

Международная конференция
Синхротронное излучение и лазеры
на свободных электронах
СИ и ЛСЭ – 2024



24 – 28 июня 2024

Книга тезисов

Новосибирск 2024

Международная конференция
Синхротронное излучение и лазеры
на свободных электронах
СИ и ЛСЭ - 2024

24 – 28 июня 2024

Книга тезисов

Новосибирск 2024

УДК 535.33/.34; 538.97-405

ББК 22.344; 22.386

Книга тезисов Международной конференции «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (СИ и ЛСЭ-2024)»

ISBN 978-5-904968-09-0

Настоящий сборник тезисов является рабочим документом Международной конференции «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (СИ и ЛСЭ-2024)», организованной ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, с 24 по 28 июня 2024 г. 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.

ISBN 978-5-904968-09-0

1

Поиск следов вулканических извержений методом РФА с использованием синхротронного излучения в донном осадке о. Чаша (Южная Камчатка)

Authors: Viacheslav Novikov^{None}; Andrey Darin¹; Guoqiang Chu^{None}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS

Corresponding Authors: av-darin@yandex.ru, snovikov50@icloud.com

Введение

Вулканический пепел крупнейших извержений, охватывавший значительные территории, является качественным временным маркером при проведении различных стратиграфических корреляций.

Кратер Чаша расположен на Южной Камчатке в центральной части района интенсивного базальтового вулканизма в плейстоцене-голоцене - лавового плато Толмачев дол (Дирксен и др., 2002).

Пробоотбор и пробоподготовка

Полевые работы проводились в августе 2023 г. С самой глубокой точки озера 45,8 м был отобран керн длиной 80 см, после чего вскрывался вдоль оси отбора.

Половина использовалась при изготовлении твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой. Подготовка препаратов проводилась по методике, описанной в Дарьин и др., 2015.

Из твердых препаратов на всю глубину опробования керна изготавливались плоскопараллельные образцы (пластинки) для микро-РФА толщиной 2 мм. Вторая половина нарезалась на дискретные пробы с шагом 10 мм для изучения распределения активности изотопов.

Изотопные исследования

Распределение активности изотопа ¹³⁷Cs получено в Институте Геологии и Геофизики Китайской Академии Наук (Пекин, <http://www.igg.cas.cn>) с использованием германиевого детектора колодезного типа (EGPC 100P-15R).

Радиоуглеродные возраста определялись методом ускорительной масс-спектрометрии в Лаборатории радиоуглеродного датирования Beta Analytic (США). Возрасты AMS ¹⁴C были преобразованы в календарные возраста с использованием набора атмосферных данных из программы калибровки CALIB 4.03 (Stuiver et al., 1998).

Аналитическая микростратиграфия

Методики изучения донных осадков с применением сканирующего РФА на пучках синхротронного излучения (микро-РФА-СИ) получили активное развитие в последние десятилетия и подробно представлены в ряде публикаций [Дарьин и др., 2013; Дарьин и др., 2013; Darin et al., 2014]. Данный метод позволили изучить данные о распределении 24 породообразующих и следовых элементов (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, Th, U) на всю глубину опробования керна.

Методы и результаты аналитических исследований

Полученные изотопные данные позволяют оценить положение максимальной активности Cs-137 в 25-30 мм от границы вода-осадок. Это соответствует времени глобальных атмосферных выпадений после ядерных испытаний на Новоземельском полигоне 1961-62 гг. (Appleby, 1997). Полученные для керна Chasha-23-С три радиоуглеродные даты были откалиброваны. На основании полученных изотопных данных строилась возрастная модель «глубина керна-возраст осадка», которая использовалась для привязки данных РФА-СИ к годовой шкале.

Макровизуально в толще керна выделяются 3 слоя тефры, связанные с извержениями прошлого. По данным сканирующего микро-РФА на всю глубину опробования керна отмечаются аномальные содержания различных элементов в местах не связанных с видимыми слоями тефры. Данный факт может говорить о наличии слоев криптотефры (скрытой тефры, не видимой невооруженным глазом).

Выводы

Применение микро-РФА-СИ позволяет проводить детальное изучение осадочного материала с целью поиска геохимических индикаторов вулканических извержений прошлого.

Список литературы

1. Дарьин А.В., Ракшун Я.В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2 (51). С. 112-118.
2. Дирксен О.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Кратер Чаша (Южная Камчатка) – уникальный пример массового выброса кислой пироклаستيку в поле базальтового ареального вулканизма

- // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 3-10.
3. Дарьин А.В., Александрин М.Ю., Калугин И.А., Соломина О.Н. Связь метеорологических данных с геохимическими характеристиками современных донных осадков оз. Донгуз-Орун, Кавказ // ДАН. 2015. Т. 463. № 5. С. 602.
 4. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В. Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 204.
 5. Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин А.В., Калугин В.М. Разработка методик микроРФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 и их применение для исследования распределения элементов в природных образцах // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. Т. 8. № 1. С. 86–90.
 6. Darin F.A., Kalugin I.A., Darin A.V., Rakshun Ya.V. The study internal structure of the annual layers in lake sediments using synchrotron radiation with x-ray focusing optics // Acta Geol. Sin. (Engl. Ed.). 2014. Т. 88. № S1. P. 5–6.
 7. Appleby P. G. The use of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs as tracers in modelling transport processes in lake catchment systems // Studies in Environmental Science, 1997. V. 68. P. 441-448.
 8. Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., et al. (1998). INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. Radiocarbon, 40, 1041–1083. <https://doi.org/10.1017/s0033822200019123>

2

Статус разработки станции 1-2 «Структурная диагностика» в ЦКП «СКИФ»

Authors: Zakhar Vinokurov¹; Yan Zubavichus²; Alexander Shmakov³; Denis Mishchenko⁴; Alexander Selyutin⁵; Maxim Syrtanov⁶; Aleksey Gogolev⁷; Vladimir Denisov⁸; Anton Teresov⁹; Yuriy Panchenko¹⁰; Sergey Kovalsky^{None}; Konstantine Beskonchin¹⁰; Vladimir Kiselev¹⁰; Aleksey Evdokimov¹⁰; Mikhael Andreev¹⁰

¹ SRF SKIF, BIC SB RAS

² Boreskov Institute of Catalysis SB RAS

³ Boreskov Institute of Catalysis SD RAS

⁴ SRF SKIF BIC SB RAS

⁵ IC SB RAS

⁶ Tomsk polytechnic university

⁷ Tomsk Polytechnic University

⁸ HCEI SB RAS

⁹ Institute of high current electronics SB RAS

¹⁰ Institute of High Current Electronics

Corresponding Author: vinzux@mail.ru

В докладе будет представлен ход разработки проекта 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 статус разработки каждого компонента станции, а также его ключевые параметры. Кроме этого, будут представлены описание методов и оборудования, которые будут доступны для пользователей на секциях по порошковой дифракции и макромолекулярной кристаллографии.

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).

3

Возможность построения реконструкции температуры голоцена Горного Алтая с высоким разрешением на основе данных микро-РФА донных отложений озера Нижняя Мульта

Author: Andrey Darin¹

Co-authors: Dmitry Sorokoletov²; Fedor Darin³; Iakov Rakshun⁴; Natalia Rudaya; Tatiana Markovich; Valeri Babich; Viacheslav Novikov

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS

² Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics

Corresponding Author: av-darin@yandex.ru

Озеро Нижняя Мульта расположено в Центральном Алтае на северо-западной оконечности Катунского хребта, в верхней части долины реки Мульта. Керны длиной 420 мм (MN02) и 1520 мм (MN03) были отобраны в июне 2020 года из самой глубокой точки озера с помощью поршневого керна Uwites и вскрыты в лабораторных условиях. Образцы для исследования готовили по разработанной методике. Порошковые пробы, отобранные с шагом 10 мм по глубине керна, использовались для физико-химических исследований – влажности, магнитной восприимчивости, минерального состава, породообразующих элементов, распределения изотопов Pb210, Cs137, C14. Твердые препараты донных отложений использовали для сканирования микро-РФА при энергии возбуждения 21 кэВ с шагом 1 мм с одновременным определением более 25 породообразующих и микроэлементов. Ранее короткий керн MN02 был использовано для построения трансферной функции и реконструкции температур Алтайского региона на временном интервале последних 400 лет (DOI: 10.1134/S102745102307008X). В данной работе два керна были объединены на основании данных о влажности, магнитной восприимчивости, распределении породообразующих и микроэлементов по данным микро-РФ-сканирования. На основе изотопных данных построена общая для двух кернов возрастная модель для временного интервала около 9000 лет назад. Временные ряды имеющихся литолого-геохимических данных, построенные на основе возрастной модели, позволяют создать температурную реконструкцию Алтайского региона для большей части голоцена с временным разрешением 3-5 лет.

4

Геохимическая модель образования аномального слоя 1908-10 гг. в донных осадках оз.Пеюнга – связь с Тунгусским космическим телом.

Author: Andrey Darin¹

Co-authors: Denis Rogozin; Viacheslav Novikov; Valeri Babich; Tatiana Markovich; Fedor Darin²; Iakov Rakshun³; Dmitry Sorokoletov⁴

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS

² Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.

³ BINP

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Corresponding Author: av-darin@yandex.ru

В донных отложениях озера Пеюнга, расположенного в 30 км от эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (ТКТ) в 1908 г., обнаружен аномальный слой, отличающийся повышенными содержаниями ряда химических элементов - индикаторов поступления в осадок вещества терригенного происхождения. Аналогичный по составу слой был ранее обнаружен в осадках

озера Заповедное (1), расположенном в 5 км от оз.Пеюнга, и датирован по распределению активности изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb возрастом 1908-10 гг. Можно предположить, что образование аномального слоя связано с взрывом ТКТ в 1908 г. и последующим поступлением большого количества терригенного вещества с территории водосбора в связи с нарушениями задержанности и последствиями пожара.

Методы оптической и электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния использованы для изучения минерального состава аномального слоя. Метод сканирующего $\mu\text{RFA-SI}$ был использован для детального исследования материала аномального слоя для сравнения с элементным составом пород, слагающих территорию водосбора.

В сравнении с выше- и нижележащими слоями возрастает количество минеральных зерен анатаза, которые являются продуктом разрушения зерен ильменита и установлены шлиховым опробованием в аллювии водотоков. Источником сноса являются долериты дифференцированных интрузий комплекса габродолеритов, имеющих широкое распространение в пределах водосборной площади. Сравнение данных об элементном составе аномального слоя и продуктов выветривания долеритов, с учетом попадания в водоем и в последующем в донный осадок большого количества золы сгоревшей древесины, позволяет построить геохимическую модель образования аномального слоя 1908-10 гг. в озерах региона.

Литература

1. Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Гогин А.А., Сенин Р.А., Дегерменджи А.Г. Следы тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера Заповедное по данным сканирующего РФА-СИ // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. - 2020. - Т.492. - № 2. - С.61-65. - ISSN 2686-7397.

5

Разработка электроники регистрации твердотельных детекторов для динамических экспериментов на пучке СИ

Authors: Anastasia Glushak¹; Lev Shekhtman²

¹ BINP SB RAS

² Budker Institute of Nuclear Physics

Corresponding Author: aaglushak@mail.ru

Для обеспечения работы станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» в Институте ядерной физики разрабатываются однокоординатные рентгеновские детекторы. Детектор прямого счета фотонов SciCODE регистрирует сигнал от каждого фотона, попавшего в чувствительную зону детектора, с энергией выше установленного значения. Интегрирующий детектор DIMEX-Si регистрирует суммарный сигнал от большого потока фотонов, попавших в детектор за короткое время.

Для достижения пространственного разрешения ниже 100 мкм для широко диапазона энергии фотонов и высокого быстродействия необходимо в качестве регистрирующего элемента использовать полупроводниковый микрополосковый сенсор в сочетании со специализированными интегральными микросхемами. Для детекторов SciCODE и DIMEX-Si были разработаны соответствующие специализированные 64-канальные интегральные микросхемы SciCODE64B и DMXS64B. Также была разработана новая управляющая и регистрирующая электроника для считывания и обработки данных с микросхем и управления их работой.

В докладе будет представлено устройство основных компонентов детекторов SciCODE и DIMEX-Si, а также соответствующее программное и аппаратное обеспечение

6

Электронно-оптические системы субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов

Authors: Андрей Куфтин¹; Владимир Мануилов^{None}; Владислав Заславский¹; Ксения Лещева¹; Михаил Глявин¹

¹ *Институт Прикладной Физики РАН*

Corresponding Author: mavnik1@yandex.ru

Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны (0.2-1.3 ТГц) являются наиболее мощными и в то же время относительно компактными и дешевыми источниками микроволнового излучения. Малые длины волн в совокупности с высокой мощностью (от десятков ватт вплоть до сотен киловатт) приводят к необходимости использования электродинамических систем с большим параметром сверхразмерности 100-500 – отношением площади поперечного сечения резонатора к квадрату длины волны, что резко обостряет проблему конкуренции типов колебаний и требует, помимо использования традиционных цилиндрических резонаторов, разработки новых электродинамических систем. Соответственно, необходима модификация традиционных электронно-оптических систем (ЭОС) и разработка новых систем формирования винтовых электронных пучков (ВЭП), являющихся в гиротронах источниками энергии излучения. В докладе дана классификация электронно-оптических систем (адиабатические – с плавным изменением формирующих полей в масштабе электронной траектории и неадиабатические – с мелкомасштабными неоднородностями полей) и представлены их основные типы, способствующие повышению селективности возбуждения рабочего типа колебаний. Среди адиабатических систем рассмотрены как традиционные аксиально-симметричные магнетронно-инжекторные пушки (МИП), формирующие один трубчатый электронный пучок, так и аксиально-симметричные многолучевые МИП с двумя и тремя трубчатыми ВЭП. Приводятся примеры геометрии МИП и типичные параметры формируемых ВЭП. Рассмотрены адиабатические МИП, способные формировать планарные ВЭП, поперечное сечение которых близко к прямоугольнику с большим (10-20 и более) отношением сторон. Показано, что они позволяют формировать как однолучевые, так и двухлучевые планарные ВЭП с приемлемыми геометрическими размерами и скоростным распределением. Кратко описана методика оптимизации всех указанных ЭОС. Отдельное внимание уделено проблеме снижения скоростного разброса в формируемых ВЭП. Приведены примеры расчета и оптимизации адиабатических МИП с секционированным эмиттером, что позволяет формировать N-лучевые ВЭП (N=10-14) для так называемых многоствольных гиротронов, где каждый электронный поток взаимодействует с электромагнитным полем своего отдельного резонатора. Неадиабатические ЭОС за счет формирования первоначально прямолинейного пучка электронов позволяют практически исключить влияние на разброс вращательных скоростей таких принципиально не устранимых в адиабатических МИП факторов, как влияние тепловых скоростей электронов и шероховатостей эмиттера, и за счет этого улучшить качество ВЭП. Обсуждаются преимущества и недостатки указанных систем по сравнению с адиабатическими МИП и возможные области их применения. Среди неадиабатических систем формирования наибольшее внимание уделено ЭОС с реверсом магнитного поля и системам с инжекцией первоначально прямолинейного электронного пучка в магнитное поле. Даны примеры расчета ЭОС практических вариантов гиротронов с рабочими частотами 0.8-1.2 ТГц. Работа выполнена в рамках проектов ИПФ РАН FFUF-2022-0007 и FFUF-2024-0027.

7

Мультигигаваттный суб-ТГц МСЭ планарной геометрии с трехмерной распределенной обратной связью: проектные параметры и моделирование

Authors: Н.Ю. Песков¹; Е.Д. Егорова¹; Н.С. Гинзбург²; А.С. Сергеев²; А.В. Аржанников³; С.Л. Синицкий³

¹ *Институт прикладной физики РАН / Институт ядерной физики СО РАН*

² *Институт прикладной физики РАН*

³ *Институт ядерной физики СО РАН*

Corresponding Author: peskov@ipfran.ru

Концепция сверхмощных пространственно-развитых МСЭ развивается на протяжении ряда лет в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород). Основной идеей этой концепции является переход к ленточной конфигурации сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) и планарной геометрии пространства взаимодействия, что позволяет обеспечить повышение интегральной мощности выходного излучения при сохранении значений плотностей тока и электромагнитных потоков. Достижение мультигигаваттного уровня мощности может быть достигнуто при использовании полномасштабного ленточного РЭП, формируемого ускорителем «У-2» 1 МэВ / 140 кА / 7 мкс (ИЯФ СО РАН), поперечное сечение которого достигает 1 см × 140 см, а энергозапас до 0.5 МДж. Одной из ключевых проблем, встающих при создании МСЭ-генератора на основе данного пучка, является разработка электродинамической системы, способной обеспечить селективное возбуждение рабочей моды в условиях, когда размеры системы по обеим поперечным координатам составляют десятки и сотни длин волн излучения. Для решения указанной проблемы предложено использование нового типа брэгговских структур, формирующих трехмерный механизм распределенной обратной связи (РОС) и, таким образом, реализующих эффективную селекцию мод по обеим поперечным координатам в условиях столь высокой сверхразмерности.

В докладе исследована возможность создания МСЭ с трехмерной РОС в W-диапазоне частот на основе ленточного РЭП, формируемого ускорителем «У-2», проведена оценка его параметров. Для работы в указанном диапазоне разработан резонатор, ширина которого составляет ~ 350 - 400 длин волн излучения λ , а расстояние между пластинами (зазор) ~ 10 - 20 λ (что необходимо для транспортировки полномасштабного пучка с учетом амплитуды его баунс-осцилляций в ондуляторе). Согласно моделированию, использование предложенной схемы резонатора позволяет обеспечить устойчивый узкополосный режим генерации в условиях указанной существенной сверхразмерности по обеим поперечным координатам. При оптимальных параметрах электронный КПД может достигать до 15 - 20%, а выходная мощность до 20 ГВт, что на порядки превышает известные мировые аналоги. При микросекундной длительности это открывает возможность генерации импульсов суб-ПГц излучения с рекордным энерго содержанием на уровне ~ 10 - 20 кДж.

Работа проводится при частичной поддержке Российского научного фонда (грант №23-19-00370).

8

Обзор современных отечественных насосов для получения сверхвысокого вакуума в ускорителях заряженных частиц и установках термоядерного синтеза

Author: Alexey Semenov¹

Co-authors: Alexander Krasnov²; Pavel Nechaev³

¹ BINP SB RAS, NSTU

² Budker INP SB RAS, SRF SKIF, NSU

³ OOO Katod

Corresponding Author: a.m.semenov@inp.nsk.su

В связи со сложностью приобретения импортных высоковакуумных насосов для ускорителей заряженных частиц, таких как ЦКП «СКИФ», было решено создание отечественных современных ионно-геттерных насосов и насосов на базе нераспыляемых геттеров для получения сверхвысокого вакуума порядка 10-11 Торр. Здесь приводятся экспериментальные результаты измерений скорости откачки от давления для различных типов ионно-геттерного насоса (диодного, Noble диодного и триодного) и с скоростью откачки 20 л/с и 40 л/с. Показаны конструкции насосов на базе нераспыляемых геттеров с скоростью откачки для 800 л/с и 1300 л/с по водороду, а также приведены результаты измерения скорости откачки в зависимости от количества, поглощенного газа. Все высоковакуумные насосы, представленные в статье, серийно изготавливаются фирмой АО «Катод» (г. Новосибирск, Россия).

9

Высокотемпературные *in situ* синхротронные исследования структурно-фазовых превращений в аддитивно изготовленных титановых сплавах

Authors: Alexey Panin¹; Maxim Syrtanov²; Olga Perevalova³; Tatyana Lobova⁴; Marina Kazachenok⁵

¹ *Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia*

² *National Research Tomsk Polytechnic University*

³ *2/4, Academicheskoy ave., Tomsk, Russia, 634021.*

⁴ *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS,*

⁵ *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS)*

Corresponding Author: pav@ispms.ru

Внедрение аддитивных технологий в различные отрасли промышленности позволяет существенно сократить время производственного цикла, снизить уровень отходов сырья, создавать детали со сложной конфигурацией без дополнительных механических обработок, и, как следствие, существенно снизить стоимость изделий. Однако микроструктура 3D-напечатанных изделий, сформированная в условиях высокоскоростного охлаждения ванны расплава и многократных циклов нагрева-охлаждения при нанесении последующих слоев, является высоконеравновесной и, следовательно, может существенно изменяться как при термической так и механической обработке, сварке и других внешних воздействиях, оказывая существенное влияние на их эксплуатационные характеристики. Целью настоящей работы является продемонстрировать возможности синхротронной рентгеновской дифракции для исследования структурных и фазовых превращений в 3D-напечатанных титановых сплавах, развивающихся при повышенных температурах.

В работе исследовали титановые сплавы Ti 6Al 4V, Ti 5Al 3Mo V, полученные методами прокатки и проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии а также металломатричные композиты на их основе. С помощью оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа детально исследована микроструктура и фазовый состав титановых сплавов и титановых матричных композитов. Показано, что микроструктура 3D-напечатанных образцов состоит из столбчатых первичных зерен β фазы, внутри которых формируются мартенситные α' пластины. Методом высокотемпературной синхротронной рентгеновской дифракции продемонстрировано развитие $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta + \alpha'$ превращений в титановых сплавах Ti 6Al 4V и Ti 5Al 3Mo V, вызывающих увеличение содержания остаточной β фазы и образование орторомбической α'' фазы. Распад α' фазы в образцах Ti 6Al 4V и Ti 5Al 3Mo V начинается при температурах 600 и 400°C соответственно. Интенсивное окисление титановых сплавов внутри высокотемпературной камеры при температуре выше 900°C приводит к снижению объемной доли β и α'' фаз, а также подавлению полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения. Полученные результаты подтверждаются данными дифференциальной сканирующей калориметрии, а также результатами, полученными при нагреве 3D-напечатанных образцов в колонне просвечивающего электронного микроскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №24-19-00604). Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН и ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

10

Поиск связи геохимического состава донного осадка озера Итколь и локализации рудопроявлений на территории водосборной площади с применением микро-РФА-СИ

Authors: Viacheslav Novikov^{None}; Andrey Darin¹; Andrey Izokh²; Nadezhda Tolstykh³; Ivan Kalugin³; Denis Rogozin^{None}

¹ *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS*

² *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy*

³ *INSTITUTE OF GEOLOGY AND MINERALOGY. V. S. SOBOLEV*

Corresponding Authors: snovikov50@icloud.com, av-darin@yandex.ru

Введение

Бассейн пресноводного озера Итколь площадью 55,5 км² располагается в районе вскрытия апикальной части Улень-Туимского гранитоидного комплекса. Контактная зона с известняками сопровождается рудопроявлениями W, Cu, Mo и скарновыми месторождениями (Даринское, Алексеевское и др.) [Государственная ..., 2002]. Был проведен поиск рудных минералов в донных осадках озера.

Отбор керн и пробоподготовка

С использованием ручного ударного пробоотборника отобран керн донных осадков длиной 85 см. В лабораторных условиях проведен отбор дискретных проб с шагом 1 см. С целью поиска следов рудной минерализации применялась методика выделения тяжелой фракции из проб донного осадка с использованием бромформа (удельный вес 2,9 г/см³). Выход тяжелой фракции составил 0,05%. Выделенные частицы тяжелой фракции помещали на алюминиевую подставку с токопроводящей клейкой лентой, фотографировали на оптическом микроскопе и покрывали углеродным слоем (20 нм).

Методы и результаты аналитических исследований

Анализ полученных зерен происходил с применением электронного сканирующего микроскопа JSM-6510LV (Jeol Ltd). Определялось порядка 300 отдельных минеральных зерен. Установлен набор часто встречаемых рудных минералов, представленных халькопиритом, пиритом, магнетитом, ильменитом и пентландитом. Количество наблюдаемых зерен рудных минералов значительно выше для верхнего интервала, что, предположительно, связано с началом активной разработки медных месторождений.

Осадок из верхнего интервала (0-10 мм) адаптировался для проведения микро-РФА на пучках синхротронного излучения по методике (Дарьин, Ракшун, 2013). Исследования проводились в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием энергии возбуждения 21 кэВ.

Проводилось 2D сканирование рядами по 50 точек с шагом 100 мкм, расстояние между рядами составляло 300 мкм. Время измерения в каждой точке сканирования составляло 20 с. Происходило определение рентгеновской плотности образца и содержания 24 порообразующих и следовых элементов.

Выводы

Основным преимуществом применения микро-РФА является более низкий порог обнаружения и, как следствие, более детальное изучение химического состава образца. Применение микро-РФА-СИ позволяет проводить детальное изучение осадочного материала с целью поиска геохимических индикаторов рудопроявлений, представленных на водосборной площади. На территории водосбора о. Итколь известно порядка 6 месторождений и рудопроявлений, которые прослеживаются в минеральном разнообразии по всей глубине опробования керна.

Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N-46- XIII (Сорск). 2002.
2. Дарьин А.В., Ракшун Я.В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2 (51). С. 112-118.

11

Применение синхротронного излучения для фазового анализа металлокерамических материалов, формируемых методом лазерного аддитивного выращивания

Authors: Alexander Golyshev¹; Alexandr Malikov¹; Alexey Zavjalov^{None}; Ilya Gertsel¹

¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS*

Corresponding Author: alexgol@itam.nsc.ru

В работе рассматривается вопрос о применении синхротронного излучения для исследования фазового состава металломатричных композитов армированных керамическими частицами.

Сравнение результатов, полученных от дифракции излучения рентгеновской трубки (Cu) и синхротронного излучения показало, дифракция синхротронного позволяет однозначно выявить легкую керамику, например, В4С и вторичнообразованные фазовые соединения (TiB, TiB₂, TiC, Ti₃B₄), в то время как дифракция излучения рентгеновской трубки не позволила однозначно интерпретировать результаты. Таким образом, было показано преимущество синхротронного излучения при дифракционных исследованиях. Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

12

О возможности улучшения пространственного разрешения фотолюминесцентных пластин при регистрации изображений в рентгеновских лучах

Authors: А.В. Емельянов^{None}; Д.А. Вихляев^{None}; С.Д. Девятков^{None}; Д.С. Носуленко^{None}; Е.А. Пряхина^{None}

Corresponding Author: i.snz7474@mail.ru

В настоящее время в качестве координатно-чувствительных детекторов ионизирующего излучения широкое распространение получили фотолюминесцентные экраны с запоминанием (ФЭЗ) на основе BaF(Br,I):Eu²⁺. Пространственное разрешение ФЭЗ зависит от считывающего устройства и составляет 50÷100 мкм при использовании серийно выпускаемых сканеров. Такое разрешение ограничивает применение ФЭЗ в некоторых экспериментах, например, при исследовании быстропротекающих процессов методом контактной радиографии на мощных лазерных установках. С другой стороны, сочетание высокой чувствительности, широкого динамического диапазона, малых габаритов и нечувствительности к электромагнитным наводкам выделяет ФЭЗ среди других координатно-чувствительных детекторов, используемых при проведении данных исследований.

При использовании способов считывания, отличных от применяемых в промышленных сканерах, пространственное разрешение может быть улучшено до 5 мкм – характерного размера кристаллов чувствительного слоя. Для получения данных с фотолюминесцентных экранов создана система, в которой, в отличие от традиционного способа последовательного сканирования, реализовано одновременное считывание всего изображения при облучении ФЭЗ широким пучком светодиодного лазера ($\lambda = 650$ нм). Создаваемое фотолюминесцентное излучение попадает в оптическую систему микроскопа Levenhuk MED 25 и регистрируется камерой Dhyana 400 BSI, закрепленной вместо штатной камеры. Для подавления рассеянного лазерного излучения перед объективом микроскопа устанавливается фильтр СС-4. Высокое пространственное разрешение системы считывания достигается за счет малого размера элементов светочувствительной матрицы и большого коэффициента увеличения микроскопа. Неизбежным следствием использования микроскопа является относительно малая величина поля зрения, не превышающая 4×4 мм². Несмотря на это, такое поле зрения приемлемо для экспериментов на мощных лазерных установках.

Пространственное разрешение созданной системы определялось по функции края. Для этого частично закрытый вольфрамовой фольгой фотолюминесцентный экран Fuji BAS-TR2025 облучался тормозным рентгеновским излучением. По результатам экспериментов определено, что пространственное разрешение для квантов с энергией 6÷25 кэВ намного лучше, чем в случае считывания изображения стандартным сканером, и составляет ~13 мкм.

13

Планарные суб-ТГц / суб-ГВт черенковские мазеры с двумерной распределенной обратной связью на базе ускорителя «ЭЛМИ»: текущие задачи реализации

Authors: Н.Ю. Песков¹; В.Ю. Заславский¹; Н.С. Гинзбург²; А.С. Сергеев²; А.В. Аржанников³; П.В. Калинин³; Е.С. Сандалов³; С.Л. Синицкий³; В.Д. Степанов³

¹ *Институт прикладной физики РАН / Институт ядерной физики СО РАН*

² *Институт прикладной физики РАН*

³ *Институт ядерной физики СО РАН*

Corresponding Author: peskov@appl.sci-nnov.ru

Создание сверхмощных узкополосных релятивистских генераторов успешно ведется на протяжении ряда лет в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Н.Новгород) на основе высокоточного ускорительного комплекса «ЭЛМИ» 1 МэВ / 7 кА / 3 мкс, формирующего релятивистские электронные пучки (РЭП) ленточной геометрии с поперечным сечением до 0.3×18 см. При этом когерентность излучения достигается путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС), которая реализуется в двумерно-периодических брэгговских структурах за счет дополнительных поперечных волновых потоков, обеспечивающих синхронизацию излучения пространственно-развитых ленточных РЭП. Работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена экспериментально в МСЭ W-диапазона при поперечных размерах (ширине) системы до 50 длин волн и уровне выходной мощности ~ 100 МВт.

В настоящее время в рамках совместных экспериментов ИЯФ РАН - ИПФ РАН на базе ускорителя «ЭЛМИ» начато создание планарных релятивистских мазеров черенковского типа, разработаны проекты генераторов W и G диапазона частот. Моделирование показывает, что в данной схеме генераторов может быть достигнут ГВт-уровень мощности в W-диапазоне (рабочая частота 75 ГГц) и мощность на уровне ~ 0.6 ГВт при продвижении в G-диапазон (частота 150 ГГц). При этом, согласно проведенному моделированию, использование планарных замедляющих структур с двумерно-периодической гофрировкой, реализующих механизм двумерной РОС, позволяет обеспечить высокие когерентные свойства излучения и устойчивость одномодового режима генерации при ширине системы, составляющей до 100 и более длин волн излучения.

В докладе обсуждается текущая стадия экспериментальной реализации данных генераторов. Представлены результаты моделирования, конструктивные элементы и решения, позволяющие обеспечить однонаправленный вывод излучения, редуцировать влияние паразитных боковых отражений и др.

Работа проводится при частичной поддержке Российского научного фонда (грант №23-19-00370).

14

Рентгеноспектральный мониторинг реакции гидроформилирования в микрофлюидном режиме

Authors: Александр Гуда¹; Дмитрий Горбунов²; Евгений Наранов³; Махмуд Эид⁴; Александр Солдатов¹

¹ *Южный федеральный университет*

² *МГУ им. Ломоносова*

³ *ИНХС РАН*

⁴ *МИИИМ ЮФУ*

Corresponding Author: guda@sfedu.ru

Микрофлюидные системы предлагают уникальные возможности для высокопроизводительного скрининга условий реакции. Обратная связь в автономной системе обеспечивается спектральными данными, измеренными из капилляра в режиме *in situ*. В данной работе обсуждается разработка новых подходов спектрального мониторинга и их интеграция с микрофлюидными системами для онлайн-мониторинга состава реакционной смеси и состояния активных центров металла. Гомогенное гидроформилирование является важной промышленной реакцией для производства альдегидов и спиртов. Металлокомплексы Rh, модифицированные лигандами третичных аминов, позволяют проводить тандемные реакции в один этап для превращения олефинов непосредственно в спирты. Выход реакции зависит от координации атомов Rh или образования кластеров Rh. Рентгеновская спектроскопия поглощения за K-краем родия является уникальным инструментом для исследования координации Rh. В работе показана экспериментальная микрофлюидная система и проточная ячейка, разработанную для измерений в условиях

сегментированного потока газ-жидкость при повышенных давлении и температуре. Количественный анализ данных XAS проводился с использованием библиотеки теоретических спектров, рассчитанных для соответствующих мономерных, димерных комплексов родия и небольших кластеров. Мы показываем, что в сегментированном потоке присутствие аминов в реакции предотвращает образование кластеров Rh в пользу димеров Rh.

15

Библиотеки экспериментальных спектров рентгеновского поглощения и интерпретируемое машинное обучение: лучшие практики

Author: Bogdan Protsenko¹

Co-authors: Yuya Kakuchi²; Olga Safonova³; Sergey Guda⁴; Alexander Soldatov⁴; Christophe Copéret²; Alexander Guda⁵

¹ Southern Federal University, The Smart Materials Research Institute

² Department of Chemistry and Applied Biosciences, ETH Zürich

³ Paul Scherrer Institute

⁴ The smart materials research institute

⁵ Southern Federal University

Corresponding Author: laosian@mail.ru

Рентгеновская спектроскопия поглощения (XAS), являясь мощным методом исследования локальной атомной структуры и химического состояния металлических каталитических центров, тем не менее, страдает от отсутствия библиотек эталонных спектров и устоявшихся инструментов анализа данных. В данной методической работе мы представляем экспериментальный набор данных как кристаллических, так и молекулярных соединений Cr и V, а также интерпретируемые подходы машинного обучения для анализа XAS. Продемонстрирован пошаговый практический подход, включающий проверку базы данных, снижение размерности и извлечение признаков, кросс-валидацию алгоритмов и окончательную расшифровку неизвестных спектров для нанесённых катализаторов на основе ванадия (VOx/TiO₂) в процессе окислительного дегидрирования этанола. Предложена процедура объединения соседних краев поглощения, позволяющая дополнительно улучшить качество предсказания. Оба набора данных и разработанные инструменты машинного обучения объединены в простой для использования программный комплекс с открытым исходным кодом, с надеждой на дальнейшую стандартизацию в качестве “лучших практик” для XAS сообщества.

16

Исследование эволюции фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений Al-Li сплавов 3-го поколения с применением синхротронного излучения, в том числе и *in-situ*

Author: Alexandr Malikov^{None}

Co-authors: Alexey Zavyalov ; Konstantin Kuper ; Igor Vitoshkin ; Alexander Shmakov ; Maria Mironova

Corresponding Author: smalik707@yandex.ru

Переход к новым материалам и технологиям их проектирования связан с одной из актуальных проблем, лежащих на стыке механики, материаловедения, физики и химии – разработкой подходов и методов проектирования определенной структуры материалов, которая обеспечивает требуемые функциональные и конструкционные свойства изделий. Al-Li сплавы 3-го поколения

все более широко используются в изделиях авиа- и ракетостроения из-за механических свойств, превосходящих свойства традиционных алюминиевых сплавов. Основной технологией соединения данных сплавов является клепка, при которой края технологических отверстий под заклепки служат источником возникновения усталостных трещин при циклическом нагружении. Технология соединения изделий с помощью лазерной сварки позволяет устранить этот недостаток и значительно уменьшить вес конструкции за счет отсутствия заклепок и соединений внахлест. Согласно оценкам ВИАМ, переход на Al-Li сплавы третьего поколения с заменой заклепочных соединений на сварные обеспечит снижение веса конструкции самолета (Ил-112В, SSJ-New) до 25 %. Однако на сегодняшний день конструкционная прочность, включающая высокие показатели циклических (сопротивление усталости), динамических (трещиностойкость) и статических (предел текучести и временное сопротивление на разрыв) характеристик лазерных сварных соединений современных термически упрочняемых Al-Li сплавов третьего поколения не исследованы, что не позволяет рассматривать применение таких неразъемных соединений в авиастроении. Причины того, что конструкционная прочность лазерных сварных соединений остается низкой, связаны со структурными и фазовыми изменениями исходного материала в результате лазерного воздействия. 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. Благодарность Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00037, <https://rscf.ru/project/23-79-00037/>»

17

In situ исследования с использованием синхротронного излучения процессов фазообразования и формирования напряжений в покрытиях CrAlYN/CrAlYO и TiCrN при их синтезе вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом

Authors: Андрей Леонов¹; Владимир Денисов¹; Юлия Денисова¹; Михаил Савчук¹; Артем Егоров¹; Виктор Савостиков¹; Захар Винокуров²; Александр Шмаков²

¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН*

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

Corresponding Author: laa-91@yandex.ru

Методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения (источником СИ являлся накопитель электронов ВЭПП-3, ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) проводилось *in situ* исследование процессов фазообразования и формирования напряжений в покрытиях CrAlYN/CrAlYO и TiCrN при их синтезе вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на установке ВЭИПС. Установлено, что изменяя параметры осаждения (поперечная или одновременная работа дуговых испарителей, изменяя ток дугового испарителя), можно управлять фазовым составом и текстурой формируемых покрытий. В частности, при осаждении многослойного покрытия CrAlYN/CrAlYO при попеременной (15 сек каждый) работе дуговых испарителей с Cr и AlY катодами и тем самым формированием нанослоистой структуры, происходил преимущественный рост рефлексов фаз CrN и AlN с индексами плоскости (111). Однако, при осаждении многослойного покрытия CrAlYN/CrAlYO при одновременной работе дуговых испарителей происходил преимущественный рост рефлексов фаз CrN и AlN с индексами плоскости (200), а рефлексы (111) оставались с неизменной интенсивностью [1-4]. Установлено, что на 66 мин эксперимента (завершение осаждение покрытия CrAlYN/CrAlYO при попеременной работе дуговых испарителей) значения напряжений кристаллических решеток ($\Delta d/d \times 10^{-3}$) CrN – 2,8 и AlN – 1,1 являются минимальными и при увеличении времени осаждения (87 и 129 мин), т.е. увеличении толщины покрытия, напряжения растут (CrN – 7,3 и AlN – 9,1 на 129 мин). Кроме того, обнаружено, что после остывания покрытия CrAlYN/CrAlYO в течении 15 мин (144 мин эксперимента), напряжения $\Delta d/d$ фаз CrN, AlN и Cr₂O₃ несколько

увеличились. При осаждении покрытия TiCrN было обнаружено, что при увеличении тока дугового испарителя с Cr катодом с 40 А до 100 А, т.е. при увеличении содержания хрома в покрытии TiCrN наблюдался преимущественный рост рефлексов фаз CrN и TiN с индексами плоскости (220), хотя при более низких концентрациях хрома в покрытиях TiCrN преимущественные рефлексы были (111) [5, 6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.1.21.

Список литературы

1. Leonov A.A., Denisova Y.A., Denisov V.V., et al. Influence of layer number and thickness of CrAlYN/CrAlYO coatings on phase composition, structure and properties // Russian Physics Journal. 2023. V. 66. P. 1102–1107. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03049-1>
2. Леонов А.А., Денисова Ю.А., Денисов В.В., и др. Влияние потенциала смещения на фазовый состав, структуру и свойства вакуумно-дуговых многослойных покрытий CrAlYN/CrAlYO // Materials. Technologies. Design. 2023. Т. 5. № 2 (12). С. 39–47. https://doi.org/10.54708/26587572_2023_521239
3. Leonov A.A., Denisova Y.A., Denisov V.V., et al. Physical and mechanical properties of CrN/AlN coating obtained by vacuum-arc deposition with alternative separation of hard substance flows // Russian Physics Journal. 2024. V. 66. P. 1152–1157. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03056-2>
4. Leonov A.A., Denisova Y.A., Denisov V.V., et al. Ceramic coatings based on chromium and aluminum nitrides obtained by vacuum-arc plasma-assisted evaporation // J. Surf. Investig. 2023. V. 17 (Suppl 1), S. 35–S42. <https://doi.org/10.1134/S1027451023070303>
5. Leonov A.A., Denisova Y.A., Denisov V.V., et al. Structure and properties of CrN/TiN multi-layer coatings obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition method // Coatings. 2023. V. 13. P. 351. <https://doi.org/10.3390/coatings13020351>
6. Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Y.A. et al. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy // Phys Mesomech. 2022. V. 25. P. 306–317. <https://doi.org/10.1134/S102995992204004X>

18

Гиротроны терагерцового частотного диапазона в ИПФ РАН

Authors: Andrei Savilov¹; Mikhail Glyavin²

¹ *Institute of Applied Physics*

² *IAP RAS*

Corresponding Author: savilov@appl.sci-nnov.ru

Гиротроны являются одними из наиболее развитых источников мощного когерентного электромагнитного излучения, работающими в суб-терагерцовом и терагерцовом частотных диапазонах. В частности, в настоящее время активно развиваются суб-терагерцовые гиротроны для приложений, связанных с спектроскопией и воздействием излучения на различные среды (например, ЯМР спектроскопия). Естественные с точки зрения потребителя требования (компактность генератора и его работа в непрерывном или длинноимпульсном режимах) приводят к реализации для таких приложений гиротронов с относительно низкими ускоряющими напряжениями и рабочими токами, обеспечивающими мощности генерации на уровне сотен Вт или единиц кВт.

Поскольку современные непрерывные криомагниты обеспечивают магнитные поля на уровне 15 Т (что соответствует электронной циклотронной частоте около 0,4 ТГц), переход к частотам около 1 ТГц или выше приводит к необходимости или отказаться от непрерывных режимов работы гиротронов и использовать импульсные магниты, или работать на высоких (вторая-третья) гармониках циклотронной частоты. В последнем случае ключевой становится проблема селективности генерации на высокой циклотронной гармонике.

Впрочем, освоение терагерцового частотного диапазона гиротронами до последнего времени сдерживалось дефицитом явно выраженных потребителей в генераторах этого диапазона. Однако в последнее время появляются новые интересные физические проблемы, для исследования которых требуются компактные генераторы суб-терагерцового и терагерцового частотных диапазонов, стабильно работающие в непрерывном или длинноимпульсном режимах [1-3]. В данном докладе мы делаем обзор гиротронных установок такого типа, реализованных в ИПФ РАН в последние годы, которые могут быть доступны «сторонним» потребителям.

Работа поддержана Российским научным фондом (Проект 22-19-00490).

- [1] Князев Б.А., Кузьмин А.В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн. Вестник ННГУ, Т. 2, №1, 2007
- [2] Kalynov Y.K., Bandurkin I.V., Zavolskiy N.A., Manuilov V.N., Movshevich B.Z., Osharin I.V., "High-power pulsed terahertz-wave large-orbit gyrotron for a promising source of extreme ultra-violet radiation," Radiophys. Quantum Electron., Vol. 63, 354, 2020
- [3] Pavelyev, V.; Khonina, S.; Degtyarev, S.; Tukmakov, K.; Reshetnikov, A.; Gerasimov, V.; Osintseva, N.; Knyazev, B. Subwavelength Diffractive Optical Elements for Generation of Terahertz Coherent Beams with Pre-Given Polarization State. Sensors 2023, 23, 1579

19

Циклотронное возбуждение терагерцевых плазмонов электронными пучками (плазмонный гиротрон)

Authors: Andrei Savilov¹; Ekaterina Novak^{None}; Ivan Oladyshkin^{None}

¹ *Institute of Applied Physics*

Corresponding Author: savilov@appl.sci-nnov.ru

Поверхностный плазмон представляет собой волну, «прижатую» к поверхности проводника [1]. В настоящее время активно изучаются плазмоны терагерцевого частотного диапазона [2,3]. Эксперименты и теоретические оценки демонстрируют существование волн терагерцевого частотного диапазона с полем, локализованным близи поверхности проводника (в масштабе десятков длин волн) и распространяющихся вдоль поверхности с относительно малыми потерями (обратные декременты порядка десятков см).

С другой стороны, для ряда приложений актуальной является разработка электронных циклотронных мазеров (гиротронов), работающих в терагерцевом частотном диапазоне на высоких (вторая - третья) циклотронных гармониках, что позволяет реализовывать такие мазеры на основе относительно компактных магнитов. Одной из ключевых проблем тут является проблема селективности (подавления паразитной генерации на низких циклотронных гармониках). Возникает естественная идея использовать свойства плазмонов для реализации открытых селективных резонаторов таких гиротронов. В настоящем докладе обсуждаются первые шаги на этом пути. Приводится возможная схема плазмонного гиротрона, описывается простейшая теория электронного циклотронного возбуждения плазмона в открытом резонаторе, даются оценки стартовых токов плазмонных гиротронов терагерцевого частотного диапазона.

Работа поддержана Российским научным фондом (Проект 22-19-00490).

- [1] Князев Б.А., Кузьмин А.В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн. Вестник ННГУ, Т. 2, №1, 2007
- [2] Gerasimov, V.V.; Knyazev, B.A.; Lemzyakov, A.G.; Nikitin, A.K.; Zhizhin, G.N. Growth of Terahertz Surface Plasmon Propagation Length Due to Thin-Layer Dielectric Coating. J. Opt. Soc. Am. B 2016, 33, 2196.
- [3] Gerasimov, V.V.; Nikitin, A.K.; Lemzyakov, A.G.; Azarov, I.A.; Milekhin, I.A.; Knyazev, B.A.; Bezus, E.A.; Kadomina, E.A.; Doskolovich, L.L. Splitting a Terahertz Surface Plasmon Polariton Beam Using Kapton Film. J. Opt. Soc. Am. B 2020, 37, 1461

20

Исследование параметров системы регистрации теневых рентгеновских изображений на основе сферически изогнутого кристалла

Authors: Семён Девятков¹; Денис Вихляев¹; Дмитрий Гаврилов¹; Андрей Емельянов¹; Дмитрий Носуленко¹; Анатолий Потапов¹; Екатерина Пряхина¹; Николай Титоренко¹; Павел Толстоухов¹; Егор Борисов¹

¹ РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина

Corresponding Author: devyatkovsemen@gmail.com

Для исследований быстропротекающих процессов разработана система регистрации теневого рентгеновских изображений на основе сферически изогнутого кристалла кварца. С целью апробации данного способа регистрации проведена серия экспериментов по получению теневых изображений тест-объекта в однокадровом режиме. Источником рентгеновской подсветки с энергией квантов ~ 2 кэВ служила лазерная плазма кремниевых и стеклянных мишеней. В качестве просвечиваемого объекта использовалась металлическая сетка с периодом 265 мкм, сплетенная из проволок диаметром 100 мкм. Спектр источника рентгеновской подсветки в интересующем диапазоне измерялся с помощью спектрографа на основе кристалла КАР, собранного по схеме Иоганна. Экспериментально определенное разрешение одноканальной системы регистрации в сагитальном и меридиональном направлении составило $\delta = 20$ мкм, поле зрения около 1 мм. Результаты измерений рентгеновским спектрографом подтверждают, что полученные изображения строились в лучах линии $L\alpha$ кремния. Также на данный момент разработана и отъюстирована двухканальная система регистрации теневых рентгеновских изображений на основе сферически изогнутых кристаллов кварца.

21

Формирование и исследование терагерцевых вихревых бесселевых пучков, полученных с помощью отражающих аксиконов

Authors: Никита Баздырев¹; Vasily Gerasimov²; Наталья Осинцева³; Константин Тукмаков⁴; Андрей Агафонов⁴; Владимир Павельев⁴

¹ Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет

² Budker Institute of nuclear physics SB RAS

³ ИЯФ СО РАН

⁴ Самарский университет

Corresponding Author: n.bazdyrev@g.nsu.ru

Работа посвящена исследованию формирования терагерцевых (ТГц) вихревых бесселевых пучков с топологическими зарядами $l=-3$ и $l=-9$ на длинах волн $\lambda=141$ мкм и $\lambda=203$ мкм, созданных с помощью спиральных бинарных фазовых отражающих аксиконов, изготовленных методами реактивно-ионного травления и лазерной абляции на кремнии с последующим напылением непрозрачного слоя меди. В качестве источника ТГц излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах. Формируемые аксиконовыми пучками бесселев профиль на расстояниях от аксикона для $l=-3$: $z=60 \div 160$ мм и $z=70 \div 100$ мм, $l=-9$: $z=70 \div 130$ мм и $z=70 \div 120$ мм при $\lambda=141$ мкм и $\lambda=203$ мкм соответственно, что хорошо согласуется с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции. Максимальная энергетическая дифракционная эффективность (30%) получена на отражающих аксиконов, изготовленных методом реактивно-ионного травления. При использовании метода лазерной абляции дифракционная эффективность составила 22%, что связано с ограничениями данной технологии.

22

Терагерцевая плазмонная рефрактометрия металлических пленок и композитных графеновых нанослоев

Authors: Vasily Gerasimov¹; Valeria Kukotenko²; Ildus Khasanov³; Artem Ivanov⁴; Irina Antonova⁵; Владислав Ванда⁶; Aleksey Lemzyakov⁷

¹ *Budker Institute of nuclear physics SB RAS*

² *Institute of Nuclear Physics*

³ *Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*

⁴ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*

⁵ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*

⁶ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет*

⁷ *Budker INP SB RAS*

Corresponding Author: v.v.gerasimov@inp.nsk.su

Металлические и графеновые пленки представляют большой интерес для интегральной плазмоники терагерцевого диапазона частот. В докладе будут представлены результаты экспериментальных исследований оптических констант металлических пленок толщиной 300 нм и композитных слоев из графеновых наночастиц толщиной от 10 до 400 нм с помощью методов плазмонной интерферометрии и поверхностной плазмонной резонансной рефрактометрии.

23

Мощные релятивистские генераторы поверхностной волны субтерагерцевого диапазона на основе двумерно-периодических замедляющих структур

Authors: Vladislav Zaslavsky¹; Nikolay Peskov¹; Naum Ginzburg¹; Ksenia Leshcheva¹; Alexey Palitsin¹; Yuri Rodin¹; Andrey Arzhannikov²; Stanislav Sinitsky²; Petr Kalinin²; Vasilij Stepanov²

¹ *IAP RAS*

² *BINP SB RAS*

Corresponding Author: zas-vladislav@yandex.ru

В настоящее время генераторы поверхностной волны (ГПВ) являются одними из наиболее перспективных источников мощного (10 - 500 МВт) импульсного излучения, работающих вплоть до субтерагерцевых частот. ГПВ представляют собой одну из разновидностей черенковских генераторов, в которых прямолинейный электронный пучок возбуждает медленную волну, распространяющуюся вдоль периодически-гофрированной поверхности. Отличительной особенностью указанного класса генераторов является достаточно высокий импеданс связи с электронным потоком и, соответственно, эффективность электронно-волнового взаимодействия. Кроме того, очевидным достоинством ГПВ является простота и компактность, поскольку снижаются требования к электронно-оптическим системам, формирующим прямолинейные релятивистские электронные пучки (РЭП).

В докладе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ГПВ планарной конфигурации с двумерно-периодическими замедляющими структурами субтерагерцевого диапазона. Достоинством подобных структур является возможность обеспечения устойчивого одномодового режима генерации в условиях существенной сверхразмерности. Основой данных исследований являются ускорительные комплексы «СИНУКИ» (ИПФ РАН, Нижний Новгород, 600 кэВ / 1 кА / 20 нс) и «ЭЛМИ» (ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1 МэВ / 5 кА / 3 мкс), которые позволяют формировать РЭП ленточной геометрии с поперечными размерами 0.03 см × 2 см и 0.3 см × 18 см соответственно. Теоретический анализ релятивистских ГПВ проводился на основе квазиоптического подхода. Полученные с помощью усредненных моделей результаты сопоставлены с результатами прямого численного моделирования в рамках коммерческого PIC кода CST STUDIO SUITE.

Экспериментальные исследования планарного ГПВ с сильнооточным ленточным РЭП проведены в настоящее время в G-диапазоне (рабочая частота ~ 170 ГГц) на базе ускорителя СИНУКИ при поперечной сверхразмерности, составляющей около 15 длин волн излучения. В эксперименте получен стабильный режим одномодовой генерации в расчетном диапазоне частот с длительностью импульса до 5 нс. Выходная мощность, измеренная калориметрическим методом, достигала 30 МВт, что соответствует эффективности электронно-волнового взаимодействия ~ 5%. Дальнейшее

радикальное увеличение выходной мощности излучения может быть достигнуто на ускорителе «ЭЛМИ» с существенно большими размерами электронного пучка. Моделирование показывает возможность достижения субгигаваттного уровня мощности в субтерагерцовом диапазоне частот.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 23-72-10094.

24

Разработка детекторов для станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ.

Authors: Lev Shekhtman¹; Vladimir Aulchenko²; Anastasia Glushak³; Vasily Kudryavtsev⁴; Vitaliy Titov¹

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

² *BINP*

³ *BINP SB RAS*

⁴ *BINP, NSU*

Corresponding Author: l.i.shekhtman@inp.nsk.su

В составе экспериментальных станций первой очереди в ЦКП СКИФ создается уникальная станция 1-3 «Быстропротекающие процессы», предназначенная для изучения детонационных, ударно-волновых процессов, а также процессов реакции материалов на импульсное тепловое или механическое воздействие. В состав станции будут входить три секции: секция «Плазма», предназначенная для изучения процессов реакции материалов на импульсные тепловые и механические нагрузки; секция «Динамические процессы, основное здание», на которой предполагается исследовать ударно-волновые процессы и секция «Динамические процессы, отдельное здание», предназначенная для изучения детонационных и ударно-волновых процессов. Для проведения экспериментов на станции 1-3 разрабатывается пять координатных детекторов рентгеновского излучения различного типа. Для секции «Плазма» создаются детекторы Sci-CODE и GINTOS. Детектор SciCODE (Semiconductor One-coordinate Detector) – однокоординатный детектор, работающий в режиме прямого счета фотонов, на основе полупроводникового микрополоскового сенсора. Детектор регистрирует фотоны с энергией от 5 кэВ до 40 кэВ, при загрузке до 1 МГц/кан. Первый детектор будет иметь сенсор из арсенида галлия с шагом каналов 50 мкм и размером чувствительной области 51x10 мм (1024 канала). Детектор GINTOS (GaAs Integrating One-coordinate System) – однокоординатный детектор, работающий в интегрирующем режиме на основе микрополоскового сенсора из арсенида галлия. Детектор позволяет работать с загрузками от 10^5 фотонов/кан до 10^9 фотонов/канал и регистрировать динамические процессы с временем экспозиции одного измерения от 100 нс. Ширина канала детектора GINTOS 50 мкм, число каналов 1024, размер чувствительной зоны 51x10 мм. Для проведения экспериментов на секциях «Динамические процессы» разрабатываются три детектора серии DIMEX (Detector for Imaging of Explosions), работающие в интегрирующем режиме: газовый однокоординатный детектор DIMEX-G на основе ионизационной камеры высокого давления со смесью Xe+25%CO₂ под давлением 7 атм, кремниевый однокоординатный детектор DIMEX-Si и кремниевый двух-координатный детектор DIMEX-Si2D. Особенностью этих детекторов является независимая регистрация сигналов от вспышек СИ от отдельных ступок электронов в накопителе. Однокоординатные детекторы имеют размер чувствительной области 100x1 мм. При этом ширина канала DIMEX-G равна 150 мкм, DIMEX-Si – 50 мкм. DIMEX-G может регистрировать поток фотонов в диапазоне 10^8 – 10^{10} фотонов/канал в секунду, DIMEX-Si рассчитан на потоки от 10^{10} до 10^{12} фотонов/канал в секунду. Детектор DIMEX-Si2D имеет размер чувствительной области 100x5 мм, шаг каналов по горизонтали – 100 мкм, по вертикали – 1 мм.

