



На правах рукописи

Клюев Александр Сергеевич

Экспериментальное исследование параметрического рентгеновского
излучения в порошках

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Белгород – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: **Кубанкин Александр Сергеевич,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Малышевский Вячеслав Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Черепенников Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета БелГУ.01.03 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, корпус 11, ауд. 307.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85 и на сайте <https://www.bsu.edu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета БелГУ.01.03
канд. физ.-мат. наук



М.С. Тихонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования свойств параметрического рентгеновского излучения проводятся на протяжении последних десятилетий и занимают важное место в науке благодаря потенциалу прикладного использования. В первую очередь параметрическое рентгеновское излучение интересно для применения в качестве основы квазимонохроматического источника рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне, обладающего возможностью плавной перестройки спектра генерируемого излучения. Данная особенность крайне важна для решения прикладных задач и в настоящее время такой коммерческий источник успешно работает в Японии. Также, интерес к параметрическому рентгеновскому излучению обусловлен разработкой новых возможностей исследования атомной структуры конденсированных сред и диагностики пучков заряженных частиц современных ускорителей.

С точки зрения фундаментальной науки, решаемые в диссертационном исследовании задачи интересны по причине изучения параметрического рентгеновского излучения, образующегося в микро- и нано-дисперсных порошках. Подобные исследования во многом выполняются впервые и вносят существенный вклад в развитие существующих знаний о механизме образования параметрического рентгеновского излучения.

Целью диссертационной работы является проведение комплексного экспериментального исследования свойств параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), генерирующегося релятивистскими электронами в микро- и нано-дисперсных порошках.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Рассчитать параметры эксперимента, который позволит обнаружить различия пиков параметрического рентгеновского излучения из порошковых мишеней.

- Модернизировать экспериментальную установку «Рентген-1» для измерения ПРИ из порошковых мишеней с различным размером зерна.
- Разработать методику изготовления мишеней из наноразмерных порошков для измерения параметрического рентгеновского излучения.
- Измерить спектры параметрического рентгеновского излучения из порошковых мишеней.
- Провести математическую обработку полученных результатов, нахождение ошибок и фитирование полученных пиков для дальнейшего анализа.
- Сравнить полученные результаты с существующими моделями ПРИ.

Научная новизна полученных результатов

- Впервые проведены измерения спектров ПРИ релятивистских электронов из порошковых мишеней с различным размером зёрен.
- Впервые зафиксировано уширение спектральных линий ПРИ, обусловленное уменьшением размера области когерентного рассеяния кулоновского поля релятивистских электронов в зёрнах.
- Впервые зафиксировано изменение соотношения интегрального выхода ПРИ для различных кристаллографических плоскостей при изменении размера зёрен.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная значимость работы определяется восполнением пробелов в современной физике излучения заряженных частиц. В частности, показаны различия механизмов дифракции реальных фотонов рентгеновского излучения и виртуальных фотонов кулоновского поля релятивистских электронов в порошковых мишенях с различным размером зёрен.

Практическая значимость исследования связана с решением задач, связанных с разработкой новых подходов к измерению параметров атомной структуры и размеров атомных кластеров конденсированных сред.

Таким образом, диссертационное исследование не только восполняет значительные пробелы в сугубо научных знаниях, но и имеет интерес для возможного прикладного использования в будущем.

Методы исследований

Все основные исследования были проведены на базе Отдела физики высоких энергий Физического института им П.Н. Лебедева РАН и Международной научно-образовательной лаборатории Радиационной физики НИУ “БелГУ”. Эксперименты были проведены на основе ускорительного комплекса “ПАХРА”, в качестве источника пучка релятивистских электронов использовался микротрон с энергией электронов 7 МэВ.

В экспериментальной части работы использовались апробированные методы ядерной физики и физики конденсированного состояния вещества. В частности, исследуемое излучение фиксировалось современными полупроводниковыми энергодисперсионными детекторами, а параметры используемых мишеней контролировались на основе апробированных методов электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Теоретические расчеты были выполнены на основе известных моделей ПРИ релятивистских электронов из сред с упорядоченной атомной структурой.

Достоверность полученных результатов

Для повышения достоверности получаемых результатов перед проведением экспериментов были проведены измерения характеристик экспериментальной установки и используемого оборудования для

минимизации влияния фона и инструментальных эффектов, негативно влияющих на проведение экспериментов.

Наблюдавшаяся в исследованиях повторяемость результатов, достоверная статистическая ошибка, использование сертифицированного оборудования и выполненные в условиях экспериментов калибровки в совокупности обеспечивают достоверность полученных результатов. Эксперименты могут быть воспроизведены, а полученные результаты не противоречат известным результатам в области исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Отношение выхода спектральных пиков ПРИ к выходу спектральных пиков дифракции рентгеновского излучения для порошковых мишеней при одинаковых угле наблюдения и семействе кристаллографических плоскостей уменьшается с ростом энергии пика.

2. Соотношение выхода спектральных пиков ПРИ изменяется при изменении размеров зёрен порошковых мишеней.

3. Спектральная ширина пиков ПРИ увеличивается при уменьшении размера зёрен порошковых мишеней.

Апробация работы

Материалы работы были опубликованы в 15 публикациях, а именно было опубликовано:

- 12 тезисов международных конференций и совещаний;
- 2 публикации в рецензируемых изданиях, из них не менее 2, индексируемых Scopus и/или Web of Science;
- один патент на полезную модель.

