На правах рукописи



Кищин Иван Александрович

Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов в средах с разной степенью упорядоченности атомной структуры

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Белгород - 2019

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

Научный руководитель:	Кубанкин Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук
Официальные оппоненты:	Малышевский Вячеслав Сергеевич,докторфизико-математическихнаук,заведующийкафедройтехническойфизики,Южный федеральный университет
	Галямин Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики, Санкт-Петербургский государственный университет
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) г.Томск

Защита диссертации состоится <u>«20» июня 2019 г.</u> в <u>16:00</u> часов на совета Д 212.015.15 при федеральном заседании диссертационного государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, корпус 17. ауд. 3.33.

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

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 212.015.15 при НИУ «БелГУ», д.ф.-м.н

Видия И.Е.Внуков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проверка существующих и разрабатываемых физико-математических моделей описания фундаментальных физических процессов всегда была актуальной задачей ввиду открывающихся новых возможностей применения результатов фундаментального характера для прикладных задач, которые ставит непрерывный решения научнотехнический прогресс. Основная часть настоящей работы посвящена изучению механизмов дифрагированного излучения И проверке соответствующих моделей излучения, образующегося при взаимодействии релятивистских заряженных частиц со средами, обладающими различной степенью упорядоченности атомной структуры.

Если говорить о дифрагированном излучении, то можно выделить два принципиально отличающихся механизма:

 – дифрагированное излучение образуется при рассеянии кулоновского поля заряженной частицы на атомах среды, в которой движется частица (дифракция виртуальных фотонов);

 – классическая дифракция свободных фотонов рентгеновского излучения, уже сформированных при взаимодействии частицы со средой, например, дифракция фотонов переходного излучения.

Для изучения механизмов дифракции виртуальных фотонов кулоновского поля заряженной частицы и реальных фотонов рентгеновского излучения важной задачей является разделение вкладов указанных В работе разработан механизмов. данной связи, В оригинальный экспериментальный подход, который позволил разделить вклады механизмов дифракции реальных и виртуальных фотонов.

С точки зрения актуальности тематики настоящего исследования для прикладных задач стоит упомянуть о следующих современных тенденциях использования излучения ускоренных частиц: переход методов диагностики

пучков релятивистских и ультрарелятивистских электронов в спектральную область рентгеновского излучения, разработка источников квазимонохроматического рентгеновского излучения, разработка новых подходов к диагностике структуры вещества. Очевидно, что для решения данных задач необходимо иметь апробированное теоретическое описание рассматриваемых процессов.

Целью диссертационной работы является проведение комплексного экспериментального исследования свойств параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), генерирующегося вследствие дифракции виртуальных фотонов кулоновского поля релятивистских электронов на атомах среды. Рассматривается излучение из сред, обладающих различной степенью упорядоченности атомной структуры – кристаллы, поликристаллы, порошки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

 модернизация установки "Рентген 1", включая создание новой диагностической системы пучка, контроля интенсивности пучка электронов с обратной связью и создание коллимированного фотонного канала с фильтром фоновых заряженных частиц;

- исследование спектрально-угловых характеристик ПРИ релятивистских электронов из вольфрамовой поликристаллической фольги;

- измерение спектров ПРИ релятивистских электронов из мозаичных кристаллов высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ);

 – разработка и изготовление порошковых мишеней, проведение измерений спектров ПРИ релятивистских электронов из порошковых мишеней;

 проведение измерений ориентационных зависимостей выхода излучения от угла поворота мишени для поликристаллических фольг и мозаичных кристаллов ВОПГ;

 сравнение полученных результатов с существующими теоретическими данными для поликристаллов, мозаичных кристаллов и порошков.

Научная новизна полученных результатов

 Впервые показана возможность генерации сигнала ПРИ, являющегося результатом дифракции виртуальных фотонов кулоновского поля заряженных частиц, в спектральной области, где дифракция свободных фотонов рентгеновского излучения невозможна.

 Разработан подход к разделению вкладов механизмов дифракции реальных и виртуальных фотонов, реализующихся при взаимодействии ускоренных заряженных частиц с периодическими средами.

– Впервые проведены измерения спектров ПРИ релятивистских электронов из порошковых мишеней, показано хорошее количественное согласие полученных результатов с теорией, основанной на кинематическом приближении теории ПРИ.