В докладе будут подробно описаны характеристики детекторов и текущий статус разработок.

25

Разработка программно-аппаратного комплекса терагерцевого плазмонного интерферометра Майкельсона для экспериментов на Новосибирском лазере на свободных электронах

Authors: Spartak Krasnopevtsev^{None}; Vasily Gerasimov¹

¹ *Budker Institute of nuclear physics SB RAS*

Corresponding Author: k.s.e@mail.ru

Система управления экспериментом состоит из аппаратной части в виде многоканального АЦП конвертера данных с интерфейсом USB и управляющей программы на персональном компьютере. Управление экспериментом заключается в одновременном управлении несколькими оптическими позиционерами, с фиксацией их координат, в управлении синхронным детектором и приемом сигналов оптических датчиков от синхронного детектора через конвертер АЦП. Координаты всех позиционеров и полученные данные оптических датчиков сопоставляются в хронологическом порядке в выходной электронной таблице. Такой подход значительно расширяет возможности анализа результатов исследований и позволяет существенно повысить повторяемость эксперимента. В качестве оптического датчика в эксперименте использовался модернизированный детектор МГ-32, в котором вместо окна использовалась короткофокусная полипропиленовая линза. Периодичность сбора данных системой при регистрации сигналов составляет 15 мс. Программно-аппаратный комплекс был протестирован на видимом и терагерцевом излучении.

26

Моделирование дифракционного излучения с винтовым волновым фронтом в ТГц диапазоне частот от спиральной мишени

Authors: Дмитрий Шкитов¹; Никита Бердников¹

¹ *Томский политехнический университет*

Corresponding Author: shkitovda@tpu.ru

Излучение с винтовым волновым фронтом, или, другими словами, излучение, несущее орбитальный угловой момент – дополнительную степень свободы, может стать новым инструментом в исследованиях и предоставить ценную новую информацию о взаимодействиях фотонов с материалами. В данной работе проведено моделирование пространственных и спектральных характеристик дифракционного излучения с винтовым волновым фронтом, возникающее при взаимодействии кулоновского поля электронного пучка с мишенью в виде спирали (геликоида). Моделирование проведено для идеально проводящей мишени конечных размеров и в условиях близких к реальным в возможном будущем эксперименте. Были подобраны параметры мишени и электронного пучка для генерации излучения в ТГц диапазоне частот. Такая спиральная мишень может послужить непосредственным источником излучения с винтовым волновым фронтом без необходимости его преобразования из плосковолнового излучения.

27

Сравнительный анализ спектров СИ-люминесценции бифазных керамик Al_2O_3 -Ce:YAG, полученных с использованием различных техник спекания

Authors: Алексей Завьялов¹; Анастасия Ворновских²; Денис Косьянов²

¹ Отдел синхротронных исследований, ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

² НОЦ «Передовые керамические материалы», Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, Россия

Corresponding Author: zav_alexey@list.ru

В работе исследованы спектры СИ-люминесценции для серий образцов бифазной керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ce:YAG}$, полученной в рамках индивидуальной техники искрового плазменного спекания (ИПС) и при ее комбинировании с последующей стадией горячего изостатического прессования (ГИП) (серии «ИПС» и «ИПС+ГИП», соответственно). Молярное соотношение фаз корунд/гранат было фиксированным 0,75, содержание ионов Ce^{3+} варьировалось в диапазоне 0,05–0,3 ат.%. Данные составы в керамической форме рассматриваются в качестве перспективных термостойких люминофоров для компактных, энергоэффективных и высокомоощных источников белого света различных оттенков, основанных на свето- и лазерных диодах с кристаллами синего и УФ-диапазона длин волн.

Спектры получены на экспериментальной станции «Люминесценция с временным разрешением» канала 6-Б накопительного кольца ВЭПП-3 [1] в Центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП СЦСТИ) на базе Уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН [2]. Измерения проводились в диапазоне 200–900 нм и 340–900 нм при использовании фильтра BS-8 с шагом 0,5–1 нм и временем накопления сигнала в точке 1 сек. Характеристики моделей аппроксимации, а также 95% доверительный интервал, определялись в открытом ПО для нелинейной аппроксимации кривых и анализа данных «Fityk 1.3.1» [3], а также с использованием программы, написанной на языке Python.

Спектры условно могут быть разделены на два диапазона по границе 465 нм. Выше 465 нм в спектрах наблюдается линия люминесценции Ce:YAG . Ниже – спектр сложной структуры, который может состоять из люминесценции самозахваченных экситонов [4,5], линий возможной остаточной фазы Ce:YAP [6] и предположительных линий $\text{Ce:Al}_2\text{O}_3$ [6,7].

Для серии «ИПС+ГИП» интегральная интенсивность спектра в обоих диапазонах в ~1,5–3 раза выше, чем для серии «ИПС», при 0,05–0,1 ат.% Ce^{3+} , но при 0,2–0,3 ат.% Ce^{3+} влияние ГИП незначительно. Интегральная интенсивность линии Ce (диапазон >465 нм) в обеих сериях существенно растёт по мере увеличения концентрации Ce^{3+} до 0,2 ат.% (в ~9,3 раза для «ИПС» и ~3,2 раза для «ИПС+ГИП»), а затем уменьшается примерно на 25% для 0,3 ат.% Ce^{3+} . Напротив, для диапазона <465 нм наблюдается монотонное падение интегральной интенсивности по мере роста концентрации Ce^{3+} (в ~4 раза для «ИПС» и ~12,3 раза для «ИПС+ГИП»). Использование различных моделей для аппроксимации формы пика люминесценции серия в диапазоне >465 нм позволяет выявить дрейф положения максимума пика на 5–7 нм и его сужение от ~0,42 до ~0,36 эВ по мере роста концентрации Ce^{3+} . Кроме различий между сериями в величине максимума пика, аналогичной интегральной интенсивности, прочие основные характеристики совпадают в пределах погрешности. Среди нескольких рассмотренных моделей вызывает интерес модель «подрезанного» сигмоидой широкого гауссового пика, для которой возможна интерпретация одного из параметров модели в качестве стокового сдвига, который также уменьшается по мере роста концентрации Ce^{3+} от ~0,13 до 0,11 эВ.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 20-73-10242). Завьялов А. благодарен Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042). Косьянов Д. благодарен Совету по грантам Президента Российской Федерации (Стипендия № СП-3221.2022.1) за финансовую поддержку исследований по развитию методов получения передовых керамических материалов. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

References:

1. E.I. Zinin, V.A. Pustovarov, Изв. ВУЗов. Физика №4, 165–168 (2006).
2. P.A. Piminov et al, Phys. Procedia 84, 19–26 (2016). DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
3. M. Wojdyr, J. Appl. Cryst. 43, 1126–1128 (2010). DOI: 10.1107/S0021889810030499
4. V.V. Osipov et al, Opt. Mater. 71, 98–102 (2017). DOI: 10.1016/j.optmat.2016.05.016
5. V. Babin et al, Phys. Status Solidi C 2 (1), 97–100 (2005). DOI: 10.1002/pssc.200460120
6. A. Shakhno et al, Mater. 16 (7), 2701 (2023). DOI: 10.3390/ma16072701
7. E.H. Penilla et al, J. Mater. Res. 35, 958–971 (2020). DOI: 10.1557/jmr.2019.417

Исследование поля поверхностных плазмон-поляритонов в терагерцевом диапазоне

Author: Валерия Кукотенко¹

Co-author: Василий Герасимов²

¹ ИЯФ СО РАН

² ИЯФ СО РАН, НГУ

Corresponding Author: valeriakukotenko@yandex.ru

Фотоника и плазмоника могут дополнять друг друга, поскольку при правильных условиях оптические сигналы могут быть преобразованы в поверхностные плазмон поляритоны (ППП) и наоборот. Поэтому, в настоящее время активно разрабатываются плазмонные интегральные планарные схемы для устройств беспроводной связи. Переход в ТГц диапазон частот позволит увеличить скорость передачи и обработки данных. При разработке плазмонных интегральных схем важно знать оптические свойства поверхностей. В настоящее время отсутствуют достоверные методы для определения оптических свойств поверхностей. Работа посвящена определению эффективной диэлектрической поверхности металлических пленок. В качестве экспериментальной методики используется метод «экранирования» поверхностной волны. Будут представлены глубины проникновения поля ППП, измеренные с использованием терагерцевого излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (141, 197 мкм) на структуре «золото – диэлектрическое покрытие (ZnS) – воздух» на подложках с разной шероховатостью. С помощью численных методов было найдено решение обратной задачи определения диэлектрической проницаемости металлической поверхности по глубине проникновения и мнимой части показателя преломления ППП. Показано, что эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от шероховатости подложки.

29

Исследование эффективных оптических констант металлических поверхностей методом терагерцевой плазмонной интерферометрии

Authors: Владислав Ванда¹; Vasily Gerasimov²; Aleksey Lemzyakov³

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет

² Budker Institute of nuclear physics SB RAS

³ Budker INP SB RAS

Corresponding Author: vladislav.vanda@outlook.com

В электронных устройствах существует проблема ограничения частоты сигнала терагерцевым диапазоном, однако возможно перейти в терагерцевую область с использованием поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Чтобы разработать такие компоненты, нужно знать оптические характеристики используемых материалов. Одним из методов, позволяющих их определить, является плазмонная интерферометрия. Поскольку ППП распространяются вдоль границы сред, то ожидается зависимость их характеристик от шероховатости материалов. В данной работе использована модель Бруггемана для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости граничного слоя, состоящего из золота, покрытого сульфидом цинка. Проведены эксперименты по измерению показателя преломления ППП для образцов с разной толщиной диэлектрического покрытия и разной шероховатостью. Учтены дополнительные энергетические потери за счёт зернистой структуры золота и аномального скин-эффекта.

30

Старение релаксоров и рентгеновская фотонная корреляционная спектроскопия.

Authors: Александр Вакуленко¹; Алексей Филимонов¹; Сергей Вахрушев²

¹ СПбПУ Петра Великого

² ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Corresponding Author: s.vakhrushev@mail.ioffe.ru

Релаксоры представляют собой одну из наиболее интересных групп неупорядоченных соединений. Микроскопический механизм структурных превращений в релаксорах и природа низкотемпературного состояния остается не до конца понятыми, несмотря на почти 70-летнюю историю исследований. В наиболее интересной области температур, вблизи температуры замерзания, характерные времена релаксации достигают значений от миллисекунд до тысяч секунд, недоступных обычным методам изучения процессов структурной перестройки. Рентгеновская фотонная корреляционная спектроскопия (XPSCS) представляется наиболее подходящим способом выполнить исследование медленной релаксации в релаксорах. Нами была исследована структурная релаксация в релаксоре $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN). Измерения проводились на линии ID10 Европейского Синхротронного источника (ESRF). Двумерные картины диффузного рассеяния были измерены в районе брэгговского отражения 110 с помощью ПЗС-матрицы Andor. На основании экспериментальных данных была прослежена температурная эволюция как одновременных, так и двухвременных корреляционных функций. Серии двумерных паттернов рассеяния были проанализированы для извлечения корреляционной функции интенсивность-время, которая описывается экспоненциально затухающим выражением Кольрауша-Вильямса-Ватса (KWW): $g(2)(Q,t) = 1 + c \exp(-2t/\tau)^\beta$, $\beta > 1$, $\tau(\tau \geq 700)$, . . . №22 – 12 – 00328, <https://rscf.ru/en/project/22-12-00328/>.

31

Возможности дифракционных методов исследования с использованием синхротронного излучения для диагностики слабых ферромагнетиков

Authors: Nikita Snegirev^{None}; Антон Куликов¹; Игорь Любутин²; Федор Пиялк¹; Энвер Мухамеджанов³; Михаил Борисов³; Сергей Ягупов⁴; Марк Стругацкий⁴

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт» 2Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, НИЦ «Курчатовский институт»

² Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

³ 2Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, НИЦ «Курчатовский институт»

⁴ 3Физико-технический институт ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Corresponding Author: niksnegir@yandex.ru

Доклад посвящен применению рентгеновских дифракционных методов для визуализации магнитной доменной структуры, а также изучению магнитных и магнитоупругих свойств слабоферромагнитных кристаллов.

В качестве модельного объекта использованы монокристаллы на основе бората железа FeBO_3 . В этом кристалле магнитные моменты двух подрешеток железа расположены в слоях, параллельных плоскости (001) и упорядочены антиферромагнитно. Антисимметричное суперобменное взаимодействие приводит к тому, что магнитные моменты подрешеток железа не строго антипараллельны, а слегка скошены, образуя слабый ферромагнитный момент.

Нами разработана и реализована методика рентгеновской топографии исследования кристаллов во внешних магнитных полях. Установлено, что существование магнитной доменной структуры ведет к неоднородному распределению магнитоэластических деформаций, которое на топограммах

проявляется в виде дифракционного контраста. Предложена модель для анализа типа дифракционного контраста в зависимости от взаимной ориентации намагниченности в доменах.

Проведены статические и времяразрешающие рентгенодифракционные эксперименты на монокристаллах FeVO_3 в условиях воздействия внешнего магнитного поля. Установлено, что в слабых магнитных полях происходит немонокотное уширение кривых дифракционного отражения, которое вызвано смещением доменных границ. Профиль интенсивности дифракционного максимума во времени соответствует профилю нарастания напряженности внешнего магнитного поля на исследуемом образце. Однако фронт нарастания интенсивности немонокотен, и на нем появляются осцилляции при выходе на «плато». Это связано со скачкообразным изменением конфигурации векторов намагниченности в кристалле во внешнем поле, например, вследствие эффекта Баркгаузена.

Для реализации методик, основанных на магнитном рассеянии рентгеновского излучения вблизи краев поглощения, изготовлена специализированная экспериментальная ячейка с возможностью приложения к кристаллу внешнего магнитного поля различной напряженности вдоль различных кристаллографических направлений. Тестирование ячейки проведено в ходе измерений на монокристаллах FeVO_3 и $\text{Fe}_{0.87}\text{Ga}_{0.13}\text{VO}_3$. Для кристалла FeVO_3 на энергетических зависимостях интенсивности дифракционного пика запрещенного рефлекса наблюдается смещение максимума при приложении внешнего магнитного поля с различной полярностью вдоль направления $[110]$. Для $\text{Fe}_{0.87}\text{Ga}_{0.13}\text{VO}_3$ этого явления не обнаружено, что является следствием замещения парамагнитных ионов Fe в матрице кристалла диамагнитными ионами Ga. Это связано с тем, что увеличение эффективного расстояния между ионами Fe ведет к ослаблению обменного взаимодействия.

Перечисленные экспериментальные методики в настоящее время доступны в составе экспериментальных станций РКФМ и ФАЗА синхротронного комплекса «КИСИ-Курчатов».

Разработка рентгеновской методики анализа эволюции магнитной доменной структуры с использованием источника синхротронного излучения, а также изготовление экспериментальных ячеек выполнены в рамках гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-1362.

32

Диагностика кристаллов бората железа FeVO_3 , предназначенных для монохроматизации синхротронного излучения в методиках на основе ядерных резонансов

Author: Igor Lyubutin¹

¹ *Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex Crystallography and Photonics, NRC "Kurchatov Institute"*

Corresponding Author: lyubutinig@mail.ru

Диагностика кристаллов бората железа FeVO_3 , предназначенных для монохроматизации синхротронного излучения в методиках на основе ядерных резонансов

И.С. Любутин¹, Н.И. Снегирёв^{1,2}, М.В. Любутина¹, С.В. Ягупов³, М.Б. Стругацкий³,

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

²Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, НИЦ «Курчатовский институт»

³Физико-технический институт ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Ядерно-резонансные методики, основанные на эффекте Мессбауэра, широко применяются на синхротронах 3-го и 4-го поколения. Эти методики очень эффективны для изучения различных материалов и наноструктур, особенно при исследованиях в экстремальных условиях высоких давлений, низких и высоких температур, сильных магнитных полей. В частности, они важны для изучения новых энергонасыщенных материалов и сверхпроводников, создаваемых в условиях высоких давлений (в камерах с алмазными наковальнями). Подобные экспериментальные методики запланированы к реализации в перспективных российских синхротронных центрах «СИЛА» и «СКИФ».

Кристаллы бората железа FeVO_3 обладают уникальным сочетанием структурных и магнитных

свойств, что позволяет управлять рентгеновским излучением при его рассеянии на ядрах изотопа Fe-57. При определенных условиях это дает возможность выделить («вырезать») из белого синхротронного излучения узкую одиночную линию, соответствующую мессбауэровскому резонансу.

Для достижения необходимых параметров дифракции, железо в таких кристаллах-монокристаллах должно быть обогащено изотопом ^{57}Fe до 95%, а к структурному совершенству кристаллов предъявляются очень высокие требования.

В результате поддержки РФФИ, в нашем коллективе разработана методика синтеза высокосовершенных монокристаллов бората железа. Методика позволяет получать кристаллы FeBO_3 в форме базисных пластин с гладкой поверхностью, что наиболее благоприятно для реализации оптической схемы на СИ.

В докладе будут представлены результаты наших многочисленных исследований монокристаллов $^{57}\text{FeBO}_3$, включая рентгеноструктурный анализ в широком диапазоне температур до области магнитного фазового перехода (вблизи TN), рентгеновскую топографию, в том числе во внешнем магнитном поле. Также выполнены детальные исследования сверхтонкой структуры мессбауэровских спектров, особенно вблизи TN, при различных ориентациях внешнего магнитного поля. Изучено влияние магнитного поля и магнитной доменной структуры на дифракционные свойства кристаллов.

Все полученные результаты чрезвычайно важны для практического использования кристаллов-монокристаллов $^{57}\text{FeBO}_3$ в синхротронных экспериментах. Аттестация синтезированных кристаллов также проведена непосредственно на станции ядерного резонансного рассеяния ID-18 ESRF (Франция). Полученные результаты подтверждают возможность применения синтезированных кристаллов в синхротронных экспериментах на основе ядерных резонансов. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части подготовки экспериментальных образцов и магнитных измерений. Разработка рентгеновской методики анализа в условиях воздействия внешних магнитных полей выполнена в рамках гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-1362.

33

Метаболомный скрининг методом ВЭЖХ-МС/МС в изучении биологических эффектов рентгеновского и терагерцового ЭМИ

Author: Никита Вячеславович Басов¹

Co-authors: Артем Дмитриевич Рогачев¹; Екатерина Алексеевна Бутикова²; Мария Андреевна Алешкова³; Мария Сотникова⁴; Евгений Владимирович Гайслер⁴; Ольга Ивановна Яровая¹; Василий Михайлович Попик⁵; Татьяна Генриховна Толстикова¹; Иван Алексеевич Разумов⁶; Андрей Георгиевич Покровский⁴; Нариман Фаридович Салахутдинов¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Ворожцова СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

² Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН

³ Новосибирский институт органической химии им. Ворожцова СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

⁴ Новосибирский Государственный Университет

⁵ Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН

⁶ Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН; Институт цитологии и генетики СО РАН

Corresponding Author: nikita.v.basov@gmail.com

Метаболомика – концепция в биоаналитической химии, целью которой является количественная оценка набора малых молекул (с молекулярной массой менее 1.5 кДа), присутствующих в биологической системе в любом из ее физиологических состояний. Таргетированный скрининг метаболитов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрической детекцией (ВЭЖХ-МС/МС) может служить удобным и чувствительным инструментом для выявления ранних изменений в живых системах на молекулярном уровне. Ранее нами был разработан подход к метаболомному скринингу методом ВЭЖХ-МС/МС с использованием

монолитной колонки на основе 1-винил-1,2,4-винилтриазола, который позволил детектировать более 400 метаболитов за один анализ [1].

Применимость подхода была показана на примере анализа крови мышей, облучённых рентгеновским излучением в дозе 5 Гр. Анализ метаболомных данных продемонстрировал 12 метаболитов, уровень которых достоверно изменялся начиная с 4 дня после облучения животных. Как маркерные метаболиты, так и аннотированные метаболические пути имеют прямую связь с литературными данными, а установленные метаболомные изменения согласуются с современными представлениями о течении радиационной болезни.

Для изучения биологических эффектов ТГц на клеточные линии был разработан удобный протокол пробоподготовки клеточных образцов. Было исследовано относительное содержание метаболитов в образцах клеток линии меланомы человека (SK-MEL-28) и мыши (B16). Показано, что ряд полярных метаболитов и липидов можно детектировать в биологических образцах, полученных из 10 тыс. клеток, однако наибольшее число детектируемых метаболитов достигается при анализе образцов от 500 тыс. клеток и выше. Разработанный подход был применен к анализу клеток, облученных ТГц рабочей станции НЛСЭ «Изучение воздействия ТГц излучения на живые системы» [2]. Метаболомный анализ позволил получить данные об относительном содержании 407 метаболитов, из которых 40 достоверно различались между группами клеток, облученных ТГц, и контрольной группой.

Работа по облучению клеток ТГц была выполнена на уникальной установке Новосибирский лазер на свободных электронах на базе ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» при поддержке гранта РФФ (Проект No. 19-72-202).

1. N. V. Basov, A. D. Rogachev et al. Talanta, 2024, Vol. 267, 125168
2. Kulipanov G.N. et al. IEEE Trans Terahertz Sci Technol, 2015. Vol. 5, № 5

34

Генные сети клеточного ответа на терагерцовое излучение, реконструированные на основе анализа метаболомных данных

Author: Макарова Аэлита-Луиза Алексеевна¹

Co-authors: Бутикова Екатерина Алексеевна²; Басов Никита Вячеславович³; Рогачев Артем Дмитриевич³; Иванисенко Тимофей Владимирович⁴; Деменков Павел Сергеевич⁵; Покровский Андрей Георгиевич⁶; Колчанов Николай Александрович⁵; Иванисенко Владимир Александрович⁵

¹ Институт цитологии и генетики СО РАН

² Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

³ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

⁴ Институт цитологии и генетики СО РАН; Курчатовский геномный центр ИЦиГ СО РАН

⁵ Институт цитологии и генетики СО РАН; Новосибирский Государственный Университет; Курчатовский геномный центр ИЦиГ СО РАН

⁶ Новосибирский Государственный Университет

В связи с развитием технологий применения терагерцового (ТГц) излучения необходимо исследовать его воздействие на живые организмы. Известно, что в культурах клеток, подвергшихся ТГц облучению, наблюдаются нарушения ряда биологических процессов, ассоциированных с изменением экспрессионных [1, 2] и протеомных [3] профилей. В частности, описана дисрегуляция биологических процессов, протекающих в митохондриях [2]. Поглощение ТГц излучения мембранами митохондрий может приводить к повреждению надмолекулярных структур, расположенных на мембранах митохондрий, нарушая транспорт метаболитов и функции ферментов биосинтеза и деградации метаболитов.

В настоящей работе были проанализированы данные метаболомного скрининга клеток меланомы человека по контрольной точке через три дня после облучения лазером с частотой 2,3 ТГц и

идентифицированы 40 метаболитов со значимо различающейся концентрацией относительно контроля. На основании гипотезы о влиянии ТГц на митохондриальные мембраны была реконструирована генная сеть регуляции ферментов превращения значимых метаболитов митохондриальными белками-транспортерами. Анализ генной сети позволил выявить потенциальные механизмы нарушения путей энергетического обмена, ассоциированные с воздействием ТГц излучения на митохондриальные мембранные белки и надмолекулярные структуры липидных рафтов.

Биоинформатический анализ был проведен при поддержке бюджетного проекта FWNR-2022-0020.

1. Alexandrov B. S. et al. Specificity and heterogeneity of terahertz radiation effect on gene expression in mouse mesenchymal stem cells //Scientific reports. – 2013. – Т. 3. – №. 1. – С. 1184.
2. Bogomazova A. N. et al. No DNA damage response and negligible genome-wide transcriptional changes in human embryonic stem cells exposed to terahertz radiation //Scientific reports. – 2015. – Т. 5. – №. 1. – С. 7749.
3. Bannikova S. et al. Specific Features of the Proteomic Response of Thermophilic Bacterium *Geobacillus icigianus* to Terahertz Irradiation //International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Т. 23. – №. 23. – С. 15216.

35

Исследование воздействия ТГц-излучения на клетки меланомы человека с применением метаболомного анализа методом ВЭЖХ-МС/МС

Author: Екатерина Алексеевна Бутикова¹

Co-authors: Басов Никита Вячеславович²; Рогачев Артем Дмитриевич²; Евгений Владимирович Гайслер³; Иван Алексеевич Разумов⁴; Василий Михайлович Попик⁵; Коломеец Дарья Андреевна⁶; Мария Сотникова³; Чересиз Сергей Владимирович³; Соловьева Ольга Игоревна⁷; Андрей Георгиевич Покровский³; Каныгин Владимир Владимирович⁸; Винокуров Николай Александрович⁹

¹ Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН

² Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

³ Новосибирский Государственный Университет

⁴ Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН; Институт цитологии и генетики СО РАН

⁵ Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН

⁶ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

⁷ Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН; Институт цитологии и генетики СО РАН

⁸ Новосибирский Государственный Университет; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;

⁹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН; Новосибирский Государственный Университет

В последние годы наблюдается значительный прогресс в сфере технологий, связанных с терагерцовым (ТГц) излучением, что делает необходимым проведение систематических исследований, направленных на оценку биологической безопасности данного вида излучения. Метаболомный скрининг представляет собой комплекс методов и подходов, направленных на исследование низкомолекулярных биомолекул — метаболитов, которые участвуют в биохимических процессах в клетках, тканях и биологических жидкостях. Анализ метаболитов позволяет получить представление о молекулярном фенотипе живой системы, а также даёт возможность динамически оценить многочисленные метаболические пути и их дисрегуляцию [1]. Метаболомный профиль, который представляет собой совокупность всех метаболитов, отражает как внутренние патофизиологические процессы в клетке или организме, так и воздействие факторов окружающей среды [2]. Целью

настоящей работы было изучить воздействие терагерцового излучения на клетки меланомы человека линии SK-MEL-28 с применением метода таргетированного метаболомного скрининга с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии и tandemной масс-спектрометрии (ВЭЖХ-МС/МС). Клетки были подвергнуты облучению с частотой 2,3 ТГц в течение 10 и 45 минут. Клеточные метаболиты анализировали через три дня после облучения. Для контроля выживаемости и пролиферативной активности проводили МТТ и клоногенный тесты. По данным клеточных тестов, облучение как ТГц, так и ИК не приводило к гибели клеток. Можно отметить только снижение выживаемости на 13% по данным МТТ теста и на 10% по результатам клоногенного теста группы, которая подверглась терагерцовому излучению в течение 45 минут. В тоже время, метаболомный скрининг показал, что терагерцовое излучение вызвало заметные изменения в путях деградации пуринов и пиримидинов. Особенно значимые изменения были отмечены в процессе деградации аденозинтрифосфата (АТФ). Наблюдалось изменение соотношения между снижением уровня предшественников и увеличением количества конечных продуктов метаболизма. Кроме того, была обнаружена неспецифическая реакция метаболитов липидного профиля на терагерцовое и инфракрасное излучение. Работа выполнена на уникальной установке Новосибирский лазер на свободных электронах на базе ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» при поддержке гранта РНФ (Проект No. 19-72-202).

1. Sarmand S. [et al.] A proposed framework to evaluate the quality and reliability of targeted metabolomics assays from the UK Consortium on Metabolic Phenotyping (MAP/UK) // Nat Protoc. 2023. P. 1017-1027.

2. Macel M., Van Dam N.M., Keurentjes J.J. Metabolomics: the chemistry between ecology and genetics // Molecular ecology resources. 2010. T. 10., № 4., С. 583-593.

36

Многоуровневая организация тонких пленок углеродных нанотрубок для ТГц приложений

Authors: Никита Рагинов¹; Арина Радивон²; Алексей Езерский³; Алексей Черных³; Александр Терентьев²; Кирилл Живетьев²; Игнат Раков¹; Глеб Катывба⁴; Илья Новиков¹; Елизавета Циплакова³; Максим Пауков²; Владимир Старченко²; Алексей Арсенин²; Игорь Спектор⁵; Сергей Кузнецов⁶; Кирилл Зайцев⁵; Николай Петров³; Мария Бурданова²; Борис Горшунов²; Валентин Волков²; Альберт Насибулин¹; Дмитрий Красников¹

¹ Сколковский Институт науки и технологий, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия / Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка, Россия

⁵ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁶ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Corresponding Author: d.krasnikov@skoltech.ru

Уникальный набор механических, электрических и оптических свойств углеродных нанотрубок в течение нескольких десятилетий вдохновлял ученых и инженеров на создание новых материалов и устройств в различных областях жизнедеятельности: от медицины до авиации, от телекоммуникаций до строительных технологий. Несмотря на существенный прогресс в области функциональных материалов, обеспечивающий постепенное внедрение нанотрубок в такие изделия науки техники, как антистатические покрытия, литий-ионные аккумуляторы и полимерные композиты, развитие решений на основе углеродных нанотрубок в оптоэлектронике и биомедицине ограничено. Данная ситуация не в последнюю очередь связана с недостаточным контролем свойств нанотрубок. Так, например, обычно рассматриваемые в качестве слабых ван-дер-Ваальсовы силы обеспечивают настолько сильное аксиальное взаимодействие углеродных нанотрубок, что их неразрушающее разделение становится практически невозможным. В настоящем докладе представлен обзор недавних работ по настройке углеродных нанотрубок для создания элементной базы в ТГц диапазоне. Выделяя пять уровней организации материала («индивидуальные нанотрубки» [1, 2], «агломераты нанотрубок» [2], «сеть агломератов» [3], «структурированный аэрогель» [4, 5], «система аэрогелей» [6]), мы трансформируем

полифонию свойств углеродных нанотрубок для создания модуляторов, сенсоров и других ТГц устройств.

Авторы благодарят совместную Сколтех-МФТИ-ИТМО программу «Клевер».

- [1] Maria G. Burdanova, et al. Carbon 173 (2021) 245
- [2] Daria S. Kopylova, et al. Carbon 167 (2020) 244
- [3] Илья V. Novikov, et al. ACS Applied Materials and Interfaces 14 (2022) 18866
- [4] Maksim I. Paukov, et al. Ultrafast Science 3 (2023), 1
- [5] Gleb M. Katyba, et al. Optica 10 (2023), 53
- [6] Илья V. Novikov, et al. Chemical Engineering Journal 485 (2024), 149733
- [7] Arina V. Radivon, et al. Advanced Optical Materials (2024) in press, 10.1002/adom.202303282

37

Синергия молекулярного моделирования и малоуглового рентгеновского рассеяния для изучения биомолекул

Author: irina Shchugoreva^{None}

Co-authors: Анна Кичкайло¹; Владимир Заблуда²; Полина Артюшенко¹; Роман Морячков¹; Феликс Томилин³

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН

² ИФ СО РАН

³ ИФ СО РАН

Corresponding Author: shchugorevai@mail.ru

Совместное применение молекулярного моделирования и малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) является многообещающим методом для детального исследования структуры и механизмов функционирования аптамеров при их взаимодействии с мишенями. Этот подход способствует повышению точности структурной характеристики аптамеров, что важно для их применения в областях биомедицины и биотехнологии. Благодаря такому комплексному подходу в работе были установлены конформации не только аптамеров в растворе, но и их комплексов с белковыми мишенями, которые давали хорошее согласие с экспериментальными данными МУРР. Для полученных комплексов была проведена оптимизация геометрии с помощью метода FMO, и далее был проведен PIEDA-анализ, который позволяет разложить общую энергию взаимодействия между двумя или более молекулами на составляющие, такие как электростатическое взаимодействие, обменное взаимодействие, дисперсионные и другие вклады. Это помогает понять, какие силы доминируют в межмолекулярных взаимодействиях и как они влияют на стабильность и свойства молекулярных комплексов. А также позволяет выявить какие нуклеотиды и аминокислоты отвечают за наиболее сильное и слабое взаимодействие, что позволяет модифицировать состав и структура аптамера с целью повышения специфичности и силы связывания.

38

Коррекция фазовых ошибок сверхпроводящего ондулятора

Authors: Pavel Kanonik¹; Nikolay Mezentsev¹

Co-authors: Vitaliy Shkaruba²; Sergey Khrushchev²; Fedor Kazantsev²; Valeriy Tsukanov²; Aleksandr Erokhin²; Artem Zorin²; Andrey Sedov³; Olga Tarasenko²; Askold Volkov²

¹ Budker Institute of Nuclear Physics

² BINP

³ *Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН*

Corresponding Author: kanpoul@mail.ru

В данной статье представлен метод коррекции магнитного поля сверхпроводящего ондулятора с нейтральными полюсами. Для коррекции поля и орбиты внутри ондулятора использовались основные обмотки ондулятора, которые были сгруппированы в отдельные группы и получали дополнительные токи. В статье представлены результаты коррекции. Были построены графики суммарной и локальной фазовых ошибок для всего диапазона магнитных полей ондулятора. Суммарная фазовая ошибка составила 3,5 градуса, а локальная – 1,9 градуса для максимального поля 1,2 Т. Спектры спектральной яркости синхротронного излучения (СИ) до и после коррекции были рассчитаны с помощью программы SPECRA для поля 1,2 Т.

39

Методы метрологии высокоточных крупногабаритных зеркал для синхротронных применений

Author: Egor Petrakov^{None}

Co-authors: Николай Чхало¹; Егор Глушков¹; Алексей Чернышев¹

¹ *ИФМ РАН*

Corresponding Author: pet.e@mail.ru

В связи с модернизацией синхротронов 3-го и синхротронов 4-го поколения стала еще более актуальной проблема точности рентгеновских зеркал, где фазовые ошибки должны быть менее четверти длины волны, а допустимые ошибки формы крупногабаритных (до метра и более) рентгеновских зеркал составляют менее 1 нм. Поэтому для достижения этого уровня в последние годы проводятся активные исследования, как в области изготовления, так и высокоточной метрологии. Специфика этих зеркал: большие габаритные размеры, до 1 м и более, часто превышающие рабочую апертуру измерительного оборудования; часто асферическая форма поверхности и высокая, на уровне 1 нм и менее точность формы. Из теплофизических характеристик в качестве материала, чаще всего используется монокристаллический кремний.

Основным методом измерений формы оптических элементов и систем, обеспечивающим наивысшую точность измерений, является высококогерентная интерферометрия. На точность интерферометрических измерений значительное влияние оказывает ряд фундаментальных факторов, таких как ошибки эталона и оптической системы регистрирующего тракта, а также ошибки математической реконструкции трехмерного профиля по интерферометрическим данным. Точнейшие интерферометры имеют рабочую апертуру 4 и 6 дюймов, что не достаточно для проведения измерений крупногабаритных зеркал. Еще меньшую область на зеркале можно измерить на асферических зеркалах, так как в пределах кадра число интерференционных полос становится большим, зачастую не поддающихся расшифровке. Еще одна проблема интерферометрии появилась с приближением точности формы изготавливаемого зеркала к 1 нанометру. На регистрируемых интерферограммах возникают паразитные интерференционные кольца, препятствующие дальнейшему повышению точности измерений.

В докладе сообщается о способах решения этих проблем, развитых в данной работе. В частности проблему паразитных интерференций удалось решить за счет создания оригинального фильтра, применение которого не вносит искажений в измеряемый профиль. Для подтверждения этого вывода была разработана методика верификации его корректности. Проблема габаритов, превышающих рабочую апертуру 4 дюймового интерферометра Zygo, а так же асферичности исследуемых зеркал решена за счет технологии «сшивки» отдельных кадров. Так же разработана методика учета ошибок эталона на результаты измерений.

Эффективность развитых методов продемонстрирована на примере плоских и асферических зеркал, изготовленных в ИФМ РАН в рамках выполнения проектов для СКИФа.

40

Импульсные магнитные измерения 128-полюсного сверхпроводящего ондулятора

Authors: Fedor Kazantsev¹; Nikolay Mezentssev²

Co-authors: Alexey Bragin²; Aleksandr Erokhin¹; Pavel Kanonik²; Sergey Khrushchev¹; Andrey Sedov³; Vitaliy Shkaruba¹; Olga Tarasenko¹; Valeriy Tsukanov¹; Askold Volkov¹; Artem Zorin¹

¹ BINP

² Budker Institute of Nuclear Physics

³ Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН

Corresponding Author: fedor52k@gmail.com

Рассмотрен метод измерения магнитных полей вигглеров и ондуляторов на основе проволоки с импульсным током, в качестве скоростной альтернативы измерениям датчиком Холла. Этот метод является привлекательной основой для создания системы точной настройки ондуляторов, которая может работать в оперативном режиме, поскольку единичное измерение магнитной структуры занимает всего несколько секунд. Рассмотрены теоретические аспекты этого метода. Описана экспериментальная установка для измерений. Измерения импульсного проволочного поля проводились с помощью сверхпроводящего 128-полюсного ондулятора с амплитудой магнитного поля 1,15 Тесла и магнитным периодом 15,6 мм. Были применены алгоритмы математической коррекции исходных данных для устранения влияния дисперсионных свойств проволоки, а также шумов электроники. Полученные данные затем были преобразованы в картину структуры магнитного поля, также была рассчитана фазовая ошибка, как локальная, так и интегральная. Обсуждаются полученные результаты и дальнейшая работа.

41

Российские сверхпроводящие материалы для ускорительной техники

Authors: Ильдар Абдюханов¹; Анастасия Цаплева¹; Максим Алексеев¹

¹ ВНИИИМ

Corresponding Author: imabdyukhanov@bochvar.ru

Для создания магнитных систем ускорителей элементарных частиц, синхротронов, устройств управляемого термоядерного синтеза, магниторезонансных томографов, спектрометров и т.д., широко используются сверхпроводящие материалы.

Высокотехнологический Научно-Исследовательский Институт Неорганических Материалов им. академика А. А. Бочвара (АО «ВНИИИМ») осуществляет разработку конструкций и технологий изготовления композиционных сверхпроводников, используемых для создания таких магнитных систем.

В работе представлен обзор отечественных сверхпроводящих материалов, разработанных в АО «ВНИИИМ». Описаны низкотемпературные сверхпроводники на основе соединения Nb₃Sn, в том числе такие, которые по своим свойствам отвечают требованиям, предъявленным со стороны международной организации ЦЕРН для сверхпроводников, предназначенных для магнитной системы ускорителя HL-LHC. Также в работе показаны свойства Nb₃Sn сверхпроводников, которые являются перспективными для ускорителей следующего поколения, например, FCC. Описанные Nb₃Sn сверхпроводники характеризуются токонесущей способностью от 800 А/мм² до 2900 А/мм² при температуре 4,2 К в магнитном поле 12 Тл.

Описаны низкотемпературные сверхпроводники на основе сплава Nb-Ti, разработанные в АО «ВНИИИМ», включая те, которые могут быть применены для создания сверхпроводящих магнитных систем синхротронов.

Представлены результаты работ АО «ВНИИИМ» по высокотемпературным сверхпроводникам.

42

Исследование зависимости энергетического разрешения матричных сенсоров рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, от размера пикселей

Authors: Антон Тяжев¹; Александр Винник¹; Андрей Зарубин¹; Олег Толбанов¹

¹ *Томский государственный университет*

Corresponding Author: antontyazhev@mail.ru

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований и моделирования амплитудного спектра матричных сенсоров рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, компенсированного хромом (HR GaAs:Cr), проводимых лабораторией детекторов синхротронного излучения Центра «Перспективные технологии в микроэлектронике» Томского государственного университета.

Экспериментальным путем установлено, что оптимальный размер пикселя, обеспечивающий энергетическое разрешение на уровне 3-4 кэВ при комнатной температуре достигается при размере пикселей в диапазоне 130 – 200 мкм при толщине HR GaAs:Cr сенсора на уровне 500 мкм.

Расчет амплитудного спектра и энергетического разрешения матричных HR GaAs:Cr сенсоров выполнялся с использованием ПО Alpix2. Представлены результаты расчета и проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта № 075–15-2022-1132 от 01.07.2022 г.

44

Сверхпроводящие вставные устройства для генерации СИ на ЦКП СКИФ

Author: Vitaliy Shkaruba¹

Co-authors: Eugeny Gusev¹; Aleksandr Erokhin¹; Artem Zorin¹; Fedor Kazantsev¹; Pavel Kanonik²; Artem Kremnev³; Nikolay Mezentsev²; Alexander Safronov¹; Andrey Sedov⁴; Olga Tarasenko¹; Sergey Khrushchev¹; Valeriy Tsukanov¹; Alexey Bragin²; Askold Volkov¹

¹ *ВИНП*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *Винп*

⁴ *Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН*

Corresponding Authors: shkaruba@mail.ru, volkov@inp.nsk.su

Использование сверхпроводящих вставных устройств на ЦКП СКИФ с энергией электронов 3 ГэВ, позволит генерировать синхротронное излучение с параметрами, не уступающими, и даже превосходящими параметры излучения из поворотных магнитов накопителей электронов с высокой энергией до 6 ГэВ. В первой очереди ЦКП СКИФ будет введено в строй пять станций на основе двух сверхпроводящих вигглеров и трех сверхпроводящих ондуляторов с различными параметрами, оптимизированными под исследовательские задачи. Статус работ по созданию сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов для ЦКП СКИФ представлен в данном докладе.

45

Излучение закрученных фотонов электроном в магнитном поле

Authors: Ilya Pavlov¹; Dmitry Karlovets²

¹ ITMO University

² ITMO University

Corresponding Author: ilya.pavlov@metalab.ifmo.ru

Теория излучения релятивистских частиц активно развивалась в середине 20-го века, что имело большое значение для разработки и практического применения мощных источников электромагнитных волн - синхротронов [1]. Кроме того, она играет ключевую роль в описании таких астрофизических объектов, как нейтронные звезды [2]. Важнейший квантовый эффект, обычно не рассматриваемый в контексте этой задачи, состоит в том, что излученный фотон квантово запутан с электроном. Из-за этого состояние излученного фотона может оказаться разным в зависимости от способа детектирования конечного состояния системы [3]. В отличие от традиционного подхода, где одновременно фотон и электрон считаются обнаруженными в определенном состоянии, в настоящей работе мы предполагаем, что детектируется только электрон. Такой подход позволяет не только изучать вероятности переходов между конкретными состояниями электрона, но и явно получать состояния излученных фотонов «самих по себе», т. е. независимо от детектора. Поскольку состояния электрона в однородном магнитном поле (релятивистские уровни Ландау) обладают определенными значениями полного углового момента, можно предположить, что при переходе между состояниями угловой момент должен передаваться излученному фотону, что уже было проверено в рамках классической теории [4] и в рамках КЭД для скалярной заряженной частицы [5].

В настоящей работе в формализме КЭД в картине Фарри получен векторный потенциал фотона, излучаемого электроном в магнитном поле. Показано, что излученный фотон является пучком Бесселя, распространяющимся вдоль магнитного поля. Явно продемонстрировано, что состояние фотона является собственным для оператора проекции полного углового момента на направление магнитного поля, то есть часть углового момента электрона действительно передается фотону. Также проведен анализ вероятности и интенсивности излучения фотонов с определенными значениями углового момента для различных параметров начального и конечного электрона. Обнаружено, что в сильном магнитном поле преобладает излучение фотонов с угловым моментом порядка единицы, в то время как излучение «незакрученных» фотонов сильно подавлено. При этом интенсивность излучения закрученных фотонов с конкретным угловым моментом почти не зависит от импульса начального электрона.

1. Sokolov A., Ternov I. M. Relativistic electron //Moscow Izdatel Nauka. – 1974.
2. Bordovitsyn V. A. et al. Synchrotron radiation theory and its development: in memory of IM Ternov. – World Scientific, 1999. – Т. 5.
3. Karlovets D. V. et al. Generation of vortex particles via generalized measurements //The European Physical Journal C. – 2022. – Т. 82. – №. 11. – С. 1008.
4. Katoh M. et al. Angular momentum of twisted radiation from an electron in spiral motion //Physical Review Letters. – 2017. – Т. 118. – №. 9. – С. 094801.
5. Karlovets D., Di Piazza A. Emission of twisted photons by a scalar charged particle in a strong magnetic field //Physical Review D. – 2023. – Т. 108. – №. 6. – С. 063007.

ДИНАМИКА ПЛОТНОСТИ СТРУИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНЫ

Author: Vyacheslav Khalemenchuk^{None}

Co-authors: Konstantin Ten ¹; Eduard Pruel ¹; Alexey Kashkarov ¹; Alexander Tumanik ¹; Anastasia Glushak ²; Ivan Rubtsov ³

¹ *Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk National Research State University", Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Novosibirsk State Technical University State University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; National Research TM State University, Tomsk, 634050, Russian Federation*

³ *Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; The Center for Collective use "Siberian ring photon source" of the Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center "G.K. Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" name of the organization, Novosibirsk, 630559, Russian Federation*

Corresponding Authors: a.a.glushak@inp.nsk.su, kashkarov@hydro.nsc.ru, pruel@hydro.nsc.ru, kten276@gmail.com, rubtsov@hydro.nsc.ru

В работе исследовалось образование микропотоков под действием ударной волны (УВ) из прямого стыка в дисках из алюминиевого сплава и меди. Диски собирались из двух одинаковых по материалу полудисков.

Выход УВ на свободную поверхность (СП) и ее взаимодействие с материалом стенок щели приводит к формированию пылевого потока с последующим образованием мелкодисперсных частиц, двигающихся с скоростями значительно превышающими скорость свободной поверхности деталей.

Исследование выброса частиц проводилось методом импульсной рентгенографии синхротронным излучением на станции «Субмикросекундной диагностики», ускорительного комплекса ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (энергия электронов 2 ГэВ, магнитная индукция в вигглере $B=2T$, ток в двух банчах 100 мА). После коллимирования поток СИ представляет собой полосу высотой 0,2 мм и шириной 40 мм.

Регистрация рентгеновской тени осуществлялась однокоординатным газовый детектор DIMEX с пространственным разрешением 512 каналов шагом 100 мкм и внутренней памятью детектора позволяющей записывать 100 кадров (распределений плотностей) с промежутком времени между кадрами 124 нс.

В докладе представлены экспериментальные результаты регистрации динамики линейной плотности и скорости потока частиц. Проведено сравнение потоков микрочастиц из алюминиевых сплавов и меди. Показана эффективность использованной методики для исследования процессов пыления из конструкционных стыков. Результаты работы важны для анализа корректности работы устройств ударного нагружения.

47

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

Author: Anna Kocheneva¹

Co-authors: Aleksey Lemzyakov²; Marat Sharafutdinov³

¹ *Institute of Nuclear Physics*

² *Budker INP SB RAS*

³ *ISSCM SB RAS, BINP SB RAS*

Corresponding Author: anna.kocheneva@gmail.com

Основная цель проделанной работы – определить взаимосвязь режима вакуумного напыления со свойствами получаемых покрытий. В связи с этим на экспериментальной станции ускорителя ВЭПП-3 было произведено исследование тонких пленок методом рентгеновской рефлектометрии.

Этот метод позволяет производить неразрушающий анализ покрытий и определять их параметры, такие как толщина, плотность, а также шероховатость поверхности и интерфейса.

В дальнейшем планируется получать покрытия с определенными заданными свойствами для решения разных научных задач, например, для проведения экспериментов в области ТГц оптики.

48

In situ рентгеновские дифракционные исследования роста тонких пленок YSZ и GDC с использованием синхротронного излучения.

Author: Anna Shipilova^{None}

Corresponding Author: lassie2@yandex.ru

В данной работе исследовалось формирование и эволюция во времени кристаллической структуры тонких пленок $ZrO_2:Y_2O_3$ (YSZ) и $Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_2$ (GDC), наносимых методом реактивного магнетронного распыления. Нанесение пленок проводилось в вакуумной установке, специально разработанной для *in situ* рентгеновских дифракционных исследований роста тонких пленок с использованием синхротронного излучения. Показано, что текстура формируемых пленок определяется температурой подложки. При осаждении пленок YSZ при температуре подложки 100–187°C происходит формирование покрытий с кубической кристаллической решеткой с преимущественной ориентацией (200). Пленки GDC, нанесенные при схожих условиях, также обладают кубической кристаллической решеткой, но в процессе их роста происходит изменение преимущественной ориентации с (111) на (220). Таким образом, для получения пленок YSZ и GDC с преимущественной ориентацией (111), т.е. получения пленок с большей ионной проводимостью, необходимо повышать температуру подложки или использовать напряжение смещения подложки для увеличения подвижности адсорбирующихся атомов. Также показано, что в обеих пленках при используемых параметрах осаждения формируются сжимающие остаточные напряжения, которые немного уменьшаются по амплитуде с увеличением толщины пленок за счет увеличения размера зерна. Таким образом, синхротронное изучение является эффективным инструментом для анализа эволюции структуры пленок в процессе их роста, что может быть использовано для получения пленок с заданной структурой и свойствами.

49

Ударно-волновое инициирование ТАТБ

Authors: Константин Тен^{None}; Эдуард Прууэл¹; Иван Рубцов¹; Алексей Кашкаров¹; Алексей Студенников²; Вячеслав Халеменчук¹; Александр Туманик¹; Анастасия Глушак³; Лев Шехтман³; Борис Толочко⁴; Евгений Смирнов⁵; Александр Музыря⁵; Кирилл Просвирнин⁵

¹ ИГиЛ СО РАН

² ЦКП «СКИФ»

³ ИЯФ СО РАН

⁴ ИХТТУМ СО РАН

⁵ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Corresponding Author: kten276@gmail.com

Исследование ударно-волнового инициирования через сплошную среду (оргстекло) состава на основе ТАТБ проводилось параллельно несколькими методиками: рентгенографической киносъемкой с помощью Синхротронного излучения (СИ) от накопителя ВЭПП-4 (ИЯФ СО РАН), радиоинтерферометром РИФ (длина волны 3 мм), а также наружной съемкой на СФР.

Накопитель ВЭПП-4 работал в режиме с 6-ю электронными ступками (банчами). При таком режиме рентгеновские импульсы (длительность 100 пс) следуют через 203 нс. Регистрация велась детектором DIMEX с размером кадра 50 мм (при пространственном разрешении 100 мкм) и объемом памяти на 100 кадров.

Параллельно процесс детонации регистрировался радиоинтерферометром РИФ (длина волны 3 мм), на котором также видны этапы развития детонации.

Дополнительно проводилась съемка на СФР формы кривизны фронта детонации. Предложена методика восстановления распределения плотности на фронте детонации ВВ на основе ТАТБ. Рассмотрена точность полученного профиля плотности.

50

Регистрация потока микрочастиц вольфрама синхротронной радиографией и PDV.

Authors: Константин Тен¹; Эдуард Прууэл¹; Иван Рубцов¹; Алексей Кашкаров¹; Вячеслав Халеменчук¹; Алексей Студенников²; Александр Туманик¹; Артур Асылкаев³; Лев Шехтман⁴; Борис Толочко⁵; Евгений Смирнов⁶; Александр Гармашев⁷; Дмитрий Кучко⁶; Дмитрий Петров⁶; Антон Федоров⁶

¹ ИГиЛ СО РАН

² ЦКП «СКИФ»

³ НГУ

⁴ ИЯФ СО РАН

⁵ ИХТТМ СО РАН

⁶ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

⁷ 5ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Corresponding Author: kten276@gmail.com

При выходе сильной ударной волны на свободную поверхность металлов происходит выброс облака микрочастиц (облако «пыли»). Интерес к этому явлению связан с влиянием выброса «пыли» на результаты измерений динамики движения СП с использованием теневых, электроконтактных и лазерных методов регистрации движения. Экспериментальное исследование этих процессов сильно затруднены из-за малых размеров микрочастиц (1 – 100 мкм) и больших скоростей их полета (1-5 км/с). Наиболее часто используются лазерные системы ЛГМ и пьезодатчики. Их достоинства – многоканальность и возможность транспортировки. А недостатки – низкая точность и сложность калибровки показаний. Синхротронное излучение дает возможность получения многих радиографических снимков (кино) процесса зарождения и динамики облака микрочастиц.

В докладе приводятся результаты одновременного измерения динамики пылевого облака из вольфрамовых микрочастиц тремя методиками – лазерной PDV, пьезодатчиками и синхротронного кино. Опыты проводились на ускорительном комплексе ВЭПП-3 – ВЭПП-4 в Институте ядерной физики СО РАН. Облако микрочастиц создавалось взрывным метанием порошка вольфрама.

Показано, что интегрально все методики равноценны, но «быстрые» измерения плотности облака видны только при радиографии с помощью СИ.

Список литературы

1. А.Л. Михайлов. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности. / Михайлов А.Л., Огородников В. Л., Раевский В.А., и др. // ЖЭТФ, 2014, Т. – 145, № – 5, С. – 892-905.
2. Титов В. М. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов / В. М. Титов, Э. Р. Прууэл, К. А. Тен. И др. // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, № – 6. С. 3–15.

51

Стенд для аттестации рентгенооптических элементов и систем для синхротронных применений

Author: Дмитрий Реунов^{None}

Co-authors: Егор Глушков ; Илья Малышев ; Михаил Михайленко ; Егор Петраков ; Алексей Чернышев ; Николай Чхало

Corresponding Author: reunov_dima@ipmras.ru

Спецификой синхротронных источников рентгеновского излучения является значительная удаленность источника СИ от экспериментальных станций и направленность пучков. Большая удаленность накладывает жесткие требования на свойства сканирующих механических систем. Поэтому для их использования важна калибровка перемещений, учитывающая даже суб-микрорадианные угловые ошибки подвижек. Из-за сильной дифракции видимого света и скользящего падения излучения на зеркала традиционная лазерная юстировка не обеспечивает требуемых точностей. Для финальной аттестации влияния элементов рентгеновской оптики на угловые ошибки отраженного пучка, изучения фокусирующих свойств зеркал необходимы лабораторные измерения на рентгеновском пучке приближенные к условиям, которые будут на синхротронах.

Для решения этих проблем в ИФМ РАН создан лабораторный стенд, состоящий из острофокусной рентгеновской трубки и коллимирующей системы Киркпатрика-Баеза с зеркалами в виде цилиндрических параболоидов. Фокусное расстояние системы составляет 1 м, угловая расходимость рентгеновского пучка составляет ± 20 мкрад. Тем самым, образуется мнимый источник на большом расстоянии от системы, тем самым система моделирует пучок СИ на СКИФе. В докладе подробно описываются характеристики зеркал и коллимирующие свойства К-Б системы. На примере тестирования оптической части двухзеркального монохроматора и фокусирующих зеркал для К-Б системы, а так же калибровки линейных подвижек от компании xHuber разрабатываемых в ИФМ РАН для СКИФа, продемонстрированы возможности данного стенда. Сообщается о планах дальнейшего развития стенда.

