

На правах рукописи

УДК 538.9

Кубанкин Александр Сергеевич

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОЙ
РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКИ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ ВЕЩЕСТВА НА
ОСНОВЕ ПУЧКОВ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Специальность

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Белгород 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
Сергиенко Владимир Иванович
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Гришин Владислав Константинович
доктор физико-математических наук,
профессор Жакин Анатолий Иванович
доктор физико-математических наук,
профессор Хоконов Мурат Хазреталиевич

Ведущая организация: Южный федеральный университет

Защита состоится «30» марта 2015 года в «12-00» часов на заседании совета Д 002.023.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН, конференц-зал, по адресу: ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года. Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Отделение физики твёрдого тела.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 002.023.03

профессор, доктор физико-математических наук

М.А. Казарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Физика взаимодействия быстрых заряженных частиц и излучения с веществом всегда привлекала внимание исследователей многообразием физических процессов и широкими прикладными возможностями. Проблема коллективного отклика атомов среды на вносимое извне электромагнитное возмущение занимает особое место в обсуждаемой области физики, поскольку в указанных условиях открываются различные пути исследования атомной структуры вещества и разработки источников электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне.

Диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому изучению механизмов взаимодействия релятивистских электронов с конденсированным веществом и затрагивает актуальную проблему в физике конденсированного состояния – исследование новых возможностей в диагностике атомной структуры вещества.

Основное внимание в диссертации уделяется коллективным радиационным эффектам, реализующимся при взаимодействии быстрых электронов с веществом, главным образом, поляризационному тормозному излучению (ПТИ) и его когерентной составляющей – параметрическому рентгеновскому излучению (ПРИ). Характерная область энергий пучков электронов в исследуемых процессах имеет величину порядка 10 МэВ, а энергия излучаемых фотонов попадает в типичный рентгеновский диапазон от единиц до десятков кэВ.

Интерес к выбранной теме обусловлен, прежде всего, обилием нерешенных физически важных проблем в области физики излучения заряженных частиц, а также широкими возможностями реализации новых

приложений. К числу таких проблем относятся потребность в разработке новых энергодисперсионных методов диагностики атомной структуры вещества и источников рентгеновского излучения.

В диссертационной работе приводятся результаты экспериментальных исследований в трех направлениях:

- разработка новых энергодисперсионных методов исследования атомной структуры поликристаллов на основе измерения спектров ПТИ;
- исследование возможности измерения функции распределения блоков мозаичных кристаллов по углам ориентации;
- исследование возможности увеличения яркости источников квазимонохроматического рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой энергией фотонов, основанных на механизме ПРИ.

Потребность в разработке новых источников вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, альтернативных по своим характеристикам синхротронным накопителям, в настоящее время обоснована расширением прикладных задач, использующих излучение в различных спектральных диапазонах. В работе приводятся результаты теоретического исследования механизмов переходного излучения (ПИ), излучения Вавилова-Черенкова и ПРИ, рассматривающиеся в качестве источников вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, предложены методы увеличения выхода данных механизмов излучения.

Таким образом, диссертационные исследования направлены на решение актуальных задач диагностики атомной и блочной структуры вещества, а

также разработки основ источников в диапазоне от вакуумного ультрафиолета до рентгеновского излучения.

ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Исследование механизмов взаимодействия быстрых электронов с веществом, перспективных с точки зрения разработки новых методов диагностики атомной структуры твердотельных мишеней и источников рентгеновского излучения с заданными спектрально-угловыми характеристиками. Разработка математических моделей данных механизмов, расчет оптимальных условий планируемых экспериментов и проведение экспериментов по верификации обсуждаемых эффектов.

Для достижения целей работы были поставлены и решены следующие **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ:**

- На основе микротрона с энергией электронов 7 МэВ Отдела физики высоких энергий ФИАН разработать экспериментальную установку для измерения спектрально-угловых характеристик рентгеновского излучения, генерирующегося при взаимодействии релятивистских электронов с веществом.
- Выполнить расчёт оптимальных условий проведения экспериментов по исследованию ПТИ релятивистских электронов в поликристаллических средах при различных углах наблюдения процесса излучения в задней и передней полусфере, в том числе в направлении противоположном импульсу излучающего электрона (далее – “геометрия обратного рассеяния”). Разработать методику проведения экспериментов, провести эксперименты.

- Разработать методику проведения экспериментов по изучению эффекта сужения спектральной линии ПТИ в геометрии обратного рассеяния. Выполнить экспериментальное исследование данного эффекта в текстурированных поликристаллах и поликристаллах с субмикронным размером зёрен. Выполнить анализ результатов исследования с целью определения эффективности использования ПТИ в геометрии обратного рассеяния для диагностики атомной структуры поликристаллических сред.
- Выполнить расчёт оптимальных условий проведения эксперимента по исследованию эффекта увеличения выхода ПРИ в геометрии скользящего взаимодействия излучающего электрона с плоскостью поверхности кристаллической мишени в асимметричной геометрии дифракции. На основе расчётов разработать методику экспериментального исследования и провести эксперимент.
- Выполнить расчёт оптимальных условий для проведения измерений функции распределения разориентации микроблоков мозаичных кристаллов в произвольно заданной плоскости на основе рассеяния широкополосного рентгеновского излучения исследуемой мишенью. Разработать методику проведения измерений, установку и провести измерения функции распределения разориентации микроблоков мозаичных кристаллов.
- Теоретически исследовать возможность измерения анизотропии распределения мозаичности кристаллов на основе ПРИ релятивистских электронов.