Материалы работы были доложены на следующих конференциях и школах для молодых учёных: XLVII международная Тулиновская

конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 30 мая – 1 июня 2017 г.; XLVII Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2017), Санкт-Петербург, 11–16 марта 2017 г.; 50-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами Москва, 25-27 мая 2021 г; XVI международной научно-практической конференции, Москва, 16 октября 2018 г.; XIII International Symposium “RREPS-19” Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures, Belgorod, 15-20 September 2019; The 7th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena Channeling 2016", SIRMIONE-DESENZANO DEL GARDA, Italy, September 25-30, 2016; XLIX международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 29 мая – 31 мая 2019 г; XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами Москва 30 мая – 1 июня 2017.

Личный вклад автора

Соискатель внёс основной вклад во все этапы работы: постановка задач, обзор научной и технической литературы, аналитические расчёты и компьютерное моделирование, необходимые для решения поставленных задач, разработка и испытание методик создания образцов, постановка и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных. Оформлению публикаций предшествовали коллективные обсуждения, тексты публикаций написаны в основном соискателем.

Связь работы с научными программами

В ходе работы над диссертацией автор участвовал в качестве исполнителя государственного задания № FZWG-2020-0032 (2019-1569),

проект «Исследование новых эффектов в процессах взаимодействия ускоренных заряженных частиц с веществом».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и сокращений. Объем диссертации – 88 страниц, включая 44 рисунков и 6 таблиц. Список литературы состоит из 121 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой задачи; приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме; сформулирована цель и задачи исследований; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; показана научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов; даны сведения о публикациях.

В первой главе диссертации описывается экспериментальная установка “Рентген 1”, на которой проводились исследования по изучению свойств ПРИ релятивистских электронов. Также, в главе представлено описание процесса изготовления порошковых мишеней, являющихся одной из наиболее важных частей исследований.

Экспериментальная установка состоит из двух основных частей: микротрон с магнитооптическим вакуумным каналом транспортировки пучка электронов к мишени, и вакуумная камера расположения мишени.

Источником релятивистских заряженных частиц являлся микротрон, находящийся в Лаборатории электромагнитных взаимодействий Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и являющийся инжектором синхротрона “ПАХРА”. Общая схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 1.

Микротрон (1) генерирует пучок электронов со следующими характеристиками: энергия электронов 7 МэВ; частота импульсов 50 Гц;

длительность импульсов 1-4 мкс; ток электронов в импульсе до 40 мА; скважность с учётом банчевой структуры 50 000. Для транспортировки электронного пучка в камеру предусмотрены три поворотных магнита (2-4), две пары электромагнитных квадрупольных линз (6), и корректор (7). Для уменьшения интенсивности пучка и его формирования между первым и вторым поворотным магнитом были установлены два углеродных коллиматора (8) с апертурой 3 мм, на расстоянии 1.2 м друг от друга.

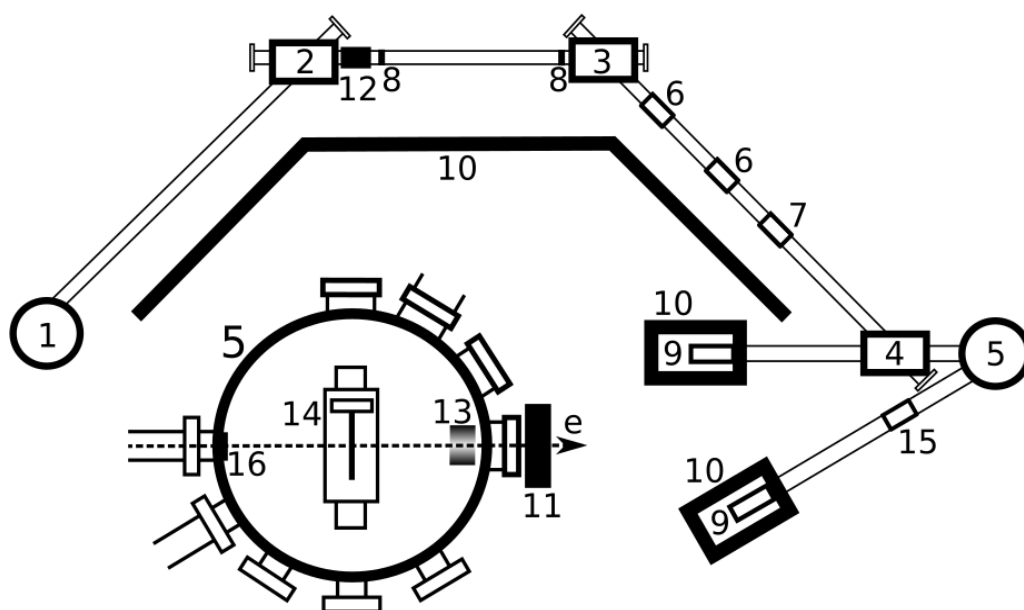


Рисунок 1 – Экспериментальная установка: 1) микротрон, 2) первый поворотный магнит, 3) второй поворотный магнит, 4) третий поворотный магнит, 5) мишенная камера, 6) квадрупольные линзы, 7) корректор, 8) углеродные коллиматоры 3 мм, 9) детекторы, 10) свинцовая защита, 11) пропорциональная камера, 12) шиберная задвижка, 13) цилиндр Фарадея, 14) гониометр, 15) магнитный фильтр, 16) свинцовый коллиматор

Диагностика пучка электронов производилась на основе цилиндра Фарадея (13) и многопроводочной пропорциональной газонаполненной камеры (11).