52

Дифрактометр высокого разрешения с системой кристаллов-мультианализаторов

Authors: Maxim Syrtanov¹; Zakhar Vinokurov²; Alexander Shmakov³; Vladimir Denisov⁴; Anton Teresov⁵; Konstantine Beskonchin⁶; Sergey Kovalsky^{None}; Aleksey Gogolev⁷; Egor Smolyanskiy⁷; Viacheslav Eruntsov¹; Alexander Rau⁸; Nikolai Sotnikov⁸

¹ Tomsk polytechnic university

² SRF SKIF, BIC SB RAS

³ Boreskov Institute of Catalysis SD RAS

⁴ HCEI SB RAS

⁵ Institute of high current electronics SB RAS

⁶ Institute of High Current Electronics

⁷ Tomsk Polytechnic University

⁸ Joint Stock Company «OMEGA»

Corresponding Author: maxim-syrtanov@mail.ru

Одной из ключевых задач при создании новых функциональных и конструкционных материалов является анализ их структурно-фазового состояния. Особый интерес представляет информация об изменении структуры и фазового состава разработанных материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным (агрессивные среды, высокая и низкая температуры, повышенное давление и т.д.), так как на ее основе появляется возможность прогнозирования свойств конечного изделия. Такая информация может быть получена из *in situ* данных дифракционных измерений на источниках синхротронного излучения. В ряде случаев появляется необходимость в разрешении перекрывающихся рефлексы или точном определении параметров решетки исследуемого образца при очень малых изменениях. Для реализации указанных задач был спроектирован

дифрактометр высокого разрешения, оснащенный многоканальной системой кристалло-мультианализаторов, позволяющей значительно уменьшить вклад инструментальной функции в ширину рефлексов изучаемого материала.

В настоящей работе представлены описание конструкции дифрактометра высокого разрешения (ДВР) и его основные технические характеристики. ДВР предназначен для проведения дифракционных измерений с высоким угловым и энергетическим разрешением на станции 1-2 «Структурная диагностика» источника синхротронного излучения СКИФ. ДВР представляет собой комплексную многоосевую систему, включающую 2-кружной тета/2тета гониометр на который дополнительно устанавливается альфа/2альфа гониометр для системы детектирования на базе 9 кристалло-мультианализаторов. Также ДВР включает систему позиционирования образца XYZ и основание, позволяющее выставить дифрактометр относительно пучка СИ. Основные параметры тета гониометра: диапазон перемещений – $\pm 180^\circ$; разрешение – $> 0,001^\circ$; осевая нагрузка на плечо 250 мм – 35 кг. Для 2тета гониометра характерны следующие параметры: диапазон перемещений – -5° – $+180^\circ$; разрешение – $> 0,001^\circ$; осевая нагрузка на плечо 250 мм на радиусе 425 мм – 50 кг. Технические характеристики альфа гониометра: диапазон перемещений – $\pm 45^\circ$; разрешение – $> 0,0003^\circ$; расстояние между осями гониометров альфа/2альфа и тета/2тета – 425 мм. Основные параметры 2альфа гониометра: диапазон перемещений – $\pm 45^\circ$; разрешение – $> 0,001^\circ$; осевая нагрузка на плечо 250 мм на радиусе 370 мм – 30 кг. Детекторная сборка ДВР имеет следующие характеристики: количество каналов регистрации – 9, квантовая эффективность при 6-27 кэВ – $> 60\%$, емкость канала – > 12 бит; быстродействие – $> 10^4$ сч/с. Теоретический расчет показал, что на энергии 17,5 кэВ в области кварцевого триплета (SRM 1878a, 2тета- 30°) инструментальный вклад в ширину дифракционной линии составит $\sim 0,0026^\circ$.

53

Дополнительная функция дУТФаз T5-подобных фагов

Author: Азат Габдулхаков¹

Co-authors: Анатолий Глухов¹; Виктор Марченков¹; Ульяна Джус¹; Георгий Селиханов²

¹ Институт белка РАН

² Институт белка РАН; Университет ИТМО, международный научный институт "Растворная химия передовых материалов и технологий"; ГБОУ ВО "Альметьевский государственный нефтяной институт"

Corresponding Author: azat@vega.protres.ru

дУТФазы – класс ферментов, катализирующих реакцию расщепления дУТФ до дУМФ и пирофосфатного остатка (ФФ). Регулируя уровень дУТФ и как следствие соотношение дУТФ и дТТФ в клетке, они предотвращают ошибочное включение урацила при репликации ДНК. Несмотря на то, что мутантные организмы, кодирующие неактивную дУТФазу (например, *E. coli* [*dut-1*]), остаются жизнеспособными, провести нокаут гена *dut* не возможно, что свидетельствует о дополнительной функции, выполняемой этими ферментами. В данной работе мы демонстрируем, что дУТФазы T5-подобных бактериофагов помимо канонической (ферментативной) функции выполняют дополнительную, необходимую для нормального течения литического цикла бактериофагов. Были определены кристаллические структуры дУТФаз двух представителей T5-подобных фагов, T5 и $\rho H3$, с разрешением 2,0 Å и 1,95 Å соответственно. Сравнительный анализ пространственных структур хозяйской (*E. coli*) и фаговых дУТФаз позволил выявить у последних дополнительный структурный элемент. Это короткая петля в N-концевой части белка является, по-видимому, характерной структурной особенностью дУТФаз T5-подобных бактериофагов и одним из элементов, определяющих способность выполнять дополнительную функцию в жизненном цикле фага. Удаление данного элемента никоим образом не сказалось ни на пространственной структуре, ни на ферментативной активности мутантной дУТФазы бактериофага T5, однако негативно повлияло на развитие фага в клетках *E. coli*. Кроме того, наши результаты указывают на то, что ферментативная и новая функция дУТФазы бактериофага T5 структурно и функционально не связаны и независимы друг от друга. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00510

emphasized text

54

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЭПП-3 НА СТЕНДЕ «ВЭИПС-1» ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Author: Vladimir Denisov¹

Co-authors: Mikhael Andreev²; Vladislav Yakovlev; Artem Egorov; Mikhail Savchuk²; Yulia Denisova; Andrey Leonov³; Daniil Ignatov; Sergey Kovalsky; Evgeny Ostroverkhov; Anton Teresov⁴; Alexandr Selutin; Denis Mischenko; Zakhar Vinokurov⁵; Alexander Shmakov⁶; Nikolay Ratakhin¹; Nikolay Koval⁷

¹ HCEI SB RAS

² Institute of High Current Electronics

³ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

⁴ Institute of high current electronics SB RAS

⁵ SRF SKIF, BIC SB RAS

⁶ Boreskov Institute of Catalysis SD RAS

⁷ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS)

Corresponding Author: volodyadenisov@yandex.ru

В большинстве случаев использования узлов и деталей авиационной, космической и другой техники в экстремальных условиях поверхность определяет их функциональные свойства и, как следствие, срок службы изделий в целом. Кратное сокращение времени разработки и внедрения новых материалов, способов и оборудования для их выпуска на территории Российской Федерации представляется возможным при использовании самых современных методов и методик синхротронных исследований.

В рамках выполнения мероприятий по направлению создания инфраструктуры для ускоренного развития синхротронных и нейтронных исследований на территории РФ по проекту «In situ методы синхротронных исследований многослойных функциональных структур с уникальными параметрами и свойствами, созданных пучково-плазменной инженерией поверхности» в рамках «Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы» разработан, создан и испытан в работе вакуумный электронно-ионно-плазменный стенд «ВЭИПС-1», который позволяет в режиме реального времени исследовать процессы синтеза структур и покрытий на поверхности конструкционных и функциональных материалов при использовании различных методов пучково-плазменной инженерии поверхности.

В докладе представлены первый опыт и результаты экспериментальных исследований процессов синтеза нитридных покрытий в режиме in situ с использованием синхротронного излучения накопителя электронов ВЭПП-3 в составе ЦКП СЦСТИ на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

55

Детектирование ТГц излучения в кристаллах GaSe:S на телекоммуникационной длине волны

Authors: Valery Antsygin¹; Konstantin Kokh²; Sergey Mikerin¹; Nazar Nikolaev³; Olesya Shevchenko⁴

¹ IA&E SB RAS

² IG&M SB RAS

³ IA&E SB RAS, NSU

⁴ Institute of Automation & Electrometry SB RAS, NSU

Corresponding Author: shevchenkoon@iae.nsk.su

В работе проведено исследование оптических линейных и нелинейных свойств кристаллов GaSe(1-x)Sx, где x принимает значения 0, 0,03, 0,12, 0,16 и 0,22, в ТГц- и ближнем ИК-диапазоне. Приведены результаты по измерениям коэффициентов преломления на длине волны 1547 нм и в диапазоне 0,1 - 2 ТГц. Показано, что наибольшая эффективность оптико-терагерцового преобразования в кристаллах GaSe, легированных серой, наблюдается при значении $x = 0,12$. Произведены оценки величины электрооптического и нелинейного коэффициентов кристаллов, согласно которым значение r_{22} и d_{22} для GaSe составило 1,262 и 13,9 пм/В при длине волны лазера 1,55 мкм, соответственно. Выявлен нелинейный характер изменения величины коэффициентов по мере увеличения содержания серы в структуре кристалла. Описанные в работе методы расчета величины электрооптического и нелинейно-оптического коэффициентов и полученные результаты позволят заложить основу для создания устройств радиофотоники на основе нелегированных и легированных серой кристаллов GaSe.

56

Сверхпроводящий спиральный ондулятор с рабочей энергией излучения 90-110 эВ

Authors: Andrey Sedov¹; Nikolay Mezentsev²

Co-author: Vitaliy Shkaruba³

¹ *Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *BINP*

Corresponding Author: andrey.sedov1999@gmail.com

Источники синхротронного излучения (СИ) с круговой поляризацией и энергией в диапазоне 90 - 100 эВ представляют большой интерес для фотолитографии и других исследований, поскольку в настоящее время для данного спектрального диапазона существует наиболее эффективные оптические системы, способные обеспечить требуемые параметры излучения в рабочей области. В данной работе представлена оптимизация параметров спирального сверхпроводящего ондулятора, генерирующего на своей оси одну гармонику излучения в заданном диапазоне. В статье обоснован выбор параметров ондулятора, описана его конструкция, приведены расчётные характеристики ондулятора и генерируемого им излучения для энергии электронов 1,6 ГэВ.

57

Получение вяжущего из α -оксида алюминия и корундовых безусадочных огнеупоров на его основе для эксплуатации в экстремальных условиях

Authors: Александр Жданок¹; Зоя Коротаева¹; Лилия Бердникова¹; Борис Толочко¹; Виктор Булгаков¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН)*

Corresponding Author: a-zhdanok@mail.ru

Исследовано несколько марок оксида алюминия, отработаны режимы его подготовки и методы тестирования для получения качественного вяжущего материала для безусадочных огнеупоров. Определено, что для применения в качестве вяжущего оксид алюминия должен содержать

α -фазу, при наличии других фаз его необходимо прокалить при температуре 1300-1400°C. Значения удельной поверхности должны находиться в пределах от 4,0 до 12 м²/г. Наиболее подходящими являются оксиды алюминия марки «для хроматографии» ТУ 6-09-3916-75 (без термообработки) и ТУ 6-09-426-75 после прокалки при 1300-1400°C в течение 4 часов.

С применением механохимических методов и активатора АГО-3 получен вязущий материал на основе предварительно подготовленного оксида алюминия марки ТУ 6-09-426-75 и добавки оксихлорида циркония в виде его кристаллогидрата. Эффективное количество добавки (по отношению к оксиду алюминия) составляет 10-20%, оптимальное время механохимической обработки – 2-3 минуты.

При получении огнеупоров в качестве зернистого наполнителя использовали плавленный электрокорунд фракции 0-500 мкм. Вязущее, содержащее 10 мас. % соли, смешивали с электрокорундом, добавляли воду до влажности шихты 10-13% и формовали изделие методом вибропрессования, высушивали, обжигали при 1250°C в течение 4 часов. Окончательно обжигали в проточной печи при 1600°C. Прочность образцов зависит от количества вязущего. Оптимальное соотношение вязущее:наполнитель составляет 1:3 мас. ч. После термообработки при 1250°C максимальное среднее значение предела прочности при сжатии образцов огнеупоров, полученных с использованием только дисперсного оксида алюминия без добавок, 44 МПа, с добавкой оксихлорида циркония – 120 МПа, объемная усадка образцов – менее 1%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания

Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Рег. № ЕГИСУ НИОКТР 121032500071-6).

58

Влияние механической обработки порошковой композиции и способа формования на свойства марганец-замещенных алюминатов бария

Authors: Александр Жданок¹; Зоя Коротаева¹; Лилия Бердникова¹; Борис Толочко¹; Виктор Булгаков¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН)

Corresponding Author: a-zhdanok@mail.ru

Исследовано влияние состава порошковой композиции, времени ее механической обработки и способа формования на свойства керамических образцов на основе марганец-замещенного алюмината бария. Для синтеза керамики были получены порошковые композиции на основе карбоната бария (BaCO₃), оксидов алюминия (γ -Al₂O₃) и марганца (III) (Mn₂O₃). Была исследована керамика стехиометрических составов: BaO·0,5Mn₂O₃·5,5Al₂O₃ (1) и BaO·Mn₂O₃·5Al₂O₃ (2). Керамику состава BaO·6Al₂O₃ (3) использовали в качестве образца сравнения.

Все порошковые композиции получены в активаторе АГО-3 (60g) при одинаковых условиях: загрузка в барабан обрабатываемого материала составила 100 г, загрузка мелющих тел (стальные шары диаметром 6 и 10 мм) – 1800 г, время механической обработки (МО) – 0,5; 1 и 1,5 мин. Изготовление сырцовых образцов керамики осуществляли методом полусухого прессования (давление прессования 200 МПа) и виброформования формовочной массы из порошковой композиции влажностью 12 %. Образцы сушили на воздухе в течение 24 часов, а затем в сушильном шкафу при температуре 200°C. Высокотемпературную обработку образцов проводили при температуре 1600°C.

Увеличение времени МО порошковых композиций от 0,5 до 1,5 мин приводит к увеличению плотности и предела прочности при сжатии образцов керамики, полученных из составов 1 и 3 независимо от метода формования. Для состава 2 максимальные значения плотности и прочности получены при времени МО порошковой композиции в течение 1 мин.

Методом статического прессования получены образцы керамики состава 2 с максимальной прочностью при сжатии 680,7 МПа и плотностью 3,73 г/см³. Прочность и плотность образцов, полученных методом виброформования – 485,8 МПа и 3,63 г/см³, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Рег. № ЕГИСУ НИОКТР 121032500071-6).

59

Получение гексаборида лантана методом СВС для использования в ускорительной технике

Authors: Александр Жданок¹; Лилия Бердникова¹; Зоя Коротаева¹; Борис Толочко¹; Виктор Булгаков¹; Михаил Михайленко¹; Данила Краснов¹; Виктор Кузнецов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН)

Corresponding Author: a-zhdanok@mail.ru

В работе использовали метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения гексаборида лантана из смеси порошков оксида лантана, бора и магния. Процесс можно представить в виде реакции: $\text{La}_2\text{O}_3 + 12\text{B} + 3\text{Mg} \rightarrow 2\text{LaB}_6 + 3\text{MgO}$. В качестве исходных компонентов использовали промышленные порошки оксида лантана (ч, ГОСТ 48-4-523-90), аморфного бора (ТУ 2112-001-49534204-2003) и магния марки МПФ-1 (ГОСТ 6001-79). Магний применяли в качестве добавки, инициирующей реакцию СВС в режиме волнового горения. Смешивание порошков проводили в активаторе планетарного типа АГО-2 (60g) при следующих условиях: загрузка в барабан обрабатываемой смеси составила 10 г, загрузка мелющих тел (стальные шары диаметром 6 мм) 200 г, время механической обработки 1 мин. СВС проводили в среде аргона. Были подобраны такие соотношения компонентов, режимы синтеза и предварительной обработки исходной смеси, при которых в продуктах реакции не наблюдали исходных и промежуточных компонентов (например, бората лантана LaBO_3). По данным рентгенофазового анализа в продуктах реакции присутствуют только две фазы – гексаборид лантана и оксид магния.

Полученный порошок был отмыт от оксида магния в 17% растворе соляной кислоты при кипячении в течение 1 часа, а затем несколько раз промыт дистиллированной водой с последующей декантацией. Полученный осадок центрифугировали и высушивали.

Согласно данным рентгенофазового анализа после промывки в СВС-продукте наблюдается только одна фаза, соответствующая гексабориду лантана, LaB_6 , методом рентгенофлуоресцентного анализа обнаружены следы магния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Рег. № ЕГИСУ НИОКТР 121032500071-6).

60

Исследование фоточувствительности сенсоров на основе монокристаллического сапфира к рентгеновскому излучению

Author: Кирилл Чаштанов¹

Co-authors: Антон Тяжев¹; Андрей Зарубин¹; Олег Толбанов¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет

Представлены результаты экспериментальных исследований и моделирования фоточувствительности к рентгеновскому излучению сенсоров на основе монокристаллического сапфира и результаты её моделирования в диапазоне энергий 10-60 кэВ

В экспериментальном исследовании использовались образцы сенсоров из монокристаллического сапфира с размерами 3 мм x 3 мм с толщинами 100 и 150 мкм.

Сенсор помещался в экспериментальный стенд с рентгеновской трубкой с W анодом и при помощи источника-измерителя Keithley 2410 на него подавалось питание, а также снимался ток. При проведении измерений ток на трубке составлял 100-500 мкА, напряжение трубки 60 кВ. Напряжение смещение сенсора составляло от 50 до 700 В.

При изменении интенсивности излучения, величина фототока изменялась линейно. В данном случае изменялся ток трубки в диапазоне от 100 до 500 мкА с шагом 100 мкА.

Для расчета фоточувствительности использовалась ключевая характеристика таких сенсоров – ССЕ (от англ. «Charge collection efficiency» - эффективность сбора заряда).

Итоговая эффективность сбора заряда была рассчитана как средняя величина ССЕ по всей толщине сенсоров.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- сенсоры характеризуются линейной зависимостью фоточувствительности от интенсивности потока рентгеновских квантов;
- сенсоры характеризуются сублинейной зависимостью фоточувствительности от напряжения на сенсоре;
- сенсоры толщиной 100 и 150 мкм имеют схожую чувствительность к рентгеновскому излучению;
- при облучении низкоинтенсивными потоками рентгеновских квантов в сенсорах отсутствуют выраженные поляризационные эффекты, а время реакции на изменение интенсивности потока квантов не превышает 1 с.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075–15-2022-1132 от 01.07.2022)

61

Исследование фоточувствительности к рентгеновскому излучению сенсоров на основе нелегированного монокристаллического карбида кремния

Author: Алексей Жидиков¹

Co-authors: Олег Толбанов¹; Антон Тяжев¹; Андрей Зарубин¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет*

Corresponding Author: davit1213@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ НЕЛЕГИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

А. В. Жидиков, А.В. Тяжев, А.Н. Зарубин, О.П. Толбанов

Томский государственный университет, г. Томск

E-mail alekseyzhidik@gmail.com

В данной статье представлены результаты экспериментальной оценки фоточувствительности к рентгеновскому излучению сенсоров на основе объемного нелегированного карбида кремния и результаты его моделирования в диапазоне энергий 10-60 кэВ.

В эксперименте использовались карбид кремниевые образцы, изготовленные из пластин диаметром 50 мм толщиной 320 мкм. На каждую из сторон пластин методом магнетронного распыления были нанесены пленки из алюминия толщиной 1 мкм. Затем на одной из сторон пластины наносилась фоторезистивная маска с последующим травлением слоя алюминия для формирования контакта в виде квадрата с размерами 4.7 мм × 4.7 мм. На заключительном этапе пластины разрезались дисковой резкой на отдельные кристаллы с размерами 6.0 мм × 6.0 мм.

Измерение силы фототока сенсоров при облучении потоком рентгеновских квантов проводилось с использованием источника-измерителя Keithly 2410 при напряжении на сенсорах «+» 300 В и «-» 300 В на облучаемом контакте. В качестве источника рентгеновского излучения использовалась микрофокусная рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом. Напряжение и ток трубки составили 60 кВ и 100-500 мкА.

Экспериментально установлено:

- сенсоры характеризуются линейной зависимостью фоточувствительности от интенсивности потока рентгеновских квантов;
- при облучении низкоинтенсивными потоками рентгеновских квантов в сенсорах отсутствуют выраженные поляризационные эффекты, а время реакции на изменение интенсивности потока квантов не превышает 1 с.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075–15-2022-1132 от 01.07.2022)

62

Исследование сплавов осмия и платины методами рентгеновской спектроскопии поглощения и РФЭС

Authors: И.П. Асанов¹; В.В. Зверева¹; А.Д. Федоренко¹; Т.И. Асанова^{None}

¹ ИИХ СО РАН

Наносплавы редких платиновых металлов являются перспективными электрокаталитическими материалами. Наночастицы сплавов состава Pt_{0.5}Os_{0.5} получены путем термического разложения двойных комплексных солей Pt и Os, а также твердых растворов комплексных солей хлоридов Pt и Os. Для полученных сплавов предложено одинаковое строение типа «ядро – оболочка» с гцк Pt-Os оболочкой. Образцы наносплавов OsPt, полученных из двойных комплексных солей, образуют агломераты размером 10-20 нм; средний размер наночастиц OsPt, полученных из твердых растворов, составляет 12 ± 2 нм. Проведено исследования химической связи в сплавах Os_{0.5}Pt_{0.5} с использованием методов РФЭС и XANES на Os L_{2,3} и Pt L₃ краях поглощения. Из измерения площадей L₃ спектров краев поглощения показано, что в сплавах число 5d электронов на Os увеличивается, а на атомах Pt уменьшается относительно чистых металлов. Анализ химических сдвигов линий РФЭС с учетом изменения энергии релаксации, работы выхода и потенциала Маделунга показал, что при образовании химической связи происходит внутриатомная spd регибридизация и межатомный перенос электронов с Os на Pt. Знак химического сдвига РФЭС на атомах металла определяется тонким балансом между изменением заряда на атоме и потенциалом Маделунга от атомов ближайшего окружения. В OsPt сплавах наблюдается значительное уширение линии Pt 4f, а ширина Os 4f практически не изменяется. Это связано с изменением характера экранирования внутренней дырки в атомах Pt при увеличении числа bsp электронов при образовании сплава. Для атомов Os характер экранирования не изменяется, а химический сдвиг, связанный с изменением числа атомов Pt в ближайшем окружении, полностью компенсируется потенциалом Маделунга. Анализ спектров валентной полосы в сплавах показывает, что вблизи уровня Ферми появляется дополнительная плотность состояний от атомов Os, что находит отражение в увеличении параметра асимметрии внутренних линий Os в спектрах РФЭС. Центр тяжести валентной d-полосы в сплаве смещается вглубь относительно чистых металлов. Из измерения отношения площадей XANES спектров Os L₂/L₃ показано, что в сплавах величина спин-орбитального взаимодействия для Os 5d электронов падает практически до нуля, что связано с «вымораживанием» орбитального момента. На основании полученных спектральных данных оцениваются перспективы использования сплавов Os-Pt в каталитических реакциях.

63

Изменение спектральных характеристик некоторых полимерных материалов в интервале частот от 0,2 до 2 ТГц в результате воздействия мегаваттным потоком субмм-излучения микросекундной длительности

Author: Андрей Аржанников¹

¹ Институт ядерной физики СО РАН

Corresponding Author: a.v.arzhannikov@inp.nsk.su

Изменение спектральных характеристик некоторых полимерных материалов в интервале частот от 0,2 до 2 ТГц в результате воздействия мегаваттным потоком субмм-излучения микросекундной длительности

А.В. Аржанников¹, С.Л. Синицкий¹, Д.А. Самцов¹, П.В. Калинин¹, С.А. Кузнецов¹, В.Д. Степанов¹, С.С. Попов¹, Е.С. Сандалов¹, М.Г. Атлуханов¹, А.В. Станкевич², А.В. Пестов³, Н.А. Николаев⁴, А.А. Рыбак⁴

1Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, press@inp.nsk.su
2Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия, vniitf@vniitf.ru
ЗИОС УрО РАН, Екатеринбург, Россия, @iosubras
4ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия, office@iae.nsk.su

В представляемой работе зарегистрировано влияние воздействия импульсными мегаваттными потоками субмиллиметрового излучения на спектральные характеристики некоторых полимерных материалов в диапазоне частот от 0,2 до 2 ТГц, которое свидетельствует о возникновении значимых структурных изменений в этих материалах. Результаты данных экспериментов должны дать основу для использования этих полимерных материалов в качестве подложек для выращивания образцов супрамолекулярных комплексов, которые при исследованиях будут подвергаться воздействию мощными импульсными потоками излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

64

Исследование газового разряда в сфокусированном пучке Новосибирского лазера на свободных электронах с длиной волны 69 мкм

Authors: Александр Сидоров¹; Виталий Кубарев²; Александр Водопьянов¹; Алексей Веселов¹; Олег Шевченко²; Ярослав Горбачев²

¹ ИИФ РАН

² ИЯФ СО РАН

Corresponding Author: alvasid@inbox.ru

В данной работе представлены результаты последних экспериментальных исследований по созданию и поддержанию плазмы инертных газов в пучке излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) дальнего инфракрасного диапазона. Для генерации электромагнитного излучения использовалась вторая очередь НЛСЭ. Как показали специальные эксперименты, диапазон перестраиваемой длины волны этого ЛСЭ в настоящее время составляет 24-156 мкм. При этом максимальная мощность лазера наблюдается для длины волны в окрестности 70 мкм. Поэтому для экспериментов с разрядом лучше всего подходит длина волны 69 мкм – середина ближайшего окна прозрачности атмосферы. Излучение лазера представляло собой непрерывные пачки импульсов (макроимпульсов) длительностью 1 мс, следующих с частотой 90 Гц, каждая из которых представляла собой набор импульсов НЛСЭ длительностью 80-90 пс, следующих с частотой 7.5 МГц. Средняя мощность излучения внутри макроимпульса при этом достигала 600 Вт. В таких условиях в сфокусированном пучке данного излучения оказалось возможным создавать и поддерживать плазму в широком диапазоне давлений рабочего газа (аргон): 0.2 -1.5 атм. Проведено исследование спектральных характеристик плазмы такого разряда в различных спектральных диапазонах. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-72-20166.

65

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ В ПУЧКАХ СИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ Ti-Al-C

Authors: Алексей Собачкин¹; Марина Логинова¹; Александр Ситников¹; Владимир Яковлев¹; Валерий Филимонов²; Андрей Мясников³; Марат Шарафутдинов⁴

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

² Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова; Институт водных и экологических проблем СО РАН

³ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова; Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

⁴ ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН; Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Corresponding Author: anicpt@rambler.ru

Одной из важных задач материаловедения является создание новых перспективных материалов и способов их получения. В настоящее время особое внимание привлекают тройные системы Ti-Al-C, позволяющие получить МАХ-фазы. Данные материалы нашли широкое применение во многих отраслях, включая авиационную и космическую промышленность, за счет сочетания в себе свойств металлических сплавов и керамических материалов.

Упростить и сократить процесс получения материалов на основе МАХ-фаз позволяет энергоэффективный метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Модифицировать условия протекания химических реакций и влиять на термические параметры при проведении высокотемпературного синтеза позволяет предварительная механоактивационная обработка порошковой смеси. Смешение порошкообразных реагентов в твердой фазе с формированием матричных структур позволяет увеличить удельную поверхность реагентов и повысить реакционную способность смеси.

Однако, вопрос о детальном представлении последовательности реакций образования или распада фаз в процессе синтеза для активированной смеси Ti-Al-C остается актуальным. Целью настоящих исследований является проведение *in situ* исследований динамики фазовых превращений при синтезе механоактивированной порошковой смеси Ti-Al-C с применением метода динамической дифрактометрии в пучках синхротронного излучения.

В качестве исходных материалов использовали порошки титана ПТХ, алюминия АСД-1 и технического углерода. Исследовался состав Ti (78 мас. %) + Al (14 мас. %) + C (8 мас. %). Для получения из порошковой смеси механокомпозитов применяли активационную обработку с использованием планетарной шаровой мельницы АГО-2. Высокотемпературный синтез реализовывался в режиме теплового взрыва. Для изучения фазового состава после завершения химической реакции проводилась выдержка системы после достижения максимальной температуры, которая составляла порядка 6 с.

При исследовании методом динамической дифрактометрии в пучках синхротронного излучения установлено, что синтез материала происходит в несколько стадий. Сначала наблюдается формирование интерметаллидного соединения TiAl₃. Затем образуется расплав Ti-Al с выделением зерен TiC, что обеспечивает основное тепловыделение и инициирует реакцию теплового взрыва. Далее расплав Ti-Al за счет растворения в нем зерен TiC насыщается углеродом с последующей кристаллизацией МАХ-фазы Ti₂AlC. На этапе выдержки формируется МАХ-фаза Ti₃AlC₂. На данном этапе, контролируя температуры, можно управлять содержанием МАХ-фаз в продукте реакции. В состав конечного продукта входят Ti₃AlC₂, Ti₂AlC и TiC.

Работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2023-0003, FWUR-2024-0040.

66

Особенности формирования морфологии, локальной атомной и электронной структуры материалов, осажденных на пористый оксид алюминия

Authors: Ришат Валеев¹; Артемий Бельтюков¹; Андрей Чукавин¹; Александр Тригуб²; Владимир Кривенцов³

¹ Удмуртский ФИЦ УрО РАН

² НИЦ «Курчатовский институт»

³ ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН

Corresponding Author: rishatvaleev@mail.ru

Современные методы позволяют решить многие проблемы, связанные с получением и исследованием новых материалов с заданными уникальными функциональными свойствами для различных областей технологии и инженерии. Примером являются стоящие перед технологами и разработчиками технических устройств задачи увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления (в части использования в электронных компонентах), увеличения эффективности процессов конверсии газов на составляющие (в части использования в каталитических приложениях). Одним из способов, позволяющих решить эти задачи, является разработка и внедрение новых подходов, связанных с получением функциональных материалов, сформированных в химически и электрически инертных пористых матрицах или на их поверхности.

В данной работе методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, а также EXAFS-спектроскопии исследованы наноструктуры и наноструктурированные покрытия полупроводниковых (Ge, ZnS, ZnSe, ZnSSe, GaAs) и металлических (Fe, Co, Ni) материалов, осажденных методами термического и магнетронного напыления на матрицы пористого анодного оксида алюминия, в том числе, в зависимости от параметров пористой структуры матриц (диаметр пор и расстояния между ними, упорядоченность пористой структуры). Проведено сравнение с морфологией, локальной атомной и электронной структурой пленок, полученных на гладких подложках поликристаллического оксида алюминия (поликора), кремния и стекла.

В результате проведенных исследований установлены различия в локальной атомной и электронной структуре, особенностях фазового и химического состава в образцах наноструктур полупроводников, осажденных на пористый оксид алюминия по сравнению с пленками на гладких подложках, заключающиеся в лучшей стехиометрии и параметрах локального атомного окружения, более близких к кристаллографическим. Также установлено, что размеры и геометрическое расположение наночастиц, из которых сформированы металлические покрытия, а также параметры локальной атомной структуры, коррелируют с параметрами матриц/подложек металлических покрытий, тогда как кристаллическая структура и фазовый состав практически не меняются и близки к кристаллографическим. Кроме этого, исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показали, что используемый в работе метод позволяет получать высокочистые нанопокртытия, на поверхности которых формируются естественные оксиды толщиной не более 10 нм

Работа выполнена в рамках государственного задания Отдела ФХП УдмФИЦ УрО РАН (№ 121030100002-0). Синхротронные исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «Сибирский центр синхротронного излучения» на базе VEPP-4-VEPP-2000 в ИЯФ СО РАН и на станции «Структурное материаловедение» Курчатовского центра СИ. Данные РФЭС и СЭМ получены с использованием оборудования ЦКП «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН.

Работа была частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0040).

Также работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351 в части развития методик рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

67

Определение рентгеноаморфных фаз FePt на СИ

Author: Анна Плпова¹

Co-authors: Никита Захаров¹; Александр Шмаков²; Юрий Захаров¹

¹ ФИЦ УУХ СО РАН

² ЦКП СКИФ

Corresponding Author: h991@ya.ru

В работе представлены результаты исследования рентгеноаморфных фаз с помощью СИ.

68

Влияние толщины мембраны маски на геометрию микроструктур при глубокой рентгенолитографии

Authors: Vladimir Nazmov¹; Карина Анцибор²; Борис Гольденберг^{None}

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

² *НГТУ*

Corresponding Author: v.p.nazmov@inp.nsk.su

В.Назьмов ИЯФ СО РАН, ИХТТ СО РАН, Новосибирск

К.Анцибор НГТУ Новосибирск

Б.Гольденберг СЦСИ «СКИФ», ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Как правило для рентгеновской литографии применяются рентгеновские маски с толщиной мембраны в несколько микрометров вследствие существенного ослабления рентгеновского пучка мембраной большей толщины [1]. Однако в диапазоне жёсткой рентгеновской литографии это требование не так критично, поскольку ослабление в данном случае не превышает десятка процентов, что допускает использование масок на базе значительно более толстой мембраны, что кажется привлекательным по многим факторам: более высокая механическая прочность, высокий фактор теплопередачи в держатель маски, невысокая радиационная стойкость, более высокая технологичность и низкая стоимость. Однако такая мембрана создаёт более высокий фон в области резистивного слоя посредством рассеяния излучения, поток которого пропорционален толщине мембраны. Существенно также, что в диапазоне жёсткой рентгеновской литографии сечения упругого и неупругого рассеяния рентгеновского излучения близки к своим максимальным значениям.

В настоящей работе исследовалось влияние величины рассеянного фона рентгеновского излучения на геометрические параметры микроструктур, изготовленных в слое резиста полиметилметакрилата. В экспериментах использовали мембраны, выполненные на базе пластин стеклоуглерода, лейкосапфира и бериллия толщиной 475, 525, 200 мкм соответственно, а также титановой фольги толщиной 2,5 мкм. Профиль проявления в облучённом слое резиста измеряли на интерференционном микроскопе МИИ-4. Установлено, что после проявления наклон боковых стенок микроструктур в вертикальной и горизонтальной плоскости (в координатной сетке пучка синхротронного излучения) в первых трёх случаях существенно выше по сравнению с таковым, полученным в условиях облучения с тонкой титановой мембраной. Выбранные для эксперимента образцы с полированной поверхностью поликристаллического стеклоуглерода и монокристаллического лейкосапфира, а также поликристаллического неполированного бериллия существенно по-разному рассеивают рентгеновское излучение. Помимо атомного фактора рассеяния удалось зарегистрировать влияние рассеяния как объёмного материала мембраны, так и его поверхности. Дозовая зависимость пространственного распределения рассеянного излучения определялась численным моделированием с помощью программы Giant. Проведённые расчёты позволили определить распределение дозы рентгеновского излучения как в облучённой области, так и в тени мембраны маски. Полученные результаты позволяют задавать требования на материал и толщину мембраны маски, изготавливаемой для переноса изображений методом глубокой рентгеновской литографии. В актуальном диапазоне критичным становится уровень рассеянного фона рентгеновского излучения, увеличивающийся с толщиной мембраны.

Цитированная литература.

1. LIGA and its applications / ed. by V.Saile et al. - Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2009. - (Advanced micro & nanosystems; Vol.7).

69

Исследование отражательной способности массивов ориентированных углеродных нанотрубок в терагерцевой области частот

Author: Анастасия Кондранова¹

Co-authors: Александр Окотруб²; Василий Герасимов³; Дмитрий Городецкий¹

¹ *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН*

² *Институт неорганической химии им.А.В. Николаева СО РАН*

³ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

Corresponding Author: a.kondranova@gmail.com

В последнее время активно развиваются терагерцевые (ТГц) технологии. Одной из основных отраслей, где ТГц излучение имеет существенные преимущества, это системы связи. В задачах ТГц телекоммуникаций, в особенности в низкочастотной части терагерцевого спектра (0.1-1.5 ТГц), большой интерес исследователей вызывает использование бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ), или “вихревых” (закрученных) пучков, для организации передачи информации с поперечно-модовой мультиплексацией каналов связи. Такое решение позволит дополнительно увеличить скорость беспроводной связи в несколько раз, по сравнению с традиционными подходами. Одним из решений, позволяющих формировать бесселевы пучки с ОУМ, могут быть предложены методы, основанные на использовании 2D и 3D структурированных материалов, в частности на вертикально ориентированных массивах углеродных нанотрубок (МУНТ) Из-за высокой проводимости, структурированные элементы из ориентированных МУНТ могут использоваться не только формирования вихревых бесселевых пучков, но и в качестве дифракционных оптических элементов для спектрального анализа и фильтрации излучения, фокусировки пучков, которые могут работать как на пропускание, так и на отражение. В данной работе исследовалась отражательная способность массивов МУНТ разной плотности и морфологии, нанесенных на плоскую кремниевую подложку в ТГц области частот. МУНТ и азотдопированные МУНТ(N-МУНТ) были получены в газофазном химическом CVD-реакторе, при термическом разложении паров реакционной смеси на поверхности кремниевых подложек размером 3×3 см, температура синтеза варьировалась от 800-850°С в зависимости от состава используемого прекурсора. В роли предшественника катализатора использовался раствор ферроцена от 2 до 4 масс%. Для получения МУНТ в качестве источника углерода использовался толуол, а внедрение азота в структуру достигалось при использовании азот содержащего прекурсора (ацетонитрил). Исследование морфологии N-МУНТ и МУНТ определяли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а проводимость четырех-зондовым методом. Отражательная способность элементов с МУНТ измерялась во всем ТГц диапазоне частот (0.1 – 10 ТГц) с использованием фурье-спектрометра Bruker, ТГц спектрометра на лампах обратной волны и Новосибирского лазера на свободных электронах.

70

Применение EXAFS-спектроскопии для характеристики структурных особенностей твёрдых актинид-содержащих фаз

Authors: Борис Крамар¹; Татьяна Плахова¹; Анастасия Кузенкова¹; Александр Тригуб²; Анна Романчук¹; Степан Калмыков¹

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*

² *НИИ «Курчатовский институт»*

Corresponding Author: kramar.b@yandex.ru

Для лучшего понимания поведения соединений актинидов в окружающей среде необходимо тщательное изучение их структурных параметров. Морфология многих образцов, однако, не позволяет полагаться исключительно на традиционный рентгеноструктурный анализ; характеристика в таких случаях требует комплексного подхода с использованием синхротронного излучения (СИ). Одним из методов структурного анализа, доступных при наличии СИ, является спектроскопия рентгеновского поглощения, которая предоставляет информацию как об электронных характеристиках образца (регион XANES), так и о локальной структуре (регион EXAFS). В данной работе мы демонстрируем эффективность EXAFS в анализе локальной структуры на примере следующих соединений: а) наноразмерные частицы и кластеры диоксидов тория и плутония, б) двойные фосфаты тория и натрия, осаждённые при различных значениях pH, в) двойные фосфаты плутония и натрия, и г) двойные карбонаты нептуния с различными щелочными и щелочноземельными металлами, где структура меняется в зависимости от присутствующего в растворе осадителя катиона. Сравнение данных с моделями, построенными на основе известных кристаллических фаз, позволяет прояснить влияние конкретных условий

формирования и/или размера частицы на структурные параметры. Внимание, в том числе, уделяется таким вариантам EXAFS-анализа, как вейвлет-преобразование, кумулятивное разложение и моделирование путей многократного рассеивания. В сочетании с иными методами структурной характеристики, например, парной функцией распределения и малоугловым рентгеновским рассеиванием, EXAFS-анализ позволяет выстроить цельное понимание структуры актинидных соединений со сложной морфологией.

71

Специфические особенности локальной структуры сверхмалого количества допантов $Ti^{(4+)}$ в выращенных из водного раствора монокристаллах $\alpha-NiSO_4 \cdot 6H_2O$ по данным структурного анализа и рентгеновской абсорбционной спектроскопии

Authors: Ирина Каурова¹; Галина Кузьмичева¹; Левко Арбанас¹; Евгений Храмов²; Владимир Лазаренко²; Вера Маноменова³

¹ МИРЭА-Российский технологический университет

² НИЦ "Курчатовский Институт"

³ ФНИИ "Кристаллография и фотоника" РАН

Corresponding Author: kaurchik@yandex.ru

Многофункциональные материалы на основе кристаллов $\alpha-NiSO_4 \cdot 6H_2O$ (NSH; пр. гр. P4_1 2_12, Z = 4) обладают комплексом эксплуатационных свойств из-за особенностей структурной организации с межмолекулярными водородными связями. Для возможного усиления характеристик свойств и/или формирования новых функциональных перспектив в NSH вносятся ионы-допанты, в частности, ионы $Ti^{(4+)}$. Вхождение в структуру NSH гетеровалентного иона Ti^{4+} даже в малых количествах должно приводить к серии точечных дефектов и структурных изменений локального характера. Цель работы - установление структурного поведения сверхмалых количеств ионов $Ti^{(4+)}$ при возможном вхождении их в кристалл NSH. Ионы $Ti^{(4+)}$ введены в раствор с NSH в золях с оксидом титана(IV) с последующей кристаллизацией (NSH:Ti(1) и NSH:Ti(2) с концентрацией ионов $Ti^{(4+)}$ в растворе - 0.4 и 0.5 мМ).

Увеличение объема ячейки ($V, \text{Å}^3$) при переходе от NSH к NSH:Ti(1) указывает на вхождение в структуру NSH:Ti(1) ионов $Ti^{(4+)}$ ($r(Ti^{(4+)}) > r(Ni^{(2+)})$, Å), а уменьшение $V, \text{Å}^3$ от NSH к NSH:Ti(2) и от NSH:Ti(1) к NSH:Ti(2) - на вакансии (\square) ионов $Ni^{(2+)}$ (позиция 4a) и нивелирующее действие внедренных ионов $Ti^{(4+)}$ (позиция 4a) в сильно искаженных октаэдрах в $[Ni(0.994(2))^{(2+)}\square(0.006)(Ti^{(4+)})^{(0.006(1))}]SO_4$ (NSH:Ti(1)) и $[Ni(0.990(2))^{(2+)}\square(0.010)(Ti^{(4+)})^{(0.010(4))}]SO_4$ (NSH:Ti(2)) ($\sim 0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{ нм}^3$; Stoe STADI-VARI Pilatus-100 K; комнатная температура; PCA). Уточненный состав ($\sim 0.05 \times 0.05 \times 0.05 \text{ нм}^3$; станция Белок/PCA, "КИСИ-Курчатов"; 100К; СИ) из другой области кристалла NSH:Ti(1) имеет вид $[Ni(0.997^{(2+)})\square(0.003)(Ti^{(4+)})^{0.003}]SO_4$ с ионами $Ti^{(4+)}$ в позиции 8b. Разное содержание ионов $Ti^{(4+)}$ с разным структурным положением в NSH:Ti оказывает влияние на расстояния в тетраэдре SO_4 , а также расстояния и валентный угол в H_2O . Ионы $Ni^{(2+)}$ в NSH (станция СТМ, "КИСИ-Курчатов") находятся в слегка сжатом октаэдре (степень сжатия больше в NSH:Ti(2)) с меньшим расстоянием $Ni^{(2+)}-H^{(1+)}$ в NSH:Ti(2), что указывает на дальнедействие сверхмалого количества ионов $Ti^{(4+)}$ и усиление влияния с увеличением его количества в системе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSSFZ-2024-0026.

72

Импульсная терагерцовая спектроскопия плазмы крови для диагностики глиобластомы

Author: Olga Cherkasova¹

¹ Institute of Laser Physics of SB RAS

Corresponding Author: o.p.cherkasova@gmail.com

В настоящий момент глиобластома, разновидность глиом, опухолей, которые развиваются в глиальной ткани мозга, составляет почти половину всех злокачественных опухолей центральной нервной системы и относится к числу наиболее быстропротекающих онкологических заболеваний с самым неблагоприятным прогнозом выживаемости [1]. Одной из причин этого является поздняя диагностика и лечение. Поэтому актуальным и важным является выявление глиобластомы на ранней стадии и разработка неинвазивных и малоинвазивных методов контроля эффективности лечения. Ранняя диагностика глиобластомы может быть достигнута при анализе жидкостей организма [2], в том числе с применением более технологичных и простых спектроскопических методов, в частности, импульсной терагерцовой спектроскопии [3-5]. Отличительной особенностью метода является возможность непосредственного измерения показателя преломления, коэффициента поглощения, что позволяет получить подробную спектральную характеристику анализируемой пробы за одно измерение [6]. В докладе будут представлены результаты применения метода импульсной терагерцовой спектроскопии для исследования экспериментальной модели глиомы, затем продемонстрированы результаты применения разработанного метода для анализа плазмы крови доноров в качестве контроля и пациентов с травмами и глиомами различной степени злокачественности. Будут показаны возможности метода импульсной терагерцовой спектроскопии по контролю эффективности операций по удалению опухоли.

1. Ostrom Q. T., Cioffi G., Waite K., et al. *Neuro-oncology*, 23 (S3), iii1 (2021). doi: 10.1093/neuonc/noab200.
2. Cherkasova O., Peng Y., Konnikova M. et al. *Photonics*, 8 (1), 22 (2021). doi: 10.3390/photonics8010022.
3. O. Cherkasova, et al, "Terahertz Spectroscopy of Mouse Blood Serum in the Dynamics of Experimental Glioblastoma", *J-BPE*, vol. 9, No. 3 p. 030308, 2023.
4. D. Vrazhnov, et al., "Analysis of Mouse Blood Serum in the Dynamics of U87 Glioblastoma by Terahertz Spectroscopy and Machine Learning," *Appl.Sci.*, vol. 12, p. 10533, 2022.
5. O. Cherkasova, et al., "Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Glioma Patient Blood Plasma: Diagnosis and Treatment," *Appl. Sci.*, vol. 13, pp. 5434, 2023.
6. Smolyanskaya, O.; Chernomyrdin, N.; Konovko, A.; et al. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids. *Prog. Quantum Electron.* 2018, 62, 1–77.

73

Нестационарная динамика закрученного электрона в магнитной линзе

Author: Дмитрий Гросман¹

Co-authors: Георгий Сизых¹; Алиса Чайковская¹; Илья Павлов¹; Дмитрий Карловец¹

¹ Университет ИТМО

Corresponding Author: dmitriy.grosman@metalab.ifmo.ru

Состояния Ландау, описывающие электроны с орбитальным угловым моментом в магнитном поле, представляют особую важность для электронной микроскопии, синхротронного излучения, физики твердого тела и многих других областей. В реалистичных экспериментальных сценариях заряженные частицы влетают в область внешнего магнитного поля, например в электромагнитные линзы, из вакуума. Описание таких процессов требует нестационарных состояний частицы для возможности учесть граничные или начальные условия при влете в поле. Данная работа представляет нестационарные Лагерр-Гауссовы состояния в продольном магнитном поле, которые описывают закрученные электроны после их перехода из вакуума в поле. Среднеквадратичный

радиус электрона, описываемого данным состоянием, осциллирует со временем вокруг среднего значения, значительно большего чем то, что соответствует состоянию Ландау с теми же квантовыми числами. Данный квантовый эффект осцилляций возникает из-за граничных условий при переходе электрона из вакуума в поле и его потенциально можно пронаблюдать на эксперименте, в особенности с помощью магнитных линз электронных микроскопов и на линейных ускорителях.

74

Формирование изменяемого во времени рельефа поверхности рентгеновского зеркала за счет создания градиента температуры подложки. Теоретические расчеты и тестовые эксперименты.

Authors: Boris Tolochko¹; Nikolay Razumov²

¹ *Institute of solid state chemistry and mechanochemistry*

² *Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

Corresponding Author: yadershik1@gmail.com

В работе предложен новый способ формирования вогнутой поверхности рентгеновского зеркала. Способ является более простым, чем механическая деформация и ионное травление. Кроме того профиль поверхности можно оперативно перестраивать в соответствии с требованиями эксперимента.

В рамках проекта источника фотонов СКИФ разрабатывается станция 1-3, использующая сегментное зеркало. Данная оптическая система предназначена для фокусировки синхротронного излучения (СИ) с целью увеличения его интенсивности при исследовании быстропротекающих процессов во взрывной камере, удаленной от зеркала на расстоянии 80 м.

Для зеркала нужно было рассчитать такой профиль температуры, чтобы функция поверхности была вогнутой поверхностью с радиусом кривизны 12500 м.

В качестве образца для тестового эксперимента использовалось серебряное зеркало с размерами 100мм50мм2мм. Для формирования градиента температуры использовались 6 плоских резисторов и один элемент Пельтье, равномерно распределенных по нижней поверхности зеркала. На каждый резистор подавалось индивидуальное напряжение, рассчитанное в соответствии с предварительным моделированием термических деформаций при разных температурах. На каждый резистор подавалось индивидуальное напряжение, рассчитанное в соответствии с требуемым тепловыделением. Контроль образовавшегося градиента температуры вдоль поверхности зеркала осуществлялся термопарами.

Сформированный профиль поверхности зеркала был измерен методом лазерной интерференции и с хорошей точностью совпал с расчетным профилем. Время формирования профиля зеркала с момента подачи напряжения на резисторы составило 10 мин. Таким образом показано, что профиль рентгеновского зеркала можно оперативно перестраивать в широком диапазоне длин фокуса во время физических экспериментов.

Для случая скользких углов падения СИ нагрев поверхности зеркала можно с хорошей точностью считать равномерным для всей поверхности зеркала и не влияющим на градиент температуры, задающий радиус кривизны зеркала. Этот факт был проверен экспериментально на полихроматическом пучке СИ ВЭПП-4.

75

Модовый состав излучения НЛСЭ терагерцового и дальнего инфракрасного диапазонов

Author: Виталий Кубарев¹

Co-authors: Олег Шевченко²; Ярослав Гетманов²; Ярослав Горбачев¹

¹ ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия; ИХКиГ СО РАН, Новосибирск, Россия

² ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований лазерных параметров излучения и модового состава излучения НЛСЭ терагерцового и дальнего инфракрасного диапазонов. В частности, модовый состав излучения этих ЛСЭ определялся на основе их спектров излучения, измеренных уникальным прибором – сверхдлинным резонансным Фабри-Перо интерферометром [1]. Для измерения потерь оптического резонатора и коэффициента усиления лазеров, помимо сверхбыстрых детекторов на основе диодов Шоттки, применявшиеся для длинноволновых субмиллиметровых волн, использовались также новые быстрые детекторы на основе сверхпроводимости, работоспособные в широком диапазоне волн дальнего инфракрасного диапазона.

Модовый состав излучения НЛСЭ оказался гораздо сложнее первоначальных представлений о классических лазерных модах открытого резонатора, предполагаемых как первое рабочее приближение структуры поля реальных оптических резонаторов НЛСЭ. В частности, была обнаружена и измерена лазерная генерация на гибридных модах, у которых излучение внутри ондулятора распространяется как волноводная мода вакуумной камеры, а в промежутках между концами ондулятора и зеркалами – как мода открытого пространства. Эти гибридные моды позволили расширить диапазон генерации терагерцового НЛСЭ почти в 2 раза - до длин волн в 400 мкм.

Другой интересной особенностью модового состава НЛСЭ является, как правило, большое наблюдаемое количество мод на сверхнизких боковых частотах, окружающих рабочую лазерную моду и на самом деле являющимися своеобразными псевдо-модами. Появление этих псевдомод, как показано в работе [2], связано с резонансным возбуждением поперечных колебаний оси рабочей лазерной моды в определенных периодических устойчивых лазерных резонаторах, к которым случайно оказались близки оптические резонаторы НЛСЭ первой и второй очередей. В общем случае, обнаруженный новый эффект лазерной модовой неустойчивости присущ не только ЛСЭ, но и многим другим импульсно-периодическим лазерам с устойчивыми резонаторами. Для того, чтобы эта лазерная модовая неустойчивость не проявлялась, а псевдо-моды на боковых частотах не возникали, в периодических лазерных устойчивых резонаторах требуется очень тщательная юстировка оси накачки моды на оптическую ось моды в резонаторе. В НЛСЭ подавление этой неустойчивости требуется в экспериментах по сверхбыстрой высокочувствительной спектроскопии молекул [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (код проекта № 19-73-20060).

[1] Kubarev V.V. // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. 2021. V.1007. С. 165426.

[2] Kubarev V.V. // Optics Letters. 2023. V. 48. С. 4785.

[3] Кубарев В.В., Чесноков Е.Н. // Журнал физической химии. 2024. Т. 5.

76

Генерация терагерцовых импульсов сверхизлучения в процессе вынужденного обратного рассеяния лазерного импульса на последовательности электронных сгустков, формируемых фотоинжектором

Author: Lev Yurovskiy¹

Co-author: Naum Ginzburg¹

¹ IAP RAS

Corresponding Author: leo@ipfran.ru

Генерация мощных терагерцовых импульсов представляет интерес для различных приложений, таких как терагерцовая спектроскопия, коллективное возбуждение магнонов и фононов и др. [1]. В [2] было показано, что при рассеянии лазерного импульса (индекс «i») на попутном сильнооточном релятивистском электронном пучке в условиях комбинационного синхронизма $\omega_i - k_i V_z = \omega_s + k_s V_z$ имеет место генерация рассеянного излучения (индекс «s») в виде сверхизлучательных (СИ) импульсов, распространяющихся в противоположном (назад) по

отношению к электронам направлении. В такой конфигурации частота импульса СИ значительно меньше частоты накачки и лежит в терагерцовом диапазоне.

В качестве альтернативы квазинепрерывному электронному пучку [2], в данной работе мы исследуем схему, использующую периодическую последовательность коротких электронных сгустков, формируемых в фотоинжекторе. В этом случае можно рассмотреть систему, в которой лазерный импульс заводится в резонатор с помощью ячейки Поккельса и циркулирует между зеркалами резонатора Фабри-Перо. Период циркуляций должен совпадать с периодом инжекции электронного сгустка. При этом одно из зеркал представляет собой 2 совмещенных брэгговских отражателя – один из которых настроен на частоту накачки, что позволяет удерживать лазерный импульс внутри резонатора, а второй – на частоту терагерцового импульса, что приводит к увеличению отбора энергии у импульса накачки на каждом последующем акте рассеяния. В такой схеме можно реализовать генерацию периодической последовательности импульсов терагерцового излучения.

Моделирование проводилось для параметров существующих экспериментальных установок. В качестве накачки был выбран лазерный импульс с энергией 3 кДж на длине волны $\lambda_i = 1,053$ мкм, генерируемый одним из каналов лазерной установки «Луч/Искра-5» [3]. В качестве источника электронных сгустков рассматривался фотоинжектор Argonne Wakefield Accelerator (AWA) (AWA) [4]: ток 3,3 кА, энергия частиц 2 МэВ, длительность 30 пс (заряд до 100 нКл), способный формировать макроимпульс длительностью ~30 нс, с периодом следования электронных сгустков порядка 1 нс. Моделирование показывает, что при длине взаимодействия 15 мм, в отсутствие брэгговского зеркала на частоте рассеянного сигнала, можно генерировать последовательность импульсов СИ на центральной частоте 3 ТГц мощностью 220 кВт, энергией 4 мкДж. Учет отражающего зеркала для терагерцового импульса с оптимизированным коэффициентом отражения по амплитуде ($R \sim 0.8$) позволяет повысить мощность импульсов на выходе из резонатора до 10 МВт и энергию до 42 мкДж.