– Зарегистрирован дополнительный к ПРИ вклад дифрагированного излучения, генерирующегося при взаимодействии релятивистских электронов с мозаичными кристаллами. При этом сигнал первых двух порядков дифракции хорошо согласуется с кинематической теорией ПРИ.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная значимость работы определяется восполнением пробелов в современной физике излучения заряженных частиц. В частности, показаны дифракции различия механизмов реальных фотонов рентгеновского излучения и виртуальных фотонов кулоновского поля релятивистских электронов, a также выполнено сравнение результатов наблюдения спектрально-угловых характеристик ПРИ с существующими аналитическими моделями описания ПРИ.

Практическая значимость исследования связана с несколькими современными направлениями. Во-первых, работа имеет непосредственное отношение к разработке источников квазимонохроматического поляризованного рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой

энергией фотонов на основе ПРИ. Во-вторых, решаемые задачи связаны с разработкой новых подходов измерения параметров атомной и блочной структуры сред с частично-упорядоченной атомной структурой. Подход основывается на измерении спектрально-угловых характеристик дифрагированного рентгеновского сигнала. генерирующегося при взаимодействии релятивистских электронов с поликристаллами. В-третьих, результаты могут быть использованы для разработки новых методов диагностики пучков ускоренных заряженных частиц, основывающихся на измерении параметров дифрагированного рентгеновского излучения.

Таким образом, диссертация направлена не только на восполнение значительного пробела в сугубо научных знаниях, но и имеет интерес для возможного прикладного использования в будущем.

Методы исследований

Эксперименты базе выполнялись на ускорительного комплекса «Пахра» отдела физики высоких энергий Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. В качестве источника ускоренных электронов использовался микротрон с энергией 7 МэВ, который является инжектором синхротрона C-25P «Пахра». Для регистрации излучения использовались современные дрейфовые полупроводниковые кремневые детекторы фирмы Amptek. Положение мишени задавалось и контролировалось с помощью гониометра, разработанного основе вакуумных моторизированных на контролеров фирмы Standa. В ходе прецизионных позиционеров И эксперимента разрабатывались и были использованы методы подавления радиационного фона на основе жесткой коллимации измеряемого сигнала и разработки низкофоновой геометрии установки. Использовались современные методы автоматизации экспериментов с использованием графического языка программирования Labview.

Теоретические расчеты были выполнены на основе известных моделей ПРИ релятивистских электронов из поликристаллов и мозаичных кристаллов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается сертифицированным откалиброванным оборудованием, воспроизводимостью результатов для разных мишеней, малой статистической ошибкой и соответствием полученных результатов расчётам, выполненным на основе апробированных методов.

Выполнено сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями, которое показало хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами.

Результаты, полученные в ходе выполненных исследований, не противоречат известным результатам в обсуждаемой области физики и могут быть воспроизведены.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм конверсии виртуальных фотонов кулоновского поля релятивистских заряженных частиц в реальные фотоны рентгеновского излучения позволяет расширить спектральную область реализации механизма брэгговской дифракции рентгеновского излучения в кристаллических средах.

2. В геометрии наблюдения ПРИ релятивистских электронов, когда излучение регистрируется в направлении противоположном направлению движения излучающих электронов, изменение угла ориентации кристаллической мишени относительно оси пучка излучающих ускоренных электронов приводит к смещению положения спектральных пиков ПРИ в более мягкую спектральную область, в то время как механизм дифракции

рентгеновского излучения предсказывает смещение спектральных пиков в более жёсткую спектральную область.

3. Кинематическая теория ПРИ позволяет количественно описать спектрально-угловые характеристики ПРИ, генерирующегося вследствие взаимодействия релятивистских электронов с порошками.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на двенадцати международных научных конференциях и на трех школах для молодых ученых: International Symposium radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS) 2013, 2015 и 2017 г.; Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами 2014 – 2018 г.; International conference on «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena — Channeling» 2014, 2016, 2018 г.; 10-я Курчатовская молодежная научная школа 2012 г.; XLIX и LI Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния Φ KC-2015, Φ KC-2017; 5th International Conference on «Electron, Positron, Neutron and X - ray Scattering under External Influences» 2017 г.