Мишень, с которой взаимодействовал пучок электронов, устанавливалась в крепление гониометра (14), который позволял

ориентировать мишень относительно оси пучка электронов и выводить мишень в горизонтальном направлении с пучка электронов для настройки и контроля пространственных характеристик пучка. Мишенная камера (5), в которой располагался гониометр, позволила регистрировать генерирующее пучком в мишени излучение под углами 150° и 180° относительно направления распространения электронов пучка. Модернизация вакуумной мишенной камеры, выполненная в рамках работы, состояла в установке дополнительной оснастки для уменьшения фона в области исследований и магнитных дефлекторов для подавления фона вторичных заряженных частиц.

Предварительно выполненные расчеты показали, что энергия фотонов ПРИ релятивистских электронов в выбранной геометрии измерений лежит в области от 3 до 8 кэВ, при этом рефлексy ПРИ проявляются в виде набора пиков с шириной порядка 10-100 эВ. Учитывая спектральные характеристики ожидаемого сигнала и высокую скважность пучка электронов в качестве детектора регистрируемого излучения были выбраны полупроводниковые кремневые детекторы X-123SDD серии FAST, позволяющие обрабатывать загрузки рентгеновского излучения до 10^6 фот/с при энергетическом разрешении порядка 100 эВ и эффективности регистрации близкой к 100%.

Для повышения стабильности работы установки была разработана система обратной связи между микротроном и пропорциональной камерой, непрерывно измеряющей интенсивность пучка электронов. Данная система позволила избежать перегрузок детектора, связанных с нестабильностью интенсивности пучка электронов.

В экспериментах по измерению дифракции рентгеновского излучения, во входном фланце мишенной камеры вакуумный канал транспортировки пучка электронов заменялся на рентгеновскую трубку с вольфрамовым анодом.

Важной деталью, во многом предопределившей успешное проведение экспериментов, стала разработанная оснастка для исследования порошковых мишеней, основной особенностью которой является использование только

органических конструкционных материалов, что позволило наблюдать ПРИ в условиях минимально допустимого вклада фонового излучения. На Рисунке 2 представлена разработанная сборка для использования в условиях высокого вакуума.

Модернизация экспериментальной установки позволила производить требующиеся измерения в низкофоновых условиях, что является важным требованием в рамках поставленных задач измерения ПРИ из порошковых мишеней.

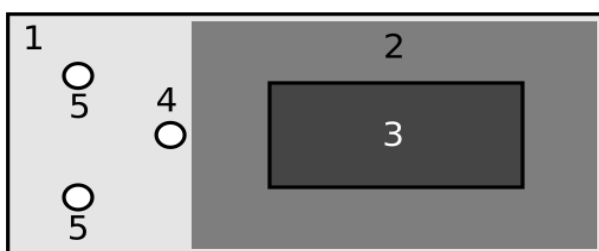


Рисунок 2 – Разработанная сборка мишенного узла для использования в условиях высокого вакуума: 1) пластина из оргстекла; 2) плёнка майлара толщиной 20 мкм; 3) порошок; 4) центровочное отверстие; 5) отверстия для крепления к гониометру

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования ПРИ из вольфрамового порошка. Рассматриваются спектральные характеристики дифракционного сигнала, образующегося при взаимодействии со средой реальных фотонов рентгеновского излучения и виртуальных фотонов кулоновского поля релятивистских электронов.

В релятивистском случае, когда скорость налетающих электронов близка к скорости света, кулоновское поле электронов значительно деформируется, вытягиваясь в поперечном направлении по отношению к направлению движения электронов, что делает более эффективным взаимодействие электрона с атомами среды. Для упрощения описания процессов взаимодействия электрона с веществом поле электрона

рассматривается в виде набора независимых волн с широким спектром, данный набор называется полем виртуальных (псевдо-) фотонов, а сам метод носит название «метод виртуальных фотонов». В рамках данного метода рассматриваются процессы рассеяния и поглощения таких частиц в приближении реальных фотонов. В частности, ПРИ рассматривается как дифракция виртуальных (псевдо-) фотонов на кристаллической решётке, при этом, электрон является источником поля виртуальных фотонов.

Спектрально-угловые характеристики ПРИ зависят от Лоренц-фактора налетающих частиц, размера зерна мишени, параметров элементарной ячейки и заряда ядра атома. Характеристики дифрагированного излучения, образующегося при взаимодействии свободных фотонов рентгеновского излучения с веществом, также зависят от этих параметров и спектры обоих излучений близки в случае, если угловое распределение рентгеновского пучка близко к распределению виртуальных фотонов кулоновского поля налетающих заряженных частиц.

Далее, на Рисунках 3а и 3б представлены спектры ПРИ и дифрагированного рентгеновского излучения соответственно, измеренные для угла наблюдения 150° . Размер зёрен порошка вольфрама составлял величины $1,25 \text{ мкм} \pm 0,45 \text{ мкм}$. Как можно отметить, в измеренный спектр также вносят вклад пики характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) примесей, являющиеся фоновыми.

