигглер для станции 1-5 («Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне») имеет поле 4.5 Тл и период магнитной структуры 48 мм. Для станции 1-3 («Быстропротекающие процессы») предназначен вигглер с полем 2.7 Тл с периодом 27 мм, параметры которого являются рекордными с точки зрения достижения максимального уровня поля при минимальном периоде для вертикальной апертуры вакуумной камеры для пучка, равной 5 мм, и приближаются к физическому и техническому пределу. Два сверхпроводящих 258-полюсных ондулятора с уровнем поля 1.25 Тл и периодом 15.6 мм предназначены для генерации излучения на станциях "Микрофокус" (1-1) и "Структурная диагностика" (1-2). 220-полюсный ондулятор с полем 1.6 Тл и периодом 18 мм будет использоваться на станции "XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм". Криогенная система сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов основана на косвенном охлаждении с помощью криокулеров и позволяет, охлаждая «сухие» магниты до температуры менее 3.5 К, работать в тоннеле накопителя автономно в течение нескольких лет без расхода гелия. В докладе представлен статус работ по данным сверхпроводящим устройствам, в том числе, обоснование выбора основных параметров, особенности конструкции магнитной и криогенной системы, а также результаты испытаний на различных этапах их изготовления.

Электронное строение и локальная атомная структура соединений U и Np полученное с помощью спектроскопии рентгеновского поглощения

Новичков Д.А.¹, Крот А.Д.¹, Аверин А.А.², Федосеев А.М.², Матвеев П.И.¹, Калмыков С.Н.¹

1 – Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Химический факультет 119991 Москва

2 – А.Н. Фрумкин Институт физической химии и электрохимии РАН Ленинский пр. 31/4, 119071, Москва, Россия

E-mail: danylo.novichkov@gmail.com

Рентгеновская спектроскопия поглощения (XAS), включающая область XANES, является одним из наиболее информативных методов для изучения электронной структуры и локального атомного окружения элементов. Особенно актуально применение XAS при исследовании соединений актинидов, таких как уран и трансурановые соединения, где наблюдается широкий диапазон валентных состояний, а также разнообразие структурных изменений.

XANES-область спектра содержит информацию о незанятых электронных состояниях, локальной окружении, что делает ее особенно чувствительной к изменению степени окисления и координационной геометрии актинидных соединений. Для интерпретации полученных экспериментальных данных важную роль играет моделирование, основанное на теории многократного рассеяния или решении уравнения Шредингера методом конечных разностей, что позволяет описывать влияние электронной структуры, а именно распределение плотностей электронных состояний и ближнего окружения на форму спектра поглощения.

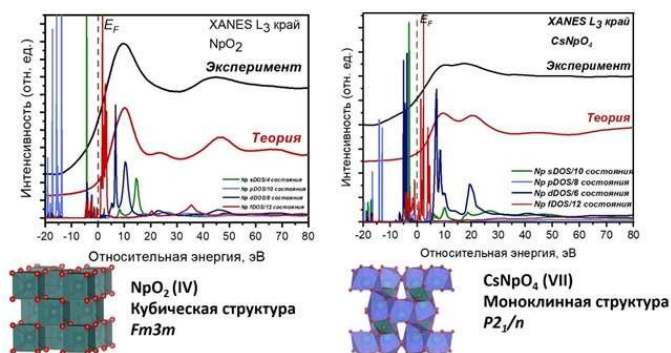


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические спектры соединений нептуния, а также распределения плотностей электронных состояний

Расчеты показывают отчетливую зависимость положения края поглощения, интенсивности посткраевых особенностей от степени окисления, координационного окружения, а также влияния степени гибридизации 5f-, 6d, 7s- орбиталей. Полученные теоретические спектры позволяют напрямую сопоставлять экспериментальные данные с различными структурными и электронными моделями, включая смешанные валентные состояния и структуры с пониженной симметрией.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 25-23-00824.

Применение синхротронного излучения для установления влияния размера межслоевого катиона на структуру двойных карбонатов Pu(V) и Np(V)

Кузенкова А.С.^{1,2}, Плахова Т.В.¹, Куликова Е.С.², Светогоров Р.Д.², Тригуб А.Л.^{1,2},
Цымбаренко Д.М.¹, Романчук А.Ю.¹, Калмыков С.Н.¹

1 – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

2 – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: kznastya@mail.ru

В связи с широким использованием атомных технологий, вопросы, связанные с захоронением радиоактивных отходов (РАО), сегодня волнуют практически все страны. Установление физико-химических форм радионуклидов при взаимодействиях с геохимической средой является ключевым фактором при оценке безопасности захоронения РАО. Поведение актинидов и их мобильность в значительной степени определяется их степенью окисления, структурой и свойствами различных соединений актинидов. Использование синхротронных методов особенно актуально для исследования актинидсодержащих фаз. Повышенная радиотоксичность таких соединений устанавливает необходимость исследования малого количества образца и, в следствии, требует повышенной интенсивности пучка при характеристизации фаз различными методами. Для установления структуры и вытекающих из неё свойств новых соединений актинидов, предлагается использование сочетания двух основных методов: рентгеновской дифракции для установления дальнего порядка в кристаллической решетке, а также спектроскопии рентгеновского поглощения (XANES, EXAFS), которая позволяет установить степень окисления актинида и его локальное окружение.