- Разработать математическую модель источника рентгеновского излучения, основанного на механизмах переходного, тормозного и когерентного тормозного излучений в режиме многократного прохождения пучка электронов через мишень.
- Разработать математическую модель и рассчитать характеристики источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, основанного на излучении Вавилова-Черенкова, генерирующегося при скользящем падении излучающего электрона на поверхность аморфной мишени в режиме трансформации конуса излучения Вавилова-Черенкова.
- Теоретически исследовать возможность генерации излучения Вавилова-Черенкова в слоистой наноструктуре релятивистскими электронами в геометрии рассеяния Брэгга. Рассчитать характеристики возможного источника мягкого рентгеновского излучения, основанного на исследуемом процессе. Рассчитать оптимальные условия для проведения соответствующего эксперимента.
- Теоретически исследовать возможность генерации мягкого рентгеновского излучения нерелятивистскими электронами в слоистой наноструктуре в геометрии рассеяния Брэгга. Рассчитать характеристики возможного источника излучения, основанного на исследуемом процессе. Рассчитать оптимальные условия для проведения соответствующего эксперимента.
- Теоретически исследовать возможность увеличения выхода ПИ в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена в скользящей геометрии падения слабoreлятивистского электрона на плоскость поверхности мишени в режиме, когда положение максимума углового

распределения ПИ, образующегося за счёт перестройки кулоновского поля электрона, близко к углу полного внешнего отражения. Рассчитать спектрально-угловые характеристики возможного источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, основанного на исследуемом эффекте.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- В результате комплексного экспериментального исследования спектрально-угловых характеристик ПТИ релятивистских электронов из поликристаллических мишеней удалось получить следующие результаты:
 - сравнение результатов выполненных абсолютных измерений спектров ПТИ под различными углами относительно оси пучка электронов в переднюю полусферу из поликристаллических фольг различных материалов показало хорошее согласие с теорией по положению, выходу и форме дифракционных линий;
 - зафиксировано аномальное сужение спектральной ширины дифракционных линий ПТИ в геометрии обратного рассеяния из поликристаллических мишеней;
 - измерены спектры ПТИ в геометрии обратного рассеяния из текстурированных поликристаллов, показана высокая чувствительность характеристик ПТИ к распределению текстуры;
 - измерен спектр ПТИ в геометрии обратного рассеяния из поликристаллов с субмикронным размером зерна в условиях,

когда размер зерна существенно меньше длины фотопоглощения сигнала ПТИ.

- Экспериментально исследован новый метод увеличения (в десятки раз) интенсивности ПРИ за счет подавления фотопоглощения в режиме скользящего взаимодействия электронов с поверхностью мишени в асимметричной геометрии дифракции.
- Экспериментально верифицирована теория нового энергодисперсионного метода измерения двумерной функции распределения зерен мозаичного кристалла по углам ориентации.
- Предсказана и теоретически исследована возможность диагностики анизотропии мозаичности кристаллов в произвольной плоскости разориентации зёрен кристалла на основе ПРИ релятивистских электронов в скользящей геометрии взаимодействия электронов с кристаллом.
- Предсказана возможность увеличения угловой плотности излучения Вавилова-Черенкова в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, обусловленная сужением конуса излучения Вавилова-Черенкова в режиме скользящего падения излучающих электронов на поверхность мишени.
- Предсказан и теоретически исследован эффект увеличения угловой плотности ПИ в скользящей геометрии падения слаборелятивистского электрона на плоскость поверхности аморфной мишени.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

- Выполненное комплексное экспериментальное исследование ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах показало возможность разработки нового энергодисперсионного метода диагностики атомной структуры вещества с высоким пространственным разрешением.
- Выявленные эффекты, связанные с увеличением угловой плотности излучения Вавилова-Черенкова и ПИ, позволяют рассчитывать на возможность разработки источников излучения в областях вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена.
- Разработанная математическая модель источника рентгеновского излучения, основанная на многократном прохождении релятивистских электронов через внутреннюю мишень в циклическом ускорителе, предсказывает возможность разработки эффективного источника рентгеновского излучения.
- Разработанная энергодисперсионная методика измерения двумерной функции распределения мозаичности кристаллов, основанная на рассеянии широкополосного рентгеновского излучения исследуемой мишенью, найдёт применение в различных областях науки и техники для диагностики качества кристаллической структуры. Эффективность предложенного метода подтверждена экспериментально в рамках диссертационной работы.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общепризнанным критерием, подтверждающим достоверность полученных результатов, является сравнение теоретических результатов с экспериментальными. Результаты большинства исследований диссертации прошли данное сравнение, обнаруженные расхождения были в пределах применяемых допущений и не несли искажения физического смысла исследуемых процессов.