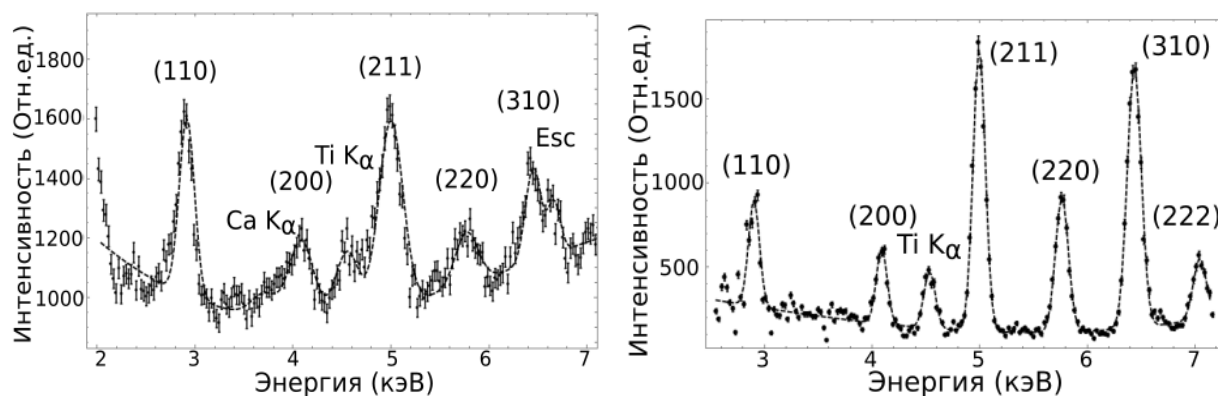


Рисунок 3 – Спектры ПРИ (слева) и дифрагированного рентгеновского излучения (справа), измеренные для угла наблюдения 150° .

Для разделения вкладов ПРИ и фоновых пиков ХРИ было проведено фитирование измеренного спектра суммой кубической функции и семи функций Гаусса, чтобы определить вклад каждой из них в общий спектр. Фитирование пиков ПРИ и ХРИ функцией Гаусса обосновывается тем, что величина энергетического разрешения детектора существенно превышает натуральную спектральную ширину пиков ПРИ и ХРИ. Аналогичное разделение вкладов также было выполнено и для эксперимента по измерению спектра дифракции реальных фотонов рентгеновского излучения. Результаты фитирования измеренных спектров ПРИ и дифрагированного рентгеновского излучения представлены на Рисунках 4а и 4б соответственно.

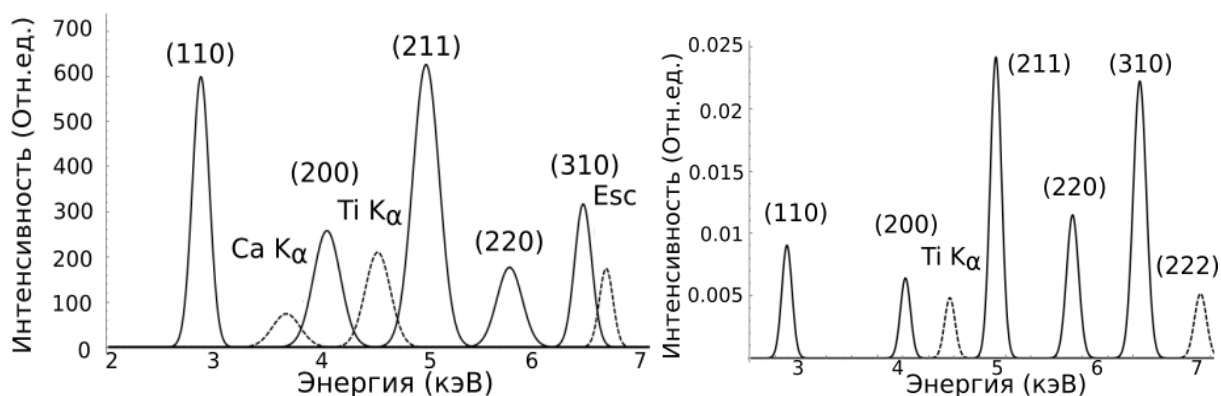


Рисунок 4 – Результаты фитирования измеренных спектров ПРИ и дифрагированного рентгеновского излучения.

Сопоставление отношения выхода пиков ПРИ к выходу дифрагированного рентгеновского излучения для каждого семейства кристаллографических плоскостей, представленное на Рисунке 5, показало, что отношение выхода пиков ПРИ к соответствующим дифракционным пикам рентгеновского излучения уменьшается с ростом энергии пиков. Данную особенность можно объяснить тем, что для более высоких по энергии пиков длина формирования ПРИ увеличивается и может превышать размер кристаллитов. Данная особенность означает подавление ПРИ из-за

отсутствия насыщения выхода, который, с одной стороны, пропорционален длине пути электрона в кристалле, а с другой – длине фотопоглощения.

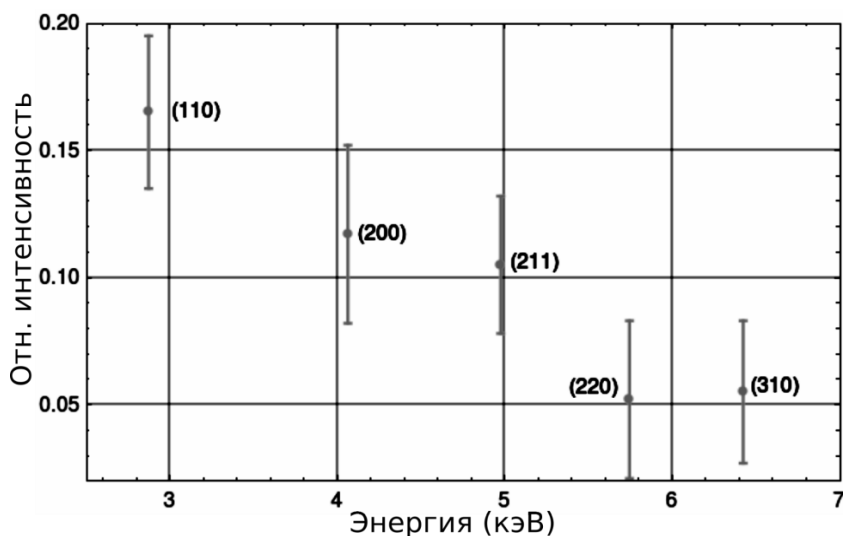


Рисунок 5– Отношение выхода пиков ПРИ к выходу дифрагированного рентгеновского излучения для каждого семейства кристаллографических плоскостей.