Работа выполнена в рамках госзадания No. FFUF-2024-0027.

[1] P. Salen, M. Basini, S. Bonetti et al., “Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology,” *Phys. Rep.* 836–837, 1–74 (2019)

[2]. N. S. Ginzburg, L. A. Yurovskiy, A. V. Nazarovskiy, A. S. Sergeev, I. V. Zotova “Generation of Terahertz Superradiance Pulses under Stimulated Scattering of Laser Radiation by an Associated High-Current Relativistic Electron Beam” *Tech. Phys. Lett.*, Vol. 46, Iss. 12, pp. 1162–1166, Dec. 2020.

[3]. Kirillov G.A., Murugov V.M., Punin V.T., Shemyakin V.I. High power laser system ISKRA V. // *Laser and Particle Beams.* 1990. V.8. Iss.4. P.827–831.

[4]. P. Schoessow, E. Chojnacki, G. Cox, et al., “The Argonne Wakefield Accelerator high current photocathode gun and drive linac,” *Proc/ Particle Accelerator Conf, Dallas, TX, USA, 1995, vol.2, pp. 976-978.*

77

Разработка секции 1-3-2 «Плазма» станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ»

Authors: Илья Балаш¹; Сергей Казанцев¹

Co-authors: Александр Шмаков²; Анастасия Глушак³; Борис Толочко⁴; Владимир Аульченко³; Владимир Жуланов³; Лев Шехтман³; Леонид Вячеславов³; Сергей Бугаев³

¹ ИЯФ СО РАН, ИХТТМ СО РАН

² ИК СО РАН

³ ИЯФ СО РАН

⁴ ИХТТМ

Corresponding Author: ilyabalash@yandex.ru

В настоящее время проводится разработка секции 1-3-2 «Плазма» станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» Центра коллективного пользования «СКИФ». Станция представляет собой дифрактометр, предназначенный для выполнения широкого спектра материаловедческих задач с использованием

методов дифракции СИ, в частности, изучения изменения структурных и субструктурных свойств потенциальных термоядерных материалов под воздействием импульсных тепловых нагрузок. В состав станции 1-3 входит узел зеркал, включающий в себя блоки фокусировки пучка, ориентации пучка СИ на объект исследования и монохроматор. Данный узел предназначен для формирования спектральной полосы заданной ширины из широкого спектра СИ и фокусировки пучка на экспериментальных секциях станции 1-3. Узел обеспечивает работу в режимах «белого», «розового» ($\Delta E/E=10^{-1}$) и монохроматического ($\Delta E/E=10^{-3}$) пучков. В основе системы прецизионной механики дифрактометра лежат два соосных гониометра, предназначенных для вращения образца и детекторов в вертикальной плоскости. Секция будет оборудована линейными и вращательными подвижками для юстировки исследуемых образцов и детекторов относительно пучка СИ и регулировки положения дифрактометра по высоте для обеспечения работы с пучком СИ в разных режимах узла зеркал. Для регистрации рассеянного излучения будут использоваться четыре различных вида детекторов, каждый из которых предназначен для выполнения тех или иных экспериментальных задач. Станция будет оборудована лазерной системой для облучения образцов, в том числе непосредственно во время проведения измерений дифракции СИ.

78

Разработка полуфабрикатов из ниобия и его сплавов для различных применений

Authors: Абдюханов И.М.^{None}; Алексеев М.В.^{None}; Силаев А.Г.^{None}; Крылова М.В.^{None}; Потапенко М.М.^{None}; Соколовский Д.В.^{None}; Шевякова С.А.^{None}; Новосилова Д.С.^{None}; Цаплева А.С.^{None}; Зернов С.М.^{None}; Шляхов М.Ю.^{None}; Сырцов С.Ю.^{None}; Ряховская Е.Н.^{None}; Волошин А.В.^{None}; Лютый А.М.^{None}; Крамарчук А.В.^{None}

АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара» обладает компетенциями в области разработки технологии изготовления композиционных сверхпроводников на основе высокочистых материалов, таких как бескислородная медь, ниобий, ниобий-титан, тантал и др.

В последние годы возрастает заинтересованность в разработке полуфабрикатов из высокочистых материалов для различных применений. Например, для сверхпроводящих СВЧ резонаторов в линейных ускорителях требуется высокочистый ниобий, для коаксиальных кабелей квантовых компьютеров – сверхпроводящий сплав ниобий-титан и т.д.

В АО «ВНИИНМ» совместно с АО ЧМЗ была разработана технология выплавки слитков ниобия резонаторного класса, выпущена документация с присвоением литеры О1, а также в АО «ВНИИНМ» была разработана технология изготовления листов ниобия резонаторного класса для сверхпроводящих резонаторов.

Отдельным направлением является разработка технологии изготовления полуфабрикатов на основе сверхпроводящего сплава ниобий-титан для коаксиальных кабелей квантовых компьютеров: в виде центральной жилы и внешней капиллярной трубки.

Наряду с этим ниобий-титановые капиллярные трубки применяются для создания низкоомных контактов между сверхпроводящими катушками в вигглерах и ондуляторах синхротронов.

В докладе приведены результаты работы по разработке режимов изготовления слитков и листов высокочистого ниобия для сверхпроводящих резонаторов, а также полуфабрикатов из сплава ниобий-титан для коаксиальных кабелей квантовых компьютеров и других применений.

79

Рентгеновская дифракционная микротомография низкотемпературных синтетических алмазов

Authors: Николай Анисимов¹; Денис Золотов²; Алексей Бузмаков²; Ирина Дьячкова²; Виктор Асадчиков²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова

² Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ “Курчатовский Институт”

Corresponding Authors: anisimov.np17@physics.msu.ru, zolotovden1985@gmail.com

В работе приведены результаты исследования ростовых дефектов в монокристаллах синтетического алмаза, выращенных методом НРНТ при предельно низких значениях температуры и давления (~ 1250°C, ~ 6 ГПа), вблизи линии равновесия алмаз-графит. На сегодняшний день монокристаллы алмаза такого типа остаются относительно мало исследованы. Вместе с тем они представляют особый интерес для промышленности, поскольку могут быть использованы для изготовления полупроводниковых элементов на алмазных подложках [1].

Использование метода рентгеновской топо-томографии позволило восстановить трехмерную структуру образцов по наборам рентгеновских топограмм, полученных в геометрии Лауэ на лабораторном источнике рентгеновского излучения [2]. Полученные трехмерные реконструкции позволили описать характер распределения и пространственную конфигурацию содержащихся в образцах включений и линейных дефектов. Анализ объемных изображений показывает, что в образцах присутствуют неоднородности и линейные дефекты. Линейные дефекты представляют собой дислокационные пучки, которые выходят из центра кристаллизации и расходятся в направлениях роста кристалла [100] и [111].

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

Список литературы:

1. Kasu Makoto // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. - 2016. - Т. 62.- С. 317.

2. Анисимов Н.П., Золотов Д.А., Бузмаков А.В. и др. // Кристаллография. - 2023. - Т.68. - № 4. - С. 507.

80

Особенности структуры мультислоёв липида DPPC на поверхности кремнезольных гидрозолей

Authors: Юрий Волков¹; Алексей Тихонов²

Co-authors: Виктор Асадчиков¹; Борис Роцин¹; Александр Нуждин¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» - КККиФ

² Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Corresponding Author: volkov.y@crys.ras.ru

На поверхности коллоидных растворов наночастиц оксида кремния (кремнезёмные гидрозоли) наблюдаются специфические электростатические условия, связанные с эффектом приповерхностного расслоения макроионов [1]. Ранее была показана возможность формирования на такой поверхности спонтанно-упорядоченных ламеллярных мультислоёв фосфолипидов [2], способных служить моделью биологической мембраны.

В настоящей работе представлены исследования динамики мультислоя дипальмитойл-фосфатидилхолина (DPPC), в том числе в области фазового перехода плавления, на поверхности растворов наночастиц SiO₂ с характерным размером 10 – 25 нм, по данным синхротронной рентгеновской рефлектометрии и скользящего диффузного рассеяния. Рентгеновские данные были получены на синхротронной станции ID31, ESRF, Гренобль [3], на энергии квантов $E = 71$ кэВ (длина волны $\lambda \approx 0.175$ Å) при пиковой интенсивности $I \approx 10^{19}$ с⁻¹. Измерения проводились в герметичном одноступенчатом термостате [4] в интервале температур 23.5 °C – 45 °C. Расчёт распределений оптической плотности по глубине и параметров внутренних границ раздела проводился в рамках непараметрического модельно-независимого подхода [5].

Рассчитанные структурные данные обнаруживают существенное расхождение строения и динамики формирования мультислоя с аналогичными мультислоями липида дистеаройл-фосфатидилхолина (DSPC) [2]. В частности, структура DPPC проявляет существенно худшую температурную и временную стабильность. Также в ряде случаев выявлено проникновение и накопление наночастиц SiO₂ в объёме липидной мембраны, чего для обсуждаемых систем ранее не наблюдалось.

[1] А.М. Тихонов, В.Е. Асадчиков, Ю.О. Волков и др., Письма в ЖЭТФ 2018, 107 (6): 394.

[2] А.М. Тихонов, В.Е. Асадчиков, Ю.О. Волков и др., Письма в ЖЭТФ 2016, 104 (12): 880.

[3] V. Honkimäki, H. Reichert, J. Okasinski, H. Dosch, J. Synchrotr. Rad. 2006, 13: 426.

[4] А.М. Тихонов, Б.С. Рошин, А.Д. Нуждин и др., ПТЭ 2021, №1, с. 1-5.

[5] I.V. Kozhevnikov, L. Peverini, E. Ziegler, Phys. Rev. B 2012, 85: 125439.

81

Новые подходы в рентгеновской визуализации суставов с использованием различных источников излучения

Authors: Ирина Дьячкова¹; Александр Омельченко¹; Денис Золотов¹; Александр Калоян¹; Валерия Шепелева²; Константин Подурец²; Виктор Асадчиков¹

¹ НИИ "Курчатовский институт"

² НИИ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: sig74@mail.ru

Рассматриваются новые подходы в рентгеновской визуализации суставов при использовании различных источников излучения. При помощи рентгеновского излучения лабораторного микротомографа и синхротронного излучения проведены исследования структуры хрящевой ткани сустава и модельных объектов, близких по структуре и свойствам к хрящевой ткани. Методами проекционной радиографии и микротомографии получены изображения внутренней структуры модельных объектов и хрящевой ткани, пропитанных рентгеноконтрастным веществом. В качестве контрастирующих веществ использовались коллоидные растворы биофункциональных наночастиц оксидных бронз титана и молибдена. При пропитке коллоидным раствором модельных объектов на основе полиакрилового гидрогеля и суставного хряща биофункциональные наночастицы из раствора проникают вглубь ткани, образуя агломераты вблизи дефектов. Показано, что наряду с проекционной радиографией на источнике СИ, позволяющей выявить внутреннюю структуру суставного хряща и распределение наночастиц в проекции плоскости экрана, можно детально визуализировать структуру хряща и распределение наночастиц при проведении исследований на лабораторном микротомографе. При помощи компьютерной обработки полученных рентгеноконтрастных изображений было восстановлено распределение наночастиц в суставном хряще.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

82

Расшифровка рентгеновских фотоэлектронных спектров с помощью квантовохимических расчётов

Authors: Артём Андреев¹; Владимир Станкевич¹; Егор Шрамков¹; Леонид Суханов¹; Ратибор Чумаков¹

¹ НИИ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: egor@shramkov.ru

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия является одним из основных методов изучения строения твёрдого тела, позволяющий определить элементный состав, химические связи, плотность электронных состояний и т.д. Фотоэлектронные спектры для стандартных поверхностей твёрдых тел хорошо известны и имеют, как экспериментальное, так и теоретическое подтверждение. Однако, анализ спектров наноразмерных и многослойных структур значительно усложняется. Это может быть связано в том числе с проявлением квантовых эффектов в сверхтонких плёнках (1-3 атомарных слоя), взаимным влиянием слоев и их перемешиванием. С целью интерпретации таких «запутанных» спектров предлагается использовать методы квантовой химии, а именно нахождение распределения электронной плотности по физическому объёму исследуемого кластера за счёт численного решения уравнения Шредингера методом функции Грина в приближении линейной комбинации атомных орбиталей.

В качестве примера расшифровки с помощью данного подхода будет рассмотрена интерпретация рентгеновского фотоэлектронного спектра от двух кластеров: первый состоял из монокристалла германия, оксида германия и напылённого на его поверхности фторида фуллерена C60F18; второй состоял из монокристалла германия и напылённого на его поверхности фторида фуллерена C60F18. По предварительным расчётам, а также схожим экспериментам [1], предполагалось увидеть фторирование поверхности германия (образование химических связей фтор-германий) в случае с отсутствием оксидного слоя; для кластера с наличием оксидного слоя схожих экспериментов не проводилось.

Решение квантово-химической задачи осуществлялось при помощи кода, написанного на языке Python с применением библиотек ASE и GPAW, с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт» (<http://ckp.nrcki.ru/>).

1. R. Z. Bakhtizin et al., Adsorption and electronic structure of single C60F18 molecule on Si(1 1 1)-7 x 7 surface //Chemical Physics Letters. – vol. 482 – 2009. – С. 308-311.

83

Измерение и оценки наведенной радиоактивности при работе микротрона-рекуператора ЛСЭ

Author: Tatiana Salikova¹

¹ Vladimirovna

Corresponding Author: salikova@inp.nsk.su

В режиме генерации терагерцового излучения энергия электронов достигает 12÷15 МэВ при работе первой очереди ЛСЭ, 20 МэВ – второй очереди, 40 МэВ – третьей очереди ЛСЭ. Энергетический спектр тормозного излучения лежит в области Гигантского Дипольного Резонанса (ГДР). В результате фотоядерных реакций происходит активация воздуха, охлаждающей воды, медных деталей микротрона-рекуператора, а также изделий из нержавеющей стали. На основе общепринятого метода расчета наведенной радиоактивности были проведены оценки, и полученные данные сопоставлены с измеренными значениями.

Некоторые отличия в измеренных и оценках можно объяснить тем, что неточно были учтены начальные данные в расчетах (время облучения, полученная доза, процент изотопов в материале). Режим работы ЛСЭ на потребителей определяет время облучения, энергетический спектр тормозного излучения. Необходимо учитывать и время профилактики (простоя) микротрона-рекуператора. В расчетах использован процентный состав изотопов в нержавеющей стали марки .

Для коротко живущих радиоизотопов легко оценить «запретный период», в течении которого после завершения облучения уровень концентрации токсичных веществ и уровень излучения в зале понижаются до безопасных величин. Сложно сделать оценки для долго живущих изотопов, т.к. происходит накопление активности радиоизотопов. Поэтому необходимо эмпирически вносить поправку в расчет запретного периода. И на основе проведенных измерений прогнозировать уровни активации деталей микротрона-рекуператора.

Возможности и проблемы оперативной интеграции съёмных блоков с полимерными преломляющими рентгеновскими линзами в рентгенофлуоресцентный микроскоп, размещенный на станции «Локальный и сканирующий РФА-СИ» накопителя ВЭПП-3

Authors: Dmitry Sorokoletov¹; Vladimir Nazmov²; Fedor Darin³; Iakov Rakshun⁴; Elena Reznikova⁵

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS*

² *BUDker Institute of Nuclear Physics*

³ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.*

⁴ *Budker Institute of Nuclear Physics*

⁵ *Budker INP SB RAS*

Corresponding Author: d.s.srkv@yandex.ru

Рентгенофлуоресцентный микроскоп, расположенный на станции «Локальный и сканирующий РФА-СИ» на 3 канале синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3, применяется в ряде исследований [1], проводимых с использованием рентгеноспектрального метода микро-РФА-СИ. Его использование позволяет неразрушающим способом получать пространственные карты распределения химических элементов внутри выбранных внутренних (как приповерхностных, так и существенно заглубленных) областей образцов различной природы с разрешением в 15-20 мкм, ограниченным поперечным размером фокусного пятна используемой поликапиллярной рентгеновской оптики. Однако, в некоторых случаях (к примеру, [2]) может возникнуть весома необходимость в увеличении указанного пространственного разрешения для получаемых с помощью данного метода рентгенофлуоресцентных карт до 5-10 мкм. Это можно сделать интеграцией в используемую установку других типов рентгеновской оптики или достаточно длительным экспериментом, подразумевающим набор сигнала с экстремально высоким (100-1000 и более) соотношением сигнал-шум и последующую обработку полученных рентгенофлуоресцентных карт методами деконволюции.

Последний способ при его применении на используемом оборудовании дает возможность всего лишь 1.5-кратного восстановления при относительных массовых концентрациях в многие сотые доли процентов (или всего лишь 2-кратного восстановления минорных и матричных элементов, составляющих основной состав пробы, с концентрациями в десятки процентов), причем по единственной, заранее выбранной, координате [3]. Что касается первого способа, то для источников СИ второго поколения выбор рентгенооптических схем, в принципе, существенного ограничен. Так, для используемой станции СИ и текущей конфигурации установленного на ней рентгенофлуоресцентного микроскопа, к примеру, конструктивно возможна (без необходимости очень существенных, критических перекомпоновок) интеграция в нее съёмных блоков с преломляющими рентгеновскими линзами, но только при условии, что их фокусное расстояние будет в диапазоне 40-400 мм. Такая интеграция при возникновении подобной необходимости может быть выполнена относительно оперативно, за одну-две рабочие смены.

В различное время нами были проведены работы по установке во входную часть рентгенофлуоресцентного микроскопа и последующей юстировке двух различных блоков, содержащих наборы полимерных преломляющих рентгеновских линз и фокусирующих первичное излучение по одной и двум поперечным координатам, соответственно. Были изучены характеристики фокусных пятен, измеренные значения их размеров ориентировочно составили от 15 до менее, чем 10 мкм. В последнем случае увеличение разрешения становится сопоставимым с эффектом от применения методов деконволюции, но в которых количество требуемого полезного сигнала дополнительно увеличивается в десятки раз.

Кроме того, в процессе проведения данных работ были исследованы вопросы, касающиеся точности и стабильности пространственной ориентации и положения блока относительно пучка для отъюстированных блоков линз. Как оказалось, существенную часть процесса юстировки необходимо повторять после каждого перепуска источника СИ, который происходит периодически (раз в несколько часов). По это причине имело место недостаточное соотношение

сигнал-шум в используемой схеме эксперимента, что, в итоге, вместе с некоторыми несовершенствами используемого процесса юстировки, также выясненных в процессе работы, негативно повлияло на определяемую точность размера выходного фокусного пятна. С учётом полученного опыта также была подготовлена стратегия проведения более точного измерения размера фокуса, которая, среди всего прочего, включает в себя определенные рекомендации применительно к оптимальной конфигурации пробного образца и его держателя, а также к способу его сканирования.

[1] <https://ssrc.bioml.org/#!page/vepp3station3>

[2] V. V. Zvereva et al. Mercury in archeological hair samples from Xiongnu burials (Noin-Ula, Mongolia): SR XRF and CXRM analysis. // X-Ray Spectrometry, 2017, 46. <https://doi.org/10.1002/xrs.2798>

[3] D. S. Sorokoletov et al. Improving the Spatial Resolution of the SR Micro-XRF Installation by Variational Tikhonov Regularization Algorithms. // Physics Procedia, 2016, 84. <https://doi.org/10.1016/J.PH-PRO.2016.11.050>

85

Быстрый монитор положения и интенсивности пучка синхротронного излучения для экспериментов по изучению быстропротекающих процессов.

Authors: Lev Shekhtman¹; Vladimir Aulchenko²; Anastasia Glushak³; Maksim Kornievskiy¹; Anton Tyazhev⁴

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

² *BINP*

³ *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk National Research State University", Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Novosibirsk State Technical University State University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; National Research TM State University, Tomsk, 634050, Russian Federation*

⁴ *Tomsk State University*

Corresponding Author: l.i.shekhtman@inp.nsk.su

Для изучения детонационных и ударно-волновых процессов в составе экспериментальных станций на ЦКП СКИФ планируется строительство станции «Быстропротекающие процессы». В составе станции будут работать детекторы DIMEX (Detector for imaging of explosions, детектор для изучения взрывных процессов). DIMEX способен регистрировать синхротронное излучение (СИ) от каждого сгустка электронов в накопителе. Поскольку сгустки могут отклоняться от равновесной орбиты, а также различаться по току, то для повышения точности измерений величины сигнала необходим быстрый монитор положения и интенсивности пучка СИ, измеряющий относительное положение и мощность излучения пучка от каждого электронного сгустка в накопителе. Показания этого монитора будут использоваться для корректировки результатов измерений детекторов DIMEX. В составе быстрого монитора положения пучка СИ предполагается разместить 4 датчика, измеряющих сигнал в окрестностях пучка сверху, снизу, справа и слева. При изменении положения пучка будут изменяться соотношения сигнала в соответствующих парах датчиков. При изменении полного потока СИ будет меняться сумма сигналов всех датчиков. Монитор пучка, синхронно с работой детектора DIMEX будет записывать сигналы со всех датчиков во время эксперимента. После проведения эксперимента результаты, записанные с детектора DIMEX, будут корректироваться в соответствии с сигналами датчиков монитора.

86

Система магнитных измерений сверхпроводящих магнитных структур на основе вращающихся рамок

Authors: Артем Зорин¹; Валерий Цуканов¹; Николай Мезенцев¹

¹ ИЯФ СО РАН

Corresponding Author: a.v.zorin@inp.nsk.su

Системы магнитных измерений на основе движущихся (в том числе вращающихся) контуров широко используются для измерений различных магнитных элементов комнатной температуры. В настоящей статье представлена попытка создания подобной системы для сверхпроводящих магнитных структур. Измерительная рамка погружена в глухую вертикальную трубку, верхним концом сообщающуюся с атмосферой. Измеряемый магнит находится снаружи нижней части трубки и имеет криогенную температуру. Решена проблема теплопритока от измерительной трубки к магниту и проблема обмерзания измерительной системы. Для проверки системы проведены измерения сверхпроводящего квадрупольа. Предложены дальнейшие улучшения системы.

87

Генерация мультимодовых вихревых поверхностных плазмон-поляритонов в ТГц диапазоне

Author: Наталья Осинцева¹

Co-authors: Василий Герасимов²; Владимир Павельев³

¹ ИЯФ СО РАН

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет

³ Самарский университет, ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Corresponding Author: natalyaosintseva@gmail.com

В настоящий момент терагерцовый диапазон привлекает интерес в связи с активно осуществляемым переходом в субтерагерцовый диапазон частот (120–350 ГГц) беспроводных сетей (например, 6G). Терагерцовые вихревые бесселевы пучки, полученные на Новосибирском лазере на свободных электронах (НЛСЭ), могут быть применены как для беспроводной, так и для проводной связи. Более того, мультиплексирование бесселевых пучков, что так же было реализовано НЛСЭ, позволит повысить объём передаваемых данных. Одним из методов внедрения пучков в системы связи является генерация поверхностных плазмон-поляритонов на аксиальной поверхности. В данной работе были продемонстрированы результаты формирования многомодовых вихревых плазмон-поляритонов на металлическом цилиндре с покрытием ZnS. Показаны характеристики, позволяющие идентифицировать плазмон-поляритоны, возбужденные суперпозицией вихревых пучков с разными топологическими зарядами l , что необходимо для задач декодирования переданных сигналов в приложениях, связанных с передачей данных.

88

ТЕСТИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ СИНХРОТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНОГО МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА

Authors: Александр Баранников¹; Дмитрий Зверев¹; Иван Лятун¹; Игорь Панормов¹; Анатолий Снигирев¹

¹ БФУ им. И. Канта

Corresponding Author: abarannikov95@gmail.com

С момента своего появления синхротронные источники стали практически основными инструментами для реализации самых передовых научных исследований с использованием рентгеновского излучения. Несмотря на это, доступность таких «Мегасайенс»-установок весьма ограничена. Это связано с высокой конкуренцией среди пользователей, высокой стоимостью «экспериментального времени», а также высокой длительностью рассмотрения заявок на исследования. Данные факторы требуют тщательной проработки плана эксперимента, чтобы выделенное пользователям время было использовано максимально эффективно. Также это затрудняет тестирование новой рентгеновской оптики и экспериментальных методов.

В данном контексте особое значение приобретает возможность и уровень подготовки, проводимой до начала проведения синхротронного эксперимента. В настоящей работе представлен лабораторный комплекс, разработанный для тестирования рентгеновской оптики и подготовки к синхротронным исследованиям [1].

Данный комплекс позволяет значительно сократить время синхротронного эксперимента, а также повысить его качество, принимая на себя ряд задач, не требующих высокого временного и энергетического разрешения. Сюда входят такие методы, как фазовоконтрастная проекционная микроскопия и томография, микроскопия с использованием преломляющих линз, малоугловая рентгеновская дифракция, а также рентгеновская топография с высоким пространственным разрешением [2]. Кроме того, комплекс активно используется для тестирования оптики, изготавливаемой для новых российских синхротронов 4-го поколения, а именно преломляющих рентгеновских линз [3,4], трансфокаторов [5] и алмазной оптики [6,7].

Основным элементом комплекса является микрофокусный рентгеновский источник Excilium MetalJet с жидким GaIn анодом (энергия характеристической линии излучения – 9.25 кэВ). Юстировка оптической схемы производится с помощью двух моторизованных систем позиционирования оптических элементов, ориентированных на различные экспериментальные методы и расположенных напротив двух каналов вывода излучения рентгеновской трубки. Регистрация данных производится с помощью детекторного блока, включающего в себя энергодисперсионный детектор и три рентгеновские камеры с разной чувствительностью и пространственным разрешением в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм.

Литература.

1. Barannikov A. et al. Laboratory complex for the tests of the X-ray optics and coherence-related techniques // EUV and X-ray Optics, Sources, and Instrumentation. – SPIE, 2021. – Т. 11776. – С. 50-60.
2. Barannikov A. et al. X-ray diffraction imaging of the diamond anvils based on the microfocus x-ray source with a liquid anode // Rev. Sci. Instrum. 2022. Vol. 93, № 8. P. 083903.
3. Petrov A.K. et al. Polymer X-ray refractive nano-lenses fabricated by additive technology // Opt. Express. 2017. Vol. 25, № 13. P. 14173.
4. Barannikov A. et al. Optical performance and radiation stability of polymer X-ray refractive nano-lenses // J. Synchrotron Rad. 2019. Vol. 26, № 3. P. 714–719.
5. Narikovich A. et al. CRL-based ultra-compact transfocator for X-ray focusing and microscopy // J. Synchrotron Rad. 2019. Vol. 26, № 4. P. 1208–1212.
6. Shevyrtalov S. et al. Towards high-quality nitrogen-doped diamond single crystals for X-ray optics // J. Synchrotron Rad. 2021. Vol. 28, № 1. P. 104–110.
7. Barannikov A. et al. X-ray diffraction imaging of diamond x-ray optics in the laboratory // Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XVI. SPIE, 2021. P. 24.

89

Применение преломляющей оптики для когерентной микроскопии на ондуляторных станциях источников СИ 4-го поколения

Authors: Yuri Khomyakov^{None}; Iakov Rakshun¹; Vladimir Chernov²

¹ Budker Institute of Nuclear Physics

² BINP

Corresponding Author: yu.v.khomyakov@yandex.ru

В последние десятилетия активно развиваются методы высокоразрешающей рентгеновской микроскопии и микротомографии. Благодаря росту когерентного потока фотонов на ондуляторных станциях современных источников СИ всё чаще применяются методы когерентной визуализации, позволяющие достигать пространственного разрешения на уровне ~10 нм, а именно различные варианты птихографии. В таких методах при сканировании сфокусированным пучком субмикронных размеров чрезвычайно важно обеспечить стабильность во времени, предотвратить генерацию паразитных интерференционных структур и сохранять максимально высокий поток фотонов. В работе предложен концепт ондуляторной станции источника СИ 4-го поколения для когерентной визуализации в жёстком рентгеновском диапазоне с использованием преломляющих рентгеновских линз. Описаны сценарии эксперимента и режимы работы оптики, позволяющие варьировать масштаб исследуемой области. Предложены решения, нивелирующие недостатки бериллиевых линз.

90

Малоугловое рентгеновское рассеяние в разработке лекарств

Authors: Roman Moryachkov¹; Vladimir Zabluda²; irina Shchugoreva^{None}; Анна Кичкайло³; Полина Артюшенко³

¹ *Kirensky Institute of Physics*

² *Kirensky Institute of Physics Russian Academy of Sciences, Siberian Branch*

³ *ФИЦ КНЦ СО РАН*

Corresponding Author: mrv@iph.krasn.ru

На сегодняшний день идёт активный поиск молекулярных агентов, которые могут выступать аналогами или заменой моноклональным антителам, ввиду сложности, долгого времени и дороговизны их разработки, для применения в терапии и диагностике. Одними из таких перспективных кандидатов выступают аптамеры на основе нуклеиновых кислот - короткие (10-100 нуклеотидов) одноцепочечные молекулы ДНК или РНК, которые селективно подбираются к своей молекулярной мишени и обладают сравнимыми с антителами специфичностью и аффинностью, обладая при этом гораздо меньшими молекулярной массой и размером. Часто подобные молекулы удаётся проанализировать биологическими методами, но информация о структуре ограничивается определением наиболее вероятных комплементарных пар в общей структуре молекулы. Определение третичной, пространственной структуры, часто затруднено сложностью в кристаллизации подобных молекул для изучения их с помощью рентгеновской дифракции. На помощь приходит метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), который позволяет изучить форму молекулы аптамера, которая уникальна для конкретной последовательности и отвечает за его свойства по распознаванию молекулярных мишеней. Кроме этого, с помощью МУРР удаётся изучить поведение биомолекул в растворе при изменяющихся внешних условиях, дополнительно подтвердить образование комплекса с целевым белком и пространственное расположение молекул относительно друг друга в комплексе. Совместно с молекулярным моделированием метод МУРР даёт возможность восстановить структуру биомолекул напрямую в растворе. В докладе будут представлены примеры применения метода МУРР на различных объектах, синхротронные станции и лабораторные установки, на которых можно проводить измерения МУРР, а также различные подходы в обработке данных МУРР от сложных многокомпонентных систем и при олигомеризации образца.

91

Investigation of influence electron beam treatment on thermal decomposition of TATB crystals

Authors: Mikhail Mikhailenko¹; Marat Sharafutdinov²; Boris Tolochko³; Evgenii Smirnov⁴

¹ *Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS*

² *ISSCM SB RAS, BINP SB RAS*

³ *Institute of solid state chemistry and mechanochemistry*

⁴ *FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin»*

Corresponding Author: mikhailenko@solid.nsc.ru

TATB (1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene) is used as a heat-resistant and insensitive high explosive. Research on the influence of ionizing radiation on the properties of TATB is important due to scope of its application.

TATB was processed with a beam of accelerated electrons using the ILU-6 accelerator (BINP SB RAS). Doses reached 450 kGy (J/g).

In situ study of TATB transformations upon heating was carried out using synchrotron radiation (station on the channel 5b VEPP-3). The data was supplemented by studies using DTA, ESR and electron microscopy methods.

It was show a decrease in onset-point temperature of intensive decomposition and significant acceleration a process of carbon phase formation.

92

Совместный анализ EXAFS и EXELFS данных на примере наноразмерных соединений титана

Authors: Игорь Аверкиев¹; Ольга Бакиева¹; Владимир Кривенцов²

¹ *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск*

² *ЦКП "СКИФ", Кольцово*

Corresponding Author: averkiev1997@mail.ru

Переход от «классических» материалов к наноразмерным материалам, приводит к появлению изменений в различных масштабах, начиная от модификации структуры и заканчивая изменениями на атомном уровне. Ведущую роль в формировании функциональных свойств наноматериалов играет ближайшее атомное окружение. Методы с использованием синхротронного излучения являются мощными инструментами исследования локального окружения вокруг атома определенного типа. Среди большого количества синхротронных методов особое место занимает спектроскопия протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS – Extended X-ray Absorption Fine Structure). В основе метода лежит регистрация когерентного рассеяния фотоэлектрона на локальном окружении возбуждаемого атома [1]. Подобные процессы формирования спектроскопических особенностей происходят при возбуждении внутреннего уровня атома электронным ударом. Это реализовано в спектроскопии протяженной тонкой структуры потерь энергии электронов (EXELFS – Extended Energy Loss Fine Structure) [2]. При этом удобно использовать EXAFS для получения информации об окружении атома металла, а EXELFS для анализа окружения легкого элемента. Поскольку спектры, полученные как с помощью рентгеновского, так и электронного возбуждения имеют одну природу – рассеяние вторичного электрона/фотоэлектрона на ближайшем окружении возбуждаемого атома – то анализ экспериментальных данных можно проводить в рамках решения одной задачи.

В настоящей работе была предложена система интегральных уравнений Фредгольма первого рода, содержащая EXAFS и EXELFS данные. В качестве метода решения системы интегральных уравнений выбран метод регуляризации по Тихонову [3]. Апробация решения предложенной системы была проведена на модельных расчетах, что позволило нам оценить минимальные погрешности, возникающие при обработке данных. Проведено исследование локальной атомной структуры реальных систем металл/легкий элемент. Объектами исследования являлись: титановая фольга и наноразмерные порошки TiH₂, TiC и Ti₂AlC. Получены параметры локальной атомной структуры: парциальные длины химических связей, координационные числа, факторы Дебая-Валлера для окружения атомов титана и углерода.

Экспериментальные EXAFS спектры К-края титана получены на синхротронной станции УНУ «Станция EXAFS спектроскопии» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ

СО РАН в режиме флуоресценции. Экспериментальные EXELFS спектры M2,3-края титана и K-края углерода получены на Оже-микронде Jeol JAMP-10S в режиме отражения от поверхности образца.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Отдела ФХП УдмФИЦ УрО РАН (№1022040600207-2). Работа была частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для ЦКП «СКИФ» (FWUR-2024-0040).

1. Rehr J. J. and Albers R. C. Rev. Mod. Phys. 72, 621.
2. Ruts Yu.V., Guy D.E., Surnin D.V., Grebennikov V.I. Secondary Electron Fine Structure - A Method of Local Atomic Structure Characterization // Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials, ed. H.S. Nalwa, Volume 2: Surface and Interface Analysis and Properties, 2001, Chapter 14, pp. 1-36
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 283 с.

93

Устройство двумерной фокусировки дифракционно ограниченных источников на основе кремниевой планарной преломляющей оптики

Authors: Михаил Сороковиков¹; Дмитрий Зверев¹; Александр Баранников¹; Вячеслав Юнкин²; Алексей Серегин³; Юрий Волковский³; Павел Просоков³; Анатолий Снигирев¹

¹ БФУ им. И. Канта

² ИПТМ РАН

³ НИИ «Курчатовский институт», ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»

Corresponding Author: mnsorokovikov@gmail.com

Представленная научная работа посвящена разработке, изготовлению и испытанию устройства двумерной фокусировки рентгеновского излучения на основе планарных кремниевых составных преломляющих линз (СПЛ) [1,2]. Предложен новый метод формирования двумерной фокусировки с использованием двух планарных кремниевых СПЛ, расположенных ортогонально друг за другом вдоль оптической оси. Такой подход позволяет фокусировать рентгеновское излучение в вертикальном и горизонтальном направлениях с заданными параметрами (размер фокуса и фокусное расстояние) в широком диапазоне энергий.

Изготовление и юстировка рентгенооптического устройства проводилась на базе УНУ «SynchrotronLike» БФУ им. И. Канта. Двумерная фокусировка рентгеновского излучения с коррекцией астигматизма экспериментально продемонстрирована на исследовательской станции РКФМ «КИСИ-Курчатов». Дополнительно реализована возможность коррекции астигматизма оптической системы, что позволяет существенно улучшить пространственное разрешение сканирующих методов исследования, связанных с асимметрией формы синхротронного источника излучения. Уникальное устройство двумерной фокусировки имеет огромный потенциал практического применения на новых источниках синхротронного излучения.

Литература.

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler. Nature. V. 384. № 6604. 49 (1996).
2. A. Snigirev, I. Snigireva, M. Grigoriev, V. Yunkin. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II 6705, 670506 (2007).

95

Текущий статус станции EXAFS спектроскопии в ЦКП СЦСТИ. Возможности XAFS-спектроскопии для изучения наносистем сложного состава.

Author: Vladimir Kriventsov¹

¹ SRF SKIF Boreskov Institute of Catalysis

Corresponding Author: kriven@mail.ru

Кривенцов В.В.

ЦКП "СКИФ", Кольцово, 630559, Россия

e-mail: kriven@mail.ru, тел.: +7 (923) 2392649

В докладе, на примере работ, выполненных за последние несколько лет на станции EXAFS спектроскопии Сибирского Центра Синхротронного и Терагерцового излучения (СЦТСИ, Новосибирск) рассмотрены аппаратные и методические особенности, методики обработки экспериментальных данных и анализа полученной структурной информации. Для широкого круга исследованных наносистем сложного состава продемонстрированы возможности рентгеновской спектроскопии поглощения в «жестком» диапазоне (XANES/EXAFS), как самостоятельного метода, так и в комплексе с другими физическими методами исследования – РФА СИ, ПЭМВР, СЭМ, РФЭС и др. Рассматриваемый метод наиболее эффективен, когда применение традиционных структурных методов проблематично, например, при изучении наноразмерных систем «сложного» состава с характерным размером ~1-10 нм и низким содержанием по исследуемому элементу. Показана перспективность использованного комплексного подхода для исследования наносистем сложного состава: капсулированных упорядоченных наноструктур, биологических наноматериалов, нанокompозитных катализаторов, атомарно-диспергированных наноматериалов, модельных образцов сложного состава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП "СКИФ" Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

96

Структурное исследование каталитических наносистем платиноид/углерод методом рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES/EXAFS).

Author: Владимир Кривенцов¹

¹ ЦКП "СКИФ"

Corresponding Author: kriven@mail.ru

Структурное исследование каталитических наносистем платиноид/углерод методом рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES/EXAFS).

В.В. Кривенцов.

ЦКП "СКИФ", Кольцово, 630559, Россия

e-mail: kriven@mail.ru, тел.: +7 (923) 2392649

В докладе представлены результаты исследования методом рентгеновской спектроскопии поглощения XANES/EXAFS особенностей состояния и локальной структуры металл-углеродных нанокompозитных катализаторов, содержащих наноразмерные формы платиновых металлов. 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, Ru-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 флюоресценции 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. Показаны корреляции между строением активного компонента и каталитическими свойствами исследованных образцов. Продемонстрирована перспективность предлагаемого подхода для исследования каталитических наносистем платиновый металл/углерод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

97

Излучение закрученных фотонов узким пучком электронов в эллиптическом ондуляторе.

Author: Vladislav Ryakin¹

¹ *Tomsk State University*

Corresponding Author: vlad.r.a.phys@yandex.ru

Под закрученным излучением понимается излучение, кванты которого обладают определенной спиральностью, проекцией полного углового момента на ось, вдоль которой распространяется фотон, проекцией импульса на эту ось и модулем перпендикулярной составляющей импульса. Закрученные фотоны используются, например, для создания оптических пинцетов; в области передачи данных, где проекция углового момента играет роль дополнительного числа, характеризующего сигнал; в микроскопии, где такие частицы применяются для увеличения контрастности изображения.

В настоящее время ондуляторы являются стандартным устройством для генерации высокоэнергетического электромагнитного излучения, в том числе закрученного. Свойства закрученных фотонов, излученных круговыми и плоскими ондуляторами, были изучены, например, в работе [1]. Вопрос об излучении закрученных фотонов одним электроном в эллиптическом ондуляторе рассматривался в работе [2]. В ней, в частности, были получены правила отбора, связывающие номер гармоники излучения и проекцию углового момента, а также вероятности излучения закрученных фотонов электроном в эллиптическом ондуляторе.

В данной работе будет представлено обобщение этих результатов на случай узкого гауссового пучка электронов в эллиптическом ондуляторе. Будут представлены правила отбора для когерентного вклада в излучение, а также непосредственно вероятности когерентного и некогерентного излучения закрученных фотонов.

Литература

1. O. V. Bogdanov, P. O. Kazinski, G. Yu. Lazarenko. Probability of radiation of twisted photons by classical currents // *Phys. Rev. A.* – 2018. – V. 97. – 033837.
2. P. O. Kazinski, V. A. Ryakin, Radiation of twisted photons in elliptical undulators // *Russian Physics Journal.* – 2021. – V. 64, No. 4. – p. 717. DOI: 10.1007/s11182-021-02370-x. IF: 0.512.

Три способа косвенного контроля правильности и эффективности вычислительных подходов при решении обратных задач

Authors: Dmitry Sorokoletov¹; Fedor Darin²; Iakov Rakshun³

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS*

² *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.*

³ *Budker Institute of Nuclear Physics*

Corresponding Author: d.s.srkv@yandex.ru

Обратные задачи различного типа могут возникать в различных практических приложениях и областях науки. К примеру, задачи деконволюции могут встречаться в ряде областей оптики и спектроскопии [1, с. 136]. Многие обратные задачи проявляют при попытке их решения неспециализированными методами («наивным» подходом) сильную вычислительную неустойчивость [2, с. 39], поэтому для возможности их приближенного (в определенном смысле) решения разработаны алгоритмы регуляризации [2, с. 47]. С другой стороны, «правила сходимости», являющиеся основой каждого из подобных методов, для получения ожидаемого эффекта требуют соблюдения тех предпосылок, что в них изначально были заложены. Например, метод Тихонова с регуляризатором в виде среднеквадратичной нормы решения [2, с. 66, 68] для получения максимально возможной точности решения требует [3, с. 52-55], чтобы специфика распределения для всех типов погрешностей в выражении свёртки строго подчинялась именно тому правилу, которое предусматривает данный алгоритм в зависимости от его выбранных настроек. Обычно подразумевается, что распределение погрешности в правой части решаемого уравнения должно быть распределено по нормальному закону (что типично, к примеру, для аппаратурных шумов).

Влияние на получаемое решение систематических ошибок со сложными, зачастую неизвестными, спектральными характеристиками, в рамках ряда распространенных алгоритмов можно качественно (приближенно) анализировать по общему виду кривых на составленном графике Пикара [4]. Однако, при этом следует помнить, что на спектр итоговой ошибки, получаемой при решении задачи, также влияет спектр самого получаемого приближения к искомому решению (естественно, заранее неизвестному). В специфических случаях этот эффект выглядит особенно выражено (к примеру, [5]). Это, вместе с принципиальной невозможностью [2, с. 19] получения в практически любых изначально неустойчивых задачах точных характеристик ошибки решения (с приемлемой точностью), приводит к необходимости применения каких-либо прочих косвенных способов контроля специфического влияния погрешностей различного происхождения и природы на получаемое решение.

Нами было предложено три способа анализа результатов работы алгоритмов регуляризации, с помощью которых косвенным образом можно выявлять случаи выражено неправильного или неэффективного применения используемых вычислительных методов. Это общий анализ зависимостей норм невязок от степени регуляризации, моделирование вспомогательных прямых задач с рядом результатов первоначальной обратной задачи, а также моделирование вспомогательных обратных задач с рядом результатов первоначальной обратной задачи. Все три способа предполагают необходимость многократного использования двух и более алгоритмов регуляризации с чередой последовательно вносимых изменений в ряд их настроек и последующего сравнительного анализа. На примерах их применения в задачах деконволюции (при восстановлении серии смоделированных одномерных распределений сигнала, отражающих ряд характерных особенностей, похожих на те, что ожидается при обработке специфических рентгенофлуоресцентных карт, получаемых методом микро-РФА) для этих нестрогих способов анализа была показана неожиданно высокая эффективность. Она выражалась в возможности точного выделения в этих задачах случаев умеренного и сильного нарушения предпосылок, заложенных в используемый алгоритм.

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

[1] В. С. Сизиков. Устойчивые методы обработки результатов измерений. Учебное пособие. СПб., изд-во «Специальная литература», 1999. 240 с

[2] А. С. Леонов. Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации в MATLAB. 2 изд.

М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 336 с.

[3] С. И. Кабанихин. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск, Сибирское научное изд-во. 2009. 457 с.

[4] Jensen T. K., Hansen P. C. Noise propagation in regularizing iterations for image deblurring // Electronic Transactions on Numerical Analysis. 2008. 31. P. 204-220.

[5] D. S. Sorokoletov et al. Improving the Spatial Resolution of the SR Micro-XRF Installation by Variational Tikhonov Regularization Algorithms. // Physics Procedia, 2016, 84. <https://doi.org/10.1016/J.PH-PRO.2016.11.050>

101

Структурное исследование модифицированных оксидов циркония методом рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES/EXAFS).

Author: Владимир Кривенцов¹

¹ ЦКП "СКИФ"

Corresponding Author: kriven@mail.ru

Структурное исследование модифицированных оксидов циркония методом рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES/EXAFS).

В.В. Кривенцов.

ЦКП "СКИФ", Кольцово, 630559, Россия

e-mail: kriven@mail.ru, тел.: +7 (923) 2392649

В заявленном докладе показаны результаты рентгеноспектрального исследования (XANES/EXAFS) состояния и локальной структуры образцов оксидов циркония (модифицированных иттрием, магнием, железом), приготовленных соосаждением и прокаленных при различных температурах. В настоящее время, смешанные оксиды, имеющие структуру флюорита базового состава ZrO₂-х, модифицированные переходными металлами, имеют широкое применение для упрочнения ферритных сталей, для специальных приложений. Известно что, данный материал используется для создания оболочки ТВЭЛов реакторов нового поколения на быстрых нейтронах, работающих в условиях высоких температур и жесткого облучения. Спектры XANES/EXAFS (Zr-K, Y-K, Fe-K) исследуемых образцов регистрировались в ЦССТИ, г. Новосибирск. Показано, что со стороны иттрия спектры XANES исследованных образцов однотипны. Можно предположить, что зарядовое состояние и ближайшее окружение иттрия также практически не изменяется в зависимости от состава образцов. Для всех образцов установлено, что иттрий занимает низко-симметричные места с понижением координационного числа Y-O, в сравнении с таковыми для классического флюоритного высоко-симметричного положения. Вопрос о присутствии значительного вклада кластеров оксида иттрия на основании данных XANES/EXAFS остается открытым, поскольку вероятно существует несколько возможных наборов фаз в различных пропорциях (нано-кластеры оксида иттрия + искаженная флюоритная фаза + пирохлорная фаза) дающих схожий результирующий вид спектра. Со стороны циркония, спектры XANES имеют незначительные различия. Видимо для циркония, при неизменном состоянии заряда, изменения в ближайшем кислородном окружении обусловлены различным составом образцов. Установлено, что кривые радиального распределения атомов (PPA), полученные из спектров EXAFS исследуемых образцов, имеют ряд характерных особенностей. Наблюдаются только первые координационные сферы Me-O и Me-Me, однако дальние координационные сферы, в области ~4.0-6.5Å, практически отсутствуют, что указывает на значительные искажения дальнего порядка. Локальное окружение иттрия практически стабильно, при изменении состава образцов, что может свидетельствовать о формировании кластеров, включающих только элементы Y и O. Локальное окружение циркония зависит от состава и предыстории образцов, так как наблюдаются различия в кривых PPA. Согласно EXAFS данным (со стороны циркония), для исследованных образцов можно предполагать, как образование искаженной флюоритной нано-фазы оксида циркония - ZrY_zO_x (частично аморфизованной), со значительными дефектами по анионной и катионным подрешеткам, так и образование искаженной пирохлорной оксидной фазы, которая также имеет дефекты по обеим подрешеткам. Вполне вероятно, что для реальной структуры могут быть также реализованы варианты смеси данных фаз в различных пропорциях. Было высказано предположение, что наличие Y-O кластеров препятствует уточнению структур с использованием модели статистического твердого раствора со структурой

флюорита. Рассчитаны длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. Детально рассмотрены возможные варианты структурных моделей. Дополнительно образцы были исследованы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Данные, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

102

Измерение дифракции "розового" пучка СИ на поликристаллах на станции "Плазма" в ИЯФ СО РАН

Author: Сергей Казанцев¹

Co-authors: Илья Балаш²; Константин Купер³; Борис Толочко⁴; Лев Шехтман⁵

¹ ЦКП «СКИФ», ИЯФ СО РАН, ИХТТМ СО РАН

² ИЯФ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИСЭ СО РАН

³ ЦКП «СКИФ», ИЯФ СО РАН

⁴ ИХТТМ СО РАН

⁵ ИЯФ СО РАН, НГУ, ТГУ, ИХТТМ СО РАН

Corresponding Author: s.kazantsev@alumni.nsu.ru

Станция "Плазма" на 8-м канале бункера СИ ускорительного комплекса ВЭПП-4М предназначена для дифракционных экспериментов по изучению механического поведения материалов под действием лазерного облучения с временным разрешением. Дифракционные эксперименты с поликристаллическими образцами проводятся с использованием монохроматического излучения. Для исследования процессов с характерными временами порядка 100 мкс, дифракционный сигнал на детекторе необходимо регистрировать в режиме ручного счета фотонов, ввиду недостаточного потока фотонов после прохождения монохроматора. Для увеличения потока фотонов на детектор после образца за счет увеличения энергетического разрешения было предложено использовать так называемый "розовый" пучок, образующийся при замене монохроматора на рентгеновское зеркало и набор фильтров. Такая схема эксперимента приводит к размытию и пересечению дифракционных рефлексов, что не позволяет использовать прямые экспериментальные данные для анализа внутренних напряжений. Однако решая обратную задачу, можно из дифракционной картины, снятой с использованием "розового" пучка, восстановить квазимонохроматические дифракционные рефлексы в узком диапазоне длин волн. В докладе будут представлены результаты тестовых экспериментов с дифракцией "розового" пучка на поликристаллических образцах

103

Кремниевые фотодиоды для регистрации синхротронного излучения

Authors: Владимир Забродский¹; Павел Аруев¹; Андрей Николаев¹; Евгений Шерстнёв¹

¹ ФТИ им. Иоффе РАН

Corresponding Author: sildet@mail.ioffe.ru

Кремниевые фотодиоды являются одним из основных инструментов для регистрации синхротронного излучения (СИ). Традиционно, при регистрации СИ используются фотодиоды под брендами AXUV, SXUV (СИА, сейчас фирма Optodiode, ранее IRD). Особенностью этих n+p фотодиодов

является входное окно из нитридизированного диоксида кремния толщиной 5-10 нм (AXUV) или силицидов той же толщины (SXUV).

Разработанные в ФТИ им. Иоффе p+n фотодиоды (SPD) также имеют входное окно толщиной порядка 10 нм на основе силицида. SPD фотодиоды прошли официальную абсолютную калибровку чувствительности на синхротроне в Германии больше 10 раз [1], а также используются больше 20 лет в токамаках РФ. Метрологические свойства фотодиодов ФТИ им. Иоффе позволяют их использовать как вторичные эталоны чувствительности диапазоне энергий квантов от 3.4 до 60 000 эВ в подразделениях РАН и РОСАТОМа. Разработаны и прошли калибровку чувствительности в Германии фотодиоды с интегрированными фильтрами для регистрации диапазона длин волн в области 13.5 нм с подавлением видимого излучения на 5 порядков [2]. Фотодиоды с активной областью диаметр 1.2 мм обладают быстродействием не больше 1 нс [3]. В ФТИ им. Иоффе были разработаны лавинные фотодиоды для вакуумного ультрафиолета с эффективностью регистрации фотонов больше 0.5 электронов/фотон и внутренним усилением несколько 1000 раз [4].

Представленный доклад посвящён последним результатам ФТИ им. Иоффе в области систем регистрации СИ на основе одиночных и многоэлементных сборок SPD фотодиодов.

1. F. Scholze, R. Klein, R. Müller, Metrologia 43, S6-S10 (2006).
2. P.N. Aruev et al, Quantum Electronics. 2012. Vol. 42, No. 10, pp. 943–948.
3. А. П. Артёмов и др. ПТЭ, 2015, № 1, с. 104–108
4. Pavel N. Aruev, et al Optical Engineering, 077103-7 July 2021 • Vol. 60(7)

104

Радиационная стойкость нанокompозитов ПММА

Authors: Vladimir Nazmov¹; Александр Варанд²; Борис Гольденберг³

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

² *ИЯФ СО РАН*

³ *СЦСИ СКИФ, ИЯФ СО РАН,*

Corresponding Author: v.p.nazmov@inp.nsk.su

В.Назьмов ИЯФ СО РАН, ИХТТИМ СО РАН, Новосибирск

А.Варанд ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Б.Гольденберг СЦСИ «СКИФ», ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Полиметилметакрилат (ПММА), обладающий высокой стойкостью к кислотам, высокой механической прочностью, высокой прозрачностью в оптическом диапазоне благодаря чему нашедший широкое применение в промышленности, изучался на предмет устойчивости к рентгеновскому излучению. Облучению синхротронным излучением накопителя источника СИ ВЭПП-3 подвергались нанокompозиты, синтезированные в одностадийном процессе полимеризации смеси метилового эфира метилметакриловой кислоты и растворённой в ней примеси радиопротектора. В качестве радиопротекторов были выбраны молекулы, содержащей одну или несколько ароматических групп: флюорен, антрацен, нафталин [1]. Известно, что ароматические группы под действием радиации переходят в возбуждённое состояние с последующей релаксацией путём потери энергии через излучение как правило в видимом или инфракрасном диапазоне спектра. Облучение проводилось широким пучком немонахроматического излучения в диапазоне энергий кантов 5-40 кэВ и диапазоне доз от 0.1 до 10 кДж/см³. В процессе изучения измерялась потеря массы облучённых различными дозами таблетками нанокompозитов ПММА, и спектры поглощения в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра.

Заключение. Потеря массы системой ПММА/нанокompозит не выявила какого-либо заметного влияния примеси на радиационную стойкость ПММА, синтезированного без примесей.

Цитированная литература

1. L.Tang, T.Peng, G.Wang, X.Wen, Y.Sun, S.Zhang, S.Liu, L.Wang, Synthesis and radioprotective effects of novel benzyl naphthyl sulfoxide (sulfone) derivatives transformed from Ex-RAD, Med. Chem. Commun., 2018, 9, 625–631

105

Об устройстве и возможностях оптического элемента «Узел зеркал» станции 1-3 СКИФ

Authors: Алексей Завьялов¹; Марат Шарафутдинов¹; Николай Чхало²; Борис Толочко¹

¹ *Лаборатория методов синхротронных исследований, Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН*

² *Отдел многослойной рентгеновской оптики, Институт физики микроструктур РАН, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН*

Corresponding Author: zav_alexey@list.ru

Для решения задач на секции 1-3-1 «Динамические процессы» станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» требуется излучение в диапазоне 20–40 кэВ [1]. Разработанный под эти требования сверхпроводящий вигглер имеет угол расхождения СИ в горизонтальном направлении $\pm 1,2$ мрад [2], в то время как угол естественного расхождения фотонного пучка составляет $1/\gamma = 0,512 \text{ МэВ}/3 \text{ ГэВ} = 0,171$ мрад. Эти углы дополнительно обрезаны фиксированной маской внутри фронтэнда в сагитальном направлении до величины $\alpha = \pm 0,9$ мрад (полная величина 1,8 мрад) и в меридиональном – $\theta = \pm 0,06$ мрад (полная величина 0,12 мрад). Это позволяет с применением щелей сформировать пучок СИ размерами до $100 \times 10 \text{ мм} \times \text{мм}$ на расстоянии ~ 120 м от источника в месте размещения образца во взрывной камере в отдельном здании станции 1-3. Другая ветвь секции 1-3-1 располагается внутри основного здания и предполагает размещение образца на расстоянии ~ 45 м от источника.