Достоверность теоретических результатов обеспечивается, прежде всего, аналитической формой большинства полученных результатов, что позволило совершить предельные переходы к результатам, полученным другими авторами. В работе использовались только апробированные методы теоретического анализа электродинамических процессов в веществе, что также повышает степень достоверности полученных результатов. Многие из результатов получили количественное, либо качественное экспериментальное подтверждение.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается откалиброванным оборудованием, повторяемостью результатов, малой статистической ошибкой и логичностью результатов. Для проведения измерений проводился тщательный анализ особенностей экспериментальной установки с целью минимизации количества и интенсивности источников фона. Все результаты получены с использованием энергодисперсионных полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, достаточно хорошо к настоящему времени изученных и хорошо себя зарекомендовавших.

Результаты всех экспериментов не противоречат известным результатам в обсуждаемой области физики и могут быть воспроизведены.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Результаты измерений выхода, положения и спектральной ширины дифракционных линий ПТИ релятивистских электронов в переднюю полусферу в поликристаллах могут быть описаны на основе кинематического приближения теории ПТИ.
2. Спектральная ширина дифракционных линий ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах аномально уменьшается в геометрии обратного рассеяния.
3. Энергодисперсионный подход, основанный на измерении спектра ПТИ релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния, позволяет определить атомную и блочную структуру поликристаллов.
4. Выход параметрического рентгеновского излучения релятивистских электронов в кристаллах может быть увеличен при скользящем падении пучка электронов на поверхность кристалла в асимметричной геометрии дифракции.
5. Измерение спектрально-угловых характеристик параметрического рентгеновского излучения релятивистских электронов, взаимодействующих с исследуемой кристаллографической плоскостью в скользящем режиме, может быть использовано для диагностики анизотропии распределения мозаичности кристаллов.
6. Угловая плотность переходного излучения слаборелятивистских электронов в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена может быть увеличена в десятки раз при скользящем взаимодействии электронов с мишенью в области углов полного внешнего отражения.

СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ

Часть работ в рамках диссертации была поддержана различными научными фондами и программами. Соискатель является руководителем работ по следующим грантам:

1. Грант CRDF and Ministry of Education of Russian Federation (программа REC-010) за 2002 год. Рассеяние и излучение электромагнитных волн в неоднородных средах. VZ-010-0.
2. Гранты Президента Российской Федерации для молодых российских учёных: МК-2555.2007.2, МК-4199.2009.2.
3. Грант РФФИ: №12-02-31389 мол_а.
4. Государственное задание: №2014/420.

Также, соискатель является исполнителем работ по следующим проектам:

1. Гранты федеральной целевой научно-технической программы: РНП.2.1.1.3263, № 02.513.11.3374, № П2317, № 02.740.11.0545.
2. Государственное задание: №2.2508.2011.
3. Гранты РФФИ: №05-02-17648, №06-02-16942-а, №07-02-12226-офи, №09-02-97528-р_центр_а.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Материалы диссертации доложены на 27 международных конференциях.

- International Symposium RADIATION from RELATIVISTIC ELECTRONS in PERIODIC STRUCTURES, 2002, 2003, 2007, 2009, 2013;
- Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014;
- Российско-японский международный симпозиум “Взаимодействие быстрых заряженных частиц с веществом”, 2002;
- Международная конференция “Многочастичные эффекты в радиационной физике”, 2004;
- Международная конференция “Электронно-фотонные взаимодействия в конденсированной среде”, 2004.
- NATO Advanced Research Workshop on “Advanced Radiation Sources and Applications”, 2004.
- International Conference “Charged and Neutral Particles Channelling Phenomena”, 2006, 2010;
- International Conference on QUANTUM ELECTRODYNAMICS AND STATISTICAL PHYSICS, 2006;

- Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра “Ядро 2009”, 2009;
- XII КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ И УСКОРИТЕЛЯМ, 2014.

ПУБЛИКАЦИИ

В основу диссертационной работы положены материалы 28 статей, опубликованных в рецензируемых журналах, в том числе 14 статей в российских журналах, рекомендованных ВАК.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Соискатель внёс основной вклад во все этапы работы: постановка задач, аналитические расчёты, компьютерное моделирование разработанных математических моделей, разработка экспериментальных установок, на которых были получены экспериментальные результаты диссертационных исследований, разработка и испытание методик проведения экспериментов, постановка экспериментов, проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных. Оформлению публикаций предшествовали коллективные обсуждения. Тексты публикаций написаны в основном соискателем.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем работы - 221 страница, включая 73 рисунка и 1 таблица. Список литературы состоит из 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Все экспериментальные результаты, представленные в диссертационном исследовании, выполнены на основе моделей, представленных в [1], большинство из которых разработано с участием соискателя.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту, определен личный вклад и отражена апробация результатов работы.