В третьей главе проведено исследование выхода ПРИ из алмазных порошков с различным размером зёрен. Выполненные исследования направлены на выявление зависимостей свойств ПРИ от размера зерна. Исследовалось влияние размера зёрен на ширину на полувысоте и отношение выходов спектральных пиков ПРИ.

В экспериментах спектры ПРИ измерялись под углами 150° и 180° относительно направления движения электронов. Излучение в направлении противоположном вектору скорости заряженных частиц представляет особый интерес исходя из того, что амплитуда ПРИ в данной геометрии возрастает прямо пропорционально, а ширина пика уменьшается обратно пропорционально квадрату энергии налетающей заряженной частицы.

Экспериментальные исследования зависимости параметров ПРИ от размеров зерна проводились на той же установке, что и исследования, представленные во второй главе диссертации. Телесные углы, в которых

регистрировалось излучение для углов наблюдения 150° и 180° относительно направления движения электронов, составляли величины 2×10^{-4} ср и 7×10^{-4} ср соответственно.

Эксперименты проводились с тремя алмазными порошками с размерами зёрен $0.3 \text{ мкм} \pm 0.1 \text{ мкм}$, $6 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ и $42 \text{ мкм} \pm 7 \text{ мкм}$. Толщина каждой мишени составляла величину около 1 мм. В образцах были выявлены примеси кремния, кальция, марганца, хрома, железа, чьи энергии характеристических линий находятся вне проявления интересующих пиков ПРИ. На Рисунке 6 представлены спектры, измеренные при углах наблюдения 150° и 180° относительно направления движения электронов для трёх мишеней. Стоит отметить, что фотоны спектральных пиков ПРИ, имеющие энергию 3,01 кэВ, 3,12 кэВ, 4,92 кэВ, 5,09 кэВ имеют длину ослабления 31,8 мкм, 35,6 мкм, 165,5 мкм, 143,1 мкм соответственно.

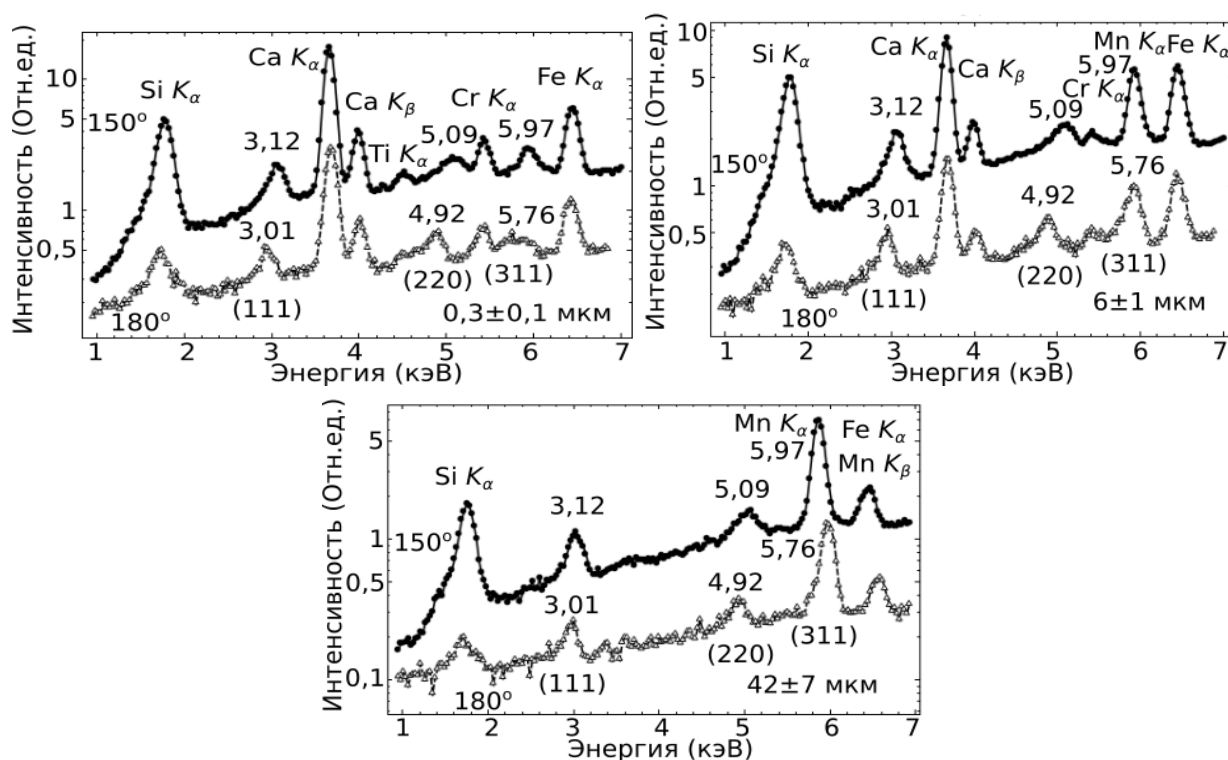


Рисунок 6 – Спектры, измеренные из порошковых мишеней с размером зёрен $0.3 \text{ мкм} \pm 0.1 \text{ мкм}$ (а), $6 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ (б) и $42 \text{ мкм} \pm 7 \text{ мкм}$ (в).