По результатам работы опубликовано восемь статей [1-8], из них две входят в список ВАК, пять – индексируются базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора

Соискатель внёс основной вклад во все этапы работы: обзор научной и технической литературы, аналитические расчёты, написание программ для автоматизации узлов экспериментальной установки, модернизация экспериментальной установки, разработка и испытание методик проведения экспериментов, 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 следующих научных проектах:

 В качестве исполнителя государственного задания № 3.1631.2017/ПЧ.

2. В качестве исполнителя гранта президента для молодых докторов наук МД-5748.2018.2.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и сокращений. Объем диссертации – 98 страниц, включая 37 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

B первой описывается главе диссертации экспериментальная установка "Рентген 1", на которой проводились исследования по изучению свойств ПРИ релятивистских электронов из ВОПГ, поликристаллических фольг и мишеней, изготовленных из порошков. В главе описаны основные узлы установки: микротрон, магнитооптическая система, мишенная камера, спектрометрическая гониометрическая система, система, система автоматической диагностики и контроля пучка. На рисунке 1 представлена схема установки "Рентген 1".

В качестве источника релятивистских электронов использовался микротрон (1) с энергией ускоренных электронов 7 МэВ, частотой следования импульсов 50 Гц, длительностью импульсов до 4 мкс с током в импульсе до 40 мА. Для транспортировки электронного пучка в камеру, где расположена мишень, используется магнитооптическая система, которая состоит из трех поворотных магнитов (2-4), двух пар квадрупольных линз (6), и корректора (7). Для уменьшения интенсивности пучка между первым и вторым поворотным магнитом были установлены два углеродных коллиматора (8) с апертурой 5 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.

Интенсивность и положение пучка контролировались с помощью цилиндра Фарадея (13) и пропорциональной газонаполненной камеры (11).

В ходе подготовки к эксперименту использовалась мишенная камера (5), которая позволила производить исследования в геометрии Брэгга с углами регистрации 150° и 180° относительно направления скорости электронов пучка. Модернизация вакуумной мишенной камеры состояла в установке дополнительных разработанных устройств – цилиндра Фарадея (13) для проведения абсолютных измерений и трехосевого вакуумного гониометра (14) для контроля положения использовавшихся мишеней.

Предварительно выполненные расчеты показали, что энергия фотонов ПРИ релятивистских электронов в выбранной геометрии измерений лежит в области от 1 до 10 кэВ, при этом рефлексы ПРИ проявляют себя как набор пиков с шириной до 100 эВ. Учитывая данные особенности и высокую скважность пучка электронов в качестве детектора излучения был выбран полупроводниковый кремневый детектор X-123SDD FAST, позволяющий обрабатывать потоки рентгеновского излучения с загрузкой до 10⁶ фот/с при энергетическом разрешении порядка 100 эВ. Первичные измерения показали наличие вклада рассеянных заряженных частиц в измеряемые спектры рентгеновского излучения, что давало дополнительную фоновую загрузку детектора. Учитывая данное обстоятельство, был разработан и установлен на спектрометрический канал магнитный фильтр (15) для подавления вклада фоновых заряженных частиц.

Также была обнаружена нестабильность тока пучка релятивистских электронов, что затрудняло проведение абсолютных измерений. Для подавления данного отрицательного эффекта была разработана автоматизированная система стабилизации тока пучка электронов с обратной связью.

Выполненная модернизация экспериментальной установки позволила производить требующиеся измерения в более низкофоновых условиях и при лучшей стабильности пучка электронов.

Во второй главе изложены результаты экспериментального исследования ПРИ в геометрии, когда излучение регистрируется в направлении обратном направлению движения излучающих электронов. Представлено описание первого наблюдения процесса дифракции в области, которая находится ниже дифракционного порога для рентгеновских лучей (далее данная область называется областью "аномальной" дифракции).

Экспериментальные исследования были выполнены на установке "Рентген 1", которая описывается в первой главе. Схема эксперимента представлена на рисунке 2. В экспериментах использовались две мишени: поликристаллическая вольфрамовая фольга толщиной 20 мкм и мозаичный кристалл ВОПГ толщиной 1 мм. Величина мозаичности (FWHM) выбранных мишеней составляла величины 5.44° для плоскости (200) вольфрамовой мишени и 0.4° для плоскости (002) графитовой мишени.