В соответствии с указанными выше особенностями для обеспечения работы станции 1-3 Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН разрабатывается оптический элемент «Узел зеркал». Он позволит обрезать жёсткий диапазон спектра СИ за счёт работы зеркальных поверхностей в режиме полного внешнего отражения на уровне 20–40 кэВ в зависимости от угла падения излучения. Устройство предполагает использование сегментированного первого (концентрирующего) зеркала и цельного второго (ориентационного) зеркала, что позволит концентрировать мощность пучка СИ в меридианальном направлении по трекам от отдельных сегментов первого зеркала на необходимом расстоянии до 120 м, что не исключает также возможности формирования параллельного пучка СИ с частичной коррекцией расхождения, обусловленного фиксированной маской внутри фронтэнда.

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).

[1] Рубцов И.А., Прууэл Э.Р., Тен К.А. и др. Концептуальный проект Станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»: [Электронный ресурс]: в 3 томах. – 2022. – Т. 1: Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс. – С. 115–135. URL: <https://srf-skif.ru/index.php/>

[2] Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А. и др. Сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы для генерации синхротронного излучения на накопителе «СКИФ» // Письма в ЭЧАЯ. – 2023. – Т. 20, № 4 (249). – С. 999–1005.

106

Структурное исследование слоистых двойных гидроксидов на основе $\text{Ni}^{2+}-\text{Al}^{3+}$ и $\text{Zn}^{2+}-\text{Al}^{3+}$

Authors: Владимир Кривенцов¹; Алексей Завьялов¹; Тхи Ван Ань Нгуен²; Борис Толочко²

¹ *ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

² *Лаборатория методов синхротронных исследований, Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН*

Corresponding Author: 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 характеризации 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.

Съёмка 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 измерении составлял ~0.5 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: Кривенцов В. и Завьялов А. благодарны Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. Толочко Б. благодарен Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках Государственного задания Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН (Проект № 121032500071-6). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

1. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // Phys. Procedia. 2016 V. 84 P. 19. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005

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. <https://intranet.cells.es/Beamlines/CLAESS/software/VIPERmanual220.pdf>

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>

*<https://src.biouml.org/#!/page/vepp3station8>

107

XAFS исследование модельных металлоуглеродных нанокompозитов.

Authors: Владимир Кривенцов¹; Виктор Байрамуков²

¹ ЦКП "СКИФ"

² ПИЯФ, НИЦ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: kriven@mail.ru

XAFS исследование модельных металлоуглеродных нанокompозитов.

В.В. Кривенцов (ЦКП “СКИФ”, Кольцово, 630559, Россия)

e-mail: kriven@mail.ru, тел.: +7 (923) 2392649

В.Ю. Байрамуков (ПИЯФ, НИЦ “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия)

e-mail: vbayramukov@gmail.com, тел. +7 (999) 2377590

Технологии длительного хранения отходов ядерного топлива и другие задачи атомной промышленности, ядерной медицины сегодня требуют разработки и создания новых функциональных материалов.

Наноуглеродные структуры (фуллерены, углеродные нанотрубки и другие формы углерода) являются перспективными материалами. Их свойства – термостойкость, электропроводность, теплопроводность, прочность – могут быть улучшены за счет введения металлов. Ключевым принципом изоляции радиоактивных отходов является наличие нескольких барьеров, сдерживающих распространение радионуклидов в окружающей среде. Одним из методов первичной иммобилизации радиоактивных отходов является использование металлоуглеродных нанокompозитных матриц.

Также эти наноматериалы могут быть использованы в ядерной медицине – в качестве контрастирующих средств. Существуют различные традиционные способы создания металлоуглеродных нанокompозитов, то есть введения атомов различных металлов в углеродную матрицу. Была разработана новая технология, основанная на пиролизе (термическом разложении в бескислородной среде) соединений-предшественников – молекул дифталоцианина металла.

Первые эксперименты были проведены на наносистемах иттрий-углерод и европий- углерод.

В качестве предшественников использовались металлоорганические соединения иттрия и европия. Методом рентгеновской спектроскопии поглощения (XAFS) были исследованы образцы новых металлоуглеродных нанокompозитов Y/C и Eu/C, разработанных в Петербургском институте ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт» (Гатчина). Спектры EXAFS (Y-K, Eu-L3) всех исследованных образцов были зарегистрированы на станции EXAFS спектроскопии (СЦСТИ, Новосибирск). Установлено, что в зависимости от температуры пиролиза металл может стабилизироваться в различных формах – в виде атомарно диспергированных иттрия и европия, а также в виде кластеров и наночастиц. Рассчитаны длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. Подробно рассмотрены возможные варианты структурных моделей. Данные XAFS хорошо согласуются с результатами ПЭМВР, РФЭС, РФА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП “СКИФ” Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН.

108

Детектор высокого разрешения для визуализации рентгеновского излучения

Authors: Alexander Astafyev¹; Zverev Dmitrii¹; Maria Voevodina¹; Anatoly Snigirev¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

Corresponding Author: followtotherabbit@gmail.com

Непрямой метод визуализации с использованием цифровых камер и кристаллов сцинтилляторов является наиболее распространённым подходом к получению рентгеновских изображений на станциях синхротронного излучения. Принцип действия таких детекторов основан на поглощении рентгеновского излучения сцинтиллятором и дальнейшем переизлучении фотонов в области видимого спектра. Далее, видимый свет через оптическую систему передается и фокусируется на сенсор цифровой камеры, который преобразует оптическое излучение в цифровой сигнал.

В докладе представлен компактный 2-D рентгеновский детектор с 20 Мп монохромным CMOS сенсором, со скоростью съемки до 19 кадров в секунду при разрешении 5496x3672 пикселей. Сцинтиллятор на основе LuAG:Ce толщиной 20 мкм обладает: хорошей чувствительностью, высоким коэффициентом световыхода, малым временем послесвечения и длиной волны эмиссии 535 нм, которая хорошо согласуется со спектральной чувствительностью сенсора камеры, что позволило добиться высокого разрешения. Поле видимости детектора 4.7x3.2 мм, эффективный размер пикселя 0.8 мкм при физическом размере 2.4 мкм.

Тестирование по проверке эффективности детектора проводилось на лабораторном источнике Excillum MetalJet D2 с жидким GaIn анодом. В качестве объектов тестирования использовались металлическая сетка с периодом 25.4 мкм и структура Siemens Star. Дополнительно, были получены рентгеновские изображения биологических объектов (оса и многоножка). В результате измерений установлено, что рентгеновский детектор обладает высокой чувствительностью, пространственным разрешением <math><3\text{ мкм}</math>, малыми линейными искажениями ($\leq 1\%$). Такие параметры обеспечивают получение качественных и детализированных рентгеновских изображений, и позволяют использовать детектор в рентгеновском имиджинге, топографии, микроскопии и высокоразрешающей дифрактометрии, а также, для интроскопии на станции СИ, для диагностики пучка, приборов, и юстировки образцов.

Литература.

1. A. Koch, C. Raven, P. Spanne, A. Snigirev, J. Opt. Soc. Am. A., 1998, p. 1940 – 1951.

109

Компактный рентгеновский трансфокатор для рентгеновских источников нового поколения

Author: Aleksandr Korotkov¹

Co-authors: Ivan Lyatun²; Anton Narikovich³; Dmitrii Zverev³; Igor Panormov³; Anatoly Snigirev¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

² X-Ray Coherent Optics Laboratory (IKBFU)

³ IKBFU

Corresponding Author: askorotkov9@gmail.com

В связи с активным строительством синхротронных источников 4-го поколения, наиболее востребованной оптикой становится преломляющая, позволяющая работать в широком диапазоне энергий. Кроме того, она демонстрирует свою универсальность и применимость не только в исследовательских методах, но и в диагностике источника, подготовки и транспорте излучения [1].

Широкое распространение преломляющих линз обусловлено не только успехами разработок самих оптических элементов, но и созданием специальных объективов на их основе, с возможностью управления блоками линз - трансфокаторов. В работе представлены результаты разработки и развития нового класса устройств - компактного трансфокатора (КТ) для задач высокоразрешающей рентгеновской микроскопии и томографии [2]. Устройство прошло успешные испытания и готовится к использованию на станциях центра коллективного пользования "СКИФ".

В компактном трансфокаторе реализована возможность управления отдельными оптическими элементами независимо друг от друга. Таким образом, КТ становится универсальным устройством, обеспечивающим гибкую настройку фокусных расстояний, и открывает целый ряд возможностей и методов применения для широкого спектра задач. В частности, наиболее перспективным выглядит применение в области спектроскопии для формирования симметричного освещения образца с возможностью изменения области освещения образца и регулировки потока излучения.

Список литературы

1. Snigirev A. et al. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays // Nature. Springer Science and Business Media LLC, 1996. Vol. 384, № 6604. P. 49–51.
2. Narikovich A. et al. CRL-based ultra-compact transfofocator for X-ray focusing and microscopy // Journal of Synchrotron Radiation. International Union of Crystallography (IUCr), 2019. Vol. 26, № 4. P. 1208–1212.

110

ИССЛЕДОВАНИЕ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ 1 ТВт ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ПЛЕНОЧНОЙ МИШЕНЬЮ

Authors: Алексей Самсонов¹; Диана Горлова²; Иван Цымбалов²; Андрей Савельев³; Александр Павлов⁴; Николай Никифоров⁴

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет*

² *Институт ядерных исследований РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет*

³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет; Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва*

⁴ *Филиал МГУ в г. Сарове*

Corresponding Author: samsonmails@yandex.ru

В настоящее время, в рамках научной программы Национального центра физики и математики, ведется работа по созданию научно-исследовательского комплекса «Мультитера» на базе импульсно-периодических лазерных установок с фемтосекундной и наносекундной длительностью импульсов и энергией ~1 Дж и ~1 кДж, соответственно. На этой 20-тераваттной лазерной установке предполагается создание источника ТГц излучения в процессе релятивистского лазерно-плазменного взаимодействия. Главной особенностью такого подхода является отсутствие эффекта насыщения энергии ТГц излучения. В теории, это означает, что при увеличении энергии основного импульса, при котором также линейно растет квадрат числа ускоренных электронов, мы получим возможность генерировать импульсы ТГц излучения до нескольких процентов от энергии основного импульса.

В данной работе будут представлены результаты экспериментального и численного исследования характеристик ТГц излучения на 1 ТВт Ti:Sa лазерной системе МГУ с аналогичной «Мультитере» экспериментальной схемой для генерации ТГц импульса, где в качестве мишени использовалась лавсановая пленка толщиной 16 мкм. Продемонстрировано создание квазиуниполярного импульса электромагнитного излучения в диапазоне частот 1-5 ТГц с эффективностью по энергии до 0.1% от энергии лазерного импульса и угловым распределением в виде конуса с углом раствора 40°. Полученные результаты работы направлены на оптимизацию характеристик источника ТГц излучения в научно-исследовательском комплексе «Мультитера».

111

АВТОМАТИЗАЦИЯ БЛОКОВ СИСТЕМЫ ОКРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ 1-1 «МИКРОФОКУС» ЦКП «СКИФ»

Author: Артём Складов¹

Co-authors: Михаил Машков²; Святогор Веригин³; Яков Ракшун⁴

¹ *Институт Геологии и Минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия. 2Общество с ограниченной ответственностью “Микрогеософт”, Новосибирск, Россия*

² *Общество с ограниченной ответственностью “Микрогеософт”, Новосибирск, Россия. Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

³ *Институт Геологии и Минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия. Общество с ограниченной ответственностью “Микрогеософт”, Новосибирск, Россия*

⁴ *Институт Геологии и Минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия. Сибирский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики, Новосибирск, Россия*

Corresponding Author: s.g.u@yandex.ru

В рамках работы над экспериментальной станцией 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ» (источник синхротронного излучения, создаваемый в Новосибирской области) на базе программного пакета Sardana [1] была разработана автоматизированная система управления установками

системы окружения образца. Основными управляемыми установками являются блоки конфокальной рентгеновской микроскопии и исследований при высоком давлении [2]. Каждый из них построен на многокоординатных системах перемещения, требующих разработки и программной реализации алгоритмов высокоточных синхронных перемещений [3, 4].

Алгоритмизация экспериментальной работы на этих блоках осуществляется макросами, реализующими оптимальные алгоритмы сканирования и перемещения. С их помощью реализуется набор типовых экспериментов станции. Архитектура макросов позволяет в каждой точке n-мерного сканирования воспроизводить и стандартную программу действий, и функцию, заданную оператором.

Программным интерфейсом, позволяющим макросам взаимодействовать с устройствами, являются модули этих устройств. Созданные модули предоставляют специализированные функции перемещений, в том числе синхронных, которые совместимы со стандартными вызовами Sardana. Надлежащий вызов этих функций перемещения задает оптимальную траекторию движения, которая исключает потерю направления движения, лишние перемещения и, при наличии обратной связи, проверяет реальное положение в ключевых точках траектории.

Литература:

1. Reszela Z. et al. Sardana—a Python Based Software Package for Building Scientific SCADA Applications //WCO206, PCaPAC2014, Karlsruhe, Germany. – 2015.
2. Рашенко С. В. и др. Использование рентгеновской дифракции *in situ* для изучения минеральных превращений: образование лавсонита при 400 С и 25 кбар //Журнал структурной химии. – 2012. – Т. 53. – №. S7. – С. 46-49.
3. Дарьин Ф. А. и др. // Развитие метода конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования микровключений в различные геологические матрицы // Синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – С. 37-38.
4. Дарьин А. В., Ракшун Я. В. Методика выполнения измерений при проведении рентгенофлуоресцентного анализа с использованием рентгеновской концентрирующей оптики (поликапиллярные линзы) //Системы анализа и обработки данных. – 2013. – №. 2 (51). – С. 119-129.

113

Изменение структуры ПММА в рентгеновских лучах

Authors: Vladimir Nazmov¹; Михаил Михайленко²; Александр Варанд³

¹ *B Udker Institute of Nuclear Physics*

² *ИХТТИМ*

³ *ИЯФ СО РАН*

Corresponding Author: v.p.nazmov@inp.nsk.su

В.Назьмов ИЯФ СО РАН, ИХТТИМ СО РАН, Новосибирск

А.Варанд ИЯФ СО РАН, Новосибирск

М.Михайленко, ИХТТИМ СО РАН, Новосибирск

Б.Гольденберг СЦСИ «СКИФ», ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Изучение поведения материалов под действием радиационных и тепловых нагрузок позволяет понять механизмы деструкции последних и разработать новые более устойчивые к экстремальным условиям материалы. Посредством широкого пучка некогерентного синхротронного излучения в диапазоне энергий квантов от 5 до 40 кэВ воздействовали на плёнки синдиотактического ПММА [1] с толщиной ок. 10 мкм. Изменения надмолекулярной структуры ПММА в облучённых плёнках исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (CuK α , $I=1.54$ А). В результате исследований ПММА с начальной молекулярной массой 107 Да показано, что в процессе облучения последнего происходит двукратная перестройка надмолекулярной структуры. При первой перестройке структура расстояние между цепями увеличивается с ростом дозы до ок. 500 Дж/см³, далее с ростом дозы до ок. 3500 Дж/см³ оно уменьшается (вторая перестройка). Молекулярная масса полимера снижается при наборе дозы монотонно до ок. 10 кДа.

Цитированная литература

1. V.P.Nazmov, A.V.Varand, M.A.Mikhailenko, B.G.Goldenberg, I.Yu.Prozanov, K.B.Gerasimov, Poly-methyl Metacrylate with a Molecular Weight of 107 g/mol for X-ray Lithography, 2023, J.Surf.Invest., 17, 652-655.

114

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ ТЕНИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЛОКАМИ СИСТЕМЫ ОКРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ 1-1 «МИКРОФОКУС» ЦКП «СКИФ»

Authors: Артём Складов¹; Яков Ракшун²

Co-author: Святогор Веригин¹

¹ *Институт Геологии и Минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; 2Общество с ограниченной ответственностью "Микрогеософт", Новосибирск, Россия*

² *Институт Геологии и Минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; Сибирский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики, Новосибирск, Россия*

Corresponding Author: s.g.u@yandex.ru

Цифровая тень [1] – это виртуальная полнофункциональная модель объекта, которая не только эмулирует реально происходящие процессы, но и собирает показания с реальных устройств и изменяется в соответствии с этими данными. В процессе работы над экспериментальной станцией 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ» (источник синхротронного излучения, создаваемый в Новосибирской области) в автоматизированную систему управления системой окружения образца были заложены программные решения, которые позволяют создать цифровую тень системы управления и в будущем позволят создать цифровой двойник системы.

Разработанная система управления существует в двух идентичных экземплярах: как часть программного обеспечения управляющего сервера автоматизированной системы управления и, независимо, как виртуальная машина. Цифровая тень системы управления может использовать тот же программный код для взаимодействия с виртуальными устройствами, что и для взаимодействия с реальными. Средствами программного пакета Tango [2] две системы управления могут быть связаны таким образом, что станут частями одной распределенной системы. Это позволит дублировать команды оператора в виртуальную систему; выстраивать взаимодействия между разными устройствами идентичным образом; собирать данные с реальных устройств; эмулировать технический процесс системы окружения образца.

Литература:

1. Liuzzo S. et al. Update on the EBS Storage Ring Beam Dynamics Digital Twin //19th Biennial International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. – 2023. – С. THPDP010.
2. Meyer J. et al. Tango for experiment control //Proceedings of the ninth international workshop on personal computers and particle accelerator controls. – 2012.

115

Изучение влияние внутренней микроструктуры алюминия на оптические свойства преломляющих линз

Authors: Антон Нарикович¹; Иван Лятун¹; Игорь Панормов¹; Александр Аставьев¹; Александр Баранников¹; Дмитрий Зверев¹; Анатолий Снигерев¹

¹ *БФУ им. И. Канта*

Corresponding Author: narikovich@gmail.com

Рентгеновские преломляющие линзы получили широкое распространение в качестве стандартного инструментария синхротронных станций для микроскопии, когерентных методов визуализации, дифракции и интерферометрии [1, 2]. Для изготовления линз применяют бериллий, алюминий, кремний, алмаз и другие материалы. Алюминиевые преломляющие линзы характеризуются

простотой технологического процесса изготовления и относительно низкой стоимостью. Внутренняя микроструктура алюминия, формируемая при производстве материала и при последующей обработке преломляющих линз, может оказывать существенное влияние на качество волнового фронта. На сегодняшний день влияние особенностей внутренней структуры алюминия на характеристики преломляющей оптики изучено сравнительно мало и является актуальной задачей.

В работе представлены результаты исследования изменений в распределении интенсивности волнового фронта, при прохождении когерентного монохроматического излучения через преломляющую алюминиевую линзу. Алюминиевые линзы имеют параболический профиль преломляющей поверхности с радиусом кривизны 200 мкм и изготовлены из особолистого поликристаллического алюминия методом двухстороннего прессования. Испытания проводились на источники синхротронного излучения ESRF при различных энергиях. В процессе перестройки энергии падающего монохроматического излучения на алюминиевую линзу на детекторе наблюдалось изменение интенсивности излучения прошедшего через линзу, которое обусловлено дифракцией излучения на поликристаллической структуре линзы. Полученные данные лягут в основу дальнейшего изучения аспектов влияния несовершенства и неравномерности внутренней микроструктуры алюминия на качество преломляющих линз.

[1] A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler. //Nature (1996), № 384, P. 49-51

[2] A. Snigirev, I. Snigireva. //C. R. Phys. (2008) № 9 (5–6), P. 507–516

116

Локальная атомная структура оксида железа, полученных методом окисления магнетронно-осажденных металлических пленок

Authors: Андрей Петков¹; Ришат Валеев²; Владимир Кривенцов³

¹ Удмуртский ФИЦ УрО РАН, Удмуртский государственный университет

² Удмуртский ФИЦ УрО РАН

³ ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН

Corresponding Author: rishatvaleev@mail.ru

Тонкие пленки оксидов металлов широко описываются в литературе благодаря их фотохимической стабильности. Тонкопленочные оксидные покрытия на основе переходных металлов IV, V групп широко используются в производстве микроэлектронных и оптических компонентов, защитных и биологически совместимых покрытий [1].

Тонкие пленки оксида железа (III) обладают потенциальными преимуществами [2] для фотоэлектрохимического водородного катализа. Он стабилен в водных растворах с pH выше 3, имеет подходящую ширину запрещенной зоны 2-2,2 эВ, что обеспечивает поглощение солнечного света на 40%. Магнетит (Fe₃O₄) использовался на протяжении тысячелетий в качестве одного из важных магнитных материалов. В частности, модифицированные тонкие пленки Fe₃O₄ обладают превосходными электрическими и магнитными свойствами по сравнению с чистыми пленками [3].

Но условия получения различных фаз оксида железа необходимо контролировать с помощью различных методов структурного и химического анализа и, таким образом, основной целью данного исследования является изучение локального атомного строения в зависимости от условий окисления магнетронно-осажденных пленок железа.

Визуализация морфологии поверхности окисленных на воздухе при различных температурах магнетронно-осажденных пленок железа проводилась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), для выявления полученных фаз оксидов железа использовался рентгено-структурный анализ (РСА). Распределение различных форм оксидов железа по толщине пленок проводилось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Локальная атомная структура исследована методом EXAFS-спектроскопии.

Спектры XANES/EXAFS (Fe-K) исследованных образцов были записаны на УНУ станция EXAFS спектроскопии (СЦСТИ, Новосибирск). Состояние и локальная атомная структура в

образцах исследовались методом XAFS (XANES/EXAFS) спектроскопии по выходу флюоресценции с селективной отсечкой фона. Установлены длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. Данные, полученные различными методами хорошо согласуются между собой. Подробно рассмотрены возможные варианты структурных моделей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Отдела ФХП УдмФИЦ УрО РАН (№ 121030100002-0).

Работа была частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2024-0040).

Также работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351 в части развития методик рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

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 α -Fe₂O₃ 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 Fe₃O₄ thin films: Synthesis, modification and applications // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol.34. – № 8. – P. 1259–1272.

117

Структурное исследование (методами синхротронного излучения) нанокompозитов перспективных для использования в интеллектуальных системах "Умный город/умный дом".

Author: Владимир Кривенцов¹

¹ ЦКП "СКИФ" / Центр ИИ НГУ, Новосибирск

Corresponding Author: kriven@mail.ru

В.В. Кривенцов (ЦКП "СКИФ" / Центр ИИ НГУ, Новосибирск)

e-mail: kriven@mail.ru, тел.: +7 (923) 2392649

Структурное исследование (методами синхротронного излучения) нанокompозитов перспективных для использования в интеллектуальных системах "Умный город/умный дом".

Исследование выполнено за счет финансовой поддержки (гранта) исследовательских центров, предоставленной Автономной некоммерческой организацией «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации», идентификатор соглашения о предоставлении субсидии 000000D730324P540002, договор о предоставлении гранта с Новосибирским государственным университетом от 27.12.2023 № 70-2023-001318.

118

Рентгеновская спектроскопия поглощения - на пути к operando нанометрологии

Author: Александр Солдатов¹

Co-authors: Сергей Гуда ¹; Богдан Проценко ¹; Александр Гуда ¹; Илья Панкин ¹

¹ Южный федеральный университет

Corresponding Author: soldatov@sfedu.ru

В докладе дается обзор применения спектроскопии рентгеновского поглощения с использованием источников синхротронного излучения для определения параметров наноразмерной атомной и электронной структур материалов без дальнего порядка в расположении атомов. В частности, рассматриваются методики анализа EXAFS, XANES, pre-edge XAFS. Особое внимание уделено описанию применения методов машинного обучения для анализа больших данных в спектроскопии рентгеновского поглощения как в области XANES, так и в области EXAFS для определения параметров наноразмерной атомной структуры материалов на основе теоретического анализа экспериментальных спектров. Особенность такого подхода заключается в том, что он позволяет не только с высокой точностью (до 0.002 нанометра) определять межатомные расстояния (функцию радиального распределения), но и угловое распределение атомов (углы химической связи) – по сути параметры 3D локальной атомной структуры любых материалов, включая возможность применения для изучения зависящих от времени процессов и, в частности, исследование изменения параметров наноразмерной атомной структуры материалов в ходе химических реакции или в ходе процесса фотовозбуждения. Описывается новый подход, основанный на развитии методов теоретического анализа тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения в трех основных энергетических диапазонах: предкраевая структура (международный термин pre-edge), ближняя тонкая структура (международный термин XANES) и протяженная тонкая структура (международный термин EXAFS) с применением технологий глубокого машинного обучения в режиме реального времени. Реализация такой методики имеет важное значение не только для расширения фундаментальных знаний, но и для последующего практического использования. На основе разработанного прецизионного подхода к диагностике материалов можно создать метрологическую методику определения параметров наноразмерной локальной атомной и электронной структур материалов с анализом больших данных в режиме реального времени, в том числе в ходе технологически важных процессов (operando режим), и практически без участия человека. Разработка методики рентгеноспектральной нанометрологии крайне важна для решения задач ускоренного создания новых перспективных материалов и реинжиниринга стратегически важных материалов, необходимых для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

119

Исследование структуры пористых материалов с помощью синхротронного излучения: от КТ к МУР томографии

Authors: Kirill Gerke¹; Marina Karsanina²

¹ *MIPT/Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS*

² *RAS*

Corresponding Author: cheshik@yahoo.com

Исследование структуры пористых сред, а также визуализация различных процессов в них, таких как фильтрация и химические реакции, важны для множества приложений, начиная от повышения добычи углеводородов и заканчивая дизайном источников (электрической) энергии. Множество пористых материалов, таких как коллектора нефти и газа, батарейки и почвогрунты, обладают иерархической структурой на различных масштабах и не могут быть исследованы с помощью одного подхода ввиду лимита разрешения. Синхротроны позволяют проводить исследования структуры и процессов в 4D как на микромасштабе (с помощью рентгеновской томографии), так и на наномасштабе (с помощью малоуглового рассеяния). В настоящем докладе мы обсудим основные проблемы и возможности получения информации на разных масштабах и ее соединения в единую цифровую модель. Будут показаны примеры применения на реальных образцах. Особый акцент будет сделан на применении микро- и нано-фокусных пучков для принципиально новых подходов к интерпретации информации о структуре изучаемых объектов.

120

Сцинтиллятор на основе синтетического алмаза для монитора синхротронного пучка

Author: Евгений Липатов¹

Co-authors: Василий Рипенко¹; Дарья Переседова²; Михаил Шулепов¹; Константин Артёмов¹; Александр Бураченко¹; Виктор Винс³; Борис Гольденберг⁴

¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН*

² *Томский государственный университет*

³ *ООО ВЕЛЛИМАН*

⁴ *Институт ядерной физики СО РАН*

Corresponding Author: evlip@mail2000.ru

Синтетический алмаз, благодаря своим уникальным свойствам, находит широкое применение в различных областях науки и техники. Кроме того, алмаз имеет большое число центров окраски, одним из самых распространенных из которых является NV0 центр. Для создания кристаллов с такими центрами, как правило используют синтетические алмазы, выращенные методом температурного градиента, с высоким содержанием примеси замещающего азота. Такие кристаллы подвергают радиационно термической обработке для создания нужных центров окраски [1]. Алмазы с высоким содержанием NV центров являются отличными индикаторами различного рода воздействия.

В данной работе исследован ряд алмазных образцов с содержанием NV0 центров. На рисунке 1 представлены фотография свечения подобного образца под действием синхротронного пучка (а), спектр излучения (б) и расчет отпечатка синхротронного пучка на алмазном кристалле (в).

Данный доклад посвящён результатам исследования и расчетов алмазных кристаллов для задачи создания сцинтиллятора монитора рентгеновского пучка.

ИСТОЧНИКИ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] I. A. Dobrinets, V. G. Vins, A. M. Zaitsev, "HPHT-Treated Diamonds", Springer Series in Materials Science, 181, p.1-270, 2013

Рис.1. а) Свечение центров NV0 в образце алмаза под действием рентгеновского пучка установки ВЭПП-3/4, б) спектр рентгеновского свечения центров NV0 в образце алмаза, в) расчетная площадь рентгеновского свечения синхротронного пучка установки СКИФ на поверхности образца алмаза с центрами NV0

Исследование выполнено при исполнении Государственного контракта ИСЭ СО РАН №40/23/УД

121

Генерация электромагнитного излучения ГГц и ТГц диапазонов при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода

Authors: Александр Ушаков¹; Ксения Мамаева¹; Тимофей Долматов¹; Сергей Романов¹; Павел Чижов¹; Владимир Шевлюга¹; Владимир Букин¹; Сергей Гарнов¹

¹ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук*

Corresponding Author: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

В данной работе представлены экспериментальные результаты генерации импульсного терагерцового (ТГц) излучения, происходящего в вакуумном диоде при эмиссии электронов под действием ультракоротких лазерных импульсов. Принцип работы источника основан на генерации импульсов тока в вакууме за счет эмиссии электронов с поверхности катода и ускорения этих электронов в электрическом поле. Для генерации ТГц излучения в диоде используется сплошной непрозрачный для электронов анод. Замедление электронного пучка на аноде

обеспечивает короткое время спада импульса тока. Это время определяется главным образом кулоновским отталкиванием электронов при их ускорении в межэлектродном пространстве. В данной работе источником терагерцовых импульсов является вакуумный зазор толщиной 1 мм между катодом (тонкая пленка Cs₃Sb на сапфировой пластине) и электрически изолированным от катода анодом – плоской пластиной из нержавеющей стали. В межэлектродном зазоре поддерживают постоянное давление на уровне 10⁻⁶ мбар. Между катодом и анодом прикладывается постоянное напряжение в пределах 5000 – 10000 В. Эмиссия электронов происходит при наклонном падении фемтосекундного лазерного импульса на катод (длительность импульса 50 фс, центральная длина волны 400 нм, энергия импульса до 1 мДж, диаметр гауссова луча 12 мм на уровне e⁻²). Фронт электронной эмиссии распространяется по освещенному участку катода со сверхсветовой скоростью, поскольку угол падения лазерного луча на катод составляет ~60 градусов. Для сравнения было проведено моделирование на основе заданной формы тока с учетом кулоновского отталкивания. В ходе экспериментов были получены зависимости энергии ТГц импульсов от приложенного электрического поля и плотности эммитируемого заряда. Максимальная энергия ТГц импульсов достигает значения до 1 нДж.

122

Осевая фазоконтрастная и абсорбционная рентгеновская микротомография с использованием лабораторных и синхротронных источников

Author: Юрий Кривоносов¹

Co-authors: Алексей Бузмаков¹; Виктор Асадчиков¹

¹ НИЦ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: yuri.s.krivonosov@yandex.ru

Известно, что методы рентгеновского фазового контраста находят применение для томографических исследований объектов, в которых различия поглощения между элементами их структуры оказываются недостаточными для достоверного распознавания. В работе был использован метод осевого рентгеновского фазового контраста, который прост в реализации, не требует использования сложных и дорогостоящие оптических элементов, а также менее чувствителен к механической и температурной нестабильности оборудования. Несмотря на то, что сегодня метод осевого фазового контраста успешно реализован на источниках синхротронного излучения (СИ), регулярно встречаются научные публикации, в которых его успешно применяют и в лабораторных условиях. Настоящая работа проводится в контексте реализации методики осевого рентгеновского фазового контраста с использованием микрофокусных и широкофокусных лабораторных источников, и ее применения для томографических исследований.

Авторами был создан опытный образец конусно-лучевого рентгеновского микротомографа. В томографе используется микрофокусный полихроматический рентгеновский источник с размером фокусного пятна 15 – 20 мкм и возможностью варьировать ускоряющее напряжение в диапазоне 30 – 80 кВ. Томографические проекции регистрировали рентгеновским детектором XIMEA с матрицей размером 3000 x 5000 элементов и размером пикселя 8.5 мкм. Разрешение, которое обеспечивает конусно-лучевой микротомограф, составляет порядка 10 мкм. Для измерений в режиме осевого фазового контраста возможно увеличивать расстояние образец – детектор до 500 мм.

Также была модифицирована оптическая схема лабораторного микротомографа, где в качестве рентгеновского источника используется стандартная широкофокусная трубка с молибденовым анодом и размерами фокусного пятна 12 x 0.4 мм. Был сформирован конический квазикогерентный пучок, для чего перед трубкой устанавливали щелевую апертуру размером 130 мкм в горизонтальном и вертикальном направлениях. Расстояние между образцом и детектором в режиме фазового контраста возможно увеличивать до 600 мм.

С использованием созданного оборудования были сделаны фазоконтрастные измерения как одиночных проекций, так и томографических экспериментов на ряде объектов различного состава. В частности, с помощью оптической схемы с широкофокусным источником было

получено трехмерное изображение эпифиза головного мозга человека. Нам удалось визуализировать его сосудистую структуру с разрешением порядка 20 мкм. На примере эпифиза показано преимущество применения методики рентгеновского фазового контраста в сравнении с традиционной томографией, где контраст основан только на поглощении. Также проведено сравнение с результатами измерений на источниках СИ. Основные результаты исследований опубликованы в работах [1, 2].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

[1] Ю. С. Кривоносов, В.Е. Асадчиков, А.В. Бузмаков // Кристаллография, 2020, том 65, № 4, с. 509–514. DOI: 10.31857/S002347612004013X

[2] Ю. С. Кривоносов, А. В. Бузмаков, В. Е. Асадчиков и др. // Кристаллография, 2023, том 68, № 2, с. 189–195. DOI: 10.31857/S0023476123020108

123

РАСЧЕТЫ ПОТОКОВ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ОСНОВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ СТАНЦИИ «1-4» «XAFS-СПЕКТРОСКОПИЯ И МАГНИТНЫЙ ДИХРОИЗМ»

Authors: Stepan Korneev¹; Maxim Syrtanov²

Co-authors: Anton Teresov³; Denis Mischenko ; Andrey Saraev⁴; Konstantine Beskonchin⁵; Sergey Kovalsky ; Vladimir Denisov⁶

¹ National Research Tomsk Polytechnic University

² Tomsk polytechnic university

³ Institute of high current electronics SB RAS

⁴ Boreskov Institute of Catalysis

⁵ Institute of High Current Electronics

⁶ HCEI SB RAS

Corresponding Author: spk6@tpu.ru

Станция 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» предназначена для исследований, включающих в себя рентгеновскую эмиссионную спектроскопию, спектроскопию магнитного дихроизма, а также спектроскопию рентгеновского поглощения. В качестве источника синхротронного излучения на данной станции предполагается использование сверхпроводящего ондулятора, параметры которого являются оптимальными для генерации пучков фотонов с энергией, лежащей в диапазоне 3-35 кэВ. На начале этапе проектирования станции необходимо провести расчеты тепловых нагрузок на основных элементах станции и потоков фотонов на образце. Понимание указанных параметров необходимо для обеспечения достаточного охлаждения ключевых элементов станции, а также для понимания специфики проведения исследований образцов. Для подбора того или иного метода охлаждения элементов оптической системы станции 1-4 в программе XRT был осуществлён расчет тепловых нагрузок на основных оптических элементах, а также осуществлен расчет потока фотонов в области окружения образца с целью обеспечения заявленных технических характеристик станции 1-4.

В настоящей работе представлены результаты расчета тепловых нагрузок на бериллиевом окне, приёмнике-коллиматоре тормозного излучения, первом кристалле монохроматора, системе подавления высших гармоник, а также распределение фотонов в области окружения образца для 3ей, 5ой и 13ой гармоник. Оптическая схема станции включает в себя монохроматор и систему подавления высших гармоник (на основе двух зеркал). Монохроматизация потока фотонов осуществляется двухкристалльным (Si 111 и Si 311) монохроматором с криогенным охлаждением. Для формирования итогового пучка на образце после монохроматизации используются: блоки фильтров, набор щелей и экспозиционный затвор. Максимальная мощность на входе в оптический хатч станции составляет 200 Вт в случае функционирующего фронтенда. Кроме того, в аварийном режиме (при разрушении бериллиевого окна) пиковое значение мощности на входе в оптический хатч составляет 245 Вт на время срабатывания затвора (10 мс). Данные значения являются отправной точкой для расчёта максимального значения отводимой мощности от элементов оптического хатча, начиная от входных щелей, вплоть до приёмника-коллиматора излучения. Полная мощность на первом кристалле монохроматора

составляет порядка 22 Вт. Исходя из данных значений будут проводиться тепловые расчеты для определения параметров охлаждения кристаллов. На первом зеркале системы подавления высших гармоник полная мощность не превышает 0,007 Вт. Для проектируемой станции необходимым является минимальный поток 1011 фотонов/с. Согласно расчетам, в области окружения образца поток фотонов для 3-ей (4,4 кэВ) гармоники примерно равен $8,8 \cdot 10^{12}$ фотонов/с, для 5-ой (7,41 кэВ) – $2,4 \cdot 10^{12}$ фотонов/с, для 13-ой (19,3 кэВ) $2,2 \cdot 10^{12}$ фотонов/с.

124

Модернизация Технологической станции СИ ВЭПП-4М для определения содержания легких элементов.

Author: Б.Г. Гольденберг¹

Co-authors: И. С. Гусев¹; И. П. Копалкин¹

¹ Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов", Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Corresponding Author: b.g.goldenberg@srf-skif.ru

«Технологическая станция СИ» на накопителе ВЭПП-4М используется для проведения учебных работ со студентами с целью практического знакомства с основами экспериментов на синхротронном излучении и тестирования новых элементов и методик. Станция выполнена в виде двух вакуумируемых камер, последовательно установленных на пучке СИ. В первой камере размещены рентгеновские щели для формирования размера пучка СИ и разрезной монохроматор на кристалле Si(111), вторая камера предназначена для размещения исследуемого объекта и системы детектирования. Оснащение может меняться для проведения демонстрационных экспериментов по различным методикам применения СИ. Для демонстрации основ метода рентгенофлуоресцентного элементного анализа во второй камере установлен энергодисперсионный детектор Amptek.

Было продемонстрировано преимущество реализации метода РФА-СИ в вакууме для исследования содержания легких элементов в образцах растительного происхождения. Однако в начальной конструкции станции отсутствовала оптимизация расположения элементов в камере, кроме того, смена образцов, сопряженная с откачкой и напуском атмосферы значительно снижала производительность.

Для реализации практического применения метода РФА-СИ в вакууме проведена модернизация «Технологической станции СИ»:

1. Изготовлен и установлен модуль автоматической смены образцов в вакуумной камере. Держатель образцов «карусельного типа» установлен на круговой подвижке, таким образом, чтобы нижний образец оказывался в оптимальной для исследования, позиции, совмещенной с пучком СИ и приемным окном энергодисперсионного детектора.
2. Для совмещения образцов и детектора относительно пучка СИ установлены датчики положения пучка СИ и разработана методика юстировки.
3. Создано ПО для автоматизации смены образцов и записи РФА спектров, обеспечивающее управление позиционированием держателя образцом и запуском энергодисперсионного детектора с автоматизированным протоколированием параметров эксперимента.

Работа была выполнена при частичном финансировании в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ"

125

Исследование возможностей определения легких элементов в растениях методом РФА-СИ на "Технологической станции

СИ” ВЭПП-4М.

Author: Б. Г. Гольденберг¹

Co-authors: И. П. Гусев¹; И. П. Копалкин²; А. А. Легкодымов¹; Ю. П. Колмогоров³; Е. В. Амброс⁴

¹ Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск

³ Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения РАН, Новосибирск

⁴ Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Corresponding Author: b.g.goldenberg@srf-skif.ru

На 1-м канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-4 функционирует «Технологическая станция СИ», созданная для проведения учебных работ со студентами ФФ НГУ и ФТФ НГТУ с целью практического знакомства с основами экспериментов на синхротронном излучении. Удачная начальная конструкция станции в виде двух разнесенных камер с возможностью откачки до форвакуума дала возможность не только проводить практикумы по исследованию свойств СИ, но и реализовать эксперименты, ранее не доступные на экспериментальных станциях СИ в ИЯФ. Так, например, методики РФА-СИ, отработанные на станциях «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» и «Жесткая рентгеноскопия» в ЦКП СЦСТИ, не дают возможность определять содержание легких элементов (Al, Si, P, S, Cl), в следствии значительного поглощения флюоресценции данных элементов атмосферным воздухом и невозможности вакуумировать установку.

В статье рассматривается расширение возможностей рентгенофлуоресцентного элементного анализа на синхротронном излучении с целью детектирования легких элементов. Описана экспериментальная установка, обоснован выбор режимов эксперимента, приведены оценки минимального предела обнаружения для Al, Si, P, S, Cl.

Работа была выполнена при частичном финансировании в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ”

126

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ MgB₂ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

Authors: Кристина Дихтиевская¹; Фёдор Казанцев²; Анастасия Цаплева³; Алексей Карцев⁴; Максим Алексеев³; Абдюханов И.М.^{None}

¹ Joint-stock company “Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar”; National University of Science and Technology “MISIS”

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

³ ВНИИИМ

⁴ НИТУ МИСИС, лаборатория функциональных квантовых материалов, Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ВЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия

Corresponding Author: m2208550@edu.misis.ru

На сегодняшний день лидирующие позиции по производству сверхпроводников на основе MgB₂ занимают компании: ASG (бывший Columbus), HyperTech и Hitachi. ASG производят сверхпроводники методом PIT (порошок-в-трубе) вариант ex-situ, где в трубу засыпают уже синтезированное сверхпроводящее соединение MgB₂, которые отличаются высокой токнесущей способностью. HyperTech руководит разработкой сверхпроводников, изготавливаемых методом in-situ, который состоит в заполнении трубы порошковыми прекурсорами для синтеза сверхпроводящей фазы. Такие сверхпроводники применяют для работы готовых изделий при переменном токе. В компании Hitachi для изготовления сверхпроводников используют модифицированные методы in-situ, в результате которых получают сверхпроводники с высокой плотностью тока и стойкостью в более сильных магнитных полях [1].

В настоящей работе рассматривалась возможность использования сверхпроводников для ускорителей частиц, а также последние достижения в этой области. На сегодняшний день широкое распространение получили ускорители-источники синхротронного излучения (СИ). С помощью СИ проводятся различные фундаментальные и прикладные исследования в различных областях знаний, таких как кристаллография, материаловедение и медицина. СИ генерируется при прохождении пучка заряженных частиц через участок с магнитным полем. В мире существует несколько десятков специализированных синхротронных центров – КИСИ-2, Diamond, APS, ALBA, MAX IV и др., где в качестве источников СИ используются сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы. Все более популярными источниками СИ становятся ондуляторы с магнитным периодом 16 мм и ниже. Уровень поля в таких устройствах составляет около 1,5 Тл, и ограничением здесь выступают критические параметры сверхпроводника. Использование высокотемпературных сверхпроводников, таких как MgB₂, может позволить либо повысить рабочий ток катушек (в сравнении с «классическим» Nb-Ti), либо уйти от охлаждения катушек жидким гелием в пользу более простых систем. Уже известны применения сверхпроводящего кабеля для линии электропередачи в Большом адронном коллайдере (HL-LHC, проект ЦЕРН) [2], энергосберегающих сверхпроводящих соленоидов из сверхпроводников на основе MgB₂, работающих при температуре 20 К [3] для компактного линейного коллайдера, а также соленоидов на основе MgB₂, которые могут использоваться в качестве альтернативы NbTi сверхпроводникам в основных линейных ускорителях в связи с более высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние.

Литература

1. A. Ballarino and R. Flükiger. Status of MgB₂ wire and cable applications in Europe/Journal of Physics: Conference Series – 871 – 2017.
2. A. Ballarino. Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine/ Superconductor Science and Technology – 27 – 2014.
3. A. Yamamoto, S. Michizono, W. Wuensch, I. Syratcev, G. Mcmonagle. Applying superconducting magnet technology for high-efficiency klystrons in particle accelerator RF systems IEEE Transactions on Applied Superconductivity – 30 – 2020.

127

Изучение природных биогибридных материалов на примере синхротронных исследований клеток *E.coli*

Authors: С.Ю. Турищев¹; Е.А. Беликов¹; Е.В. Паринаова¹; О.А. Чувенкова¹; С.Ю. Требунских¹; В. Сиваков²; Р.Г. Чумаков³; А.М. Лебедев³; Ю.С. Какулия¹; С.С. Антипов¹

¹ Воронежский государственный университет

² Лейбниц институт фотонных технологий

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Corresponding Author: tsu@phys.vsu.ru

Использование методов синхротронного излучения ультрамягкого рентгеновского диапазона дает уникальную возможность изучения физико-химического состояния, локального атомного и электронного строения и состава поверхностей и достижимых границ раздела актуальных материалов и структур. В сочетании с современными лабораторными методами использование синхротронного излучения привлекательно и для исследований природных биогибридных материалов. В работе обсуждаются возможности актуальных исследований, в том числе синхротронных, на примере биогибридных материалов на основе клеток кишечной палочки *Escherichia coli*.

Бактериальные клеточные культуры *E.coli* являются источником ДНК-связывающего белка голодающих клеток DPS, который представляет собой уникальный по своим свойствам наноразмерный объект, включающий в себя органическую оболочку и внутреннюю полость, в которой формируется железосодержащее ядро.

Синхротронные исследования атомного и электронного строения, физико-химических свойств бактериальных клеток *E.coli* и молекул Dps выполнены совместно с изучением морфологических и структурных свойств. Впервые применен метод фотоэмиссионной электронной микроскопии (PhotoEmission Electron Microscopy - PEEM), который сочетает в себе спектроскопический и

микроскопический подходы к исследованию микроскопического объекта – клетки *E.coli*. Полученные данные показали наличие неорганических ядер в молекулах белка Dps, а также присутствие железа в исследуемых клеточных образцах. При размере молекул (~ 3-6 нм) их неорганические ядра состоят из ионов Fe²⁺ и Fe³⁺. Изучена возможность использования клеточной культуры как источника природного бионаногибридного материала контролируемой морфологии, структуры и состава. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-20180). Методическая проработка синхротронных исследований выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351.

128

Лабораторные и синхротронные исследования нанокристаллов меди в пористой матрице диоксида кремния

Authors: Ю.С. Какулия¹; Е.В. Парина¹; Е.Ю. Канюков²; В. Сиваков³; С.В. Канькин⁴; Т. Ляйтнер⁵; Р. Овсянников⁵; С.Ю. Турищев¹

¹ Воронежский государственный университет

² Московский институт стали и сплавов

³ Лейбниц-институт фотонных технологий

⁴ Воронежский государственный университет

⁵ Гельмгольц Центр Берлин

Corresponding Author: tsu@phys.vsu.ru

Массивы медных наночастиц являются потенциальными плазмонными материалами и, таким образом, могут рассматриваться как перспективные структуры активного элемента в сенсорах, создаваемых на основе эффекта поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света. При этом ключевым для создания сенсорных устройств на основе таких наноматериалов является понимание физико-химических и структурных свойств. Поэтому необходимо детальное изучение морфологии, состава, структуры, полученных наночастиц меди в матрицах SiO₂ на Si, наряду с атомным и электронным строением материалов.

Для получения пористого слоя SiO₂ на кремнии использовалась технология травления ионно-пролетных треков. Далее в сформированных субмикронных порах происходил рост наночастиц посредством разложения солей меди.

По данным растровой электронной микроскопии были определены морфология и средний размер нанокристаллов в образцах. С помощью рентгеновской дифракции был получен средний размер областей когерентного рассеяния (размеры нанокристаллов). Проведена статистическая оценка размеров частиц, формирующих структуру. Анализ Cu L₃ синхротронных спектров ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES) позволил отметить, что для всех сформированных структур наблюдается изменение степени окисления, вплоть до формирования оксида, близкого к естественному.

В совокупности полученные результаты говорят о том, что используемый подход в формировании структур с наночастицами меди позволяет эффективно получать компактные и размерно-селективные массивы металлических медных наночастиц в контролируемом количестве, заполняющих субмикронные поры диэлектрика на полупроводниковой подложке.

Работа подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351.

129

Ключевые направления исследований ЦКП «СКИФ»: экспертное мнение со стороны пользовательского сообщества

Author: С.Ю. Турищев¹

¹ Воронежский государственный университет

Corresponding Author: tsu@phys.vsu.ru

Источник синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» (Сибирский кольцевой источник фотонов) запланирован как ультрасовременный исследовательский комплекс уникальный в мировом масштабе. В первую очередь такая характеристика касается параметров высокоинтенсивного синхротронного излучения, которое способно формировать данный синхротрон последнего поколения. При этом важным является выбор научно-исследовательских, а возможно, и иных подходов к использованию возможностей синхротронного излучения источника ЦКП «СКИФ». К настоящему моменту (весна 2024 года) имеется полная ясность с характеристиками источника, а также с шестью каналами вывода и исследовательскими станциями первой очереди. Завершается планирование каналов и станций второй очереди. Являясь исследовательским инструментом высокой степени универсальности, важно продуктивное использование создаваемой инфраструктуры. Первоочередной задачей здесь является определение и утверждение ключевых направлений исследований в рамках функционирования синхротронного центра. Одну из ключевых ролей при этом играют мнение и запросы сообщества пользователей ЦКП «СКИФ», которое уже формируется. Определяющим является нахождение взвешенного решения в сочетании направлений развития науки, техники и технологий страны, представляющих стратегический интерес и экспертного запроса ведущих научных групп, сообщества ученых и специалистов.

130

Синхротронные исследования биосовместимых наночастиц пористого кремния

Authors: С. С. Титова¹; У.А. Цурикова²; Л.А. Осминкина²; Ю.С. Какулия¹; Р.Г. Чумаков³; А.М. Лебедев³; Е.В. Парина¹; О.А. Чувенкова¹; С.Ю. Турищев¹

¹ Воронежский государственный университет

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Corresponding Author: titova@phys.vsu.ru

Наночастицы пористого кремния (PSi NPs) являются перспективным материалом для использования в целях терапии и диагностики благодаря свойствам биосовместимости, биодоступности и биodeградируемости. Совокупность этих свойств зависит от способов получения наночастиц и свойств исходного кремния. В данной работе для получения наночастиц был использован способ измельчения в планетарной мельнице пленок пористого кремния. Пленки пористого кремния были получены с помощью электрохимического травления с-Si (100) в растворе плавиковой кислоты.

Для дальнейшего исследования PSi NPs было предложено два кардинально отличных метода высушивания. Первый состоял в термическом нагреве (12 часов) при температуре 50°C на воздухе. Второй состоял в резком охлаждении водной суспензии, а затем резком увеличении температуры (лиофилизация). Исследования полученных порошков при помощи методов электронной микроскопии и рентгеновской дифракции показали, что PSi NPs отличны в размере и агломерации. Исследования состава, специфики локального окружения атомов заданного сорта и особенностей локальной парциальной плотности электронных состояний вблизи дна зоны проводимости проводились синхротронным методом спектроскопии ближней тонкой структуры края поглощения рентгеновских лучей XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) в ультрамягком диапазоне. Данные XANES были получены на станции НаноФЭС синхротрона «КИСИ-Курчатов» (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва).

Полученные данные указывают на значительное влияние условий высушивания на состав, структуру и агломерацию PSi NPs. Процесс сублимационного (лиофильного) высушивания предотвращает глубокое окисление поверхности PSi NPs по крайней мере до глубины 2-3 нм. В то же время термическое высушивание приводит к образованию поверхностного оксида PSi NPs толщиной свыше 5 нм. Таким образом, плавно изменяя параметры формирования и высушивания можно контролируемо и тонко изменять состав, структуру, атомное и электронное строение поверхности наночастиц пористого кремния, которые однозначно определяют физические

свойства наночастиц и важны для их длительного хранения и дальнейшего использования в таком перспективном направлении, как биомедицина. Методическая проработка синхротронных исследований выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351

131

ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ТОНКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ И МАГНЕТРОННЫХ СЛОЕВ ОКСИДА ОЛОВА ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Authors: Н.И. Бойков¹; С.С. Титова¹; О.А. Чувенкова¹; С.В. Рябцев¹; Е.В. Парина¹; Р.Г. Чумаков²; А.М. Лебедев³; Ю.С. Какулия¹; К.А. Фатеев¹; С.Ю. Турищев¹

¹ Воронежский государственный университет

² Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Corresponding Author: titova@phys.vsu.ru

Материалы системы олово-кислород и тонкопленочные структуры на их основе являются современными и актуальными для создания широкого ряда электронных приборов. Управление свойствами при формировании таких материалов и структур является важным вызовом при варьировании технологических режимов. Исследования синхротронными методами спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES – X-ray absorption near edge structure) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS – X-ray photoelectron spectroscopy) позволяют без разрушения получить высокоточные экспериментальные данные о специфике локального атомного окружения и зарядовом состоянии атомов на поверхности изучаемого объекта, соответственно. Тем самым, изучить особенности состава, физико-химического состояния поверхности и доступных границ раздела, что является очень востребованным при управлении свойствами тонких слоев системы олово-кислород.

В работе исследованы тонкие слои оксидов олова, полученных современными методами молекулярно-лучевой эпитаксии и магнетронного распыления. В случае эпитаксии 5 монослоев олова (~1.6 нм) из эффузионной ячейки осаждались на подложки Si (001) с буферным слоем Si толщиной 50 нм. Слои олова толщиной 30 нм были получены магнетронным распылением на постоянном токе оловянной мишени в плазме аргона на подложки Si (100). XANES и XPS исследования были выполнены на канале RGBL синхротрона BESSY II Гельмгольца Центра Берлин (Берлин, Германия) и канале НАНОФЭС синхротрона "Курчатов" НИЦ "Курчатовский институт" (Москва, Россия).

Данные XPS показали, что при использовании метода магнетронного распыления для формирования 30 нм слоя Sn с последующим хранением в лабораторных условиях образуется однофазная поверхность естественного оксида олова SnO₂-x. Слой олова сформированный методом молекулярно-лучевой эпитаксии, после хранения такой же длительности в лабораторных условиях, полностью окисляется до SnO₂. Поверхность буферного слоя кремния подвергается окислению атомами атмосферного кислорода в результате их диффузии через эпитаксиальный слой олова.