Также во введении кратко представлены основные результаты работ, предшествовавших диссертационным исследованиям, выделены проблемы, присутствовавшие в данных работах, определены возможные пути их преодоления.

В первой главе диссертации приводится описание экспериментальной установки “Рентген” отдела физики высоких энергий Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, на которой были выполнены экспериментальные исследования диссертации.

Общая схема установки представлена на Рисунке 1. Динамика эксперимента происходила следующим образом. Микротрон 1 генерирует пучок электронов 2 с энергией 7 МэВ. Первым (по ходу пучка) поворотным магнитом 4 пучок выводится из первичного канала микротрона и далее формируется двумя углеродными коллиматорами 3 с апертурой 5 мм. В процессе взаимодействия пучка с коллиматорами образуется интенсивный радиационный фон, преимущественно распространяющийся вдоль оси коллиматоров. Второй поворотный магнит 4 выводит пучок из области

радиационного фона в магнитооптический канал формирования пучка, состоящий из двух пар квадрупольных магнитных линз 5 и корректора 6. Для обеспечения удобства проведения измерений характеристик излучения, генерирующегося в направлении, противоположном направлению распространения пучка электронов, был установлен третий поворотный магнит 4, выводящий пучок электронов в мишенную вакуумную камеру, в которой располагалась мишень 8. Ориентация мишени контролировалась гониометром 9, также имелась возможность вывода мишени с пучка электронов. Диагностика пространственного положения пучка и его интенсивности проводилась пропорциональной камерой 10 и цилиндром Фарадея 11. Излучение 12, генерирующееся в процессе взаимодействия электронов 2 с мишенью 8, формируется коллиматорами 13, установленными перед детектором 14. Микротрон и детектор были закрыты свинцовой защитой 15 для снижения уровня радиационного фона. Вакуум в микротроне и мишенной камере был общим, при необходимости разделялся шиберным затвором 7.

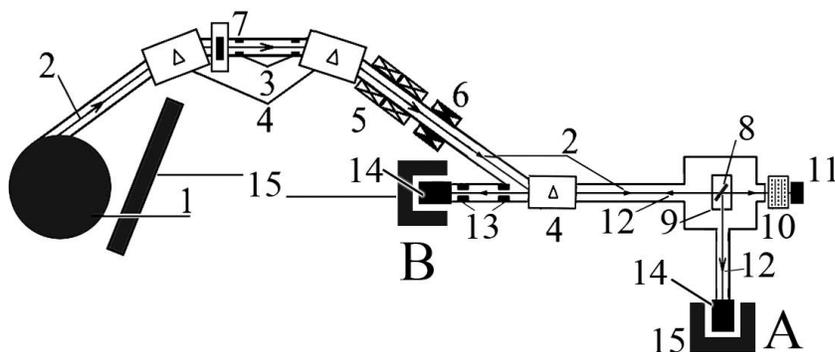


Рисунок 1-Экспериментальная установка.

Учитывая необходимость использования различной геометрии проведения экспериментальных исследований, важной деталью экспериментальной установки является мишенная камера с гониометром, позволяющим точно контролировать ориентацию мишени относительно пучка электронов. В рамках проведённых исследований мишенная камера была оснащена вакуумными портами для установки каналов спектроскопии и оборудования, необходимого для контроля характеристик пучка электронов. В процессе выполнения исследований использовались два варианта геометрии установки, обозначенные “А” и “В”.

По мере выполнения исследований использовались две вакуумные камеры, позволяющие выводить исследуемый фотонный сигнал в диапазоне углов 40° - 140° и 170° - 180° относительно оси пучка излучающих электронов.

Предварительно выполненные расчёты показали, что исследуемый сигнал для большинства задач проявляется в области 3-8 кэВ в виде набора пиков с шириной 10-1000 эВ на фоне тормозного и характеристического рентгеновского излучений. При выборе детектора были учтены высокая скважность электронного пучка и интенсивный радиационный фон. Данные обстоятельства означают, что детектор исследуемого сигнала должен обладать энергетическим разрешением в области измерений не хуже 200эВ и скоростью счёта не менее 10^4 имп./сек. Учитывая данные требования, для исследований были выбраны полупроводниковые детекторы, имеющие максимальные показатели загрузки порядка 10^5 имп./сек. при энергетическом разрешении 100-200 эВ.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований ПТИ релятивистских электронов, пересекающих поликристаллические фольги. Первые экспериментальные результаты исследования ПТИ в поликристаллах, представленные в данной главе, получены в 2005г.