В Таблице 1 представлены результаты обработки спектров ПРИ, измеренного из порошков с различным размером зерна.

Таблица 1 – Результаты обработки спектров ПРИ, измеренного из порошков с различным размером зерна.

размер зерна, угол наблюдения	(111)		(220)	
	Ширина	Выход	Ширина	Выход
0.3 мкм $\pm$ 0.1 мкм 150°	0,22 кэВ	$8,45 \times 10^6$	0,36 кэВ	1.01×10^7
0.3 мкм $\pm$ 0.1 мкм 180°	0,19 кэВ	1.5×10^6	0,23 кэВ	2.25×10^6
6 мкм $\pm$ 1 мкм 150°	0,21 кэВ	8.32×10^6	0,32 кэВ	8.9×10^6
6 мкм $\pm$ 1 мкм 180°	0,18 кэВ	1.54×10^6	0,2 кэВ	1.8×10^6
42 $\pm$ 7 мкм 150°	0,17 кэВ	3.45×10^6	0,35 кэВ	6.8×10^6
42 $\pm$ 7 мкм 180°	0,14 кэВ	0.52×10^6	0,21 кэВ	1×10^6

На основе выполненных в данной главе исследований удалось зафиксировать подавление выхода ПРИ для фотонов с большей энергией относительно рефлексов с меньшей энергией при уменьшении размера зерна. Данная особенность может быть объяснена исходя из уменьшения относительного объёма мишени, в которой формируется ПРИ.

В четвёртой главе проводятся экспериментальные исследования ПРИ из порошков вольфрама с размером зерна 1,25 мкм $\pm$ 0,45 мкм и никеля со средним размером зёрен 1,56 мкм, а также из нанопорошков алмаза с размером зёрен 5 нм $\pm$ 1 нм и платины со средним размером зёрен 6,39 нм. Измерения проводились на экспериментальной установке, описанной в первой главе.

Основной интерес в данном разделе состоит в изучении свойств ПРИ, генерирующегося в порошковых мишенях с размером зёрен менее 100 нм. Хорошо известно, что при уменьшении размера зёрен меньше области

когерентного дифракционного рассеяния рентгеновского излучения в кристаллических средах наблюдается уширение спектральных линий дифрагированного рентгеновского излучения. Данное явление описывается формулой Шеррера и нашло применение в диагностике размеров зёрен конденсированных сред. Учитывая схожую с дифракцией рентгеновского излучения природу формирования ПРИ стоит ожидать, что при уменьшении размера зёрен спектральные пики ПРИ также должны уширяться. Таким образом, основная задача в рамках данной главы состоит в изучении спектральных характеристик ПРИ, генерирующегося в порошках с размером зёрен менее характерных размеров области когерентного дифракционного рассеяния.

В первой части работы проведены измерения спектров ПРИ из наноразмерных порошков алмаза с размером зёрен $5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$. Для исследования зависимости выхода ПРИ в области размера зёрен порядка и менее 100 нм были выбраны порошки, изготовленные лазерным и детонационным синтезом. Исследование элементного состава порошков показало наличие достаточно большого количества примесных элементов в порошке, изготовленном на основе детонационного синтеза. Данная особенность не позволяла проводить измерения ПРИ в виду проявления множества пиков ХРИ примесных элементов. Результаты аналогичного измерения для порошка, изготовленного лазерным синтезом, приведены в Таблице 2.

Из представленных результатов можно отметить, что существенный фоновый вклад в интересующую область спектра ПРИ будут давать только примеси кальция и железа, проявляющиеся при энергиях 3.69 кэВ (линия кальция K_α), 4.01 кэВ (линия кальция K_β), 6.40 кэВ (линия железа K_α), 7.06 кэВ (линия железа K_β). Также стоит отметить, что размер зёрен и однородность порошка контролировались на основе сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Таблица 2 – Элементный состав порошка, произведённого лазерным синтезом.

Элемент	Вес. %	Атомный %	Интенсивность	Ошибка %
C	86.72	91.88	610.46	3.71
O	8.49	6.75	18.68	15.91
Al	0.01	0.01	0.41	83.19
Si	0.25	0.11	8.01	53.23
Ca	2.44	0.78	45.36	12.59
Fe	2.08	0.47	17.12	20.39

Результаты измерения спектра ПРИ представлены на Рисунке 7. Как можно отметить, пики ПРИ убедительно зафиксированы для семейств плоскостей (111) и (220).