Данные XANES показали, что на поверхности исследуемых образцов присутствуют оксиды схожие с оксидами на поверхности оловянной фольги, но отличные от диоксида олова тетрагональной модификации. Слои, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, полностью окислены с включениями фаз промежуточных оксидов. Слои олова, полученные магнетронным распылением, содержат на поверхности те же самые фазы промежуточных оксидов олова SnO и SnO₂ орторомбической модификации, однако, отмечается наличие неокисленного металлического олова. Таким образом, тонкие слои олова при окислении от поверхности проходят одни и те же стадии образования оксидов независимо от метода получения этих слоев. В то же время результат взаимодействия с атмосферным кислородом существенно зависит от толщины сформированного нанослоя как показатель количества доступного для окисления металлического олова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках научного проекта № 23-22-00465.

132

Синхротронные XANES и XPS исследования нитевидных кристаллов SnO₂

Authors: К. А. Фатеев¹; О. А. Чувенкова¹; С. В. Рябцев¹; С. Ю. Турищев¹

¹ Воронежский государственный университет

Corresponding Author: fateev@phys.vsu.ru

В настоящее время, тонкопленочные структуры на основе оксида олова SnO₂ очень распространены в качестве газочувствительного материала. Наноразмерные материалы на основе SnO₂, такие как нитевидные кристаллы с высоким соотношением поверхности к объему является перспективными с точки зрения улучшения ряда показателей. Знания о специфике локального атомного окружения поверхности нитевидных кристаллов, ее физико-химическом состоянии позволяют управляемо формировать такие объекты с заданными свойствами.

В работе исследовались нитевидные кристаллы оксида олова, полученные методом газотранспортного синтеза. Также исследовались тонкие 30 нм пленки оксида олова, полученные методом магнетронного распыления и отожженные на воздухе, пленки, полученные методом химического осаждения из газовой фазы, и кристаллы природного касситерита SnO₂. Исследования проводились методами спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), с использованием синхротронного излучения BESSYIII Гельмгольц Центра Берлин (Берлин).

Синхротронные XANES и XPS исследования показали, что существенный количественный вклад поверхности по сравнению с объемом нитевидных кристаллов оксида олова (с минимальным сечением ~ 20 нм, при протяженности до нескольких микрометров), приводит к влиянию несовершенства поверхности на электронно-энергетический спектр, состав и физико-химическое состояние. Недостаток атомов кислорода в слоях развитой поверхности нитевидных кристаллов приводит к образованию препика в синхротронных спектрах XANES, соответствующего состояниям в запрещенной зоне диоксида олова. В случае существования условий, обеспечивающих формирование упорядоченной (кристаллической) структуры диоксида олова, специфика морфологии не оказывает значительного влияния на распределение основных особенностей электронного спектра, в том числе для нитевидных кристаллов. Доокисление пленок металлического олова до SnO₂ приводит к формированию двухфазной системы, состоящей из орторомбического и тетрагонального диоксида олова. Вариации условий формирования нитевидных кристаллов оксида олова могут позволить управлять их атомным и электронным строением, физико-химическим состоянием для современных электронных устройств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351.

133

Синхротронные и лабораторные исследования интеграции белка Dps с массивом нанонитей кремния

Authors: Е.В. Паринова¹; С.Ю. Турищев¹; К.А. Фатеев¹; В. Сиваков²; Е.А. Беликов¹; Р.Г. Чумаков³; А.М. Лебедев³; Ю.С. Какулия¹; О.А. Чувенкова¹; С.С. Антипов¹

¹ Воронежский государственный университет

² Лейбниц институт фотонных технологий

³ НИЦ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: fateev@phys.vsu.ru

Массив кремниевых нанонитей (SiNWs) — это перспективная поверхность с контролируемыми физико-химическими свойствами, которая может быть модифицирована функциональными материалами в зависимости от задач применения. Одна из актуальных задач состоит в интеграции между природными биоматериалами и полупроводниковыми наноструктурами. Белок Dps - DNA-bound Protein from Starved Cells (ДНК-связанный белок клеток в условиях

голодания) — это молекула полой сферической формы, которая относится к группе бактериальных ферритинов. Эти молекулы показали способность образовывать ядро окисленного нанокластера железа с пространственным размером, ограниченным внутренней полостью молекулы. Сочетание Dps с массивом SiNWs может позволить создавать гибридные наноматериалы для нанoeлектроники или спинтроники. В данном случае белок Dps играет роль источника и контейнера для наночастиц железа, с размером, ограниченным несколькими нанометрами, и идентичной формой, структурой и составом.

Рассмотрена возможность заполнения (интеграции) массивов SiNWs белком Dps (молекулы, свободные от железа), а также информация о составе и структуре поверхностных/объемных частей полученных структур. Морфологические исследования полученных объектов планарно и в сечении проводились методом сканирующей электронной микроскопии. Атомное и электронное строение поверхности и химический состав до и после иммобилизации Dps изучались с использованием поверхностно-чувствительных методов: синхротронной спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES) для оценки локального окружения атомов заданного сорта и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) для определения физико-химического состояния развитой поверхности. Использовалось оборудование станции НАНОФЭС синхротронного центра НИЦ “Курчатовский институт”. Показано успешное заполнение пространства внутри массива нитевидного кремния молекулярной культурой белка Dps. Установлено, что развитая поверхность нитевидного кремния не взаимодействует с белковым покрытием, оставаясь стабильной. Ферритин Dps полностью покрывает поверхность нитей кремния субмикронного сечения и может рассматриваться как средство адресной доставки нано- биогибридного материала для последующей функционализации развитой поверхности SiNWs. Полученные результаты могут сыграть ключевую роль в будущем формировании композитных наноструктур, содержащих малые наночастицы железа. Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации СП-189.2021.1 для молодых ученых и при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351.

134

Проблема анализа перекрывающихся EXAFS спектров

Author: Элина Хаметова¹

Co-author: Ольга Бакиева¹

¹ УдмФИЦ УрО РАН

EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) является классическим и широко распространенным методом исследования локальной атомной структуры материалов. Для обработки данных спектров существует множество программных пакетов (например, Viper и m Ifeffit) которые позволяют успешно определять параметры локальной атомной структуры исследуемого материала. В этих программах реализован метод Фурье анализа, что позволяет определять радиусы координационных сфер, координационные числа и факторы тепловой дисперсии атомов. Однако до сих пор существует проблема разрешения нескольких спектральных сигналов, наблюдаемых в одном диапазоне кинетических энергий. В данном случае регистрируемый EXAFS спектр является суммой осцилляций с разными волновыми числами, в результате чего анализ экспериментальных данных методом Фурье преобразования невозможен. Подобная проблема была рассмотрена ранее для спектров энергетических потерь электронов EXELFS (Extended Electron Energy Loss Fine Structure). Было предложено использовать для анализа перекрывающихся сигналов систему уравнений Фредгольма 1 рода, решением которой являются парные корреляционные функции [1]. В настоящей работе планируется использовать наработанный опыт для решения проблемы анализа перекрывающихся EXAFS спектров. Данная проблема рассмотрена на примере системы титаната бария (BaTiO₃). На спектре титаната бария наблюдается перекрытие Ti K (4965 эВ), Ba L₃ (5247 эВ) и Ba L₂ (5624 эВ). Область наложения сигналов составляет ~80% от всего EXAFS спектра. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №1022040600207-2.

Список литературы

[1] Nemtsova O., Bakieva O., Electron energy loss spectroscopy equation for spectra with overlapping oscillations and its solution by a regularization method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, 368, 103-111.

135

Специальная вычислительная схема для решения обратных задач деконволюции с возможностью строгого учёта внеграницной информации произвольного вида

Authors: Dmitry Sorokoletov¹; Iakov Rakshun²; Fedor Darin³

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.*

Corresponding Author: d.s.srkv@yandex.ru

Обратные задачи деконволюции могут возникать в различных практических приложениях и областях науки, например, в ряде областей оптики и спектрометрии [1, с. 136]. Они, являясь, как правило, некорректными по Адамару с высокой степенью некорректности [2, с. 133; 3, с. 59], при попытке их решения неспециализированными методами («наивным» подходом) проявляют очень сильную вычислительную неустойчивость [1, с. 181; 2, с. 39]. В связи с этим, для возможности их приближенного решения было специально разработано множество алгоритмов регуляризации [2, с. 47]. Однако наличие в выражении свёртки тех или иных систематических погрешностей (значительного для задачи уровня) со сложными спектральными характеристиками серьезно нарушает предпосылки правил сходимости, заложенных в основу многих алгоритмов регуляризации. К примеру, методы Лаврентьева или Тихонова в своих распространенных формах записи для получения приближенного решения с максимально возможной точностью подразумевают наличие только случайной ошибки в правой части задачи, распределенной по нормальному закону [4, с. 52-55]).

Систематические погрешности в задачах деконволюции, как правило, обусловлены тем, что их правая часть, обычно являясь экспериментальными данными, равна сумме решения интегрального уравнения свёртки и шумов различного типа. Вместе с этим, вычислительным процедурам в алгоритмах регуляризации подвергается не само это уравнение, а его приближение. Это дискретная и конечномерная (с фиксированными границами) сумма отдельных значений искомого изображения и аппаратной функции, учитываемых только для ограниченного количества позиций изначальной области определения. Данное приближение разрешается относительно правой части, значения которой такое приближение изначально не предполагают [1, с. 180]. Как следствие, имеют место систематические погрешности, которые можно подразделить на ошибки дискретизации [2, с. 111-113] и ошибки, обусловленные ненадлежащим учётом прикраевой и внеграницной информации об аппаратной функции и/или искомом сигнале [3, с. 29-30]. Первые могут являться причиной так называемого «алиазинга», тогда как последние - причиной так называемых краевых эффектов (ringing effects [3, с. 30]). Применение оконных преобразований для минимизации данных эффектов в рамках задач деконволюции в каком-либо виде не всегда пригодно, поскольку они определенным образом искажают спектр, внося собственные ошибки, в том числе, широкополосные — от десятых долей до единиц процентов [5, с. 465-471]. С другой стороны, наиболее распространенные из вычислительных схем, специально предназначенных для этих целей, предполагают очень ограниченный набор поведения искомого сигнала (постоянное, симметричное, периодическое, рефлективное [3, с. 36-38], антирефлективное [6]). Существуют также такие способы, как статистически обусловленное, а также экстраполированное определение внеграницной информации [3, с. 30]. При этом в рамках всех вышеперечисленных схем значения восстанавливаемого сигнала, в определенной мере, являются взаимосвязанными, что, в ряде случаев, может приводить к принудительному присваиванию им в задаче конкретных фиксированных значений внутри достаточно обширных областей его распределения.

Влияние дополнительной погрешности, вносимой всеми вышеперечисленными способами, может являться значительным в ряде случаев. К примеру, оно становится критическим в случаях решения некоторых задач деконволюции [7] с числами обусловленности, большими нескольких сотен. Это приводит к необходимости разработки альтернативных, специфических подходов к правильному учёту внеграницной информации об искомом сигнале (как ранее [7] это было сделано для учёта внеграницных значений аппаратной функции). Нами была

разработана вычислительная схема, в рамках которой возможно проводить учёт произвольной при- и внеграницной информации об искомом сигнале. Более того, в ее рамках есть возможность дополнительного принудительного наложения принципиально любых значений (например, предполагаемых априорно известными) для отдельных позиций и/или произвольных участков искомого пространственного распределения сигнала. Предлагаемая схема сводит исходную обратную задачу в набор явно решаемых прямых задач. Для этого она требует использования символического процессора, такого как Symbolic Tools программы Matlab. К ее существенному недостатку относится то, что длина получаемых при этом выражений достаточно значительна, и их поиск может налагать повышенные требования на ЭВМ. Это может существенным образом ограничить допустимую длину одновременно учитываемой области сигнала. Однако эти выражения достаточно получить только единственный раз для каждого отдельного набора наложенных правил и длины одновременно учитываемой области сигнала (вне всякой зависимости от его искомых значений). Также, к сожалению, в предлагаемой схеме невозможно наложение каких-либо «нежестких» (условных) априорных ограничений.

Разработанная вычислительная схема была применена нами в двух смоделированных случаях восстановления относительно коротких (в 14 и 16 позиций) одномерных распределений сигнала со спецификой (отличающиеся значения в обоих прикраевых областях). Она показала отличные результаты в сравнении с применением общеизвестных схем. Для рассмотренных случаев число комбинаций (слагаемых или множителей) в полученных в символьной форме выражениях составило примерно 250 шт, при этом среднее количество составляющих (различных компонент векторов или матриц, фигурирующих в задаче) в одной комбинации было равно 4. Нами также было предложено и проанализировано три области потенциального применения данной вычислительной схемы, все из которых имеют достаточно большое практическое значение и востребованы, в частности, при обработке рентгенофлуоресцентных карт, которые получаются в некоторых экспериментах.

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

- [1] В. С. Сизиков. Устойчивые методы обработки результатов измерений. Учебное пособие. СПб., изд-во «Специальная литература», 1999. 240 с
- [2] А. С. Леонов. Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации в MATLAB. 2 изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 336 с.
- [3] P. C. Hansen, J. G. Nagy, and D. P. O'Leary, *Deblurring Images, Matrices, Spectra, and Filtering* (SIAM, Philadelphia, 2006). P. 130
- [4] С. И. Кабанихин. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск, Сибирское научное изд-во. 2009. 457 с.
- [5] A. V. Oppenheim. *Discrete-time signal processing.* / A. Oppenheim, R.W. Schaffer, with J. R. Buck. - 2nd ed. 1999. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- [6] Marco Donatelli and Stefano Serra-Capizzano. Antireflective Boundary Conditions for Deblurring Problems. Review Article. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. Volume 2010, Article ID 241467, 18 pages. Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2010/241467>
- [7] D. S. Sorokoletov, Ya. V. Rakshun, F. A. Daryin. New intuitive regularizing approaches for deconvolution problems. // *AIP Conference Proceedings* 2803, 040006 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0144507>

136

Изучение ударного сжатия 3D-структурного алюминия с помощью синхротронного излучения

Author: Arthur Asylkaev^{None}

Co-authors: Konstantin Ten¹; Alexey Kashkarov¹; Vyacheslav Khalemenchuk; Eduard Pruel¹

¹ *Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

Corresponding Author: a.asylkaev@g.nsu.ru

Изучение распространения ударных волн в различных конденсированных веществах, таких как металлы, вода и другие, имеет важное значение как теоретически, так и практически. В частности, это необходимо для понимания и расчета взрывных процессов. Расчеты термодинамических функций для таких сплошных не представляют больших трудностей, в отличие от теоретического описания пористых тел при высоких давлениях, характерных для мощных ударных волн. В данной работе основное внимание уделено использованию синхротронного излучения (СИ) для получения распределения плотности пористых образцов в ударно-волновых процессах. СИ позволяет проводить измерения в быстропротекающих процессах с очень малыми экспозициями (менее 1 нс). В динамических экспериментах результаты взаимодействия фиксируются в последовательные моменты времени с интервалом от 100 нс.

В описываемых экспериментах источником СИ является накопительное кольцо ускорителя на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-4), которое расположено в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (энергия электронов составляет 4,5 ГэВ, индукция магнитного поля вигглера – 2 Тл). При прохождении СИ через исследуемое вещество часть излучения поглощается объектом. Излучение, проходящее без отклонения, имеет наибольшую интенсивность. Оно несет информацию о распределении плотности вещества. Важнейшим элементом измерительной системы является линейный детектор рентгеновского излучения DIMEX. Детектор позволяет фиксировать распределение плотности потока рентгеновского излучения за время, меньшее чем интервал между импульсами, и имеет 512 каналов при ширине каждого 0,1 мм. Электронная схема рентгеновского детектора позволяет запоминать 100 кадров. Для вычисления плотности исследуемого жатого объекта проводится калибровка поглощения детектора DIMEX (для этого перед детектором ставится известная масса того же вещества). Предложенный метод позволяет сквозным образом восстановить распределение плотности вещества. По данным детектора могут быть также вычислены массовые скорости и скорости ударной волны в образце.

В данной работе исследовалось распределение плотности 3D-структурного алюминия. Нагружение образца происходило ударниками (взрывными пушками) и взрывом зарядов ВВ диаметром 20 мм.

137

Возможности экспериментальных станций, научная программа, программа инфраструктурного развития ЦКП «СКИФ»

Author: Yan Zubavichus¹

¹ *Boreskov Institute of Catalysis SB RAS*

Corresponding Author: yzubav@gmail.com

В докладе представлен статус создания экспериментальных станций первой очереди источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ», описаны реализуемые на них рентгеновские методики и решаемые исследовательские задачи. К декабрю 2024 года должны завершиться работы по созданию шести 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» и 1-6 «Электронная структура».

В качестве организаций-интеграторов создания экспериментальных станций первой очереди выступают Томский политехнический университет (1-1, 1-6), Институт сильноточной электроники СО РАН (1-2, 1-4), Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева (1-3) и Конструкторско-технологический институт научного приборостроения (1-5).

Программа инфраструктурного развития ЦКП «СКИФ» (финансирование которой на текущий момент не подтверждено) предусматривает завершение ввода в эксплуатацию всего комплекса из 30 экспериментальных станций к 2035 году. В числе приоритетных станций второй очереди «Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов» (СКИФ-НГУ), «Спектроскопия и метрология мягкого рентгеновского диапазона», «Высокоэнергетические исследования конструкционных материалов (СКИФ-НГТУ)», «ИК-диагностика», «Макромолекулярная кристаллография», «Малоугловое рассеяние», «Когерентная визуализация», «Поверхность».

138

Применение теории возмущений для вычисления информационной энтропии случайных Гауссовых полей с зашумленной автокорреляционной функцией

Authors: Алексей Черкасов¹; Кирилл Герке^{None}; Алексей Хлюпин^{None}

¹ *Московский Физико - Технический Институт*

Corresponding Author: cherkasov.am@phystech.edu

Разного рода стохастические структуры широко распространены как в природной, так и в искусственной среде и одним из общепринятых способов их анализа является работа с их изображениями или дифракционными картинками. Для характеристики этих структур доступно множество дескрипторов, включая пористость, корреляционные функции, функции ближайших соседей [1]. Кроме морфологического анализа, такие дескрипторы необходимы для стохастических реконструкций, анализа стационарности и реализуемости характеризующих сред.

Важным свойством дескриптора является его информационное содержание – степень полноты его описания соответствующей структуры. Например, известно, что автокорреляционная функция не обладает достаточным информационным содержанием для однозначного описания большинства структур. Оценка информационного содержания этой функции может быть выполнена разными численными методами, однако в данной работе [2] мы делаем шаг к разработке общей методологии для аналитического вычисления таких показателей. В качестве меры информационного содержания мы выбираем информационную энтропию Шеннона [3] и показываем, что ее можно оценить для возмущенного случайного гауссова поля, а также то, что стохастическое возмущение корреляционной функции поля уменьшает ее информационное содержание. Мы также демонстрируем, что различные области корреляционной функции обладают различной степенью информативности и чувствительности к возмущению. Предложенная модель сокращает разрыв между реконструкцией гетерогенных сред на основе дескрипторов и теорией информации, открывая путь к созданию вычислительно эффективного подхода для нахождения информационного содержания любого дескриптора, применяемого к произвольной структуре.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 23-74-00069).

Torquato S., Haslach Jr H. W. Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties // *Appl. Mech. Rev.* – 2002. – Т. 55. – №. 4. – С. B62-B63.

Cherkasov A., Gerke K. M., Khlyupin A. Towards effective information content assessment: Analytical derivation of information loss in the reconstruction of random fields with model uncertainty // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* – 2024. – Т. 633. – С. 129400.

Shannon C. E. A mathematical theory of communication // *The Bell system technical journal.* – 1948. – Т. 27. – №. 3. – С. 379-423.

139

Стохастические реконструкции как методологическая база для МУР исследований структуры нанопористых материалов

Authors: Марина Карсанина¹; Кирилл Герке^{None}; Алексей Черкасов²

¹ *ИФЗ РАН / МФТИ*

² *МФТИ*

Corresponding Author: marina.karsanina@gmail.com

Малоугловое рассеяние рутинно используется для исследования наноструктуры. По полученным из паттернов рассеяния автокорреляциям можно восстановить структуру с помощью моделей

сфер или Гауссовых случайных полей и сходных подходов. Стохастические реконструкции представляют большой класс методов и различных модификаций. Их умелое применение помогает компенсировать неполный набор данных, совмещать данные различных масштабов при апскейлинге или моделировать новые материалы. В докладе будут представлены методы на основе иерархического отжига и реконструкции фазы, которые позволяют убрать часть дегенеративных состояний и повысить точность реконструкций. Иерархический подход с использованием субмикронного пучка может значительно повысить достоверность МУР исследований.

140

Антиалиасная фильтрация для исследования материалов с высокой диэлектрической проницаемостью в импульсной терагерцовой спектроскопии

Author: Alina Rybak¹

¹ *Институт автоматизирующей и электротехники СО РАН*

Corresponding Author: a.rybak1@gsu.ru

В работе представлено исследование диэлектрических свойств сегнетоэлектрического кристалла ниобата бария-стронция ($\text{Sr}_{75}\text{Ba}_{25}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN-75) в импульсной терагерцовой спектроскопии в диапазоне температур $25 \div 200$ °С с применением антиалиасной фильтрации. В результате удалось определить температуру фазового перехода, комплексную диэлектрическую проницаемость кристалла SBN-75 в диапазоне 0,2-1 ТГц, при этом сократив время измерения до четырех раз.

141

Исследование дефектной структуры объёмных образцов бета-фазы оксида галлия

Author: Дмитрий Калганов¹

Co-authors: Владислав Спиридонов²; Дмитрий Бауман²; Алексей Романов¹; Владимир Каминский²

¹ *Университет ИТМО, ФТИ им. А.Ф. Иоффе*

² *Университет ИТМО*

Corresponding Author: kalganov@itmo.ru

Наиболее полная информация об упругих константах и структурной анизотропии образцов различных материалов (в том числе и высококристаллических) может быть получена при изучении спектра резонансов в ультразвуковой области частот [1]. Однако получение такой информации для кристаллических структур низкой симметрии (моноклинной для бета-фазы Ga_2O_3) связано с необходимостью изучения сложной картины установившихся колебаний с помощью лазерной интерферометрии [2] и сложных расчетов. При изучении реальной структуры низкосовременных монокристаллов и их сростаний наиболее эффективным акустическим методом остается исследование резонанса первой продольной моды [3].

В данной работе исследовались объёмные кристаллы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, полученные методом Степанова при различных условиях роста. Степень кристаллического совершенства оценивали по кривой качания рентгеновской дифракции для рефлекса (800). Акустические свойства, соответствующие структурным особенностям, исследовались методом составного вибратора.

Для исследуемых образцов было получено значение полуширины кривой качания до 15° ,

соответствующее высокой степени кристалличности. Исследования температурных зависимостей упругой деформации и внутреннего трения в образцах показали наличие кислородных вакансий, плотность которых уменьшалась при повторном отжиге образцов.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1349).

Литература:

1. Migliori A., Maynard J.D. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens // Review of scientific instruments. – 2005. – 12(76). – P. 121301.
2. Adachi K., Ogi H., Takeuchi N., Nakamura N., Watanabe H., Ito T., Ozaki Y. Unusual elasticity of monoclinic β - Ga_2O_3 // Journal of Applied Physics. – 2018. – №. 8(124) – P. 085102.
3. Kaminskii V.V., Kalganov D.A., Panov D.I., Spiridonov V.A., Ivanov A.I., Rozaeva M.V., Bauman D.A., Romanov A.E. A study of gallium oxide by using the piezoelectric composite oscillator technique at a frequency of 100 kHz // Condensed Matter and Interphases. – 2023. – №. 4(25). – pp. 548-556

142

Лабораторная рентгеновская установка на основе лазерно-плазменного источника: создание: первые результаты и планы

Authors: Victor Asadchikov¹; Сергей Кузин^{None}; Евгений Мареев^{None}; Тимур Семенов^{None}; Никита Минаев^{None}; Алена Гарматина^{None}; Алексей Бузмаков²; Irina Dyachkova³; Denis Zolotov⁴; Yuri Krivonosov^{None}; Вячеслав Гордиенко^{None}

¹ FSRC "Crystallography and photonics" RAS

² НИЦ "Курчатовский институт"

³ FSRC "Crystallography and Photonics" RAS

⁴ FSRC "Crystallography and Photonics" RAS

Corresponding Author: asad@crys.ras.ru

Разработан новый микрофокусный рентгеновский лазерно-плазменный источник, обеспечивающий высокую мощность рентгеновского излучения, составляющую приблизительно 1.6×10^9 фотон/с/2л, при размере приблизительно 10×10 мкм. Это было достигнуто с помощью фемтосекундного волоконного лазера с низкой энергией и высокой частотой повторения импульсов при жесткой фокусировке ($NA \sim 0.2$) на поверхности вращающейся медной мишени. Размер источника рентгеновского излучения в режиме реального времени контролируется с помощью обратной связи, основанной на генерации второй гармоники в приповерхностной плазме. Размер лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения был минимизирован по сравнению с аналогичными источниками, известными в литературе.

Для оптимизации выхода рентгеновского излучения, создана система управления на основе обучения с подкреплением, с использованием второй гармоники, генерируемой в лазерной плазме, которая в режиме реального времени управляет положением вращающейся мишени Cu. Это дает возможность уменьшить линейный тренд, возникающий из-за абляции поверхности мишени и колебаний вращающейся мишени. Кроме того, источник рентгеновского излучения можно оптимизировать, добавив наносекундный или фемтосекундный предварительный импульс. Предварительный импульс создает определенный профиль предварительной плазмы и плотности, модулируемый индуцированными лазером ударными волнами.

Созданный микрофокусный источник был применен для получения фазо-контрастных рентгеновских изображений.

Получение укрупненных изображений может быть достигнуто с использованием проекционного увеличения или увеличивающих рентгенооптических элементов, когда эллиптический концентратор выполняет функцию конденсора, формирующего сходящийся рентгеновский пучок, падающий на образец. При этом получение увеличенных рентгеновских изображений достигается путем применения зонной пластинки Френеля. В то же время эллиптический концентратор может

применяться и для фокусирования рентгеновского пучка на поверхности исследуемого образца, что позволит, например, проводить локальный рентгено-флуоресцентный анализ. Кроме того, для получения изображений создан двумерный рентгеновский детектор прямого счета с размером пикселя 3.5 мкм с количеством их 1.5×2 тысячи.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (в части оптических исследований) и в рамках задания Минобрнауки России Грант №075-15-2021-1362 в части создания микрофокусного источника и проведения рентгеновских исследований.

143

Станция синхротронного излучения "Космос". Состояние и перспективы.

Author: Антон Николенко¹

Co-authors: Анастасия Федоренко²; Михаил Платунов³; Михаил Сырковашин⁴; Евгений Коротаев⁴

¹ ИЯФ СО РАН, ЦКП СКИФ

² ИНХ СО РАН, ЦКП СКИФ

³ ЦКП СКИФ

⁴ ИНХ СО РАН

В работе рассмотрено состояние работ по модернизации станции «Космос» на накопителе ВЭПП-4. Модернизация направлена на дальнейшее развитие возможностей станции для регистрации эмиссионных и адсорбционных спектров и расширение спектра метрологических работ в мягком рентгеновском диапазоне (0.5 - 10 кэВ). Описана система монохроматизации станции, система манипулирования образцами в экспериментальном объеме, а также набор имеющихся детекторов. Описано устройство спектрометра эмиссионных спектров, "Стеарат", установленного на станции в текущем году. Модернизация станции направлена в первую очередь на подготовку всей ее аппаратуры для последующего перемещения на строящийся специализированный источник синхротронного излучения СКИФ. Приведены примеры полученных эмиссионных и флуоресцентных спектров, а также параметры станции после ее перемещения на новый источник.

144

РАЗВИТИЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Author: Ilia Savelev¹

Co-authors: ILDAR ABDYUKHANOV¹; Maxim Alekseev¹; Anastasia Tsapleva¹; Maria Terina¹

¹ Bochvar Institute (VNIINM)

Corresponding Author: iligsav@gmail.com

Открытие в 2008 году группой Хосоно из Токийского технологического института сверхпроводимости в железосодержащих соединениях [1] дало начало исследованиям по изучению их структуры и свойств, а также поиску возможных путей их практического применения. Оказалось, что сверхпроводники на основе этих соединений обладают меньшей по сравнению с купратными высокотемпературными сверхпроводниками анизотропией свойств, крайне слабой зависимостью критического тока от магнитного поля и более высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние по сравнению с традиционными низкотемпературными сверхпроводниками.

Возможность применения сильных магнитных полей играет большую роль в развитии фундаментальных наук [2], термоядерной энергетики, систем и установок, работающих на основе ядерного магнитного резонанса [3,4], и ускорителей частиц [5,6]. Но применение сильнополюсных магнитов требует доступных сверхпроводящих кабелей и проводов, способных проводить сверхтоки. Железосодержащие сверхпроводники могут стать кандидатами для подобного применения [7]. Для этого уже сейчас решается множество как научных, так и технологических задач, включая разработку параметров синтеза сверхпроводящих железосодержащих соединений, технологии изготовления одно- и многожильных сверхпроводящих проводов и лент на их основе, исследование влияния легирующих добавок и границ зёрен на перенос транспортного тока [8]. Решение части которых, на данный момент, позволило достичь прогресса в получении первых проводов и лент, а также магнитных катушек на их основе и выявить ключевые вопросы, с которыми могут столкнуться железосодержащие сверхпроводники в дальнейшем. Аналогичные задачи решаются и в России, в частности, в АО «ВНИИНМ» получены и изучены первые экспериментальные образцы одножильных проводов и лент на основе $\text{BaFe}_{1,9}\text{Ni}_{0,1}\text{As}_2$ и $\text{Ba}_{0,6}\text{Na}_{0,4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние 13,8 К и 32,4 К соответственно.

1. Kamihara Y., Watanabe T., Hirano M. and Hosono H. Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05\text{--}0.12$) with $T_c = 26$ K. – 2008. – J. Am. Chem. Soc. – 130. – P.3296-3297.
2. Aad G, Abajyan T, Abbott B et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. – 2012. – Phys Lett B. – 716:1–29.
3. Nassar O, Jouda M, Rapp M et al. Integrated impedance sensing of liquid sample plug flow enables automated high throughput NMR spectroscopy. – 2021. – Microsyst Nanoeng. – 7:30.
4. Ladd ME, Bachert P, Meyerspeer M et al. Pros and cons of ultra-high-field MRI/MRS for human application. – 2018. – Prog Nucl Magn Reson Spectrosc. – 109:1–50.
5. Bottura L, De Rijk G, Rossi L et al. Advanced Accelerator Magnets for Upgrading the LHC. – 2012. – IEEE Trans Appl Supercond. 22:4002008.
6. Tang J. Design Concept for a Future Super Proton-Proton Collider. – 2022. – Front Phys. – 10:828878.
7. Kametani F, Tarantini C, Hellstrom E. Fe-based high field superconductors for cost-effective future accelerator magnets. – 2022. – arXiv:2203.07551.
8. Dong C., Xu Q., Ma Y. Towards high-field applications: high-performance, low-cost iron-based superconductors. – 2024. – National Science Review. – nwae122.

145

Станция исследования быстропротекающих процессов на источнике синхротронного излучения ЦКП «СКИФ»

Authors: Ivan Rubtsov¹; Andrey Bukhtiyarov²; Konstantin Zolotarev³; Yan Zubavichus⁴; Anna Konovalova⁵; Konstantin Kuper³; Sergey Kazantsev³; Mikhail Devushkin⁶; Alexey Kashkarov⁷; Aleksey Pluman^{None}; Eduard Prueel⁷; Alexey Studennikov⁸; Konstantin Ten⁷; Vyacheslav Khalemenchuk^{None}; Lev Shekhtman³; Boris Tolochko⁹

¹ Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS

² Boreskov Institute of Catalysis

³ Budker Institute of Nuclear Physics

⁴ Boreskov Institute of Catalysis SB RAS

⁵ SRF SKIF

⁶ LIH SB RAS

⁷ Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁸ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

⁹ *Institute of solid state chemistry and mechanochemistry*

Corresponding Author: rubtsov@hydro.nsc.ru

В рамках реализации проекта ЦКП «СКИФ» предполагается строительство 30 экспериментальных станций, одной из которых является Станция 1-3 «Быстропротекающие процессы». Станция строится в рамках Государственного контракта с ИГиЛ СО РАН и будет сдана в эксплуатацию в конце 2024 года. Уже выпущена конструкторская документация и идет этап изготовления уникального научного оборудования.

Экспериментальная станция исследования быстропротекающих процессов 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.

Исследования быстропротекающих процессов с помощью синхротронного излучения были начаты в конце 90-х годов объединением усилий институтов Сибирского отделения РАН. В последние годы в мире это направление начало активно развиваться: Англия, Франция и Германия проводили исследования по изучению ударных волн, генерируемых пушками и/или лазерами, также за эти годы очень активно начали развиваться методики для таких исследований. А станция в США на сегодняшний день по многим параметрам является мировым лидером по исследованию быстропротекающих процессов с использованием синхротронного излучения.

Таким образом, создание этой новой экспериментальной станции и совершенствование методик исследования быстропротекающих процессов с использованием синхротронного излучения в Российской Федерации необходимо для поддержания лидирующих позиций в этой области исследований.

Авторы (ЦКП «СКИФ») благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042).

146

Технологии проведения рентгеновской компьютерной томографии для решения исследовательских и прикладных задач

Authors: Иван Крамлих^{None}; Юрий Кудинов^{None}

Corresponding Author: ivan.kramlikh@ya.ru

1. Выявление включений в композитных материалах, лопасти несущего винта вертолетной техники, состоящей из стеклоуглепластика на основе стекловолокна углеродного жгута, титановой фольги, стеклопластика, абразивостойкой резины, нержавеющей стали, полиметакрилимидного пенопласта и пластин из алюминиевого сплава.
 2. Наложение сечения от объемной модели (CAD-модель) спроектированного изделия/образца в автоматизированной системе проектирования с реально полученной рентгеновской томограммой, с последующим анализом отклонений по геометрии.
 3. Выявление отклонения поверхности изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий, на полученной рентгеновской томограмме с номинальной поверхностью CAD-модели, поиск неоднородной структуры и выявления дефектов типа «межслойное неспекание».
 4. Выявление и оценка площади непрочлеев и расслоений в композиционном материале на основе углеродных нитей (препрегов).
 5. Оценка геометрических параметров исследуемой конструкции по отношению к основной оси.
- Выявление дефектов в сварных соединениях элементов, в случае если этот элемент находится внутри изделия.

147

Применение СИ для измерения сечений поглощения ультрамягкого рентгеновского излучения в области NEXAFS

Authors: Viktor Sivkov¹; Sergey Nekipelov²; Xenia Bakina³; Olga Petrova³; Danil Sivkov⁴; Valeriy Rutkovskiy³; Roman Scandakov³

¹ ФМИ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

² FSC Romi SC UrD RAS

³ FSC Komi SC UrD RAS

⁴ FSC Komi SC UrD RAS

Corresponding Author: sivkovvn@mail.ru

В докладе обсуждаются методики проведения абсолютных измерений сечений поглощения с учетом немонохроматического фона и аппаратурных искажений в области ультрамягкого рентгеновского (УМР) спектра 90-1000 эВ, где располагаются 1s-пороги ионизации атомов бериллия, бора, углерода, азота, кислорода и фтора, а также 2p-края поглощения атомов кремния, фосфора, серы, хлора, калия, кальция и 3d-переходных металлов от скандия до меди, с применением монохроматизированного синхротронного излучения на выходе каналов НаноФЭС (КИСИ-Курчатов, г. Москва) [1] и RGBL (BESSY-II, г. Берлин)[2]. В настоящее время единственным каналом доступным российским пользователям для проведения NEXAFS исследований в УМР диапазоне 40-1200 эВ является канал НаноФЭС. На этом канале удалось успешно реализовать методики измерения сечений поглощения методом полного электронного выхода (Total electron yield, TEY) с учетом аппаратурных искажений и немонохроматического фона в области NEXAFS, развитые в процессе исследований на Русско-Немецком канале на BESSY-II. Исследования спектральных зависимостей материалов проводилось методом TEY по методике, разработанной нами ранее [3], которая позволяет минимизировать аппаратурные искажения, поскольку измерения поглощения в области NEXAFS осуществляются в пределе к «нулевой толщине» исследуемого образца из-за малой глубины выхода фото-, Оже- и вторичных электронов. Сигнал TEY проводящего образца пропорционален произведению сечения поглощения σ , энергии кванта E_0 и интенсивности I_0 монохроматического излучения, падающего на образец:

$$iA \sim \sigma(E_0) I_0 \Phi(E_0) \varphi(E_0)$$

где функция $\varphi(E_0)$ являются монотонной от энергии кванта E_0 , изменением которой в небольших интервалах энергий можно пренебречь. При этом сигнал TEY формируется электронами, вышедшими из поверхностного слоя образца толщиной $d = 1 - 5$ нм, что соответствует пределу «нулевой толщины».

Для определения зависимости $I_0 E_0 \varphi(E_0)$ в относительных единицах использовался спектр TEY от чистой поверхности Au-пластины. Выбор золота обусловлен тем, что его сечение поглощения в ультрамягкой области спектра известно и изменяется монотонно [4], а также для золота имеются данные по абсолютным величинам квантового выхода [5]. Для измерения и подавления вкладов фонового излучения в падающем пучке и в регистрируемом сигнале TEY от образца использованы абсорбционные фильтры из Ti-пленки толщиной 230 нм или 150 нм, закрепленной на Au-сетке. Титановый фильтр сильно поглощает длинноволновое ВУФ (5-40 эВ) и коротковолновое излучение второго порядка в интервале энергий 455–900 эВ, поэтому его применение ограничено снизу энергией 225 эВ. Для интервала 160-280 эВ могут быть применены углеродсодержащие полимерные пленки, в частности, из полистирола, который также характеризуется высоким поглощением в ВУФ области спектра. Обычно исследования в области NEXAFS C1s- (285 эВ) и N1s- (400 эВ) порогов ионизации проводят при коэффициенте фокусировки $C_{ff} = 2.25$, когда интенсивность синхротронного излучения и энергетическое разрешение достаточно высоки, но уровень фона кратных порядков составляет порядка 15%, поэтому подавление кратных порядков оказывается важным. Титановые фильтры могут также успешно использоваться для подавления длинноволнового фона при исследованиях в области 2p-краев поглощения кремния, фосфора, серы и хлора при величине $C_{ff} = 1.6$. В этом случае энергетическое разрешение будет несколько хуже, но отношение фон 2-го и 3-го порядков к монохроматическому излучению в области 90–200 эВ составит менее 0.01 [2]. Таким образом основной проблемой остается подавление немонохроматического длинноволнового фона, которую можно решить с помощью тонких Ti-фильтров толщиной 40-50 нм, которые обеспечат подавление этого фона в 40-70 раз. Поэтому при проведении измерений сечений поглощения в области NEXAFS 2p порогов ионизации Si, P, S и Cl могут быть решены с использованием тонких (40-50 нм) Ti-поглощающих фильтров и при величине коэффициента

фокусировки $C_{ff} = 1.6$.

Исследование выполнено в рамках г/б темы 122040400069-8, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351 при проведении NEXAFS-исследований.

1. A. M. Lebedev, K. A. Menshikov, V. G. Nazin, V. G. Stankevich, M. B. Tsetlin, R. G. Chumakov // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021. V. 15. P. 1039–1044.
2. S.A. Gorovikov, S.L. Molodtsov, R. Follath // *Nucl. Instr. and Meth. A*. 1998. V.411. P.506–512.
3. D. Sivkov, O. Petrova, A. Mingaleva, A. Obedkov, B. Kaverin, S. Gusev, I. Vilkov, S. Isaenko, D. Bogachuk, R. Skandakov, V. Sivkov, S. Nekipelov // *Nanomaterials*. 2020. V. 10(2). P. 374
4. B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis // *At. Data Nucl. Data Tables*. 1993. V. 54, P. 181.
5. H. Henneken, F. Scholze, G. Ulm // *Metrologia*. 2000. V.37(5). P.485-488.

148

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА

Authors: Фёдор Горбунов¹; Лилия Бердникова²; Виктор Булгаков²

¹ *Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН; Новосибирский государственный технический университет*

² *Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

Corresponding Author: f1123723@yandex.ru

Впервые проведено исследование влияния воздействия ионизирующего и УФ-излучений на физико-механические характеристики полимерных материалов на основе наночастиц SiO₂ марки Tarkosil® и литьевого полиуретана различного срока хранения исходных компонентов. Показано, что в результате воздействия ионизирующего излучения (1 000 Гр) происходит увеличение прочности при растяжении до 30 % (с 23 до 30 МПа) и относительного удлинения до 65 % (с 382 до 627 %) полиуретана на основе компонентов изготовленные за месяц до синтеза образцов.

Выявлена возможность влияния внешних факторов, таких как УФ и ионизирующее излучения, на эксплуатационные характеристики изделий и деталей на основе полиуретана с целью улучшения показателей физико-механических свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Пер. № FWUS-2021-0004 и FWUS-2024-0002).

149

Оценка радиационных полей от рассеянного синхротронного излучения в каналах транспортировки

Authors: Valery Bepalov¹; Aleksey Gogolev²; Marat Sharafutdinov³; Tatyana Gogoleva¹

¹ *National Research Tomsk Polytechnic University*

² *Tomsk Polytechnic University*

³ *SRF "SKIF"*

Corresponding Author: gogolev@tpu.ru

В работе для экспериментальной станции «Микрофокус» проекта SKIF методом Монте Карло проведены расчеты необходимой защиты от рассеянного синхротронного излучения (СИ), возникающего при взаимодействии пучка СИ с различными устройствами во время

его транспортировки по каналу. Предложен метод расчета мощности дозы рассеянного СИ через расчет плотности потока рассеянного излучения в заданном интервале углов. Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП "СКИФ" Института катализа СО РАН № FWUR-2024-0042.

150

Многоэлектронные возбуждения в спектрах фотоэмиссии халькогенидных полупроводников

Author: Vladimir Grebennikov¹

Co-authors: Татьяна Кузнецова²; Ратибор Чумаков³

¹ *ИМП УрО РАН*

² *ИФМ УрО РАН*

³ *НИЦ "Курчатовский институт"*

Corresponding Author: vgrebennikov@list.ru

Экспериментально изучены два типа многоэлектронных эффектов в рентгеновской фотоэмиссии из халькогенидных полупроводников $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, Cu_2SnS_3 , $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{Se, Te})_2$. Первый - это межатомные оже-переходы с выбросом электронов из внутренних уровней атомов окружающих медь, возникающие в результате процесса распада фотодырки, образующейся на атомах меди при поглощении синхротронного излучения. И второй - характерные потери кинетической энергии в процессе прямой фотоэмиссии из внутренних уровней атомов олова за счет динамического кулоновского поля фотодырки.

Межатомные CuL CuM SnN оже переходы с кинетической энергией электронов примерно на 20 эВ меньшей энергии электронов, рождающихся в соответствующем внутриатомном CuL CuM V переходе, возникают в результате распада Cu L фотодырки и последующей эволюции электронной системы. Внезапное появление дырок (зарядов) в процессе фотопоглощения создает динамическое электрическое поле с широким частотным спектром, вызывающее сильное встряхивание окружающих электронов, в том числе, принадлежащих внутренним уровням соседних атомов Sn, In, Ga.

Этот же механизм работает и в случае прямой фотоэмиссии. Например, основные Sn 3d линии сопровождаются сателлитами с потерей энергии на 28 эВ. Сателлиты возникают за счет заброса Sn 4d электронов в валентные состояния.

Наиболее благоприятные условия для проявления многочастичных электрон-дырочных эффектов реализуются в соединениях с узкой валентной зоной d-типа, поскольку кулоновское взаимодействие локализованных зарядов существенно больше, чем в случае делокализованных s-p состояний. Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-72-00067.

151

Исследование монокристаллических и полимерных пироэлектрических детекторов в диапазоне 0,9-2,0 ТГц с использованием Новосибирского ЛСЭ

Authors: Анатолий Мельников¹; Артем Синельников²; Евгений Кальнеус³; Ярослав Гетманов⁴; Дарья Коломеец⁴; Василий Герасимов⁴; Олег Анисимов³; Матвей Федин¹; Сергей Вебер¹

¹ *Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия*

⁴ *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Corresponding Author: anatoly.melnikov@tomo.nsc.ru

Разработка эффективных и надежных детекторов, работающих при комнатной температуре, необходима для развития науки и технологий, использующих терагерцовое (ТГц) излучение. Пироэлектрические ТГц детекторы являются одними из лучших кандидатов, учитывая их разнообразие, отличные технические характеристики, простоту изготовления и надежность. В данной работе мы сравниваем шесть различных детекторов, основанных на кристалле La-TiO₃ или различных полимерных пленках, используя монохроматическое излучение Новосибирского лазера на свободных электронах в диапазоне частот 0,9-2,0 ТГц. Для всех детекторов были определены их основные характеристики, включая эквивалентную мощность шума и частотную зависимость отклика. Возможные причины различий в полученных характеристиках описаны на основе физико-химических характеристик и оптических свойств чувствительной области. Три детектора продемонстрировали достаточную чувствительность для регистрации формы и длительности ТГц макроимпульсов, используя лишь небольшую часть излучения основного пучка. Эта возможность позволяет точно характеризовать параметры ТГц излучения параллельно с основным экспериментом на различных специализированных пользовательских станциях синхротронов и лазеров на свободных электронах. В качестве примера такой характеристики была исследована стабильность средней мощности излучения Новосибирского ЛСЭ на пользовательской станции спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Кроме того, на основе поливинилидендифторидной (ПВДФ) пироэлектрической пленки, покрытой напыленными металлическими электродами, был изготовлен компактный детектор для измерения поглощения ТГц излучения исследуемым образцом *in-situ* при криогенной температуре. Конструкция детектора была оптимизирована для системы регистрации пользовательской станции ЭПР спектроскопии. Возможность использования такого детектора для измерения поглощения *in-situ* была продемонстрирована на примере двух типичных молекулярных спиновых систем с прозрачностью 20-25% на 76,9 см⁻¹ при 4 К. Такие измерения, проводимые непосредственно в криостате с полностью настроенной основной регистрирующей системой и образцом, позволяют точно контролировать параметры ТГц излучения, используемого в эксперименте.

Благодарности

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 23-73-00042.

152

In situ дифракционное исследование процесса кристаллизации Mn-Zr катализаторов

Authors: Валерия Коновалова¹; Ольга Булавченко¹; Захар Винокуров¹; Татьяна Афонсенко²

¹ *Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

² *Центр новых химических технологий ИК СО РАН*

Corresponding Author: lekorux@gmail.com

Mn-содержащие катализаторы являются перспективными в реакциях окисления различных органических соединений, таких как метан, этанол, пропан и СО, а также в реакциях селективного восстановления. Они представляют интерес благодаря многообразию валентных состояний Mn и способностью ионов легко менять степень окисления. Активность Mn-содержащих катализаторов зависит от условий получения: температуры, среды, скорости термообработки и катионного состава. Варьирование этих параметров в ходе *in situ* эксперимента может дать важную информацию о процессе формирования различных состояний катализатора. Целью работы стало установление особенностей процесса кристаллизации Mn-Zr катализаторов с помощью синхротронной *ex situ* / *in situ* рентгеновской дифракции и термического анализа. Были поставлены задачи определения генезиса фазового состава при кристаллизации оксидов в инертной, окислительной и восстановительной средах с помощью *in situ* рентгеновской дифракции и определения локальной структуры исследуемых катализаторов методом РРА. Серия Mn-Zr катализаторов была получена сосаждением нитратов Mn и Zr и последующим

прокаливанием при температурах 400–800°C. Каталитические свойства были протестированы в реакции окисления СО. По данным рентгеновской дифракции, катализаторы, полученные при низких температурах прокаливания (400–500°C), являются рентгеноаморфными. По данным РРА, аморфная фаза, образующаяся при низких температурах прокаливания, имеет локальную структуру, близкую к кубическому ZrO_2 . При температуре прокаливания 600°C формируется кристаллическая фаза Mn-Zr твёрдого раствора. При 650-700°C происходит частичное расслоение твёрдого раствора с выходом марганца из его состава. Именно такое состояние обуславливает наибольшую активность катализатора в реакции окисления СО. Дальнейшее увеличение температуры прокаливания приводит к полному расслоению твёрдого раствора и формированию наименее активного состояния.

Для рассмотрения процесса кристаллизации методом *in situ* рентгеновской дифракции был выбран катализатор, полученный при температуре прокаливания 400°C. Показано, что в инертной и восстановительной средах кристаллизация начинается в диапазоне температур 450-460°C, и кристаллическая фаза твёрдого раствора окончательно формируется при 600-650°C. При дальнейшем увеличении температуры происходит расслоение твёрдого раствора с выходом марганца и формированием фазы MnO. В окислительной среде процесс кристаллизации начинается при 560°C. Расслоение твёрдого раствора происходит при 690-700°C и сопровождается формированием фазы Mn_2O_3 . Термический анализ также показал увеличение температуры кристаллизации при нагревании катализатора в окислительной среде.

153

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГТОВЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР

Author: Aleksandr Gentslev¹

¹ Budker INP, Novosibirsk, Russia

Corresponding Author: ang1209@mail.ru

УДК 539.1.043; УДК 539.1.044; PACS 85.40.Hr

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГТОВЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР

Генцелев А.Н.1, Кузнецов С.А.1,2,3, Варанд А.В.1, Овчинникова С.Н.4

- 1) Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск
- 2) Новосибирский государственный университет (НГУ)
- 3) Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
- 4) Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

Частотная фильтрация излучения в терагерцовом диапазоне частот, в частности, выделение коротковолновых спектральных гармоник на фоне сильного подавления пропускания длинноволновых является актуальной экспериментальной задачей. Как показано нами ранее, данная задача может быть эффективно решена при использовании квазиоптических фильтров высоких частот на основе высокоаспектных рентгенолитографических микроструктур чисто металлического (ММС) или псевдометаллического (ПММС) типов. Такие микроструктуры представляют собой периодические массивы из субволновых отверстий, разделенных узкими перемычками, и имеют толщину масштаба характерной длины волны волноводной отсечки отверстия. Отличие ПММС от ММС заключается в структурировании полимера посредством технологии глубокой рентгеновской литографии с последующим покрытием всей поверхности структуры металлом с толщиной не менее характерной толщины скин-слоя ТГц излучения.

В настоящем докладе обсуждается развитие технологии получения терагерцовых ПММС-фильтров высоких частот на базе Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучений (СЦСТИ, ИЯФ СО РАН). Разработанная нами технология предполагает использование промышленно выпускаемого листового оргстекла, которая была существенно усовершенствована. Технологический маршрут производства ПММС включает: 1) использование подложек из высокополимерного ПММА (имеющего молекулярную массу ~107 и характеризующегося более высокой ударной

вязкостью и прочностью); 2) проведение экспонирования полимерной подложки пучком СИ через высококонтрастный рентгеношаблон, изготовленный посредством лазерной резки танталовой фольги, толщиной 30 мкм; 3) применение комбинированных способов металлизации структурированной поверхности полимера, включающих реакцию серебряного зеркала, гальванического осаждения меди и магнетронного напыления металлов на вращающуюся подложку, расположенную под углом 45° к поверхности катода-мишени магнетрона (что позволяет напылять металл на всю поверхность структур, благодаря специфике их геометрических размеров); 4) напыление защитных антикоррозийных алюминиевых покрытий, препятствующих окислению толстого гальванически осаждённого медного слоя. Усовершенствованная технология изготовления квазиоптических терагерцовых ПММС-фильтров позволяет существенно повысить их механическую прочность и сроки эксплуатации.

Александр Николаевич Генцелев,
630090, Новосибирск, проспект ак. Лаврентьева, 11
E-mail: ang1209@mail.ru; Тел.: (383) 329-41-38

154

Серийная и разрешенная по времени кристаллография мембранных белков

Author: Валентин Борщевский¹

¹ *Московский физико-технический институт*

Corresponding Author: borshchevskiy@gmail.com

В докладе обсуждается применение современных методов белковой кристаллографии для изучения структуры и функции мембранных белков. Будут рассмотрены представители двух классов белков: рецепторы, связанные с G-белками, и ретинальные белки. Первая часть доклада посвящена методу серийной кристаллографии на примере рецепторов, сопряженных с G-белками, и обсуждается применение этого метода на современных синхротронных источниках рентгеновского излучения и лазерах на свободных электронах. Вторая часть доклада посвящена методам получения переходных состояний на примере ретинальных белков: кристаллографии с временным разрешением и методу фиксации переходных состояний при низких температурах. В завершающей части доклада освещаются результаты работы, возможности и перспективы Российской группы белкового рентгеноструктурного анализа и малоуглового рассеяния. Автор выражает благодарность за поддержку Минобрнауки России (соглашение #075-03-2024-117, проект FSMG-2024-0012).

155

Сверхпроводящий 40-полюсный вигглер с полем 4.5 Тесла и периодом 48 мм для ЦКП СКИФ.

Authors: Sergey Khrushchev¹; Vitaliy Shkaruba¹; Nikolay Mezentsev²; Valeriy Tsukanov¹; Askold Volkov¹; Alexander Safronov¹; Olga Tarasenko¹; Konstantin Kuper²; Aleksandr Erokhin¹; Sergey Makarov³

¹ BINP

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *КТИ НП СО РАН*

Corresponding Author: khruschev@mail.ru

В Институте ядерной физики СО РАН разработан и создан 40-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 4.5 Тесла и периодом 48 мм для строящегося источника синхротронного

излучения 4-го поколения «СКИФ». Вертикальная апертура вакуумной камеры вигглера составляет 5 мм при межполюсном зазоре 7 мм. Вигглер будет использоваться в качестве источника высокоэнергетического рентгеновского излучения в диапазоне от 25 до 150 кэВ с интегральной мощностью 40 кВт. Интенсивность монохроматического излучения из вигглера составит величину на уровне 1013 фотон/сек./мм², что позволит проводить научные исследования с высоким пространственным и временным разрешением. Вигглер будет генерировать равномерное распределение излучения в горизонтальном угловом растворе до 2 мрад., что позволит получать широкоформатные рентгеновские изображения в высокоэнергетическом диапазоне. В статье обоснован выбор параметров вигглера, описаны особенности его конструкции, приведены расчётные характеристики вигглера и генерируемого им излучения.

156

Терагерцовая микроскопия поверхностного плазмонного резонанса на полупроводниковой поверхности в лазерном излучении

Authors: Ildus Khasanov¹; Vasily Gerasimov²; Alexey Nikitin³; Oleg Kameshkov⁴; Irina Antonova⁵; Artem Ivanov⁶

¹ *Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*

² *Budker Institute of nuclear physics SB RAS*

³ *Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of RAS*

⁴ *BINP SB RAS*

⁵ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*

⁶ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*

Corresponding Author: khasanov@ntcup.ru

В докладе мы демонстрируем успешную реализацию широкопольной амплитудной микроскопии поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в геометрии Отто на поверхности антимионида индия в терагерцовом диапазоне с использованием когерентного квазимонохроматического излучения Новосибирского лазера на свободных электронах. Были получены детальные изображения поверхностных покрытий, демонстрирующие эффективность данного метода для детального исследования плоских поверхностей полупроводников и, в частности, для локализации границ полипропиленовых и графеноподобных тонких покрытий. В исследовании представлен анализ влияния различных параметров, таких как — воздушный зазор между призмой и исследуемой поверхностью, длиной волны, плазменной частотой полупроводника, — на разрешающую способность микроскопии. Предложены оптимальные условия для наблюдения ППР для повышения контрастности и разрешения изображений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ТГц микроскопия ППР может найти применение как метод для неразрушающего контроля тонких плёнок и полупроводников.