Рассеяние кулоновского поля движущейся в веществе быстрой заряженной частицы электронами атомов вещества приводит к возникновению ПТИ [2]. ПТИ реализуется при большом эффективном прицельном параметре столкновения частицы с атомами, поэтому характеристики ПТИ существенно зависят от межатомных корреляций в мишени. Указанное обстоятельство стимулировало теоретические и экспериментальные исследования возможности разработки нового метода диагностики атомной структуры вещества, основывающегося на измерении характеристик ПТИ в рентгеновской области. В частности, были теоретически предсказаны и экспериментально обнаружены когерентные дифракционные линии (пики) в спектре ПТИ релятивистских электронов, движущихся в поликристаллах. Положение пиков в спектре ПТИ оказалось однозначно связанным с параметрами решетки микрокристаллитов, составляющих поликристалл.

Впервые когерентные пики в спектре ПТИ электронов с энергией 2.4 МэВ, пересекающих тонкую плёнку поликристаллического алюминия, в задней полусфере наблюдались в [3]. В данной работе проводились абсолютные измерения спектра ПТИ при фиксированном угле наблюдения 90° относительно оси пучка электронов. В результате измерений были обнаружены два пика, идентифицированных как проявление когерентной составляющей ПТИ от плоскостей (111), (200) и (220). Стоит отметить, что интенсивный фон и недостаточное энергетическое разрешение детектора не

позволили однозначно определить вклад каждой из указанных плоскостей в обнаруженные пики. Второй принципиальной экспериментальной работой в данной области было относительное измерение когерентных пиков ПТИ электронов с энергией 150 МэВ из поликристалла молибдена в переднюю полусферу при углах измерения 25.8° и 11.27° относительно направления движения электронов [4,5]. Результаты данных работ показали значительную зависимость характеристик ПТИ от текстуры поликристаллов.

Представленные в данной главе измерения были выполнены на экспериментальной установке “Рентген” Отдела физики высоких энергий ФИАН, описанной в первой главе (геометрия “А”). В качестве мишеней использовались поликристаллические фольги алюминия толщиной 8.5 мкм, меди – 15 мкм и никеля – 15 мкм, расположенные под углом 45° к оси пучка.

На первом этапе исследований сигнал ПТИ, выходящий в переднюю полусферу, регистрировался под углом 90° в телесный угол $1.5 \cdot 10^{-6}$ ср. относительно оси пучка электронов. В качестве детектора использовался кремний-литиевый PIN-детектор с энергетическим разрешением 200 эВ.

На Рисунке 2 представлены абсолютные измерения спектра ПТИ из поликристалла алюминия. Кроме пиков ПТИ в спектре можно выделить пик характеристического излучения железа (6.4 кэВ), присутствующего в деталях установки. Хорошее согласие положения и формы измеренных пиков с расчётными [6], подтверждает правильность полученных результатов. Аналогичные спектры ПТИ были измерены для поликристаллов никеля и меди.

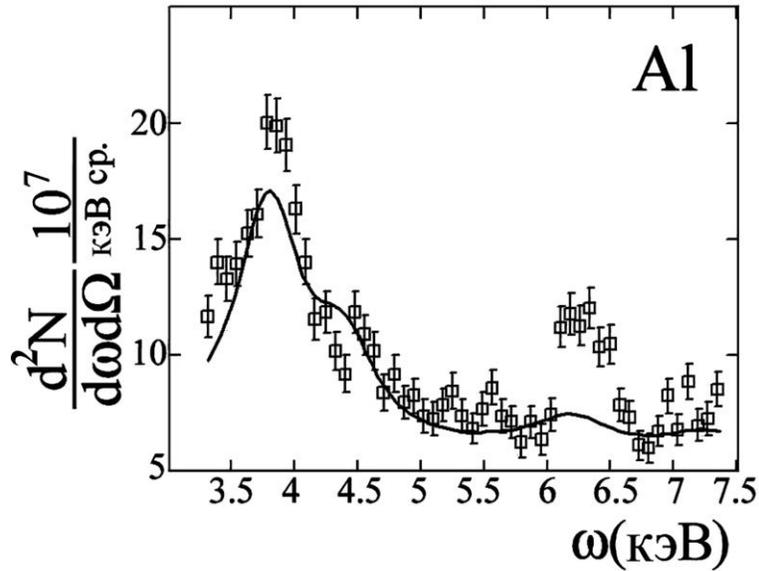


Рисунок 2- Спектр ПТИ из поликристалла алюминия, угол измерения 90°.

Сплошная кривая – расчёт.

На втором этапе исследований была выполнена верификация предсказываемого теорией смещения положения спектральных пиков ПТИ при изменении угла наблюдения. В связи с данным предсказанием была выполнена серия измерений спектров ПТИ при углах наблюдения отличающихся от 90°. На Рисунке 3 представлен измеренный и расчётный спектры ПТИ для алюминиевой мишени при угле измерения 75°. В измеренном спектре четко выделяется когерентный пик ПТИ, который сдвигается с 3,78 кэВ при угле 90° до 4,44 кэВ при значении угла 75°. Наблюдается хорошее согласие измеренных и рассчитанных спектров как по положению, так и по абсолютной величине выхода ПТИ.