С использованием методов синхротронной рентгеновской дифракции и спектроскопии рентгеновского поглощения установлено, что соединения состава KAnO_2CO_3 ($\text{An} = \text{Pu}, \text{Np}$) представляют собой гексагональные анионные слои $[\text{AnO}_2\text{CO}_3]^-$ с катионами K^+ между ними. В свою очередь, структура соединения $\text{NaNpO}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ уже значительно отличается и представляет собой чередующиеся орторомбические слои $[\text{NpO}_2\text{CO}_3]^{n-}$ и межслоевые катионные частицы $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_3]^{n+}$ [1, 2]. Методом ионного обмена были получены и охарактеризованы соединения двойных карбонатов $\text{Mg}_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Установлено, что в ряду двойных карбонатов Np(V) для катионов малого ионного радиуса (менее 1 Å) Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} нептуний-содержащие слои имеют ромбический мотив слоя, в то время как для катионов большего радиуса (K^+ , NH_4^+) характерен гексагональный мотив слоя.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-23-00824.

Литература:

[1] Kuzenkova A. et al. // Inorganic Chemistry. 2023. Т. 62, № 51. С. 21025 - 21035

[2] Kuzenkova A. et al. // ENVIRONMENTAL SCIENCE-NANO. 2024. Т. 11. С. 4381 - 4390

Исследование влияния совместного измельчения и электронно-лучевой обработки на процесс кристаллизации D-ПЛА в смесях с арабиногалактаном

Михайленко М.А.^{1,2}, Шахтшнейдер Т.П.¹, Шарафутдинов М.Р.^{1,3}, Мызь С.А.¹,
Кузнецова С.А.⁴, Коробейников М.В.²

1 - Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

2 - Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

3 - Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа СО РАН, Новосибирск

4 - Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск

E-mail: mikhailenko@solid.nsc.ru

D-полилактид (D-ПЛА) — биоразлагаемый полимер, который может быть получен из возобновляемых ресурсов, находит всё больше применений в качестве упаковочного материала, в тканевой инженерии, доставке лекарств, имплантатах и т. д. Получение композитов ПЛА с полисахаридами позволяет улучшить его свойства, в частности, устойчивость к кристаллизации. В данной работе композиты ПЛА с арабиногалактаном (АГ) получали путем совместного измельчения смесей в вибрационной мельнице Srex-8000 в течение 15 минут. Электронно-лучевую обработку проводили с использованием импульсного ускорителя электронов ИЛУ-6. Энергия электронов 2.15 МэВ, ток пучка 328 мА. Набор дозы до 50 кГр (Дж/г) проводили путем перемещения образцов под выпускным окном ускорителя.

Исследование изменения структуры полученных композитов, обработанных ускоренными электронами, при изменении температуры проводили с использованием синхротронного излучения ускорительного комплекса ВЭПП-3, канал 5а. Длина волны 1.48-1.51 Å. Скорость нагревания ~ 5 °/мин. Дифрактограммы регистрировали каждые 2 минуты. Полученные в одной серии данные нормировались на ток пучка.

Показано, что оптимальная концентрация добавок АГ для блокирования кристаллизации в смесях с ПЛА после электронно-лучевой обработки составляет ~ 10 масс. %.

Благодарности: Работа поддержана Министерством образования и науки России.

Научное издание

Международная конференция
Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах
Сборник тезисов

22 – 25 июня 2026 г., Новосибирск, Россия

Под общей редакцией член-корреспондента РАН Винокурова Н.А.,
к.ф.-м.н. Николенко А.Д., к.т.н. Кузина М.В.

Составитель: Кузин М.В.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
630090, пр-кт Академика Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН
<http://www.inp.nsk.su/>
E-mail: inp@inp.nsk.su Тел.: +7 383 330 60 31

Электронная версия:

Отдел научно-информационного обеспечения ИЯФ СО РАН
E-mail: kuzin@inp.nsk.su Тел.: +7 383 329 41 67

Объем: 7 МБ. Подписано к размещению 15.06.2026
Адрес размещения: <https://www.inp.nsk.su/images/SFR26-Thesis-book.pdf>

Системные требования: i486, Adobe® Reader® (чтение формата PDF)

ISBN 978-5-904968-10-6