Рисунок 2 – Схема эксперимента и геометрия наблюдения.

В соответствии с рисунком 2 геометрия взаимодействия электронного пучка с мишенью может быть определена тремя векторами (\vec{g} – вектор обратной решётки; \vec{V} – вектор скорости излучающих электронов; \vec{n} – единичный вектор вдоль направления регистрации излучения) и соответствующими углами (α – угол ориентации мишени; β – угол

наблюдения излучения; ξ – угол дифракции). Энергия фотонов ПРИ определяется всеми тремя углами, в то время как в соответствии с законом Брэгга энергия при дифракции рентгеновского излучения (ДРИ) зависит только от угла ξ . Энергия фотонов ПРИ и ДРИ может быть рассчитана исходя из следующих выражений (используется система единиц $\hbar = c = 1$):

$$\omega^{\Pi P M} = \frac{-\vec{g} \cdot \vec{v}}{1 - \sqrt{\varepsilon} \vec{n} \cdot \vec{v}} = \begin{bmatrix} V \approx 1\\ \varepsilon \approx 1 \end{bmatrix} = \frac{g \cdot \cos(\alpha)}{2 \cdot \cos^2(\frac{\beta}{2})} \tag{1a}$$

$$\omega^{\text{ДРИ}} = \frac{g^2}{2\vec{n}\vec{g}} = \frac{g}{2\cos\left(\xi\right)} \tag{16}$$

Результаты измерений спектров ПРИ при различных углах ориентации мишеней представлены на рисунке 3. Измерения соответствуют случаю $\beta = 0$ и $\alpha \neq 0$. Положение зафиксированных пиков ПРИ составило величины 3909 эВ ± 3 эВ для плоскости (200) вольфрамовой мишени и 1857 эВ ± 1 эВ для плоскости (002) ВОПГ.



Рисунок 3 – Спектры ПРИ, измеренные в геометрии обратного рассеяния при разной ориентации мишени. а) для фольги вольфрама; б) для ВОПГ. Красная область соответствует области, запрещённой для дифракции рентгеновского излучения.

Сдвиг пиков ПРИ в более мягкую спектральную область достоверно наблюдается для обеих мишеней, при α ≠ 0. Спектральная ширина пика ПРИ из вольфрамовой мишени составляет величину 132 эВ, что близко к

энергетическому разрешению детектора 137 эВ \pm 8 эВ. Для ВОПГ мишени те же величины были 112 эВ и 111 эВ \pm 3 эВ соответственно.

Измеренные зависимости положения пиков ПРИ от угла ориентации представлены на рисунке 4. Сплошные кривые соответствуют расчету $\omega^{\Pi P U}$ и $\omega^{\Pi P U}$, выполненному на основе выражений (1 а) и (1 б) соответственно (зависимость $\omega^{\Pi P U}$ рассчитывалась при условии $\xi = \alpha$).



Рисунок 4 – Зависимость положения пиков ПРИ от угла ориентации. а) для вольфрама; б) для ВОПГ. Сплошными кривыми представлены, расчетные значения по формулам (1 а) и (1 б). Красная область соответствует области, запрещённой для дифракции рентгеновского излучения.

Также стоит отметить симметричную форму представленных на рисунке 4 зависимостей относительно угла ориентации $\alpha = 0^{\circ}$, что свидетельствует о правильной юстировке экспериментальной установки при установке детектора под углом наблюдения 180°.

Зависимости выхода ПРИ от угла ориентации мишени представлены на рисунке 5. Формы кривых характерны для текстурированных поликристаллов (рисунок 5 а)) и мозаичных кристаллов (рисунок 5 б)). Интенсивность пиков была нормирована на выход линии ХРИ М_α для вольфрамовой мишени и К_α (Cu) линий для мишени ВОПГ (медная фольга толщиной 20 мкм была установлена за мишенью ВОПГ).



Рисунок 5 – Ориентационные зависимости а) плоскости (200) текстурированного вольфрама, б) ориентационная зависимость плоскости (002) ВОПГ.