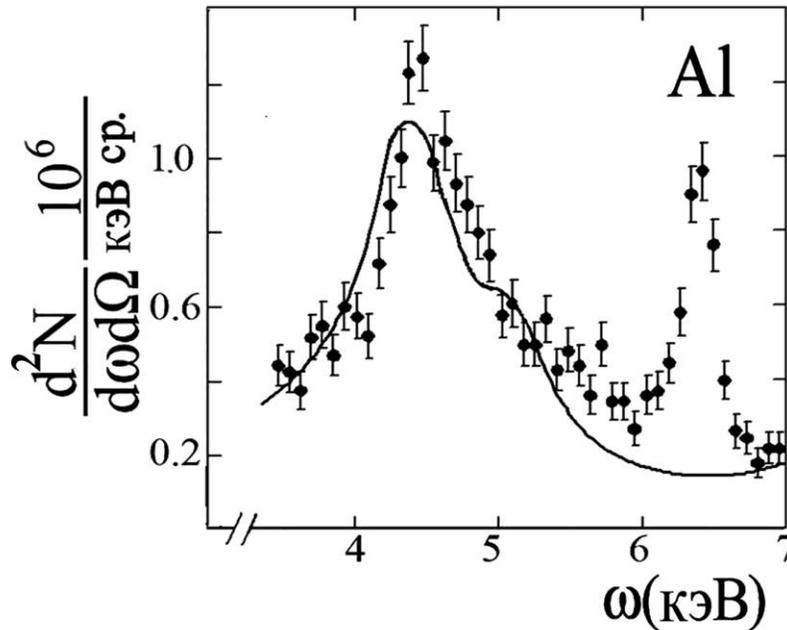


Рисунок 3- Спектр ПТИ из поликристалла алюминия, угол измерения 75° .

Сплошная кривая – расчёт.

Также были измерены спектры ПТИ из медной мишени при углах 83° и 75° . Сдвиг основного когерентного пика ПТИ с $4,27$ кэВ (90°) до $4,62$ кэВ (83°) и $4,95$ кэВ (75°), следующий из полученных данных, находится в согласии с теоретическими предсказаниями.

Таким образом, полученные результаты показывают возможность идентификации когерентных пиков ПТИ по их положению в спектрах в зависимости от угла измерения и согласие экспериментальных данных и теоретической моделью ПТИ, развитой с участием автора данной работы.

В третьей главе приводятся результаты первого в мире успешного измерения ПТИ в геометрии обратного рассеяния. ПТИ в геометрии обратного рассеяния позволяет реализовать диагностику атомной структуры поликристаллических сред с уникальным энергетическим разрешением, поскольку ширина спектральных пиков ПТИ становится обратно пропорциональной квадрату энергии электронов.

Относительная ширина спектрального когерентного пика ПТИ в геометрии обратного рассеяния, согласно теории ПТИ релятивистских электронов [6], может быть представлена в следующем виде

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\rho}{2} \sqrt{\rho^2 + (\Delta\theta)^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\theta$ - разориентация угла наблюдения относительно направления строгого обратного рассеяния, коэффициент $\rho^2 = \gamma^{-2} + \omega_0^2 / \omega^2$ учитывает эффект плотности (γ -Лоренц – фактор электрона, ω - энергия фотона, ω_0 - плазменная частота мишени). Из (1) следует важное следствие - влияние многократного рассеяния, угловой расходимости электронного пучка, конечности размера поперечного сечения электронного пучка и угла коллимирования излучения на спектральную ширину пиков ПТИ назад несущественно при условии $\Delta\theta \ll \sqrt{\gamma^{-2} + \omega_0^2 / \omega^2}$ (в $\Delta\theta$ включены все перечисленные факторы). В случае, когда средняя энергия пика ПТИ превышает критическое для эффекта плотности значение $\gamma\omega_0$ относительная ширина становится обратно пропорциональной квадрату энергии электрона. Примеры спектров когерентного ПТИ из поликристалла меди, рассчитанные для углов наблюдения $\theta = 180^\circ$ и 160° , представлены на Рисунке 4.

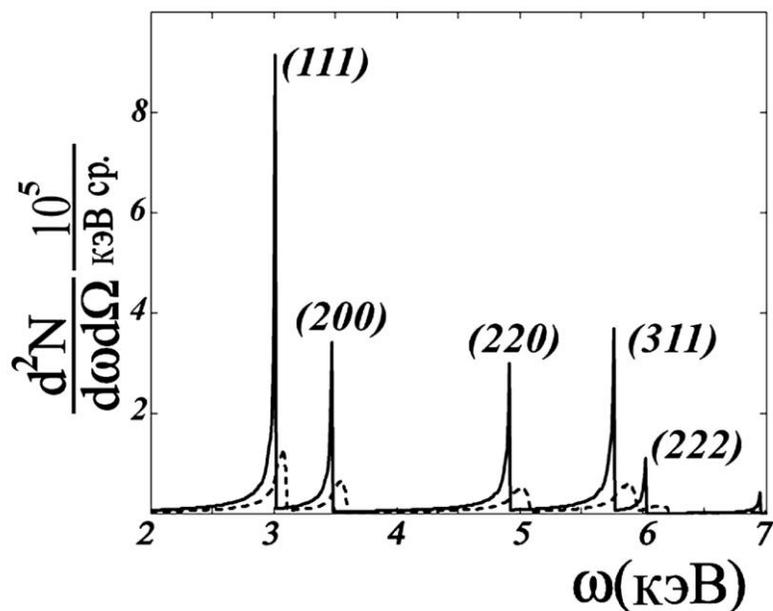


Рисунок 4- Спектрально-угловое распределение когерентной части ПТИ из поликристалла меди, рассчитанные для углов наблюдения 180° (сплошная кривая) и 160° .