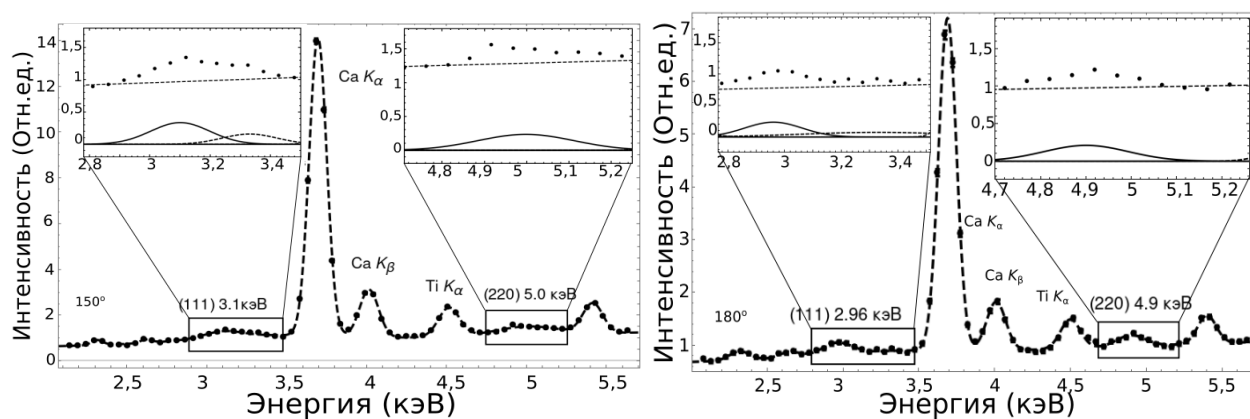


Рисунок 7 – Спектры нанопорошков, измеренных под углами 150 градусов (слева) и 180 градусов (справа). Экспериментальные данные (точки), фитирование (пунктирная линия), фитированные гауссианы (сплошная линия).

Обработка данных, полученных для различных размеров зёрен показала, что отношение выходов спектральных пиков ПРИ различно для

различных размеров зёрен порошковых мишеней, что представлено в Таблице 3.

Ещё одним важным результатом является зафиксированное уширение спектральной ширины пиков ПРИ при уменьшении размера зёрен порошковых мишеней. Так, при угле наблюдения 150 градусов для размера зёрен $42 \text{ мкм} \pm 7 \text{ мкм}$ спектральная ширина пика (111) составляет величину $173 \text{ эВ} \pm 14 \text{ эВ}$, в то время как для размера зёрен $5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ аналогичная величина имеет значение $220 \text{ эВ} \pm 20 \text{ эВ}$.

Таблица 3 – Отношение выходов спектрального пика (111) к пику (220) ПРИ для различных размеров зёрен

Размер зерна	Отношение выходов	
	150°	180°
5 нм $\pm$ 1 нм	1.4 $\pm$ 0.4	1.26 $\pm$ 0.35
0.3 мкм $\pm$ 0.1 мкм	0.8 $\pm$ 0.15	0.66 $\pm$ 0.13
6 мкм $\pm$ 1 мкм	0.9 $\pm$ 0.2	0.85 $\pm$ 0.16
42 мкм $\pm$ 7 мкм	0.5 $\pm$ 0.1	0.5 $\pm$ 0.1

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В технической части работы разработана система обратной связи между микротроном и диагностической пропорциональной камерой, что позволило избежать перегрузок детектора, связанных с нестабильностью интенсивности пучка электронов. Данный результат является одним из определяющих для выполнения измерений ПРИ с низким выходом фотонов для порошковых мишеней с нанонаразмерными зёрнами. Вторым важным результатом является разработка мишенного узла, позволившим проводить измерения с порошковыми мишенями в условиях низкого фона.

Использование в работе порошковых мишеней из различных элементов и проведение измерений ПРИ при различных углах наблюдения позволило уверенно зафиксировать и интерпретировать искомые эффекты. В частности, в работе использовались порошковые мишени алмаза, никеля, вольфрама и платины. Измерения показали, что спектры ПРИ достаточно хорошо согласуются с кинематической теорией ПРИ для поликристаллических сред по положению, форме и относительной интенсивности пиков. В частности, зафиксированное изменение положения спектральных пиков ПРИ при углах наблюдения 150° и 180° доказывает природу наблюдаемых явлений.

Показано, что при размере зёрен, когда длина фотопоглощения существенно больше, чем размер зёрен, пики ПРИ уширяются, а выход уменьшается. Данная особенность связана с уменьшением области формирования излучения, в которой излучение формируется в когерентном режиме. По аналогии, подобная ситуация наблюдается в дифракционном рассеянии рентгеновского излучения.

Показано, что при уменьшении размера зёрен порошковых мишеней отношение выхода пиков ПРИ от различных семейств кристаллографических плоскостей изменяется для фиксированного угла наблюдения излучения. В частности, выход спектральных пиков подавляется для больших энергий фотонов.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных библиометрических базах

1. Klyuev, A.S. Diffraction of virtual and real photons / Klyuev, A.S. V.I. Alekseev, A.N. Eliseyev, E. Irribarra, I.A. Kishin, A.S. Kubankin R.M. Nazhmudinov and S.V. Trofymenko // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15. – No 3. – P. C03009. – DOI 10.1088/1748-0221/15/03/C03009.

2. В. И. Алексеев, А. Н. Елисеев, А. С. Ключев, И. А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмуудинов / Влияние размера зерен порошковых мишеней на спектры параметрического рентгеновского излучения релятивистских электронов // (2021) Краткие сообщения по физике ФИАН, 48 (2), стр. 9-16.