Теоретические кривые, представленные на рисунке 5, были рассчитаны на основе кинематического приближения ПРИ в соответствии с формулой из работы¹, разработанной для мозаичных мишеней. Из представленных зависимостей можно наблюдать хорошее согласие между теорией и экспериментальными данными.

Сдвиг пика ПРИ в область "аномальной" дифракции наблюдался для обеих мишеней с различной атомной структурой. Структуру вольфрамовой мишени можно рассматривать как текстурированный поликристалл, поэтому типичный провал в ориентационной зависимости ПРИ не наблюдался. С другой стороны, мишень ВОПГ можно рассматривать как кристаллическую мишень в соответствии с условием $\sigma \ll \sqrt{\gamma^{-2} + \omega_0^2/\omega^2}$ (σ – угол мозаичности мишени, ω_0 – плазменная частота, γ – фактор Лоренца). В

¹ Alexeyev, V. I. Observation of parametric X-ray radiation in an anomalous diffraction region / V. I. Alexeyev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, et al. // Physics Letters A. – 2016.–.380.– P. 2892–2896

отличие от ПРИ из вольфрамовой мишени, для графитовой мишени наблюдается типичный для ПРИ провал в ориентационной зависимости.

В третьей главе проведено исследование выхода ПРИ из мозаичных кристаллов ВОПГ. Использовались три двухсторонних образца ВОПГ с мозаичностью 0.4°±0.1°, 0.8°±0.2° и 1.7°±0.5° размерами 10х10х1 мм³. Исследования проходили в геометрии Брэгга под углом наблюдения 180°.

Исследования проходили в тех же экспериментальных условиях, которые были описаны во второй главе. Первые проведенные эксперименты с ВОПГ выявили присутствие в измеренных спектрах семи порядков дифракции (см. рисунок 6). Для нормировки выхода ПРИ на ток пучка электронов на заднюю поверхность графитовой мишени была установлена медная фольга. С учётом сигнала ХРИ меди (пики при энергиях 8.04 кэВ и 8.93 кэВ) достоверно были выявлены первые четыре порядка дифракции (рисунок 7). Наблюдается хорошее совпадение теоретических расчетов и экспериментальных данных по положению спектральных пиков ПРИ.



Рисунок 6 – Просуммированный Рисунок 7 – Спектр ПРИ из ВОПГ с спектр ПРИ из ВОПГ с установленной медной фольгой. мозаичность 0.8°.

Также, были измерены ориентационные зависимости выхода ПРИ для различных плоскостей и величин мозаичности мишени. На рисунке 8 представлены результаты измерения для мишени ВОПГ с мозаичностью 0.4°. Видно, что характерный провал в ориентационных зависимостях проявляется четко только для первого порядка дифракции. С повышением порядка

дифракции наблюдается сужение ориентационной зависимости. Подобная особенность наблюдалась и для остальных двух мишеней. На рисунке 8 также представлены результаты сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами, выполненными на основе кинематической теории ПРИ из работы¹, учитывались длины фотопоглощения 12 мкм для плоскости (002), 96 мкм для плоскости (004), 333 мкм для плоскости (006), 800 мкм для плоскости (008).

Из представленных результатов видно, что экспериментальные данные первых двух порядков дифракции хорошо согласуются по форме и относительной интенсивности с теоретическими расчетами, тогда как для рефлексов третьего и четвертого порядков согласие теории и эксперимента существенно хуже. Данная особенность может быть связана с вкладом в излучение дифрагированного тормозного излучения, которое образуется в более глубоких слоях ВОПГ.



Рисунок 8 – Сравнение экспериментальных данных с теорией ПРИ (сплошная синяя кривая), рассчитанной по формуле из работы¹.

В четвертой главе представлены результаты первого наблюдения ПРИ релятивистских электронов из порошковых мишеней. Важной особенностью таких мишеней является отсутствие преимущественной ориентации кристаллитов, т.е. текстуры. Для решения поставленной задачи была использована установка "Рентген 1". В экспериментах были использованы два спектрометрических канала, расположенных под углами наблюдения 180° и 150° относительно вектора скорости движения электронов.