Для проведения экспериментальных исследований ПТИ назад была модернизирована установка “Рентген” (геометрия “В”), описанная в первой главе. Установка третьего поворотного магнита на расстоянии 1.2 м перед мишенью дала возможность создать геометрию установки, соответствующую измерениям с минимальным фоном, генерирующимся микротроном и коллиматорами пучка электронов. Третий магнит отклонял электронный пучок в сторону противоположную первым двум магнитам, что позволило улучшить расходимость пучка в месте расположения мишени.

Основной целью исследования в рамках данной главы было фиксирование аномального сужения спектральных пиков ПТИ в геометрии обратного рассеяния и демонстрация чувствительности спектральных характеристик сигнала к структурным характеристикам поликристаллов. Исследование

состояло из двух частей – измерение спектра ПТИ в геометрии обратного рассеяния из текстурированных поликристаллов и поликристаллов с субмикронными размерами зёрен.

В качестве мишени при исследовании ПТИ в геометрии обратного рассеяния из текстурированных поликристаллов использовалась фольга электротехнической меди толщиной 25 мкм. Толщина мишени выбиралась из расчета наилучшего соотношения (сигнал ПТИ)/фон. Сигнал регистрировался рентгеновским PIN-детектором с энергетическим разрешением 152 эВ (паспортное значение для энергии 5.9 кэВ) в режиме жёсткой коллимации сигнала.

В результате измерений удалось зафиксировать когерентные пики ПТИ от различных кристаллографических плоскостей. Спектры ПТИ назад для различных ориентаций плоскости поверхности мишени относительно пучка электронов представлены на Рисунке 5.

Изменение выхода пиков ПТИ при изменении ориентации мишени относительно пучка электронов свидетельствует о наличии текстуры в исследуемой мишени. При расчётном значении положения пика (220) 4.85 кэВ, фитирование функцией Гаусса показало следующие значения его положения и спектральной ширины: 4.818 кэВ \pm 9 эВ и 178 эВ \pm 18 эВ (а); 4.811 кэВ \pm 7 эВ и 221 эВ \pm 19 эВ (b); 4.921 кэВ \pm 12 эВ и 228 эВ \pm 30 эВ (с). Измерение энергетического разрешения детектора в области пика (220) в условиях выполненного эксперимента показало величину 160 эВ \pm 2 эВ (измерение проводилось на K_{β} линии характеристического излучения титана 4.932 кэВ).