Статьи в научных журналах и сборниках, тезисы докладов на конференциях

1. Klyuev, A.S. Parametric X-ray radiation in the backward geometry under interaction of relativistic electrons with crystalline and polycrystalline structures //A.S.Klyuev, A.S.Kubankin, A.N.Oleynik, A.V. Shchagin, K.A. Vokhmyanina, P.V.Karataev, V.Y.Ionidi, A.S.Chepurnov, M.B.Gromov/ The 7th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena Channeling 2016" SIRMIONE-DESENZANO DEL GARDA (Italy) September 25-30, 2016 — P. 140.
2. Klyuev, A.S.Parametric X-ray radiation from powders with different grain size //V.I.Alexeev, V.A. Astapenko, A.N.Eliseev, E.Irribara, V.Karpov, I.A.Kishin, Yu.A.Krotov, A.S.Kubankin, R.M.Nazhmuddinov, Al-Omari, S.Sakhno / The 7th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena Channeling 2016" SIRMIONE-DESENZANO DEL GARDA (Italy) September 25-30, 2016 — P. 125
3. Ключев, А.С. Параметрическое рентгеновское излучение в порошках с разным размером зерен //А.С. Ключев,К. А. Вохмянина, М. Б. Громов, О. О. Иващук, И. А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмуудинов, А. Н. Олейник, А. С. Чепурнов, А. В. Щагин/ LI Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2017). Сборник тезисов и список участников, с. 237 (11–16 марта 2017, ПИЯФ, Санкт-Петербург, Россия).

4. Клюев, А.С. Генерация быстрых нейтронов при помощи пирозлектрического эффекта //А.С. Клюев, К. А. Вохмянина, М. Б. Громов, О. О. Иващук, И. А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмудинов, А. Н. Олейник, А. С. Чепурнов, А. В. Шагин/Тезисы докладов XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М. И. Панасюка. М.: Университетская книга, 2017, с. 62 (30 мая – 1 июня 2017, МГУ, Москва, Россия).
5. Клюев, А.С. Влияние размеров зерен на выход параметрического рентгеновского излучения в поликристаллических средах //А.С. Клюев, В. И. Алексеев, А. Н. Елисеев, Э. Ф. Иррибарра, В. А. Карпов, И. А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмудинов / Тезисы докладов XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М. И. Панасюка. М.: Университетская книга, 2017, с. 62 (30 мая – 1 июня 2017, МГУ, Москва, Россия).
6. Клюев, А.С. Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов из мозаичных кристаллов //А.С. Клюев, В. И. Алексеев, А. Н. Елисеев, П. Н. Жукова, Э. Ф. Иррибарра, В. А. Карпов, И. А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмудинов/Тезисы докладов XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М. И. Панасюка. М.: Университетская книга, 2017, с. 52 (30 мая – 1 июня 2017, МГУ, Москва, Россия).
7. Клюев, А.С. Подавление роста культуры *Aspergillus niger* растворами солей тяжелых металлов на разных стадиях обработки //А.С. Клюев, В. В. Ключева, А. А. Сиротин, Н. С. Ляховченко/ I-й Российский Микробиологический конгресс: Сборник тезисов, Пущино, 17–18 октября 2017 года / Под редакцией Т.А. Решетиловой. – Пущино: Издательский дом "Вода: химия и экология", 2017. – С. 51.

8. Клюев, А.С. Установка "рентген 1" для изучения радиационных процессов взаимодействия релятивистских электронов с веществом //А.С. Клюев, В. И. Алексеев, А. Н. Елисеев, И. А. Кишин [и др. всего 6]/ Advances in Science and Technology : Сборник статей XVI международной научно-практической конференции, Москва, 16 октября 2018 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2018. – С. 104-105.
9. Клюев, А.С. Параметрическое рентгеновское излучение в порошках //А.С. Клюев, В.И. Алексеев, А.Н. Елисеев, Э.Ф. Иррибарра, И.А. Кишин, А. С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов/ Тезисы докладов XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М. И. Панасюка. М.: Университетская книга, 2019, с. 125 (29 мая – 31 мая 2019, МГУ, Москва, Россия).
10. Klyuev, A.S. Time-of-Flight particles identification in the MultiPurpose detector at NICA //A.S.Klyuev, Babkin, V.A., Buryakov, M.G., Dmitriev, A.V., Dronik, V.I., Golovatyuk, V.M., Lobastov, S.P., Mudrokh, A.A., Nazhmudinov, R.M., Oleinik, A.N., Rumyantsev, M.M., Vokhmyanina, K.A./ (2019) Proceedings of Science, 364, статья № 209.
11. Klyuev, A.S. Diffraction of Real and Virtual Photons in Crystalline Powders //A.S.Klyuev, V.I.Alexeyev, A.N.Eliseyev, E.Irribarra, I.A.Kishin, A.S.Kubankin, R.M.Nazhmudinov/ XIII International Symposium "RREPS-19" Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures 15-20 September 2019, – Belgorod, Russian Federation – P. 97.
12. Klyuev, A.S. Detector Simulation for the MPD Experiment //A.S.Klyuev, E.V.Bolotov, V.A.Babkin, K.A.Vokhmyanina, V.I.Dronik/ XIII International Symposium "RREPS-19" Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures 15-20 September 2019, – Belgorod, Russian Federation – P. 148.

Патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, патенты на промышленный образец, патенты на селекционные достижения, свидетельства на программу для электронных вычислительных машин, базы данных, топологию интегральных микросхем

1. Пат. 199118 Рос. Федерация. МПК H05H 6/00 Кубанкин А. С., Кищин И. А., Ключев А. С., Нажмудинов Р. М., Каплий А. А., Шевчук О. Ю; № 2020116493; заявл., 20.05.2020; опубл. 17.08.2020, Бюл. № 23.