На первом этапе проводились эксперименты с алмазным порошком с размерами зерен 0.3 мкм \pm 0.1 мкм, 6 мкм \pm 1 мкм, 42 мкм \pm 7 мкм. В ходе экспериментов удалось зафиксировать только рефлексы ПРИ от плоскостей (111) и (220), совпадающие с соответствующими расчетными значениями в пределах \pm 0.03 кэВ. Тем не менее, обработка полученных результатов показала значительное количество примесей различных элементов, что препятствовало достоверной интерпретации результатов. Остальные пики ПРИ однозначно зафиксировать не удалось, поскольку области их проявления совпадают с областями проявления фоновых пиков ХРИ. Для сравнения с теорией полученных данных было недостаточно, так как удалось достоверно зафиксировать только два рефлекса ПРИ от плоскостей (111) и (220).

На втором этапе в качестве порошка был выбран вольфрам марки ПВ1. Размер зёрен составлял 0.8 - 1.7 мкм, чистота порошка составляла 99.986 %. Порошок вольфрама был выбран, прежде всего, исходя из высокой чистоты. На рисунках 9 и 10 представлены результаты измерения спектров ПРИ при углах наблюдения 180° и 150°. Измерения показали наличие рефлексов ПРИ от плоскостей (110), (200), (211), (220), (310). Пик ПРИ от плоскости (222) имеет положение вблизи пика вылета кремневого детектора, образующегося при неупругом рассеянии интенсивной L_{α} -линии вольфрама на атомах кремния.

Измерения спектра ПРИ под углом наблюдения 150° показали наличие сдвижки пиков ПРИ в область более жёстких энергий фотонов в сравнении с углом наблюдения 180°, что согласуется с теорией и подтверждает наблюдение именно рефлексов ПРИ. На рисунке 10 видно, что плоскость (310) сливается с пиком вылета. Также, на обоих спектрах проявляется пик с энергией 4.5 кэВ, соответствующий ХРИ титана (K_{α} Ti 4.51 кэВ), который входит в состав порошка.



Рисунок 9 – Сравнение с теорией при Рисунок 10 – Сравнение с теорией при угле наблюдения 180°. при угле наблюдения 150°.

Таким образом, выполненное сравнение полученных экспериментальных результатов для углов наблюдения 150° и 180° с теорией из работы², разработанной для идеальных поликристаллов, показало хорошее количественное согласие по положению, форме и интенсивности пиков.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты, согласно поставленным задачам диссертационного исследования, можно разделить на следующие:

- Проведена модернизация установки "Рентген 1". В частности, создана новая система диагностики и контроля пучка электронов с обратной связью,

² Astapenko, V. Anomalous peak in the spectrum of polarizational bremsstrahlung from relativistic electrons moving through a solid target/ V. Astapenko, N. Nasonov, P. Zhukova // J. Phys. B, At. Mol. Opt. Phys. – 2007. – V. 40. – P.1337–1346.

в результате чего удалось стабилизировать интенсивность пучка электронов и выполнить эксперименты при равномерной загрузке детектора излучения. Разработан и изготовлен коллимированный фотонный канал с фильтром фоновых заряженных частиц. Использование данного канала позволило снизить фоновую нагрузку на детектор и увеличить достоверность полученных данных.

– Измерены спектры и ориентационные зависимости выхода ПРИ релятивистских электронов из высокоориентированного пиролитического графита с разной мозаичностью. Измерения, выполненные в геометрии обратного рассеяния, позволили достоверно зафиксировать семь порядков дифракции. При этом в ориентационной зависимости для первого порядка дифракции наблюдается характерный для ПРИ провал, в то время как для остальных порядков дифракции провал отсутствует.

– Измерения спектров ПРИ релятивистских электронов из высокоориентированного пиролитического графита и текстурированной фольги вольфрама показали, что в геометрии обратного рассеяния спектральные пики ПРИ смещаются в область более мягких энергий фотонов, в то время как спектр дифрагированного рентгеновского излучения смещается в область больших энергий.

 – Показано, что в геометрии обратного рассеяния, ПРИ может проявляться в области, запрещённой для дифракции фотонов рентгеновского излучения.