157

Исследование времен жизни и когерентности состояний доноров в n-Ge с использованием терагерцевого излучения Новосибирского лазера на свободных электронах

Author: Валерия Кукотенко¹

Co-authors: Роман Жукавин²; Павел Бушуйкин²; Юлия Чопорова¹; Константин Ковалевский²; Вениамин Цыпленков²; Василий Герасимов³; Борис Князев; Наталья Осинцева⁴; Николай Абросимов⁵; Валерий Шасти²

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

² *Институт физики микроструктур РАН*

³ *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

⁴ *ИЯФ СО РАН*

⁵ *Leibniz-Institut für Kristallzüchtung*

Corresponding Author: valeriakukotenko@yandex.ru

При разработке новых полупроводниковых устройств важно исследовать кинетику быстро протекающих электронных процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Такие процессы определяют степень неравновесности электронной подсистемы. В частности, речь может идти о мелких кулоновских центрах легирования в полупроводниках, которые обычно используются в качестве фотоприемников, но могут быть и источниками терагерцевого (ТГц) излучения. В данной работе использовалась методика «накачка-зондирование» для измерения темпов релаксации возбужденных состояний мышьяка As и сурьмы Sb в германии при криогенных температурах $T < 15\text{K}$ и дана экспериментальная оценка степени когерентности наиболее важных состояний. Для оценки степени когерентности электронных состояний доноров использованы два дополняющих друг друга подхода: осцилляции Рамсея и фотонное эхо. В качестве источника излучения использовался ТГц Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ) с перестройкой частоты в диапазоне длин волн 8–400 мкм. Импульсы излучения такого источника имеют длительность ~ 100 пс при частоте повторения 5.6 МГц. Измерения времен жизни наиболее важных состояний выполнялись одночастотным методом «накачка-зондирование». То или иное состояние донора резонансно возбуждалось импульсом накачки, и его распад (релаксация) во времени отслеживался оптически задержанным импульсом зондирования. Оба импульса были абсолютно идентичны и отличались лишь амплитудой [1]. В работе использованы два варианта возбуждения донора As: из основного состояния $1s(A1)$ и первого возбужденного $1s(T2)$ в условиях его термического возбуждения при температуре ($T = 15\text{K}$). В первом варианте установлено, что время распада состояния $2p0$ составляет ~ 0.8 нс, а состояния $3p\pm$ ~ 0.6 нс. При втором варианте удалось получить значения времен релаксации сразу двух состояний: $2p\pm$ и $1s(T2)$, значения которых ~ 0.6 нс и ~ 0.16 нс, соответственно. Тем самым можно сделать вывод о возможности формирования инверсной населенности и усиления ТГц излучения на переходах $2p\pm$, $2p0 \rightarrow 1s(T2)$ при оптическом возбуждении указанных состояний донора As на разрешенных внутрицентровых переходах при температурах $T < 30\text{K}$.

Также проводились измерения методом «накачка-зондирование» образцов германия с сурьмой при одноосной деформации сжатия кристалла давлением ≥ 100 бар по оси [111]. Указанное давление было «предельным» в том смысле, что его увеличение не приводит к смещению уровней состояний нижней долины. Изучалась релаксация состояния $2p0$. Характерное время экспоненциального спада сигнала и соответственно время жизни электрона в данном случае близко 1.7 нс. Заметим, что по нашим данным время жизни электрона на уровне $2p0$ сурьмы в Ge без деформации близко 1 нс.

В следующей серии экспериментов была продемонстрирована возможность наблюдения осцилляций Рамсея при возбуждении состояния $2p0$ донора мышьяка в германии импульсным ТГц излучением НЛСЭ при криогенных температурах [2]. При проведении экспериментов применялась стандартная методика, предполагающая воздействие последовательности двух оптических импульсов на частоте излучения, близкой к частоте примесного перехода $1s(A1) \rightarrow 2p0$. Когерентное состояние ансамбля доноров наблюдалось с помощью измерения фототока, обусловленного термическим выбросом электронов в зону проводимости из состояния $2p0$. Полученный эффект оказался достаточно устойчив к используемым экспериментальным условиям, в частности, температурному режиму. Используемые в представленной работе образцы с концентрацией мышьяка $1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ позволили наблюдать осцилляции Рамсея вплоть до времен 400 пс, что позволяет надеяться на дальнейшее увеличение времени при использовании образцов с меньшей шириной линии. Анализ экспериментальных данных и проведенные модельные расчеты показывают, что наблюдаемая форма огибающей осцилляций Рамсея зависит от ширины линии, отстройки от резонанса и интенсивности возбуждения.

В третьей серии измерений целью ставился поиск фотонного эха в Ge:Sb под «предельным» давлением (> 100 бар). На образец в криостате ($T = 5\text{K}$) под углом друг к другу направлялись два оптических импульса, которые приходили на образец с контролируемой задержкой. Мощности первого и второго импульса подбирались такими, чтобы соответствовать углам θ равным $\pi/2$ и π на сфере Блоха для перехода $1s(A1) \rightarrow 2p0$ (233 мкм) Sb в Ge под давлением. Тогда излучение фотонного эха должно наблюдаться в направлении $2k_2 - k_1$, где k_1 и k_2 -

волновые вектора $\pi/2$ - и π - импульсов, соответственно. Из экспоненциального спада измеренного сигнала фотонного эха было получено время дефазировки T_2 , равное 184 пс при температуре образца 4К и 103 пс при 10 К. В работе была продемонстрирована возможность измерения времени продольной и поперечной релаксации доноров в германии, на примере мышьяка и сурьмы.

- [1] Жукавин, Р. Х., Ковалевский, К. А., Чопорова, Ю. Ю., Цыпленков, В. В., Герасимов, В. В., Бушуйкин, П. А., Князев, Б. А., Абросимов, Н. В., Павлов, С. Г., Хьюберс, Г.-В., Шастин, В. Н. (2019). Времена релаксации и инверсия населенностей возбужденных состояний доноров As в германии. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 110(10), 677-682.
 [2] Жукавин, Р.Х., Бушуйкин, П.А., Кукотенко, В.Д., Чопорова, Ю.Ю., Дессманн, Н., Ковалевский, К.А., Цыпленков, В.В., Герасимов, В.В., Князев, Б.А., Абросимов, Н.В., Шастин, В.Н. (2022). Обнаружение осцилляций Рамсея в германии, легированном мелкими донорами, при возбуждении перехода $1s(A1) \rightarrow 2p0$. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 116(3), 139-145.

158

Акустооптическая модуляция поверхностных плазмон-поляритонов терагерцевого диапазона

Authors: Pavel Nikitin¹; Vasily Gerasimov²; Aleksey Lemzyakov³

¹ 1) Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS; 2) Moscow Power Engineering Institute

² Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

³ Budker INP SB RAS

Corresponding Author: nikitin.pavel.a@gmail.com

Никитин П.А.¹, Герасимов В.В.^{2,3}, Лемзяков А.Г.^{3,4}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342, Москва, улица Бутлерова, 15

² Физический факультет Новосибирского государственного университета, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Лаврентьева пр., 11

⁴ ЦКП "СКИФ" института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Морской, 2

Современное развитие информационных технологий направлено на миниатюризацию и повышение пропускной способности каналов связи. Поэтому перспективным является применение электромагнитных волн терагерцевого (ТГц) диапазона с длиной волны порядка 100 мкм. Миниатюризация же может быть обеспечена использованием поверхностных волн, таких как поверхностные плазмон-поляритоны (ППП). В настоящее время существуют различные методы генерации и управления таких волн. Для временной модуляции ППП используют в основном полупроводниковые структуры, нанесённые на проводящую поверхность. Целью данной работы являлась разработка метода динамического управления параметрами ППП с использованием акустооптического эффекта, заключающегося во взаимодействии электромагнитной волны с фазовой дифракционной решёткой, наведённой в среде ультразвуковой стоячей волной. Предварительные результаты проведённого эксперимента по акустооптической модуляции ТГц ППП с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах в пределах погрешности совпали с аналогичными результатами для акустооптической модуляции пучка ТГц излучения. Таким образом, впервые экспериментально реализована акустооптическая модуляция ТГц ППП.

159

Об оптимальных условиях генерации поверхностных плазмон-поляритонов терагерцового диапазона методом торцевой связи

Authors: Pavel Nikitin¹; Василий Герасимов²; Aleksey Lemzyakov³

¹ 1) *Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS*; 2) *Moscow Power Engineering Institute*

² *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

³ *Budker INP SB RAS*

Corresponding Author: nikitin.pavel.a@gmail.com

Никитин П.А.¹, Герасимов В.В.^{2,3}, Лемзяков А.Г.^{3,4}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342, Москва, улица Бутлерова, 15

² Физический факультет Новосибирского государственного университета, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Лаврентьева пр., 11

⁴ ЦКП "СКИФ" института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Морской, 2

Эффективная генерация поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) является одной из актуальных проблем в плазмонике терагерцового диапазона. Метод торцевой связи представляется очень перспективным благодаря простоте реализации и высокой эффективности преобразования (около 60 %). В данной работе экспериментально исследована зависимость эффективности преобразования от угла падения сфокусированного ТГц пучка и от трансляционного сдвига падающего ТГц пучка от плоскости распространения ППП. Эффективность преобразования достигала максимума при нормальном падении ТГц пучка и снижалась в два раза при угле падения 2,5 градуса от нормали к входному ребру образца. Было установлено, что наиболее эффективная генерация ППП достигается, когда пятно сфокусированного ТГц-пучка находится немного ниже плоскости распространения ППП.

160

Экспериментальное и теоретическое исследование XANES систем УОх: результаты моделирования с высоким разрешением.

Author: Даниил Новичков¹

Co-authors: Татьяна Полякова¹; Юрий Неволин²; Александра Смирнова¹; Петр Матвеев¹; Степан Калмыков¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

² *Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН*

Corresponding Author: danylo.novichkov@gmail.com

Среди всех актинидов уран является наиболее важным с практической точки зрения. В настоящее время он является основой атомной энергетики. В процессе ядерного топливного цикла оксиды урана являются его основной химической формой. Оксидные системы урана встречаются при добыче, транспортировке, изготовлении ядерного топлива, хранении отработанного ядерного топлива, а также при воздействии на окружающую среду после аварий. Хотя уран в оксидных системах имеет +4, +5 и +6 степени окисления для них характерно образование большего набора смешанных и нестехиометрических оксидов с различными аллотропными модификациями. Это также существенно влияет на методы синтеза различных оксидных форм урана. Рентгеновская спектроскопия поглощения (XAS) в настоящее время является одним из ведущих методов изучения структуры веществ и электронных состояний. Как структурные, так и

электронные свойства актинидов представляют фундаментальный интерес для описания внутримолекулярных взаимодействий. Используя лабораторные спектрометры, можно получить не только информацию об окислительном состоянии исследуемых материалов, но и структурную и электронную информацию, используя различные теоретические подходы. Использование теоретических подходов для моделирования XANES-спектров различных смешанных оксидов урана позволяет оценить локальную плотность электронных состояний (DOS). DOS помогает идентифицировать потенциальные переходы и спектральные линии, наблюдаемые в экспериментах, что крайне важно для понимания фундаментальных свойств актинидных соединений.

161

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

Authors: Konstantin Kuper¹; Aleksandr Legkodymov²; Peter Zavjalov³; Sergey Makarov⁴; Gleb Dovzhenko⁵; Alexandr Malikov⁶

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *TDISIE*

⁴ *КТИ НП СО РАН*

⁵ *SRF "SKIF"*

⁶ *Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS*

Corresponding Author: 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 высоко разрешающей 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 вилглер 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 рентгенокопии и рентгеноструктурного анализа можно будет предсказать, как поведут себя металлические конструкции при механической и термической нагрузке. Это исследования будут наиболее актуальны в авиастроении, машиностроении. Сейчас завершены этапы эскизного проектирования станции и разработки конструкторской документации. Начался следующий этап по изготовлению комплектующих материалов, его должны закончить в 2024 году.

162

Станция «ИК-диагностика» синхротронного источника «СКИФ»: концептуальный дизайн и ключевые экспериментальные методики

Authors: Анатолий Мельников¹; Илья Милёхин²; Аркадий Самсоненко¹; Матвей Федин¹; Александр Милёхин²; Константин Золотарев³; Николай Винокуров⁴; Ян Зубавичус³; Сергей Вебер¹

¹ *Институт «Международный томографический центр» СО РАН*

² *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*

³ *ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

⁴ *Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН*

Corresponding Author: sergey.veber@tomo.nsc.ru

Представлен проект экспериментальной станции «ИК-диагностика» инфракрасной микро-/наноскопии, работающей в рекордно мягком для синхротронного источника СКИФ энергетическом диапазоне: от терагерцового до ультрафиолетового (приблизительно 5 мэВ – 5 эВ). Кратко отражен мировой опыт создания синхротронных исследовательских станций аналогичного диапазона фотонных энергий. Описаны ключевые экспериментальные методики, предполагаемые к реализации на станции «ИК-диагностика», показана принципиальная оптическая схема и, в частности, конфигурация специализированной вакуумной камеры сбора излучения. В докладе также будут изложены перспективные фундаментальные задачи, для решения которых создается данная станция.

Расчеты излучающей структуры станции «ИК-диагностика» и описание методики магнитодипольной спектроскопии выполнены при поддержке РНФ (проект № 22-13-00376).

163

Моделирование рентгенооптических систем для станции 1-1 «Микрофокус» в проекте СКИФ

Author: Вадим Овсянник¹

Co-author: Федор Дарьин²

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*

Corresponding Author: ovsyannik2013@mail.ru

СКИФ или Сибирский Кольцевой Источник Фотонов – это современный источник синхротронного излучения поколения 4+, который строится в Новосибирске наукограде Кольцово. На момент запуска СКИФ будет обладать рекордно высокими характеристиками синхротронного излучения во всем мире, что в свою очередь, позволит выполнять на нем передовые эксперименты в различных областях науки. Станция «Микрофокус», используя сверхмалый эмиттанс пучка электронов и последние достижения рентгеновской оптики, позволит получать высокоинтенсивные пучки синхротронного излучения субмикронных размеров. И очевидно, что под разные виды экспериментов будет необходима своя уникальная рентгеновская оптика.

В данной работе было проведено исследование одной из рентгенооптических схем, предложенных проектировщиками станции. В данной схеме используется составная рентгеновская линза, расположенная примерно посередине между источником и объектом исследований, а также двухзеркальный и двухкристальный монохроматоры. Для моделирования использовались такие программные пакеты как OASYS (OrAnge Synchrotron Suite) [1] и XRT (XRaYTracer) [2], использующие методы трассировки лучей. Также было проведено моделирование распределения температур для некоторых элементов рентгенооптической схемы.

В результате расчетов были получены характеристики пучка в точке расположения образца. Получены распределения поглощенной мощности излучения на рентгенооптических элементах

и интегральные величины поглощенной мощности этими элементами.

Исследовательская часть работы выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ” ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

[1] Luca Rebuffi, Xianbo Shi and Manuel Sanchez del Rio, Advanced optical simulation tools in the OASYS suite and their applications to the design of last generation synchrotron radiation beamlines, DOI: 10.1088/1742-6596/2380/1/012065;

[2] Konstantin Klementiev, Roman Chernikov, Powerful scriptable ray tracing package XRT, DOI: 10.1117/12.2061400.

164

Широкополосные и селективные матричные микроболометрические приемники постоянного и импульсного терагерцового излучения

Authors: Михаил Демьяненко¹; Игорь Марчишин¹; Дмитрий Щеглов¹

¹ ИФП СО РАН

Corresponding Author: demyanenko@isp.nsc.ru

В работе рассматриваются особенности микроболометрических приемников традиционного и инвертированного типа, а также болометров антенного типа с резистивной связью применительно к регистрации постоянного и импульсного терагерцового (ТГц) излучения.

Применение в болометрах традиционного типа дополнительного резонатора, расположенного между поглотителем, нанесенным на мембрану болометра, и кремниевым окном, снабженным просветляющим покрытием значительно повышает коэффициент поглощения ТГц излучения и делает приемник селективным.

Болометр инвертированного типа в ТГц области обладает примерно вдвое большим поглощением излучения и является широкополосным. Его чувствительность остается практически постоянной для длин волн от 10 до 1000 мкм.

Болометры антенного типа с резистивной связью вследствие повышенной теплопроводности обладают пониженной чувствительностью к постоянному излучению, однако имеют высокую чувствительность к импульсному излучению и обладают высоким быстродействием.

Обычно используемые поглотители ТГц излучения, не обладающие частотной дисперсией проводимости, примерно вдвое понижают коэффициент поглощения инфракрасного излучения. Ранее нами было показано, что применение поглотителей, обладающих частотной дисперсией проводимости, позволяет устранить этот недостаток и достичь практически полного поглощения инфракрасного излучения при сохранении повышенной чувствительности в терагерцовом диапазоне.

Разработанные в ИФП СО РАН матричные микроболометрические приемники на длине волны 100 мкм обладают минимальной обнаружимой мощностью излучения 1,4 нВт и минимальной обнаружимой энергией импульса излучения 25 пДж.

Работа выполнена в рамках ГК 20411.1950192501.11.003 от 29.12.20 (код 17705596339200009540)

165

Исследования с использованием синхротронного излучения в Новосибирском центре синхротронного и терагерцового излучения.

Authors: Konstantin Zolotarev¹; Ivan Rubtsov²; Anton Nikolenko³; Konstantin Kuper^{None}; Pavel Piminov⁴; Gen-nady Kulipanov⁵; Konstantin Ten⁶; Boris Tolochko⁷; Eugeny Levichev⁸; Vladimir Kriventsov⁹; Alexander Shmakov^{None}; Vladimir Nazmov¹⁰; Aleksandr Legkodymov¹¹; Fedor Darin¹²; Marat Sharafutdinov¹³

¹ Budker Institute of Nuclear Physics

² *Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS*

³ *Budker INP SB RAS, SRF "SKIF"*

⁴ *BINP SB RAS*

⁵ *Director of SSTRC*

⁶ *Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

⁷ *Institute of solid state chemistry and mechanochemistry*

⁸ *BINP*

⁹ *Boreskov Institute of Catalysis of SB RAS*

¹⁰ *BUDker Institute of Nuclear Physics*

¹¹ *Budker Institute of Nuclear Physics*

¹² *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.*

¹³ *ISSCM SB RAS, BINP SB RAS*

Corresponding Author: zolotarev@inp.nsk.su

Центр коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) предоставляет пользователям из различных организаций возможности использования современных аналитических методик с использованием синхротронного излучения (СИ) для проведения широкого класса исследовательских работ.

На базе Центра организовано развитое пользовательское сообщество, объединяющее в себе исследователей из институтов СО РАН и других исследовательских организаций.

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 существующего состояния дел по выше обозначенным темам.

166

Применение методики малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением для исследования алюминизированных взрывчатых составов

Authors: Ivan Rubtsov¹; Alexey Kashkarov²; Eduard Prueel²; Alexey Studennikov³; Konstantin Ten²; Vyacheslav Khalemenchuk^{None}; Evgeniya Blinova⁴; Aleksandr Kurepin⁴; Alena Ryazantseva⁴

¹ *Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS*

² *Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

³ *Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

⁴ *АО «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева»*

Corresponding Author: rubtsov@hydro.nsc.ru

Среди применяемых импульсных рентгеновских методов изучения детонационных и ударно-волновых явлений наиболее интенсивно развиваются методы, основанные на использовании синхротронного излучения (СИ) ускорителей высоких энергий. Их преимущество перед другими методами заключается в малом времени экспозиции (менее 1 нс) и хорошей повторяемости импульсов излучения.

Работа посвящена совершенствованию методики малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением и ее применения для исследования реагирования алюминия в процессе детонации взрывчатых составов.

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Авторы (ЦКП «СКИФ») благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую

поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042).

167

Мировые тренды использования микропучков СИ в геолого-геохимических исследованиях.

Authors: Федор Дарьин¹; Андрей Дарьин²; Марат Шарафутдинов¹

¹ ЦКП СКИФ

² ИГМ СО РАН

Corresponding Author: fdaryin@gmail.com

На примере мировых центров СИ рассмотрены актуальные геолого-геохимические и экологические задачи, для решения которых применяются станции с микронными и субмикронными пучками. Основной метод исследований элементного состава образцов - микрорентгенофлуоресценция (SR- μ XRF). Реализация SR- μ XRF в режиме 2D сканирования (элементное картирование) с микронным и субмикронным пространственным разрешением дает новые возможности в исследовании рудных систем, геологоразведке и т.д. Картирование золотосодержащих образцов месторождения Timmins gold camp в Канаде с разрешением 20 мкм оказалось очень эффективно для быстрой идентификации и характеристики ассоциаций микроэлементов с золотом, даже в образцах с низким содержанием золота [1]. Использование рентгеновской абсорбционной микро спектроскопии (μ XAS) для исследования *in situ* биовыщелачивания золота и серебра из порфириновых и эпитермальных систем с использованием железooksисляющих бактерий, позволило определить механизмы происходящих процессов и оптимизировать извлечение благородных металлов [2]. Исследование механизма включения Ge в сфалерит, синтезированный в гидротермальных условиях, аналогичных условиям осадочных месторождений Zn-Pb дало возможность разработки технологии извлечения германия как побочного продукта добычи других сырьевых товаров [3] Для исследования структурно-текстурных характеристик минерального сырья активно используются методы микро томографии (SR- μ CT) с субмикронным разрешением в 2D и 3D [4]

Планируемые характеристики размеров пучка СИ на станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП СКИФ составляют величину в интервале 0,2 – 10 мкм в широком диапазоне энергий (10-30 кэВ), что позволит решать актуальные задачи исследования состава и структуры природных и технологических образцов на мировом уровне.

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

1. Jessica M. Stromberg et. Al. // Applications of synchrotron X-ray techniques to orogenic gold studies; examples from the Timmins gold camp// Ore Geology Reviews Volume 104, January 2019, Pages 589-602
2. Loredana Brinza et al.// Geochemical investigations of noble metal-bearing ores: Synchrotron-based micro-analyses and microcosm bioleaching studies //Chemosphere Volume 270, May 2021, 129388
3. Weihua Liu et al // Germanium speciation in experimental and natural sphalerite: Implications for critical metal enrichment in hydrothermal Zn-Pb ores //Geochimica et Cosmochimica Acta Volume 342, 1 February 2023, Pages 198-214
4. A.-J. Soini et al// Investigation of the porosity of L/LL4 ordinary chondrite Bjurböle using synchrotron radiation microtomography and scanning electron microscopy: Implications for parent body evolution //Physics of the Earth and Planetary Interiors Volume 343, October 2023, 107087

168

Бериллиевая преломляющая оптика для ЦКП "СКИФ"

Authors: Ivan Lyatun¹; Игорь Панормов²; Александр Баранников²; Aleksandr Korotkov³; Дмитрий Зверев²; Анатолий Снигирев²

¹ X-Ray Coherent Optics Laboratory (IKBFU)

² БФУ им. И. Канта

³ Immanuel Kant Baltic Federal University

Corresponding Author: ivanlyatun@gmail.com

В ближайшее время планируется ввод в эксплуатацию источника синхротронного излучения 4+ поколения с энергией 3 ГэВ - ЦКП "СКИФ". Главной отличительной характеристикой источников синхротронного излучения 4-го поколения является - высокая степень пространственной когерентности излучения и высокая яркость. Новое поколение синхротронных источников используют преломляющую рентгеновскую оптику как базовую для решения задач по управлению пучками жесткого рентгеновского излучения при проектировании синхротронов [1], [2]. В МНИЦ "РО" БФУ им. И. Канта разработана технология изготовления бериллиевой преломляющей оптики для использования в широком диапазоне энергий в различных рентгено-оптических схемах [3]. Станции первой очереди: 1-1 «Микрофокус», 1-2 «Структурная диагностика» и 1-3 «Быстропротекающие процессы» синхротрона "СКИФ" будут оснащены комплектами бериллиевых линз с возможностью линейной и двумерной фокусировки и коллимации излучения. Задачи транспорта рентгеновского излучения с высокой тепловой и радиационной нагрузкой будут выполнены с помощью специальной оптики с рабочей апертурой более 1 мм по вертикали и более 10 мм по горизонтали. Задача фокусировки излучения с высоким пространственным разрешением будет выполнена с использованием короткофокусных линз с радиусом кривизны $R = 50$ мкм с минимизированным поглощением. В работе представлены результаты исследования, тестирования и оценок оптических характеристик бериллиевой оптики.

Список литературы

1. Snigirev A., Snigireva I., Lengeler B., Kohn V. // Nature. 1996. V. 384. № 6604. P. 49–49.
2. Roth T., Alianelli L., Lengeler D., Snigirev A., Seiboth F. // MRS Bulletin. 2017. V. 42. №. 6. P. 430–436.
3. Narikovich A., Lyatun I., Zverev D., Panormov I. et. al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. № 6. P. 1258-66.

169

Высокоразрешающая микрооптика для рентгеновской микроскопии

Authors: Ivan Lyatun¹; Aleksandr Korotkov²; Sergey Shevyrtalov²; Svetlana Lyatun³; Anatoly Snigirev²

¹ X-Ray Coherent Optics Laboratory (IKBFU)

² Immanuel Kant Baltic Federal University

³ IKBFU

Corresponding Author: ivanlyatun@gmail.com

В работе показана возможность изготовления компактных рентгеновских микрообъективов с предельным разрешением менее 100 нм. Малые габариты микрообъектива вдоль оптической оси, достигаются благодаря использованию системы ионно-лучевой литографии на базе FIB-SEM систем, позволяющей изготавливать микролинзы с радиусом кривизны $R < 5$ мкм из любых кристаллических и аморфных материалов. Малые радиусы кривизны позволяют получать короткие рабочие фокусные расстояния — менее 25 мм для алмаза при энергии излучения 12 кэВ и реализовывать ультракомпактные высокоразрешающие оптические схемы, общей длиной до 1 м с оптическим увеличением более 40X. Новое поколение микрооптики является перспективным направлением развития методов высокоразрешающей когерентной рентгеновской визуализации и микроскопии на современных дифракционно-ограниченных синхротронных источниках для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований.

Работа была выполнена благодаря финансовой поддержке гранта Российского научного фонда No 23-22-00422, <https://rscf.ru/project/23-22-00422/>.

170

Пример, демонстрирующий возможности алгоритма, реализующего способ фундаментальных параметров на основе комбинации аппроксимирующих выражений и набора точных и приближенных значений характеристик

Authors: Dmitry Sorokoletov¹; Iakov Rakshun²; Fedor Darin³

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.*

Corresponding Author: d.s.srkv@yandex.ru

Применение способа фундаментальных параметров (СФП) является составной частью для ряда абсолютных количественных методик в рамках РФА и микро-РФА. Последние представляют собой два неразрушающих рентгеноспектральных метода, позволяющие проводить исследование элементного состава внутренних участков образцов различной природы с пространственным разрешением от сотых долей микрометров до единиц миллиметров. Исследования показывают, что при применении СФП к анализу образцов в наиболее благоприятных случаях (при анализе участков условно однородных образцов или объектов с хорошо известными характеристиками) типичная точность определения для относительных массовых концентраций элементов с содержанием не менее нескольких десятых долей процента может составлять от единиц до десяти-пятнадцати (в некоторых случаях, до двадцати-тридцати) процентов [1-5]. Можно предположить, что в отдельных случаях это значение приближается к пределам, обусловленным собственными ошибками спектрометрического подхода, основанного на использовании СФП, и ограничивается, по большей степени, именно ими (которые, часто оставаясь в пределах младших единиц процентов, все же имеют тенденцию носить сложный систематический характер) [6]. Следует отметить, что в рамках реализаций подобных алгоритмов необходимо использовать библиотеки спектрометрических характеристик для химических элементов типа «henke x-ray optical library» [7], «xraylib» [8] и др.

Нами была реализована процедура СФП, которая не нуждается в обязательном применении подобных детализированных библиотек данных. Она основана на использовании приближенных значений и аппроксимирующих выражений (там, где это допустимо) [9, с. 158-160, 275; 10, с. 14] и, на наш взгляд, потенциально способна обеспечить точность всего лишь в 2-2.5 раз хуже, чем достижимо в вышеуказанных альтернативных алгоритмах (поскольку основной вклад в итоговую погрешность обеспечивает ошибка определения коэффициентов фотоэлектрического поглощения, которая в данном случае хуже примерно в 2 раза [9, с. 160]). Результаты применения разработанной процедуры к спектрам, полученным в результате рентгенофлуоресцентного анализа трёх образцов-таблеток, подготовленных из исходных навесок веществ со стандартизированным химическим составом и высокой степенью однородности, приведены в настоящей работе. В них подтверждается ранее предположенная [11, с. 54] точность описания используемой моделью СПФ экспериментально полученных рентгеноспектральных данных (на примере конкретной серии из трёх спектров), которая в рассмотренном случае получилась не хуже 20 % для большинства химических элементов.

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

[1] I. Mantouvalou, W. Malzer, I. Schaumann, L. Lühl, R. Dargel, C. Vogt, and B. Kanngießner. Reconstruction of Thickness and Composition of Stratified Materials by Means of 3D Micro X-ray Fluorescence Spectroscopy. *Anal. Chem.*, 80(3):819–826, 2008

- [2] I. Mantouvalou. Quantitative 3D micro X-ray fluorescence spectroscopy (PhD, Berlin 2009).
- [3] Timo Wolff et. al. A new fundamental parameter based calibration procedure for micro X-ray fluorescence spectrometers. // *Spectrochimica Acta Part B* 66 (2011) 170-178
- [4] Hans. A. van Sprang. Fundamental parameter method in XRF Spectrometry. // JCPDS-International Centre for Diffraction Data 2000, *Advances in X-ray Analytic*, Vol. 42
- [5] In situ applications of X ray fluorescence techniques. Final report of a coordinated research project 2000–2003. IAEA, Vienna, 2005 IAEA-Tecd-1456. ISBN 92–0–107105–1. ISSN 1011–4289.
- [6] M. Mantler And N. Kawahara. How Accurate Are Modern Fundamental Parameter Methods? *The Rigaku Journal*. Vol. 21 / No. 2 / 2004, 17–25
- [7] <https://henke.lbl.gov>
- [8] T. Schoonjans, A. Brunetti, B. Golosio, M. Sanchez del Rio et al. The xraylib library for X-ray matter interactions. Recent developments. *Spectrochimica Acta Part B* 66 (2011) 776-784. doi:10.1016/j.sab.2011.09.011
- [9] Блохин, М. А. Физика рентгеновских лучей / М. А. Блохин. – Москва: государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1967.
- [10] Лосев, Н. Ф. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа / Н. Ф. Лосев, А. Н. Смагунова. – Москва: Химия, 1982. – 208 с
- [11] D. Sorokoletov, Ya. V. Rakshun, F. A. Daryin. Some Problems In A Proposed Preliminary Procedure For The Calibration Of Sample's Simulation Model Under The Realization Of A Quantitative Micro-Xrf Technique Based On The Fundamental Parameters Means. // *Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (SFR-2022)*. Book of abstracts.

171

Рентгеноспектральные исследования натрий-ионных аккумуляторов на основе дисульфида молибдена

Author: Анастасия Федоренко¹

Co-authors: А.А. Загузина¹; Г.И. Семушкина¹; А.Д. Николенко²; В.В. Кривенцов³; С.В. Трубина¹; А.В. Окопруг¹; Л.Г. Булушева¹

¹ ИИХ СО РАН

² Budker INP SB RAS, SRF "SKIF"

³ Boreskov Institute of Catalysis of SB RAS

Corresponding Author: fedorenko@niic.nsc.ru

В данной работе рассматриваются перспективы использования двумерных наноматериалов на основе MoS₂ для создания натрий-ионных аккумуляторов (НИА). Слоистая структура дисульфида молибдена обеспечивает высокую емкость. Внедрение допирующих примесей может повысить как емкость, так и мощность устройства. Использование графита позволяет значительно увеличить стабильность при циклировании НИА.

Для исследования взаимодействия функциональных материалов с натрием при разрядке и зарядке батарейки были синтезированы и охарактеризованы наноматериалы на основе MoS₂. Увеличение температуры термолиза тетраиомолибдата аммония приводит к увеличению кристалличности образцов, что повышает стабильность работы ячейки. Модификация характеристик материала осуществлялась замещением атомов молибдена на атомы никеля и кобальта. При встраивании гетероатома происходит повышение электропроводности и диффузии Na в ячейке. Использование оксида графита во время термолиза приводит к стабильной работе образцов без уменьшения ёмкости ячейки.

С использованием коммерчески доступного корпуса батарейки CR2032 разработана ячейка, позволяющая измерять рентгеновские спектры поглощения (XANES) и рентгеновские эмиссионные спектры (РЭС). Для материалов на основе дисульфида молибдена MoS₂, допированного никелем, и гибридного материала MoS₂/графен был проведен анализ особенностей электронной и локальной структуры. Выполненные исследования показали возможность внедрения Ni и Co в решетку MoS₂ при быстром термолизе соединений без формирования металлических кластеров Ni или Co. Сравнение XANES спектров S K-края показало наличие пред-краевого пика при 2465 эВ для образцов, допированных никелем и кобальтом. Появление данного пика может быть связано с проявлением примесных уровней вблизи дна зоны проводимости.

Измерения спектров при разрядке ячейки с 2.5 В до 0.7 В показали понижение интенсивности и сдвиг линий спектров S K-края. Это указывает на изменение электронной структуры MoS₂ при взаимодействии с ионами Na. РЭС S K α спектры измерены для заряженной ячейки. При 0.1 В наблюдалось падение интенсивности Mo L₃-края. Данные изменения связаны с переносом электронной плотности с натрия на MoS₂ при электрохимической интеркаляции. При этом не происходит значительного изменения зарядового состояния и симметрии окружения для большей части никеля по данным, полученным из анализа XANES спектров Ni-края для заряженной (2.50 В) и разряженной батарейки (0.01 В).

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант 23-73-00048.

172

Высокоэффективные квазиоптические селективные элементы и устройства ТГц диапазона на основе метаструктур

Authors: Сергей Кузнецов¹; Александр Гельфанд²; Павел Лазорский³; Виктор Федоринин²; Назар Николаев⁴; Алина Рыбак⁴; Александр Генцелев¹

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

² *Филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ», Новосибирск*

³ *Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

⁴ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

Corresponding Author: sakuznetsov@nsu.ru

Технологическое освоение области субтерагерцовых и терагерцовых частот электромагнитного спектра относится к приоритетным задачам развития фотоники в Российской Федерации. Для ТГц экспериментов большую актуальность представляют оптические элементы и устройства, обеспечивающие нужное управление характеристиками ТГц излучения, включая спектрально-селективную амплитудную фильтрацию, поляризационную дискриминацию, преобразование фазы, трансформацию волнового фронта, модуляцию, детектирование.

В большинстве случаев указанные задачи могут быть наиболее эффективно решены за счёт использования планарных однослойных и многослойных метало-диэлектрических микроструктур субволновой топологии с латеральным размером составляющих их периодических ячеек меньше или много меньше характерной рабочей длины волны. Электромагнитный отклик подобных метаструктур определяется дизайном их элементарных ячеек, оптимальный выбор которого позволяет реализовывать квазиоптические селективные элементы и устройства с уникальными ТГц характеристиками.

В настоящем докладе представлен обзор результатов по отработке высокоэффективных инструментальных решений в области пассивных и активных терагерцовых устройств на основе метаструктур, работающих в диапазоне 0,1-5 ТГц. Рассмотрены квазиоптические фильтры различных типов (полосовые, фильтры низких частот, фильтры высоких частот), высококонтрастные широкополосные поляризаторы, волновые пластинки, голографические фокусаторы, резонансные поглотители и селективные тепловые детекторы на их основе, сенсоры сверхтонких слоёв вещества, а также электрически управляемые пространственные модуляторы. Описаны ключевые технологии изготовления метаструктур, включая фотолитографию на гибких полимерных подложках, гальванопластику, глубокую рентгеновскую литографию и микроструктурирование фемтосекундными лазерными импульсами. Обсуждаются вопросы электродинамической оптимизации, спектральной характеристики и практического применения разработанных устройств.

Представленные решения отличаются выдающимися экспериментальными характеристиками, опережающими конкурирующие устройства, доступные на рынке ТГц технологий.

173

Технологии и применения силовой терагерцовой дифракционной оптики

Authors: Vladimir Pavelyev¹; Василий Герасимов²; Наталья Осинцева³; Константин Тукмаков⁴; Андрей Агафонов⁴; Виктор Сойфер⁴; Борис Князев^{None}; Юлия Чопорова³; Максим Комленок⁵; Виталий Конов⁵; Геннадий Кулипанов^{None}; Николай Винокуров^{None}

¹ Samara State Aerospace University

² Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

³ ИЯФ СО РАН

⁴ Самарский университет

⁵ ИОФ РАН

Corresponding Author: pavelyev10@mail.ru

Появление новых источников излучения терагерцового (ТГц) диапазона, в том числе мощных, таких как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и гиротроны, требует развития и совершенствования соответствующей элементной базы для управления характеристиками такого излучения. Методы дифракционной оптики, хорошо зарекомендовавшие себя ранее в задачах управления излучением оптического диапазона, представляются весьма перспективными для решения этой задачи. На основе анализа результатов расчетов и экспериментов, поставленных в оптическом диапазоне длин волн, ранее было показано, что использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) позволяет формировать пучки с заданным поперечно-модовым составом, фокусировать излучение когерентного источника в заданную область и управлять поляризационным состоянием пучка. В настоящей работе приведены результаты изготовления и исследования элементов кремниевой и алмазной оптики терагерцового диапазона, предназначенных для управления характеристиками мощных пучков терагерцового лазера.

174

Синхротронная времяразрешающая методика регистрации лазерно-индуцированных деформаций, и ее реализация для наблюдения пьезофотовольтаического эффекта в ниобате лития

Authors: Fedor Pilyak¹; Evgeniy Mareev¹; Anton Kulikov¹; Nika Asharchuk¹; Nikolai Obydenov¹; Eduard Ibragimov¹; Yury Pisarevsky¹; Nikita Marchenkov¹; Alexandr Blagov¹; Fedor Potemkin²; Mikhail Kovalchuk¹

¹ National Research Centre "Kurchatov Institute"

² Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty

Corresponding Author: fpilyak@yandex.ru

Разработана времяразрешающая рентгенодифракционная методика исследования динамики обратимых лазерноиндуцированных деформационных процессов, реализуемая в экспериментальной схеме «лазерная накачка – рентгеновское зондирование» на источнике синхротронного излучения. Синхронизация наносекундного лазера и детектирующего оборудования с периодом обращения электронных банчей накопительного кольца с помощью реконфигурируемой программной платформы с использованием ПЛИС позволила с высокой точностью менять временную задержку между лазерным и рентгеновским импульсами, за счет чего достижимое временное разрешение методики составило ~100 пс.

Апробация методики была реализована на станции РКФМ источника КИСИ-Курчатов. Была зарегистрирована динамика кривой дифракционного отражения (КДО) монокристалла LiNbO₃:Fe рефлекса 0012 при воздействии наносекундного лазерного импульса (4 нс, энергия до 20 мДж, $\lambda = 532$ нм) с временным разрешением 1 нс. Локализация области возбуждения фотоиндуцированного процесса и сбора данных осуществлялась за счет фокусировки лазерного пучка и его совмещения

с рентгеновским пучком. Отклик кристалла на воздействие происходил в течение ~35 нс после лазерного импульса и проявлялся в смещении дифракционного пика (деформации кристаллической решетки) и существенном падении интегральной интенсивности. По истечении указанного промежутка времени параметры КДО возвращались к исходным значениям. Анализ зарегистрированной динамики позволил определить, что наблюдаемые процессы возникают вследствие формирования и последующего спада электрического поля в рамках механизма объемного фотовольтаического эффекта. Так, деформация решетки обусловлена пьезофотовольтаическим эффектом, а падение интегральной интенсивности – возникновением и распространением в объеме кристалла акустической волны с широким спектром колебаний, что дополнительно подтверждается результатами Вейвлет-анализа.

Таким образом, впервые в России разработана и апробирована времяразрешающая методика исследования обратимых фотоиндуцированных процессов в экспериментальной схеме «оптическая накачка – рентгеновское зондирование» на источнике синхротронного излучения. Это эффективный экспериментальный инструмент, который может применяться на синхротронных экспериментальных станциях для проведения исследований мирового уровня и контроля особенностей преобразования и аккумуляции энергии в фоточувствительных материалах. Получаемые в рамках применения методики данные могут быть дополнены за счет использования комплементарных экспериментальных методов и дополнительных методов анализа, в частности Фурье и Вейвлет-анализа, что существенно упрощает последующую интерпретацию результатов эксперимента. Настоящая методика может представлять большой интерес для научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий, специализирующихся на разработке отечественных энергоэффективных компонентов микроэлектроники.

Разработка времяразрешающей рентгенодифракционной методики и ее апробация на источнике синхротронного излучения выполнены в рамках гранта РФФИ № 23-73-00039.

175

Определение средних размеров вирусных частиц SARS-CoV-2 с использованием метода малоуглового рентгеновского рассеяния для создания селективных SERS-субстратов.

Author: Артем Табаров¹

Co-authors: Данила Крылов¹; Ольга Андреева¹; Евгений Попов¹; Дарья Даниленко²; Владимир Виткин¹

¹ Университет ИТМО

² НИИ Гиппа им. Смородиной

Corresponding Author: a_t_tabarov@itmo.ru

Short Abstract: SERS - это новый альтернативный метод диагностики вирусных заболеваний. Точное определение размеров вирусных частиц имеет важное значение для создания селективных SERS-субстратов. В данном исследовании использовалось малоугловое рентгеновское рассеяние для оценки размера инактивированных частиц SARS-CoV-2, который составил 112 ± 5 нм, что может помочь в разработке эффективных методов диагностики методом SERS

Technical Abstract: Классические методы диагностики вирусных заболеваний, такие как ПЦР-тесты, доказали свою неэффективность в условиях широкого распространения инфекции из-за высокого процента ложно-отрицательных результатов и значительного времени диагностики. В настоящее время ведутся исследования по новым методам диагностики вирусных заболеваний, одним из самых перспективных направлений является поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS). Диагностика методом SERS использует субстраты с металлическими наночастицами, которые локально усиливают сигнал рамановского рассеяния за счет плазмонного резонанса. Для создания селективного SERS-подложки важно знать размеры вирусных частиц, которые не могут быть полностью охарактеризованы с помощью электронной микроскопии (ЭМ). В данном исследовании было использовано малоугловое рентгеновское рассеяние (SAXS) для изучения суспензии, содержащей инактивированные вирусные частицы, что позволило оценить их размер и другие параметры. В исследовании использовался генетический штамм

коронавируса CL.1, штамм hCoV-19/Russia/PER-RII-MH117274/2022. Вирусные частицы предварительно инактивировали формалином. Эксперимент проводился на станции "БиоМУР" "КИСИ-Курчатов" с использованием синхротронного излучения ускорителя "Сибирь-2". Регистрация рассеянного рентгеновского излучения выполнялась с использованием двухкоординатного детектора DECTRIS Pilatus3 1M. Полученные кривые SAXS анализировались с помощью инструмента "Распределение расстояний" (PRIMUS) в моносферном режиме. В результате проведенного исследования был определен средний или наиболее вероятный размер (диаметр) вирусной частицы SARS-CoV-2 в размере 112 ± 5 нм. Эти результаты вносят вклад в будущее развитие селективных SERS-подложек с высокими коэффициентами усиления, тем самым повышая эффективность методов диагностики SARS-CoV-2.

176

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ 1-1 «МИКРОФОКУС» ЦКП «СКИФ»

Authors: Marat Sharafutdinov¹; Andrey Darin²; Fedor Darin³; Sergey Rashchenko²; Iakov Rakshun⁴; Vladimir Chernov⁴; Nikolay Chkhalo⁵; Igor Dolbnya⁶; Yuri Khomyakov⁴; Ilya Malyshev⁷; Aleksey Gogolev⁸; Maksim Gorbachev⁹

¹ ЦКП "СКИФ"

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Synchrotron radiation facility SKIF Boreskov Institute of Catalysis.

⁴ BINP

⁵ Institute for Physics of Microstructures RAS

⁶ Diamond Light Source

⁷ Институт физики микроструктур, Нижний Новгород, Россия

⁸ Tomsk Polytechnic University

⁹ NGTU

Corresponding Author: rakshun@inp.nsk.su

В настоящее время в Новосибирской области создается источник синхротронного излучения 4-го поколения ЦКП «СКИФ» и шесть экспериментальных станций первой очереди. Одной из них является станция 1-1 «Микрофокус». Она ориентирована на решение различных материаловедческих и геологических задач методами рентгеновской дифрактометрии для исследования образцов, находящихся под воздействием высоких давлений и температур, а также рентгенофлуоресцентного элементного анализа на основе конфокальной рентгеновской микроскопии, реализуемой в режиме сканирующего, растрового микро- нанозонда с субмикронным пространственным разрешением с возможностью спектроскопии (XANES).

Станция оптимизирована для работы как со спектрально широкими ($\Delta E/E$ порядка 10-2), так и узкими ($\Delta E/E$ порядка 10-4) пучками СИ микронных и субмикронных размеров - от 0,1 до 10 мкм (по вертикали) - в диапазоне энергий 10–31 кэВ. Спектральная ширина определяется используемым набором многослойных стрипов двухзеркального монохроматора и введением/выведением двухкристального монохроматора на основе кристаллов Si (111). Фокусировка осуществляется набором оптики финального фокуса: зеркалами Киркпатрика-Байеса полного внешнего отражения и бериллиевыми преломляющими линзами. Рассмотрена возможность формирования промежуточного фокуса при помощи охлаждаемого трансфолятора, расположенного до стены биозащиты для дальнейшего развития и применения методов птихографии.

Следует отметить, что оптическая схема станции претерпела значительные изменения по сравнению с концептуальным дизайном [1]. В частности, в текущем варианте отсутствуют боковые каналы, в которые пучки отводились алмазными расщепителями. Кроме того, ввиду высокой мощности пучка излучения из сверхпроводящего ондулятора, за основу была принята концепция работы двухзеркального и двухкристального монохроматоров, изложенная в [2]. Исследовательская часть работы выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП "СКИФ" ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

Литература:

1. Ращенко С.В., Дарьин А.В., Ракшун Я.В. // Концептуальный дизайн станции «Микрофокус»

источника синхротронного излучения «СКИФ» // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 2. С. 228-232.

2. A concept of “Materials” diffraction and imaging beamline for SKIF: Siberian Circular Photon Source // Vladimir A. Chernov, Ivan A. Bataev et al // Rev. Sci. Instrum. 94, 013305 (2023).

177

Дифракционные исследования функциональных и конструкционных материалов в СЦСТИ

Author: Александр Шмаков¹

Co-authors: Захар Винокуров²; Александр Селютин¹; Денис Мищенко¹; Владимир Денисов³; Константин Купер¹; Александр Легкодымов¹

¹ Центр коллективного пользования “Сибирский Кольцевой Источник Фотонов” (ЦКП СКИФ)

² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

³ Институт сильноточной электроники СО РАН

В докладе представлены результаты исследований структуры и фазового состава функциональных и конструкционных материалов методами рентгеновской дифракции, выполненных на станциях СИ «Прецизионная Дифрактометрия II» источника СИ ВЭПП-3 и «Жесткая рентгеноскопия» источника СИ ВЭПП-4М.

Станция «Прецизионная Дифрактометрия II» 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 подвижности кислорода и фазовой стабильности никелатов лантана в рабочих условиях катодов среднетемпературных твердооксидных топливных элементов, фазовой стабильности лазерных сварных швов сплавов на основе алюминия, поведения при высоких температурах покрытий различного состава, наносимых методами пучково-плазменной инженерии на поверхности материалов. 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.

Станция «Жесткая Рентгеноскопия» использует излучение в диапазоне энергий 30-110 кэВ. Высокая проникающая способность жесткого излучения делает его удобным для исследования структуры объектов, находящихся в ограниченных объемах при высоких давлениях. Кроме того, короткая длина волны излучения позволяет в небольшом интервале углов дифракции получать экспериментальные данные в широком диапазоне векторов рассеяния и применять для анализа структуры слабоорганизованных и аморфных материалов метод функций радиального распределения электронной плотности. На станции были проведены исследования структуры носителей и катализаторов, углеродных материалов, а также фазовых превращений в катализаторах в условиях сверхкритической среды.

178

Реконструированная станция “Аномальное Рассеяние” в бункере СИ ВЭПП-3

Author: Александр Шмаков¹

Co-authors: Семен Папко²; Борис Гольденберг³

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

² Новосибирский государственный технический университет

³ Центр коллективного пользования “Сибирский Кольцевой Источник Фотонов” (ЦКП СКИФ)

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 модернизированном варианте станция включает первичный коллиматор с функцией монитора положения входного пучка СИ, автоматизированную систему горизонтальных и вертикальных щелей для формирования пучка СИ, монохроматор типа channel-cut со сменными кристаллами Si(111) и Si(311), систему позиционирования образца с возможностью линейных перемещений и поворота вокруг нормали к поверхности, трехканальную систему детектирования с тремя кристаллами-анализаторами и тремя детекторами, установленную на прецизионном гониометре Microcontrol RT660 с шагом по углу 0.001°. Обновленный вариант системы управления обеспечивает контроль двигателей и детекторов в произвольном сочетании.

В докладе представлено описание обновленной станции и приведены улучшенные технические данные.

179

Запланированные возможности ЦКП «СКИФ» для кристаллизации биополимеров и их структурных исследований

Authors: Сергей Архипов¹; Борис Гольденберг²; Захар Винокуров³; Ян Зубавичус⁴

¹ *Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk State University*

² *Институт ядерной физики СО РАН*

³ *Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

⁴ *ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

Corresponding Author: arksergey@gmail.com

Определение пространственной структуры макромолекулярных соединений является ключевым элементом для решения широкого круга научных и прикладных задач. Среди них наиболее важными являются: определение механизмов протекания биохимических процессов, разработка новых лекарств, а также создание белков и ферментов с желаемыми функциями. На данный момент порядка 184 600 (или 84%) экспериментально определенных структур макромолекулярных соединений были получены методом рентгеноструктурного анализа, причем в более чем 80% случаев для сбора первичных данных использовалось синхротронное излучение.

Метод рентгеноструктурного анализа требует наличия монокристалла. Ряд мировых центров синхротронного излучения имеют собственные подразделения для работы с биополимерами в непосредственной близости от синхротрона. В проекте ЦКП «СКИФ» также предусмотрены помещения в лабораторном корпусе для работы с растворами биополимеров. В докладе будут представлены возможности запланированных помещений (размеры, температурный режим, влажность) и необходимого для кристаллизации биополимеров оборудования (хроматографическая очистка растворов белков, замена буферного раствора, оценка гомогенности раствора перед кристаллизацией, приготовление растворов осадителей, раскапывание, наблюдения за ростом кристаллов, их извлечение, хранение и транспортировки на станцию). Кроме того, будут рассмотрены существующие в Мире техники сбора первичных дифракционных данных с кристаллов биополимеров и экспериментальные возможности станции первой очереди 1-2 «Структурная диагностика» для их структурных исследований.

180

Экспериментальная станция «Серийная макромолекулярная кристаллография» на источнике синхротронного излучения 4-го поколения «СИЛА»

Authors: Vladimir Lazarenko¹; Павел Дороватовский²; Роман Светогоров²

¹ NRC "Kurchatov institute"

² НИЦ "Курчатовский институт"

Corresponding Author: vladimir.a.lazarenko@gmail.com

В настоящее время разрабатывается новая установка "СИЛА" (синхротрон-лазер), которая не будет иметь аналогов в мире и превзойдет по техническим характеристикам существующие международные источники синхротронного излучения. Ввод объекта в эксплуатацию запланирован на 2032 год.

На синхротроне «СИЛА» будут реализованы 12 экспериментальных станций «первой очереди» с возможностью расширения списка станций до более чем 40. Один из двенадцати каналов будет посвящен исследованиям в области кристаллографии макромолекул.

Рентгеновская кристаллография макромолекул, несмотря на бурное развитие методов электронной микроскопии, до сих пор остается основным методом получения трехмерной структуры макромолекул, возможности которого были расширены методом серийной кристаллографии [1]-[2]. Источник излучения был выбран ондулятор, который покрывает весь необходимый диапазон энергий для задач макромолекулярной кристаллографии. Будущая станция «серийной макромолекулярной кристаллографии» сможет работать в нескольких режимах. Благодаря трем трансфокаторам, схема фокусировки рентгеновского излучения сможет работать в «режиме розового пучка», в «режиме широкого пучка» и в «режиме микрофокусного пучка». Кроме того, благодаря планируемыми возможностям дифрактометра можно будет быстро сканировать кристаллизационные планшеты и «каптоновые сетки - mesh», а также собирать данные серийной кристаллографии с нескольких разных кристаллов (планируется реализация только методов «фиксированной мишени»).

Высокая яркость источника, оптическая схема станции и широкие возможности окружения образца сделают станцию «серийной макромолекулярной кристаллографии» флагманом на территории РФ для анализа кристаллов белков, вирусов и других макромолекулярных комплексов.

Ссылки на литературу:

[1] Ursby T. et al. MicroMAX—new opportunities in macromolecular crystallography //ACTA CRYSTALLOGRAPHICA A-FOUNDATION AND ADVANCES. – 2 ABBEY SQ, CHESTER, CH1 2HU, ENGLAND : INT UNION CRYSTALLOGRAPHY, 2021. – Т. 77. – С. C817-C817.

[2] Pearson A. R., Mehrabi P. Serial synchrotron crystallography for time-resolved structural biology //Current Opinion in Structural Biology. – 2020. – Т. 65. – С. 168-174.

181

ПРОСТАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛМАЗНОГО КРИСТАЛЛ-МОНОХРОМАТОРА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОМИКРОСКОПИИ.

Authors: Федор Дарьин¹; Яков Ракшун²; Дмитрий Сороколетов²; Владимир Чернов³; Игорь Долбня⁴; Юрий Хомяков²; Максим Горбачев⁵

¹ ЦКП СКИФ

² ИЯФ СО РАН

³ ИЯФ

⁴ Diamond Light Source, Oxfordshire, UK

⁵ Новосибирский государственный технический университет

Corresponding Author: fdaryin@gmail.com

В работе рассматривается оптическая схема для метода сканирующей конфокальной рентгеновской спектроскопии на ондуляторном канале источника СИ 4-го поколения.

Схема включает в себя три основных оптических элемента: двухзеркальный многослойный монохроматор, составную преломляющую линзу и кристалл-монохроматор.