– Изготовлены порошковые мишени для наблюдения излучения, генерирующегося при взаимодействии пучка релятивистских электронов с мишенью. Изготовленные мишени использовались для проведения измерений спектров ПРИ релятивистских электронов, взаимодействующих с порошками алмаза и вольфрама.

– Выполнено сравнение полученных экспериментальных результатов с существующими теориями ПРИ, разработанными для поликристаллических сред и мозаичных кристаллов. Показано хорошее согласие теории и

эксперимента по положению и форме зафиксированных спектральных пиков ПРИ, а также по форме и ширине ориентационных зависимостей выхода ПРИ. Тем не менее, ориентационные зависимости выхода ПРИ, измеренные для мозаичных кристаллов ВОПГ, хорошо согласуются с теорией для первых двух порядков дифракции, в то время как следующие порядки имеют меньшую ширину и большую величину ориентационных зависимостей в сравнении с теорией. Данная особенность, предположительно, может быть обоснована вкладом дифрагированного тормозного излучения.

Таким образом, в работе проведены исследования свойств ПРИ релятивистских электронов из текстурированных поликристаллов, мозаичных кристаллов высокоориентированного пиролитического графита с различной мозаичностью и из мишеней, изготовленных из порошков. Данная особенность работы является уникальной, поскольку в одинаковых условиях были измерены характеристики ПРИ из мишеней, имеющих различную степень упорядоченности атомной структуры.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- Алексеев, В. Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения при взаимодействии релятивистских электронов с веществом на установке "Рентген 1" / В. Алексеев, В. Астапенко, А. Елисеев, Э. Иррибарра, В. Карпов, И. Кищин, Ю. Кротов, А. Кубанкин, Р. Нажмудинов, М. Аль-Омари, С. Сахно// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017 – № 7. – С.13-18,
- Алексеев, В. И. Экспериментальное исследование поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристаллах с субмикронным размером зерна / В. И. Алексеев, Э. Ф. Иррибарра, И. А. Кищин, А. С. Кубанкин, Р. М. Нажмудинов, Н. Н. Насонов, В. В Полянский, В. И. Сергиенко // Современные наукоемкие технологии. –2013. – № 6. – С.44-46.

- Alekseev, V. I. // Research of the polarization bremsstrahlung of relativistic electrons in polycrystalline targets / V. I. Alekseev, A. N. Eliseev, E. F. Irribarra, I. A. Kishin, A. S. Kubankin, R. M. Nazhmudinov, V. V. Polyanski, V. I. Sergienko, P. N. Zhukova // Nuclear Instruments a. Methods in Phys. Research B. 2015 V. 342. P. 47–51.
- Alexeyev, V. I. Observation of parametric X-ray radiation in an anomalous diffraction region / V. I. Alexeyev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, I. A. Kishin, A. S. Kubankin, R. M. Nazhmudinov // Physics Letters A. – 2016.–.380.– P. 2892–2896
- Alekseev, V. I. Evolution of the characteristics of Parametric X-ray Radiation from textured polycrystals under different observation angles / V. I Alekseev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, I. A. Kishin, A. S. Klyuev, A. S. Kubankin, R. M. Nazhmudinov, P. N. Zhukova // Physics Letters A. – 2018. – 382. – P. – 503-506
- Alekseev, V. I. Polarization bremsstrahlung by relativistic electrons in backscattering geometry for diagnosing atomic structure of polycrystals / V. I. Alekseev, A. N. Eliseev, E. F. Irribarra, I. A. Kishin, A. S.Kubankin, V. S. Levina, I. S. Nikulin, R. M. Nazhmudinov, V. I. Sergienko // Advanced Materials Research. – 2015. –V. 1084. – P. 246–251.
- Alekseev, V.I. Parametric x-ray radiation and texture of polycrystalline foils / V.I. Alekseev, A.N. Eliseyev, E. Irribarra, I.A. Kishin, A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov // Resource-Efficient Technologies. – 2018. – V.2. – 12– 15.
- Alekseev, V. I. Parametric X-ray Radiation from powders / V. I. Alekseev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra I. A. Kishin, A. S. Klyuev, A. S. Kubankin, R. M. Nazhmudinov, S.V. Trofymenko, P. N. Zhukova, // Physics Letters A. – 2019. – V. 383, Iss. 8. – P. 770-773.