Двухзеркальный монохроматор с фиксированным положением выходного пучка обеспечивает выделение «рабочей» гармоники ондулятора с относительным энергетическим разрешением 1%.

Длиннофокусная линза служит для фокусировки изображения ондуляторного источника непосредственно на исследуемый образец и располагается посередине между ондулятором и образцом. Окончательное формирование размеров рентгеновского пучка на образце обеспечивается прецизионными щелями.

В базовом варианте уже этих двух элементов достаточно для реализации сканирующей конфокальной микроскопии и получения распределения концентраций исследуемого элемента в образце с пространственным разрешением порядка 10 мкм.

Для определения химического состояния исследуемого элемента необходимо получение спектра его края поглощения с высоким энергетическим разрешением. С этой целью в схеме используется кристалл-монохроматор, установленный перед образцом.

Малоугловая расходимость, порядка 100 мкрад, ондуляторного пучка позволяет получить высокоэнергетическое разрешение монохроматора на уровне 10⁴ и выше. Малый поперечный размер, порядка 100 мкм, сфокусированного пучка в районе расположения кристалл-монохроматора, позволяет использовать кристаллы миллиметровых размеров, однако плотность мощности излучения, падающего на кристалл, достигает высоких значений, порядка 100 Вт на мм² и выше. Применение высококачественных монокристаллов алмаза с уникальными теплофизическими характеристиками позволяет решить эту проблему. Использование разрезных кристаллов, «бабочек», представляется оптимальным техническим решением.

Данная оптическая схема возможна только для источников 4-го поколения.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0042).

182

Использование жесткого рентгеновского (60-120 кэВ) синхротронного излучения накопительного кольца ВЭПП-4М для количественного анализа химических элементов методом РФА-СИ.

Author: Александр Легкодымов¹

Co-authors: Кирилл Лапшин²; Валентина Трунова³; Константин Купер¹; Константин Золотарёв²; Григорий Баранов²; Андрей Федотов⁴; Елена Крупович³; Анастасия Семёнова⁵

¹ ИЯФ СО РАН, ЦКП "СКИФ"

² ИЯФ СО РАН

³ ИНХ СО РАН

⁴ ЛИИ СО РАН

⁵ Научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"

Corresponding Author: a.a.legkodymov@inp.nsk.su

Анализ элементного состава образцов по их рентгенофлуоресцентным спектрам проводился на станции синхротронного излучения (СИ) с использованием излучения из 9-ти полюсного вигглера накопительного кольца ВЭПП-4М Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ). В докладе представлены основные фоновые факторы (комптоновское и двойное комптоновское рассеяние) ограничивающие пределы обнаружения химических элементов в энергодисперсионной схеме РФА-СИ при использовании жесткого монохроматического синхротронного излучения (60-120 кэВ). Рассмотрена аппаратура и методика анализа донных отложений методом сканирующей рентгенофлуоресцентной спектроскопии в контексте палеоклиматических реконструкций. Представлены экспериментальные данные по биоиндикации экологического

статуса ихтиофауны методом РФА-СИ. Также приводятся экспериментальные данные по количественному определению йода в биологических тканях привитых сингенных опухолей у модельных животных, подвергнувшихся лечению онколитическими вирусами, геном которого содержит вставку трансгена симпортера йодида натрия мыши (mNIS).

183

WavePropaGator (WPG): программное обеспечение для моделирования распространения волнового фронта на синхротронных источниках и лазерах на свободных электронах.

Author: Алексей Бузмаков¹

¹ Курчатовский комплекс "Кристаллография и фотоника" НИЦ КИ

Corresponding Author: buzmakov@gmail.com

Рентгеновский лазер на свободных электронах (РЛСЭ) - сложный научно-исследовательский комплекс. Для оптимизации параметров РЛСЭ необходимо проводить предварительное аккуратное моделирование всех процессов, включая расчёт распространения волнового фронта, генерируемого длинными ондуляторами РЛСЭ, распространение рентгеновского излучения через каналы РЛСЭ и его взаимодействие с оптическими элементами и исследуемыми образцами.

Мы разрабатываем новое программное обеспечение для расчёта и оптимизации параметров РЛСЭ. Новый пакет программного обеспечения WavePropaGator (WPG) является набором свободно распространяемых утилит, предназначенных для:

- расчёта параметров источника излучения, включая спонтанное и частично когерентное излучение SASE ондуляторов XFEL;
- расчёта распространения когерентного рентгеновского излучения через канал XFEL, в частности, после отражения от зеркал скользящего падения, дифракционных решеток, рентгеновских рефракционных линз и кристаллических монохроматоров;
- выбора параметров оптических элементов для экспериментальных станций, например, фокусирующих зеркал, зонных пластинок, апертур и т.д.

Разработанный программный пакет использовался, например, для оптимизации параметров оптических элементов для фокусировки SASE излучения XFEL.

В докладе будет описана структура WPG и приведены примеры применения WPG для визуализации волновых фронтов XFEL на разных участках бимлайнов и расчёт фазоконтрастных изображений в реальных синхротронных измерениях.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

184

Деформационное поведение метастабильной аустенитной стали 12X18H9T, исследуемое методом дифракции синхротронного рентгеновского излучения

Author: Igor Nasennik¹

¹ Novosibirsk State Technical University

Corresponding Author: nasennik.2017@corp.nstu.ru

Поиск и разработка новых материалов, обладающих комплексом уникальных физико-механических свойств, требует развития и/или совершенствования методов исследования, позволяющих прогнозировать изменения структуры и свойств материала изделия в процессе его эксплуатации. Одним из наиболее используемых в современной промышленности материалов, является коррозионностойкая сталь. Комплекс ее свойств позволяет использовать ее в качестве материала для работы в условиях агрессивной внешней среды, однако, исследования деформационного поведения данной стали, упускают структурные процессы, влияющие на физику пластической деформации.

В работе проводились исследования деформационного поведения метастабильной аустенитной стали 12X18H9T, отожженной при 1000°C в течение 1 часа и впоследствии, подвергнутой пластической деформации методом холодной прокатки (максимальная степень деформации составляла $\epsilon = 75\%$, шаг деформации составлял 15%). Полученные образцы, исследовались методом дифракции синхротронного рентгеновского излучения в режиме "на просвет" на источнике синхротронного рентгеновского излучения ВЭПП-3. Кроме того, проводились исследования механических свойств полученных образцов.

Используя полученные данные о структурном и фазовом состоянии метастабильной аустенитной стали, в работе проводились расчеты параметра кристаллической решетки, разориентации кристаллитов и главной кристаллографической оси для аустенита и мартенсита деформации. Кроме того, были проведены сравнения классического и модифицированного методов Вильямсона-Холла для расчета величины областей когерентного рассеяния и величины гомогенных напряжений, образующихся в материале в процессе деформации.

185

XAFS исследование генезиса модельной систем, на основе виннокислой меди (II), при воздействии высокоэнергетических электронов

Authors: Владимир Кривенцов¹; Михаил Михайленко²; Борис Толочко³

¹ ЦКП "СКИФ",

² ИХТТУМ

³ ИХТТУМ СО РАН

Corresponding Author: kriven@mail.ru

Выполнено комплексное XAFS исследование генезиса модельной системы, на основе виннокислой меди (II), при воздействии высокоэнергетических электронов. В качестве источника использовался импульсный ускоритель электронов с системами визуального наблюдения, температурного контроля и программирования работы по температурному графику. Съемка XAFS спектров для исследованных образцов проведена вблизи К-края поглощения меди Cu (8979 эВ) 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. В качестве монохроматора использовали разрезной моноблочный кристалл-монохроматор Si(111). Шаг при измерении составлял ~0.5-1.5 эВ. Обработку XAFS-спектров проводили с помощью программного комплекса VIPER и XANDA. Показано, что полученные кривые PPA (RDFs) для исследованных образцов имеют значительные отличия в зависимости от предыстории. Установлены длины межатомных связей и соответствующие координационные числа. Дополнительно проведено исследование методами ЭПР и ИК. Полученные различными методами результаты хорошо согласуются между собой. Подробно рассмотрены возможные варианты структурных моделей. Благодарности: Кривенцов В.В. благодарен Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. Толочко Б.П. и Михайленко А.М. благодарны Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках Государственного задания Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН (№ 121032500071-6), "Исследование радиационно-химических процессов с использованием радиации современных ускорителей электронов с

целью получения новых материалов”. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

186

Комплексное исследование состояния микробиообъектов методами СИ

Author: Vladimir Kriventsov¹

¹ *SRF SKIF*

Corresponding Author: kriven@mail.ru

Комплексное исследование состояния микробиообъектов методами СИ

Кривенцов В.В.1, Дарьин Ф.А.1, Сороколетов Д.А.2, Ракшун Я.В.2, Дарьин А.В.3

1 ЦКП “СКИФ”

2 Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

3 Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

В докладе представлены результаты комплексного исследования тестовых образцов технологического и природного происхождения, имеющих сложный состав для развития комбинированных методов, на основе синхротронного излучения (СИ), таких как μ -XAFS, μ -РФА и др. Основной целью исследования является адаптация развиваемого комплексного подхода для исследования методами СИ микровключений и микрочастиц в ближайшем будущем. Все спектры исследуемых образцов регистрировались, с использованием μ - и стандартных методик, как на экспериментальном модуле рентгеновской конфокальной микроскопии, расположенном в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), так и на РФА-, EXAFS- станциях Сибирского Центра Синхротронного и Терагерцового Излучения (СЦСТИ, Новосибирск). Исследованные тестовые образцы, имеющие сложный состав были синтезированы и/или выбраны из имеющихся коллекций. Тестовые образцы и реперы, необходимые для тестирования и развития методик СИ были изучены набором методов (XAFS, ПЭМВР, РФА, РФЭС, СЭМ, ЭДА и др.). Для исследуемых тестовых систем была получена новая информация о фазовых и элементных составах, атомной структуре, морфологии, структурных параметрах. Показаны перспективы предлагаемого подхода для исследования микрочастиц и микровключений сложного состава методами СИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП “СКИФ” Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН.

187

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ММ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХСТАДИЙНОМ МСЭ-ГЕНЕРАТОРЕ НА УСТАНОВКЕ ЭЛМИ

Author: Evgenii Sandalov¹

Co-authors: Stanislav Sinitsky²; Andrey Arzhannikov³; Petr Kalinin⁴; Maksim Makarov⁵; Denis Samtsov¹; Vasilii Stepanov⁴; Naum Ginzburg⁶; Nikolai Peskov⁷

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS)*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *Novosibirsk State University*

⁴ *BINP SB RAS*

⁵ BINP⁶ IAP RAS⁷ Institute of Applied Physics RAS**Corresponding Author:** arzhan1@ngs.ru

В рамках доклада представлены результаты экспериментальных исследований по генерации мощных импульсов ЭМ-излучения в мм- и субмм- диапазонах частот в двухстадийном МСЭ-генераторе, реализованном на установке ЭЛМИ (ИЯФ СО РАН) [1]. Этот генератор состоит из двух секций: низкочастотной (НЧ) и высокочастотной (ВЧ), внутри которых одновременно транспортируются в параллельных направлениях два килоамперных электронных пучка с ленточной формой сечения (0.8-1 МэВ, 1-3 кА, 5 нс). Схема генерации излучения в таком устройстве заключается в следующем. В НЧ-секции первый электронный пучок, проходя в резонаторе планарного мазера на свободных электронах (МСЭ) с двумерно распределенной обратной связью [2, 3], генерирует мощный квазимонохроматический импульс мм-излучения с частотой 75 ГГц, который далее направляется по каналу связи в канал ВЧ-секции и рассеивается там на втором ленточном пучке с преобразованием в ЭМ-волну ТГц диапазона. Такая схема в соответствии с расчетами в однопроходном (SASE) режиме позволяет генерировать ТГц-излучение с мощностью масштаба 10 кВт, а при использовании резонатора уровень мощности излучения может быть в перспективе увеличен до нескольких МВт [4, 5]. В настоящее время проводится серия экспериментов при отсутствии резонатора в высокочастотной секции, что соответствует однопроходному режиму генерации ТГц излучения. Серия этих экспериментов нацелена на достижение максимального уровня низкочастотной (75 ГГц) волны в высокочастотной секции этого двухстадийного генератора. В докладе обсуждаются методы измерения энергии, спектрального состава и диаграммы направленности мощных импульсов мм-излучения, а также приводятся результаты таких измерений в выполненной экспериментальной серии. Работы по созданию и развитию диагностического комплекса были выполнены при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-1900370).

188

Применение синхротронного излучения для исследования структуры и свойств двойных карбонатов актинидов

Authors: Анастасия Кузенкова¹; Татьяна Плахова¹; Анна Романчук¹; Степан Калмыков¹**Co-authors:** Елизавета Куликова²; Александр Тригуб²; Мария Шаульская¹; Дмитрий Цымбаренко¹¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова² Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

В связи с повсеместным использованием атомных технологий, проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов (РАО), на сегодняшний день касаются практически всех стран. Одним из перспективных методов долгосрочного обращения с высокоактивными и среднеактивными долгоживущими РАО является глубинное размещение в устойчивых геологических формациях с использованием инженерных и природных барьеров. Для обеспечения безопасности пунктов захоронения необходимо понимание миграционного поведения радионуклидов на молекулярном уровне. Карбонат-анионы и катионы щелочноземельных металлов являются неотъемлемыми компонентами природных сред. В связи с этим одной из важных задач становится исследование структуры и свойств двойных карбонатов актинидов.

Плутоний – один из самых сложных для изучения элементов, так как он может присутствовать в растворе одновременно в нескольких степенях окисления, причём химическое поведение каждой из них отличается. Нептуний является высокорadioактивным элементом, который входит в состав ОЯТ. При этом, на сегодняшний день информация о структурах двойных карбонатов Np и Pu с катионами щелочных и щелочноземельных металлов довольно скудна и обрывиста. Основные работы по этой тематике проходили в прошлом веке советским учёным Волковым [1] и коллегами из других стран Эллинггером и Захариасеном [2], а также Ницше с соавторами [3]. Впервые синхротронное излучение для исследования двойного

карбоната аммония Pu(V) было использовано в недавней работе Квашниной с соавторами [4].

Традиционным методом определения структуры соединений является рентгеновская дифракция. Синхротронная рентгеновская дифракция позволяет исследовать малые количества вещества, что особенно важно в контексте работы с радионуклидами. В дополнении к методу рентгеновской дифракции рентгеновская спектроскопия поглощения (XANES, EXAFS) позволяет установить степень окисления актинидов, а также их локальное окружение. Вместе эти методы комплексно представляют данные о структуре двойных карбонатов актинидов и позволяют всесторонне описывать новые, неизвестные ранее в литературе соединения.

В представленной работе были исследованы структуры двойных карбонатов Pu(V) и Np(V) с катионами щелочных и щёлочноземельных металлов. Установлено, что соединения состава KAnO_2CO_3 ($\text{An} = \text{Pu}, \text{Np}$) имеют гексагональную структуру с пространственной группой $R\bar{6}3/mmc$, которая представляет собой анионные слои $[\text{AnO}_2\text{CO}_3]^{2-}$ 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 $[\text{NpO}_2\text{CO}_3]_n^{2-}$ и межслоевые катионные частицы $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_3]_n^{+}$. Соединение состава $\text{NaPuO}_2\text{CO}_3$ так и не удалось синтезировать, что может быть связано с его низкой термодинамической стабильностью.

Структуры двойных карбонатов установленного состава $\text{Ca}_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3$ могут значительно различаться, в зависимости от методов синтеза. Так, например, при осаждении представленной твёрдой фазы из раствора Np(V), дифрактограмма полученного соединения лучше всего индицируется в орторомбической P решеткой с параметрами ячейки $a = 10,33 \text{ \AA}$, $b = 4,33 \text{ \AA}$, $c = 4,88 \text{ \AA}$. При образовании соединения методом ионного обмена твёрдой фазы $\text{NaNpO}_2\text{CO}_3$ в растворе 0,1 M CaCl_2 , дифракционные максимумы образца лучше всего описываются орторомбической I решеткой с параметрами ячейки $a = 18,85 \text{ \AA}$, $b = 4,88 \text{ \AA}$, $c = 4,34 \text{ \AA}$. Структура фазы $\text{Mg}_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3$, синтезированной из модельного раствора природной воды индицируется в моноклинной P решетке с параметрами ячейки $a = 9,39 \text{ \AA}$, $b = 4,32 \text{ \AA}$, $c = 4,87 \text{ \AA}$. Твёрдая фаза $\text{Mn}_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3$, синтезированная из аналогичного модельного раствора природной воды, где магний заменён

на марганец, имеет моноклинную P решетку с параметрами $a = 9,57 \text{ \AA}$, $b = 4,34 \text{ \AA}$, $c = 4,87 \text{ \AA}$.

Исходя из уточненных данных РД в структурах всех изученных образцов состава $\text{M}(\text{II})_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3$ присутствует плоскость $4,33 \text{ \AA} \times 4,88 \text{ \AA}$, что указывает на присутствие анионных слоев $[\text{NpO}_2\text{CO}_3]_n^{2-}$ натриевого типа, то есть слоев с ромбическим строением.

Согласно данным EXAFS, локальное окружение атома Np во всех структурах двойных карбонатов щёлочноземельных металлов схоже. Расстояние от атома Np до аксиального атома кислорода составляет $1,87 \text{ \AA}$. В локальном окружении отражающего атома Np присутствует шесть экваториальных атомов кислорода на расстоянии $2,5 \text{ \AA}$. На EXAFS спектрах образцов присутствует расщепление пика Np-C в районе $3-4 \text{ \AA}$, связанное с различной структурной функцией атомов кислорода карбонатной группы. Результаты показали схожесть локальной структуры $\text{NaNpO}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и карбонатов $\text{M}(\text{II})_{0,5}\text{NpO}_2\text{CO}_3$ ($\text{M} = \text{Ca}^{2+}$, Mg^{2+} , Mn^{2+}).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №23-23-00292

Литература

[1] Ю.Ф. Волков и др. Радиохимия 2 (1981)

[2] F.H. Ellinger and W.H. Zachariassen. The Journal of Physical Chemistry 58(5) (1954) 405-408.

[3] Heino Nitsche et al. Radiochimica Acta 66/67 (1994) 3 – 8.

[4] Kristina O. Kvashnina et al. Angewandte Chemie 58(49) (2019) 17558 – 17562.

189

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТГц ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Author: Evgenii Sandalov¹

Co-authors: Stanislav Sinitsky²; Andrey Arzhannikov³; Dmitriy Skovorodin⁴; Pavel Logachev⁵; Petr Bak⁴;

Danila Nikiforov ⁴; Kirill Zhivankov ⁴; Vadim Pavlyuchenko ; Igor Mescheryakov ⁴; Petr Kalinin ⁶; Denis Samtsov ¹; Vasilii Stepanov ⁶; Naum Ginzburg ⁷; Nikolai Peskov ⁸

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS)*

² *Budker Institute of Nuclear Physics*

³ *Novosibirsk State University*

⁴ *BINP*

⁵ *Budker INP*

⁶ *BINP SB RAS*

⁷ *IAP RAS*

⁸ *Institute of Applied Physics RAS*

Corresponding Author: e.s.sandalov@inp.nsk.su

В рамках данного доклада представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке и созданию новых схем генерации мощного ЭМ-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах частот с использованием высокоэнергетических пучков релятивистских электронов (РЭП) [1-3]. В основу этих исследований положены результаты предшествующих экспериментальных и теоретических работ, в которых осуществлялось исследование как пучково-волнового [4], так и пучково-плазменного взаимодействия [5]. В разрабатываемых в настоящее время схемах генерации излучения отмеченных диапазонов будут использованы килоамперные РЭП, поступающие от линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) нового поколения, которые создаются в ИЯФ СО РАН [6-7]. В планируемых экспериментах по генерации ТГц излучения будет использован пучок, поступающий от ЛИУ с током до 2 кА и длительностью импульса около 100 нс при характерной энергии электронов 5 МэВ. Совокупность данных параметров электронного пучка при низком значении нормализованного эмиттанса (менее 1000 п·мм·мрад) позволяет реализовать схемы генерации излучения в интервале частот от 0.1 ТГц до нескольких ТГц с рекордной субгигаваттной мощностью в окрестности одного терагерца. Таким образом, использование килоамперных пучков, генерируемых в ЛИУ, открывает возможность создания генераторов импульсов ТГц излучения мультимегаваттного уровня мощности с длительностью масштаба 100 нс, что недоступно для других схем источников излучения.

190

О возможности проведения локального рентгено-дифракционного анализа биоминералов в массивных биологических объектах на примере анализа почечных камней человека в модельных объектах

Authors: Александр Низовский¹; Александр Шмаков²; Валерий Бухтияров³

¹ *Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск*

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

³ *ИК СО РАН*

Corresponding Author: alexniz@inbox.ru

В связи с развитием предиктивной медицины и лапароскопических методик анализ минеральных образований в организме человека *in vivo* является весьма актуальной задачей. Параметры процедуры литотрипсии, которая используется для удаления мочевых камней, определяются по шкале Хаунсфилда, которая является функцией плотности камня и никак не учитывает его минеральный состав. Однако известно, что конкременты мочевой системы человека, имеющие разный минеральный состав, существенно отличаются по прочности. Ранее нами была проведена серия экспериментов по рентгенофазовому анализу с использованием синхротронного излучения коллекции почечных камней человека, полученных в результате полостных операций. Были проанализированы как индивидуальные образцы, так и в составе

модельных объектов, имитирующих человеческое тело [1]. Было показано, что идентификация минерального состава *in vivo* возможна. Существенным ограничением в данных экспериментах было использование излучения с энергией 33,7 кэВ, имеющего невысокую проникающую способность.

С появлением станций на источнике ВЭПП-4, работающих в жестком рентгеновском диапазоне, была проведена серия экспериментов по рентгенофазовому анализу индивидуальных почечных камней и в составе модельных объектов (жировая и мышечная ткань, емкости с водой). Энергия излучения составляла 67 кэВ и 112 кэВ.

Показано, что переход на жесткий рентгеновский диапазон принципиально не ухудшает возможности идентификации минерального состава почечных камней, но при этом существенно увеличивается проникающая способность излучения и, соответственно, уменьшаются ограничения по весу пациента, а также дозовая нагрузка.

Литература

[1] A.I. Ancharov, S.S. Potapov, T.N. Moiseenko, I.V. Feofilov, A.I. Nizovskii // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575 (2007) 221–224

191

Измерение спектральной чувствительности золотого фотокатода стрик камеры в диапазоне энергий 10 – 100 кэВ

Authors: Кирилл Алабин¹; Николай Воробьев¹; Олег Мешков²; Николай Разумов²; Борис Толочко^{None}; Евгений Шашков¹

¹ ИОФ РАН

² ИЯФ СО РАН

Corresponding Author: razumov.kolya@mail.ru

В работе измерена спектральная фоточувствительность золотого катода В ходе исследования рассматривалась перспектива применения золота в роли материала фотокатода, способного регистрировать рентгеновское излучение в диапазоне от 40 до 100 кэВ, и проверка возможности достижения временного разрешения на уровне 10 пикосекунд.

Предложен новый способ определения входящего на фотокатод спектра по известной фоточувствительности материала. Способ основан на зависимости фототока катода от состава спектра пучка синхротронного излучения. Спектр излучения изменялся набором фильтров.

Для золота уже была измерена фоточувствительность для энергий до 10 кэВ, однако свыше 10 кэВ этого сделано не было. В этой работе мы впервые измеряем фоточувствительность на энергиях от 10 до 100 кэВ.

Результат получен на синхротроне ВЭПП-4м. В эксперименте использовался специально-разработанный макет, произведенный в ИЯФе, совместно с Институтом общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, работающий в режиме как на просвет, так и на отражение. Толщина золотого фотокатода 2 мкм.

192

Применение ядерного рассеяния вперёд для исследования надобъемных материалов

Authors: Юрий Князев¹; Дмитрий Балаев²; Сергей Овчинников²; Наталья Казак²

¹ Институт физики им. Л. В. Киренского

² ИФ СО РАН**Corresponding Author:** yuk@iph.krasn.ru

В докладе обсуждается принцип метода ядерного рассеяния вперёд с применением синхротронного излучения, а также примеры его использования для исследования магнитной структуры для случаев объёмных магнетиков и для ансамблей наночастиц. В качестве примера объёмного материала рассматривается исследование монокристаллов FeVO₃. Для этого кристалла были выполнены одновременные измерения спектров ядерной дифракции и ядерного рассеяния вперёд. Такой подход позволил обнаружить антиферромагнитное высокоспиновое состояние при давлениях до 48 ГПа и выявить антиферромагнитное состояние в диапазоне, характеризующемся сосуществованием ионов Fe³⁺ в высокоспиновых состояниях. Также показано, что низкоспиновое состояние Fe³⁺ возникает при давлениях от 48 до 54 ГПа.

Для магнитных наночастиц редкого оксидного полиморфа e-Fe₂O₃ со средним размером 8 нм, изолированных в матрице ксерогеля были выполнены измерения временных спектров ядерного рассеяния вперёд в диапазоне температур 4–300 К в приложенных магнитных полях 0–4 Тл в продольном направлении. Обнаружено, что внешнее магнитное поле качественно не меняет поведение Hhf(T), но оказывает сильное противоположное влияние на сверхтонкие поля в неэквивалентных позициях железа, приводя к расхождению зависимостей полярного угла Hhf ниже 80 К. Предложена полная схема магнитной структуры -Fe₂O₃ в интервале температур 4–300 К.

193

Дифракционные потери в наборе монокристаллических рентгеновских линз.

Authors: Nataliya Klimova¹; Anatoly Snigirev²¹ Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU)² Immanuel Kant Baltic Federal University**Corresponding Author:** klimovanb@gmail.com

С улучшением параметров современных источников рентгеновского излучения, таких как лазеры на свободных электронах и синхротроны 4-го поколения, все большие требования предъявляются к преломляющей рентгеновской оптике [1]. Поликристаллические материалы такие как бериллий и алюминий могут вносить искажения в волновой фронт генерируемого излучения, тем самым увеличивая паразитное рассеяние и приводя к появлению нежелательных интерференционных эффектов. Кроме того, новейшие источники позволяют достигать невиданной ранее плотности потока фотонов, соответственно используемые оптические элементы должны быть радиационно стойкими. В связи с вышеизложенными факторами на первый план выходит изготовление рентгеновской оптики из монокристаллов кремния и алмаза. Монокристаллическая оптика из алмаза, являясь радиационно- и термически-стойкой, позволяет уменьшить практически до нуля паразитное рассеяние и сохранить уникальные параметры генерируемого современными источниками излучения.

Однако, у рентгеновской оптики, изготовленной из монокристаллов, наблюдается один недостаток – возникают дифракционные потери, или так называемые рентгеновские «глитчи». Данный эффект возникает при незапланированном выполнении условия дифракции на некотором наборе атомных плоскостей, что приводит к падению интенсивности прошедшего через оптический элемент излучения. Подобное падение интенсивности может достигать больших значений, в некоторых случаях ослабляя прошедшее излучение почти до нуля [2,3].

Нами была разработана теория возникновения глитчей [2,3], а также были предложены и конструктивные применения данного негативного эффекта [4]. Также была исследована тонкая структура глитчей в составных преломляющих линзах (СПЛ) [5]. Кроме того, была предложена методика измерений, при которой возможно избегать глитчей при измерении [6].

Поскольку величина провалов интенсивности пропорциональна толщине кристалла, можно уменьшать толщину отдельных оптических элементов и составлять оптическую схему из

элементов с различной кристаллографической ориентацией [7]. Такие оптические элементы, как СПЛ или поглотители пучка идеально подходят для практической реализации подобной идеи. Для проведения экспериментальных исследований были использованы двумерные одиночных полу-линзы (с одной преломляющей поверхностью) из различных пластин монокристаллического алмаза (тип IIa), изготовленные в Технологическом институте сверхтвёрдых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ, Троицк) [8].

На Рис.1 показан нормированный спектр пропускания системы, состоящей из восьми одиночных двумерных полу-линз (синяя экспериментальная кривая). В представленном спектре присутствует большое количество глитчей, однако интенсивность каждого глитча невелика (около 1%) в силу малой толщины каждой линзы. Эта ситуация кардинально отличается от наблюдаемых глитчей в планарных линзах из монокристаллического алмаза, которые представляют собой системы линз, изготовленных в одной подложке [1-5], и провалы интенсивности в этом случае могут достигать более 50%.

Рис. 1. Нормированный экспериментальный спектр пропускания системы из восьми линз (синяя кривая) и промоделированные энергии глитчей в каждой из линз с соответствующими индексами Миллера.

Несмотря на то, что наблюдаемые в системе из восьми отдельных двумерных полу-линз глитчи имеют малую интенсивность, может возникнуть необходимость предсказать появление глитчей на любой энергии. Именно эта задача была решена в рамках данного исследования – Рис. 1. В результате обработки одного экспериментального спектра удалось определить ориентацию каждой из восьми линз с точностью порядка $1e-4$ градуса и определить какой провал интенсивности в спектре соответствует какой линзе (определить порядок линз в оптической системе из одного измерения не представляется возможным, ровно как и необходимым) и промоделировать глитчи от каждой линзы в произвольном диапазоне энергий.

Разработанная методика анализа дифракционных потерь от системы, состоящей из множества монокристаллических оптических элементов с различной ориентацией кристаллической решетки, позволит определять ориентацию всех элементов даже из общего спектра поглощения, а также позволит создавать оптические системы на новейших рентгеновских источниках с четко контролируемыми параметрами и возможностью нивелирования влияния дифракционных потерь.

Благодарности

Авторы выражают особую признательность Александру Ефанову (Center for Free-Electron Laser Science, Гамбург, Германия) за неоценимый вклад в проведение данного исследования.

Ссылки на литературу:

1. Snigirev A. V. Kohn, I. Snigireva and B. Lengeler, A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays // Nature. – 1996. – Т. 384. – №. 6604. – С. 49.
2. N. Klimova, O. Yefanov, I. Snigireva, A. Snigirev, Determination of the exact orientation of single-crystal X-ray optics from its glitch spectrum and modeling of glitches for an arbitrary configuration // Crystals. – 2021; – Vol. 11(5):504.
3. Н. Б. Климова, А. А. Снигирев, Метод определения ориентации монокристаллов и калибровки энергии рентгеновских лучей при помощи спектра дифракционных потерь // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023, – № 10, – С. 1–10
4. N. Klimova, I. Snigireva, A. Snigirev, O. Yefanov, Using diffraction losses in the single-crystal X-ray optics for precise determination of its cell parameters and tuning the monochromator // Journal of Synchrotron Radiation. – 2022, – Vol. 29. – P. 369-376.
5. Н. Б. Климова, А. А. Баранников, М. Н. Сороковиков, Д. А. Зверев, В. А. Юнкин, П. А. Просеков, А. Ю. Серегин, А. Е. Благов, А. А. Снигирев, Тонкая структура дифракционных глитчей в монокристаллических рентгеновских линзах // Кристаллография. – 2022, – Том 67(6), С. 906-912
6. N. Klimova, I. Snigireva, A. Snigirev, O. Yefanov, Suppressing diffraction-related intensity losses in transmissive single-crystal X-ray optics // Crystals. – 2021; – Vol. 11(12), 1561.
7. M. Polikarpov, H. Emerich, N. Klimova, I. Snigireva, V. Savin and A. Snigirev Spectral X-ray glitches in monocrystalline diamond refractive lenses // Physica Status Solidi B – 2018. – Vol.255 – P. 1700229.
8. Terentyev S. et al. Parabolic single-crystal diamond lenses for coherent x-ray imaging // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107, № 11. P. 111108.

194

ХМCD исследование магнитного состояния Co и Fe подсистем в людвигитах

Authors: Наталья Казак¹; Михаил Платунов²; Вячеслав Жандун¹; Сергей Овчинников¹

¹ ИФ СО РАН

² ЦКП «СКИФ» ФИЦ «Институт катализа СО РАН»

Corresponding Author: nat@iph.krasn.ru

Представлены результаты XAS и ХМCD исследований магнитных монокристаллов людвигитов Co_3BO_5 и Co_2FeBO_5 . Соединения являются сильно анизотропными низкотемпературными ферромагнетиками. Дальний магнитный порядок возникает при $T_N = 42$ К и 117 К, соответственно [1, 2]. Измерения XANES/ХМCD выполнены на К-краях Co и Fe при $T = 5$ К, $H = 17$ Т. Используя XAS спектроскопию, проведено разделение вкладов двух- и трехвалентной подсистем кобальта в Co_3BO_5 . Впервые для боратов получены спектры поглощения иона Co^{3+} . Количественный анализ ХМCD спектров позволил установить, что основной вклад в ХМCD происходит от двухвалентной подсистемы кобальта, в то время как вклад трёхвалентной подсистемы подавлен за счет немагнитного низкоспинового состояния (LS).

В Co_2FeBO_5 замещение Co^{3+} на Fe^{3+} приводит к значительной компенсации магнитного момента вдоль оси легкого намагничивания (b-ось), чрезвычайной магнитной жесткости и переходу в более проводящее электронное состояние [2]. Было высказано предположение об антиферромагнитной связи между подрешетками Co и Fe, приводящей к установлению ферромагнитного порядка. Измерение элементно-селективных кривых намагниченности выполнено на К-краях Co и Fe в интервале температур $T = 5 - 130$ К. Форма кривых ХМCD свидетельствует о том, что железная подрешетка ферромагнитно упорядочена и антиферромагнитно связана с магнитной подрешеткой кобальта. Обнаруженная разнонаправленность петель ХМCD сохраняется во всем температурном интервале. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение сильной обменной связи между двумя магнитными подсистемами. Этот вывод требует пересмотра существующих представлений об иерархии обменных взаимодействий в людвигитах. Полученные результаты поддержаны теоретическим расчетом электронной структуры с учетом спин-орбитальной связи (DFT).

1. N.V. Kazak, M.S. Platunov, Yu.V. Knyazev, et al. M.S. Molokeev, M.V. Gorev, S.G. Ovchinnikov, Z.V. Pchelkina, V.V. Gapontsev, S.V. Streltsov, J. Bartolomé, A. Arauzo, V.V. Yumashev, S.Yu. Gavrillkin, F. Wilhelm, A. Rogalev, Spin state crossover in Co_3BO_5 , Phys. Rev. B 103, 094445 (2021).
2. J. Bartolome, A. Arauzo, N.V. Kazak, N.B. Ivanova, S.G. Ovchinnikov, Yu.V. Knyazev, and I.S. Lyubutin, Uniaxial magnetic anisotropy in $\text{Co}_2.25\text{Fe}_0.75\text{O}_2\text{BO}_3$ compared to $\text{Co}_3\text{O}_2\text{BO}_3$ and $\text{Fe}_3\text{O}_2\text{BO}_3$ ludwigites, Phys. Rev. B 83, 144426 (2011).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки (проект №24-12-20012).

195

Изучение и оптимизация режимов генерации Новосибирского ЛСЭ, установленного на двухдорожечный ускоритель-рекуператор.

Authors: Егор Эптешев¹; Yaroslav Getmanov²; Oleg Shevchenko³; NIKOLAY VINOKUROV⁴

¹ НГУ, ИЯФ, лаборатория 3-2

² Budker INP

³ BINP

⁴ *Budker Institute of Nuclear Physics*

Corresponding Author: e.epteshev@g.nsu.ru

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (ЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, установленных на одно-, двух- и четырёхдорожечный ускоритель-рекуператор (УР). На сегодняшний день Новосибирский ЛСЭ обладает рекордными значениями мощности генерации в ТГц диапазоне излучения. Такие параметры излучения определяются характеристиками источника электронов, в качестве которого используется линейный ускоритель заряженных частиц со схемой рекуперации энергии. Основная сложность работы с многооборотными УР заключается в транспорте через одну и ту же магнитную структуру электронных пучков с разным энергетическим разбросом. Это в полной мере ощущается при работе в режимах с максимальным усилением, в которых энергетический разброс значительно возрастает. В работе обсуждаются результаты экспериментов по генерации излучения Новосибирского ЛСЭ в режиме двухдорожечного УР и оптимизация магнитной структуры ускорителя.

196

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОГО СОСТАВА БИОПСИЙНОГО МАТЕРИАЛА КОСТНОГО МОЗГА У ПАЦИЕНТОВ С ГЕМОБЛАСТОЗАМИ МЕТОДОМ РФА-СИ

Authors: Valentina Trunova¹; Tatyana Pospelova²; Marie Voytko³; Elena Krupovich⁴; Galina Soldatova²

¹ *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS*

² *Кафедра терапии, гематологии и трансфузиологии (ФПК и ППВ), Новосибирский государственный медицинский университет*

³ *Кафедра терапии, гематологии и трансфузиологии (ФПК и ППВ), Новосибирский государственный медицинский университет,*

⁴ *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск*

Corresponding Author: valna-t@mail.ru

Значительные успехи в терапии гемобластозов, связанные с внедрением стандартизированных протоколов химиолучевой терапии, таргетных препаратов и трансплантационных технологий, закономерно привели к увеличению общей выживаемости больных. Поиск доступных маркеров для ранней диагностики и определения прогноза опухолевых заболеваний кроветворной ткани является актуальной задачей. Пучок синхротронного излучения на порядки величины ярче и интенсивней рентгеновской трубки и применяемых изотопов. Преимущества пучка синхротронного излучения:

- высокая яркость позволяет уменьшить время измерения образцов и снизить требования к размерам и массе образцов,
- естественная поляризация СИ значительно снижает пределы обнаружения,
- неструктивность метода, позволяет создать банк данных образцов и использовать его в последующих исследованиях.

Анализ микроэлементов в костном мозге осуществлялся методом рентгенофлуоресцентным с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) на базе Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения в Институте ядерной физики (ИЯФ СО РАН) на накопителе ВЭПП-3. Определяли следующие химические элементы: K, Ca, Cr, Mn, Co, Ni, Fe, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, La, Th. Проведение анализа с вариацией энергии возбуждающих квантов, обеспечивает возможность уменьшения требуемых пределов обнаружения. Пробоподготовка исследуемого материала исключает термический разогрев, взаимодействия с кислотами, а это исключает возможность как потери из образца микроэлементов, так и возможность вносимых загрязнений.

Полученные данные, позволяют выделить ранние предикторы рефрактерно-рецидивирующего течения гемобластозов. Полученные результаты исследования апробированы в клинической практике, утверждены Локальным Этическим Комитетом больницы.

197

Non-thermal nature of the metabolic response of thermophilic and non-thermophilic bacteria to terahertz radiation

Author: Sergey Peltek¹

¹ Institute of Cytology and Genetics SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Corresponding Author: peltek@bionet.nsc.ru

Пельтек С.Е.1,2*, Банникова С.В., 1,2, Хлебодарова Т.М. 2, Васильева А. А. 1,2, Мещерякова И.А. 1,2, Мухин А.М. 2, Уварова Ю. Е. 1,2, Брянская А.В. 1,2, Шипова А.А. 1,2, Ощепков Д.Ю. 2, Попик В.М. 3 1Лаборатория молекулярных биотехнологий Федерального научного центра «Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 10 2Курчатовский центр геномики Федерального исследовательского центра «Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», пр. Лаврентьева, 10, г. Новосибирск, 630090, Россия 3Институт ядерной физики им. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 11 * peltek@bionet.nsc.ru

Излучение в терагерцовом (ТГц) диапазоне практически полностью поглощается атмосферой и водой и поэтому живые организмы в процессе эволюции не выработали механизмов защиты от его воздействия. Однако, в связи с появлением новых источников ТГц излучения, задача детального изучения его воздействия на живые системы становится все более актуальной. По мере того, как расширяются области применения ТГц излучения, накапливаются данные, что этот тип излучения может влиять не только непосредственно на биологические молекулы, но и в целом на клеточные процессы. Так, использование биологических сенсоров позволило установить, что облучение клеток *E. coli* электромагнитными волнами ТГц диапазона (0.14 ТГц) приводит к активации генных систем антистрессовой защиты, усвоения дисахаридов и метаболизма аминокислот, контролируемых транскрипционными факторами YdeO, ChbR и TdcR (Serdyukov et al., 2020; 2021), а при более высокой частоте (2.31 ТГц) приводит к активации генных сетей окислительного стресса и поддержания гомеостаза переходных металлов (Demidova et al., 2013; 2016), а также процессов формирования биопленки, контролируемых TF MatA (Serdyukov et al., 2020). ТГц облучение клеток линии K12 JM109 *E. coli* в течение 15 мин (1-2 ТГц) приводит к активации экспрессии генов, ответственных за биосинтез пилей и колановой кислоты, а также генов, контролирующих деление клеток, что ведет к образованию клеток с аномальной морфологией, склонных к агрегации (Peltek et al., 2021). В недавнем обзоре (Sun et al., 2021) отмечается, что, хотя существует определенный прогресс в исследовании влияния ТГц излучения на биологические системы, на этом пути существует множество технических препятствий и одним из них является точный контроль температуры при регистрации интенсивности воздействия. Эксперименты, проведенные в условиях строгого контроля температуры, показали, что в протеомном профиле облученных клеток *E. coli* и *Geobacillus isigianus* отсутствуют белки теплового шока, что свидетельствует о нетермическом характере ТГц излучения (Vannikova et al., 2022). В настоящее время исследованию для изучения эффектов облучения электромагнитными волнами ТГц диапазона использованы клетки термофильной бактерии *G. isigianus*, которые адаптированы к широкому диапазону температур от 50 до 75°C с оптимумом около 60°C (Bryanskaya et al., 2015). Сравнительный анализ транскриптома клеток *G. isigianus* сразу после ТГц облучения и через 10 мин после его окончания подтвердил нетермический характер ТГц излучения, показал негативное влияние ТГц облучения на рост бактерии и структуру ее клеточной стенки, продемонстрировал угнетение транскрипции генов, продукты которых участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, а также генов шаперонного белка ClpB, белка системы репарации ДНК RadA, каталазы KatG – маркера окислительного стресса и генов двух-компонентной системы фосфорилирования остатков аргинина с помощью McsB киназы. Наиболее чувствительными к ТГц облучению у клеток *G. isigianus* оказались генные системы поддержания гомеостаза переходных металлов – меди, железа и цинка, ингибирование экспрессии которых значительно усилилось через 10 минут после окончания воздействия. Блокирование экспрессии генов системы экспорта меди и импорта железа под действием ТГц облучения может быть предвестником развития в клетках *G. isigianus* токсического стресса, ведущему к дестабилизации функции белков, содержащих в своей структуре Fe/S кластеры. С другой стороны, при анализе протеома клеток *G. isigianus*, показано, что специфичность ответа клеток термофильной бактерии *G. isigianus* на ТГц облучение связана с нарушением активности цепи передачи электронов и метаболической системы клетки, а также компонентов системы трансляции. Подтверждением этому является быстрая и стабильная активация систем клетки, компенсирующих угнетение

респираторной и гликолитической систем, а именно, АТФ-синтазы и широкого спектра ферментов, продуцирующих НАДН. Об общем угнетении метаболизма и роста клетки при ТГц облучении свидетельствует снижение уровня ферментов, контролирующих синтез кофакторов НАДФН, ФАД и *pyridoxal 5'-phosphate*, ферментов, обеспечивающих синтез рибофлавина, оксалоацетата и пептидогликана, а также реакции клетки, направленной на их восстановление. Характер ответа клеток *E. coli* и *G. icigianus* на ТГц облучение оказался сходным. Клетки *G. icigianus* оказались более устойчивы к стрессовым воздействиям и продемонстрировали быстрое восстановление до контрольного уровня систем, обладающих шаперонной, протеазной, нуклеазной и антиоксидантной активностью, а также продемонстрировали частичное восстановление точности и эффективности системы трансляции через 10 мин после окончания ТГц воздействия.

198

Кремниевая планарная преломляющая оптика для когерентных источников рентгеновского излучения

Author: Дмитрий Зверев¹

Co-authors: Михаил Сороковиков¹; Вячеслав Юнкин²; Анатолий Снигирев¹

¹ БФУ им. И. Канта

² ИПТМ РАН

Corresponding Author: daswazed@yandex.ru

Сегодня кремниевая планарная преломляющая оптика становится ключевым инструментом для сканирующих методов визуализации и микроскопии на современных источниках синхротронного излучения, а также является многообещающим оптическим решением для рентгеновских лазеров на свободных электронах. Например, планарные составные преломляющие линзы [1], изготовленные в виде микроструктур на поверхности пластин из монокристаллического кремния с использованием высокоточных методов его микрообработки (МЭМС технология), позволяют фокусировать жесткое рентгеновское излучение в пятно размером всего несколько десятков нанометров. Это обеспечивает высокое пространственное разрешение и чувствительность когерентных рентгеновских методов исследования, что особенно важно для применения в материаловедении, биологии и нанотехнологиях.

Яркой демонстрацией кремниевой планарной преломляющей оптики также является рентгеновский интерферометр, представляющий собой набор из нескольких рядов кремниевых составных преломляющих линз, преобразующих падающее когерентное монохроматическое излучение в интерференционное поле. При когерентном рентгеновском освещении интерферометр генерирует массив сфокусированных пучков [2,3]. За фокусом пучки перекрываются, создавая устойчивую интерференционную картину полос в дальнем поле. Такие устройства позволяют реализовать параксиальные оптические схемы интерферометрии, основанные на когерентных свойствах современных рентгеновских источников. Формируемая ими периодическая пространственная структура пучка открывает новые возможности для разработки методов рентгеновской фазоконтрастной визуализации [4], может быть использована для создания специального освещения, а также для задач диагностики источника, транспорта и подготовки рентгеновского пучка [5].

[1] Aristov, V., Grigoriev, M., Kuznetsov, S., Shabelnikov, L., Yunkin, V., Weitkamp, T., ... & Voges, E. (2000). X-ray refractive planar lens with minimized absorption. *Applied Physics Letters*, 77(24), 4058-4060.

[2] Snigirev, A., Snigireva, I., Kohn, V., Yunkin, V., Kuznetsov, S., Grigoriev, M. B., ... & Detlefs, C. (2009). X-ray nanointerferometer based on Si refractive bilenses. *Physical review letters*, 103(6), 064801.

[3] Snigirev, A., Snigireva, I., Lyubomirskiy, M., Kohn, V., Yunkin, V., & Kuznetsov, S. (2014). X-ray multilens interferometer based on Si refractive lenses. *Optics express*, 22(21), 25842-25852.

[4] Zverev D., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A., (2020) X-ray phase-sensitive imaging using a bilens interferometer based on refractive optics. Accepted for publication in journal *Opt. Express*

[5] Zverev, D., Snigireva, I., Sorokovikov, M., Yunkin, V., Kuznetsov, S., & Snigirev, A. (2021). Coherent X-ray beam expander based on a multilens interferometer. *Optics Express*, 29(22), 35038-35053.

199

Расширитель рентгеновского пучка на основе планарных составных преломляющих линз

Authors: Михаил Сороковиков¹; Дмитрий Зверев²; Вячеслав Юнкин³; Анатолий Снигирев²

¹ БФУ им.И.Канта

² БФУ им. И. Канта

³ ИПТМ РАН

Corresponding Author: mnsorokovikov@gmail.com

Предварительная подготовка и формирование пучка на источниках синхротронного излучения 4-го поколения позволяет полноценно реализовать возможности современных рентгеновских методов исследования, создавая необходимые условия для их эффективного использования. Обеспечение возможности регулирования поперечного размера пучка, а также управления плотностью потока фотонов, является одной из наиболее востребованных задач подготовки и формирования пучка. Это позволяет исследовать крупные и чувствительные к радиационным нагрузкам объекты, например, биологические образцы или полимерные структуры. Визуализация таких объектов, исследуемых методами фазово контрастной микроскопии, проекционной рентгенографии или спектроскопии, дает возможность получить информацию об образце, без процесса его сканирования.

Одним из способов генерации расширенного пучка является использование составной преломляющей линзы, формирующей расходящийся пучок за фокусом. Однако, в большинстве случаев ввиду большего размера падающего пучка, по сравнению с эффективной апертурой линзы, происходит значительная потеря интенсивности. Преодолеть это позволяет кремниевый планарный многолинзовый интерферометр, выполненный в виде системы из нескольких параллельных рядов составных преломляющих линз. В данной конфигурации размеры эффективной апертуры и падающего пучка сопоставимы, что дает возможность сформировать расширенный пучок высокой интенсивности с увеличенной эффективностью его преобразования. Экспериментальная демонстрация расширителя рентгеновского пучка выполнена на станции ID13 ESRF (Гренобль, Франция) при энергии рентгеновского излучения 12.4 кэВ. Применение такого типа оптики позволило эффективно управлять угловым размером и плотностью потока фотонов формируемого пучка, с возможностью работы как в когерентном, так и в некогерентном режимах. Полученные экспериментальные результаты оптических преобразований полностью согласуются с результатами численного моделирования.

Расширитель пучка на основе многолинзового интерферометра имеет огромный потенциал для использования на современных источниках синхротронного излучения, а также на новых источниках 4-го поколения и лазерах на свободных электронах в качестве устройства подготовки и транспортировки рентгеновского пучка.

200

Элементный анализ компонентов сигарет методом РФА-СИ

Authors: Elena Krupovich¹; Valentina Trunova²; Alexander Malikov³; Nikolay Maslov³

¹ ИИЦ SB RAS

² Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS

³ Институт лазерной физики СО РАН

Corresponding Author: elena.krup42@gmail.com

Известно, что при курении на легких оседает большое количество различных микроэлементов (ссылка), эссенциальных и токсичных. Для этого была разработана методика по сбору аэрозоля, получаемого при курении сигарет.

По последним литературным данным, существующие методики пробоподготовки аэрозолей для химического анализа можно разделить на две основные группы:

1) Анализ аэрозолей, собранных на сухих фильтрах из кварцевого волокна;

2) Анализ аэрозолей, пропущенных через объем какой-либо жидкости.

Первый вариант часто используется для метода РФА-СИ, но количественное определение элементного состава затруднено из-за матрицы фильтра и отсутствия стандартных образцов для фильтров из кварцевого стекла. Для повышения концентрации аналита перевод аэрозоля в жидкое состояние выглядит перспективным, но данные методики в основном применяются для анализа органических соединений, а не микроэлементного состава аэрозоля.

Проведен элементный анализ сигарет трех ценовых категорий методом РФА-СИ на станции №3 накопительного кольца ВЭПП-3 (ЦКП СЦСТИ, ИЯФ СО РАН). Был изучен элементный состав табака в сигаретах, пепла, остающегося, после курения и смолы, концентрированной из дыма сигарет. Смолу получали путем прогонки дыма горячей сигареты через объем дистиллированной воды, после испарения которой получали смолу. Измерения проведены при двух энергиях возбуждающих квантов – 21 и 30,2 кэВ для определения по $K\alpha$ -линиям элементов от S до Sb.

При пересчете содержания химических элементов на одну сигарету результаты анализа показали, что концентрация макро и микроэлементов в табаке разных марок сигарет очень близка, существуют различия только в содержании Cl, Br, Se. В пепле сигарет всех трех марок также схожее содержание химических элементов, только в одном из случаев концентрация K снижена на 25%. Интерес вызывает различие в содержании химических элементов в смоле, т.е. дыме сигарет – в одной из марок относительно других значительно повышены содержания Ca и Sr, и при этом снижена концентрация Br.

201

Атомные спиновые эффекты в резонансной фотоэмиссионной спектроскопии f-d соединений

Author: Татьяна Кузнецова¹

Co-authors: Екатерина Пономарева²; Владимир Гребенников¹; Ратибор Чумаков³; Евгений Герасимов¹; Николай Мушников¹

¹ *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН*

² *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН*

³ *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"*

Corresponding Author: kuznetsova@imp.uran.ru

Методом резонансной фотоэмиссионной (ФЭ) спектроскопии с использованием синхротронного излучения исследованы электронные состояния в многокомпонентных редкоземельных интерметаллидах типа $R\text{Mn}_2\text{Si}_2$ и $R\text{Ni}_2\text{Mnx}$. Проведен сравнительный анализ резонансов на атомах редкоземельных и переходных металлов, исследованы особенности взаимодействия d- и f-оболочек в мягком рентгеновском диапазоне. Изучены основные сценарии фотоэмиссии валентных электронов: (i) Интерференция прямого ФЭ-канала с непрямым ФЭ-каналом, открывающимся после возбуждения электрона основного уровня в промежуточное состояние с последующей автоионизацией валентной зоны. (VB) электрон, (ii) неупругий оже-распад дырки основного уровня, сопровождающийся эмиссией электронов и образованием двух дырок в валентной зоне и (iii) другие неупругие потери.

Атомные магнитные моменты определяют величину и ширину резонансных спектров. Например, если все пять 3d-состояний со спином вверх заполнены (как в Mn), при поглощении фотона возникает только дырка на уровне 2p со спином вниз. Заполнение фотодырки возможно только путем обратного перехода возбужденного электрона, сопровождающегося автоионизацией электрона, поскольку переходы валентных электронов запрещены из-за сохранения проекции спина. Если в валентной зоне присутствуют электроны с той же проекцией спина, что и дырка (как в Ni), появляется конкурирующий неупругий канал LVV-оже-распада. Таким образом, чем выше спин атома, тем меньше число конечных состояний и тем больше и острее наблюдаемый резонанс.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-72-00067.

202

Критерии восстановления уравнения состояния взрывчатых веществ по данным малоуглового рентгеновского рассеяния от зоны химической реакции детонации

Authors: Альфред Чернышев¹; Борис Толочко¹; Иван Рубцов²; Эдуард Прууэл²; Константин Тен²

¹ *Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

² *ИГиЛ СО РАН*

Corresponding Author: alfred.chernyshev@solid.nsc.ru

По данным малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) системы наночастицы (НЧ) – взрывчатое вещество (ВВ) на начальных стадиях прохождения детонационной волны можно восстановить уравнение состояния (УС) ВВ. Сформулированы критерии получения УС ВВ из данных МУРР. Критерии основаны на использовании контраста МУРР между электронными плотностями продуктов детонации и наночастиц в приближении Гинье для определения интенсивности МУРР: $I(q) = I_e N V^2 (\Delta\rho)^2 \exp(-(q^2 R_g^2)/3)$ где N – количество наночастиц, V – средний объем наночастицы, $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ – контраст рентгеновских лучей, который пропорционален разнице в электронной плотности между частицей (ρ) и ее ближайшим окружением (ρ_0), а R_g – радиус инерции, I_e – интенсивность рассеяния по Томсону. В соответствии с уравнением, экспоненциальный множитель, зависящий от q , определяется исключительно размером и формой частиц (через радиус инерции, R_g), в то время как масштабирование, обусловленное прохождением детонационной волны, связано с одним из трёх факторов: N , V и $\Delta\rho$.

Научное издание

Книга тезисов Международной конференции «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (СИ и ЛСЭ-2024)»

24 – 28 июня 2024

ИЯФ СО РАН

Ответственный за выпуск М.В. Кузин

Сдано в набор 20.06.2024 г.

Подписано в печать 21.06.2024.

Формат 60x90 1/16 Объем 6.5 печ.л., 5.2 уч.-изд.л.

Бесплатно.