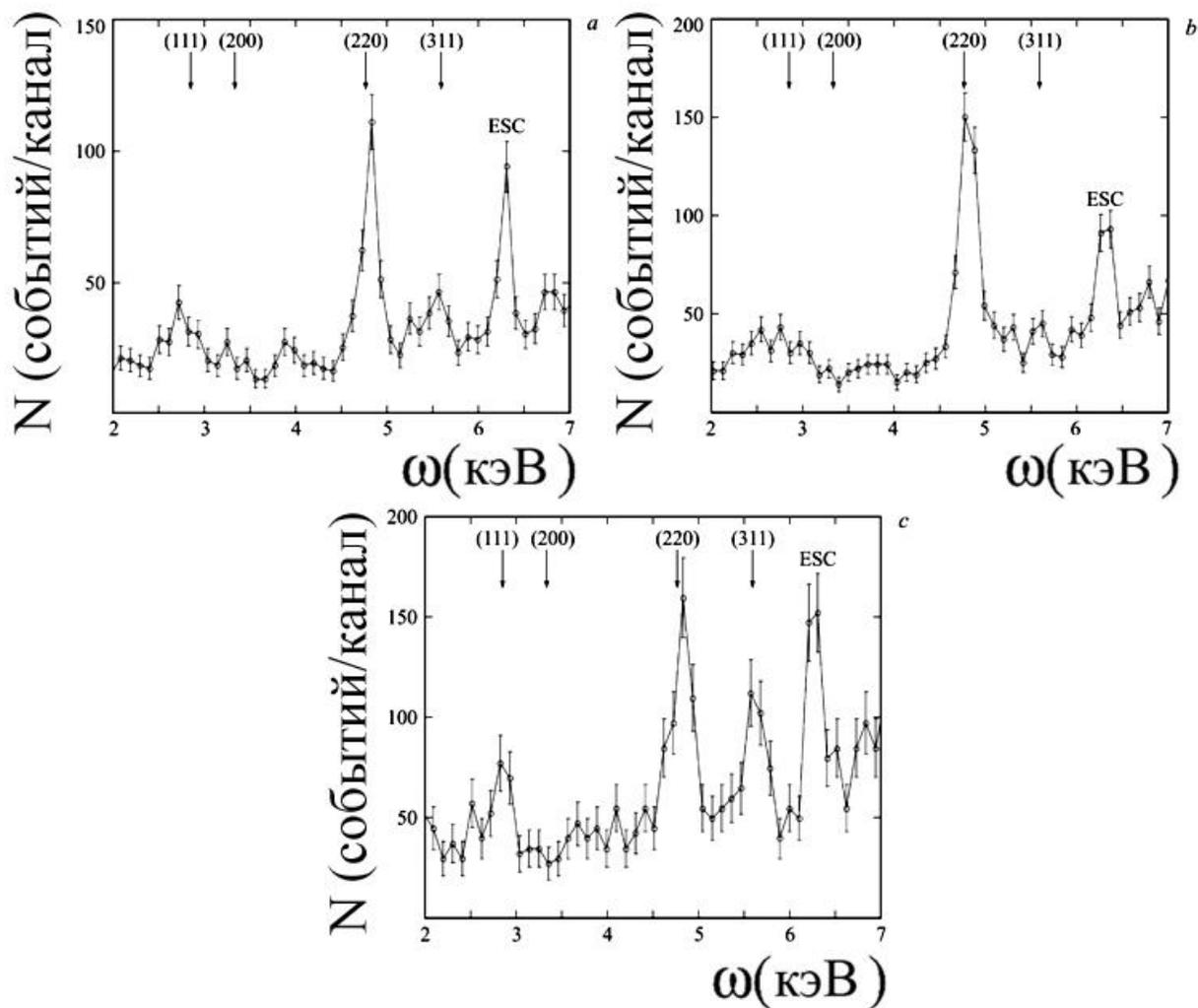


Рисунок 5- Спектр ПТИ назад, а - нормальная ориентация мишени относительно пучка электронов; б - случайная ориентация мишени относительно пучка электронов; с - случайная (другая) ориентация мишени относительно пучка электронов.

Сравнивая измеренные значения ширины пика (220) и энергетического разрешения детектора можно утверждать, что реальная ширина пиков ПТИ назад составляет величину порядка 10 эВ, что является аномальным для ПТИ в ранее исследовавшихся условиях. Для более точных измерений необходимо использовать оборудование с более высоким энергетическим разрешением.

Важной задачей в изучении ПТИ в поликристаллах является измерение спектра ПТИ в условиях, когда размер зерна поликристалла существенно меньше длины фотопоглощения. Учитывая когерентный характер исследуемого процесса, в данном случае выход излучения должен быть подавлен. Типичный размер зёрен поликристаллов составляет величину порядка 1-10 мкм, что соотносится с типичной длиной фотопоглощения в исследуемой спектральной области 1-10 кэВ, что, в свою очередь, делает выход ПТИ близким к насыщению. Таким образом, при рассмотрении ПТИ в качестве нового метода исследования атомной структуры вещества [7] актуальным вопросом, требующим исследования, является определение возможности эффективного применения развиваемого метода для исследования наноструктурированных сред в условиях, когда размер зёрен поликристалла меньше длины фотопоглощения сигнала ПТИ.

Второй частью главы является исследование ПТИ в геометрии обратного рассеяния из поликристаллов с субмикронными размерами зёрен, когда размер кристаллитов существенно меньше длины фотопоглощения сигнала ПТИ.

Сигнал регистрировался энергодисперсионным кремниевым дрейфовым детектором с энергетическим разрешением 130 эВ (паспортное значение для энергии 5.9 кэВ) и площадью окна 7 мм². В качестве мишени использовалась поликристаллическая фольга никеля толщиной 40 мкм и средним размером зерна около 300 нм.

Результат измерений ПТИ назад из поликристалла Ni представлен на Рисунке 6. Спектр обрезан в более жесткой области в начале проявления пика характеристического излучения K_α линии Ni, амплитуда которого превосходит амплитуду сигнала ПТИ более чем на два порядка. Измерение спектра ПТИ назад из поликристаллической фольги Ni показало наличие

когерентных пиков, положение которых хорошо согласуется с расчетными данными. Фитирование пика (220) функцией Гаусса показало, что положение и спектральная ширина пика равны $4.940 \text{ кэВ} \pm 7 \text{ эВ}$ и $159 \text{ эВ} \pm 18 \text{ эВ}$ при рассчитанном положении пика 4.976 кэВ . Измерение энергетического разрешения детектора в области пика (220) в условиях выполненного эксперимента показало величину $151 \text{ эВ} \pm 2 \text{ эВ}$ (измерение проводилось на K_{β} линии характеристического излучения титана 4.932 кэВ). Данный результат также является подтверждением аномальной ширины пиков ПТИ в геометрии обратного рассеяния.

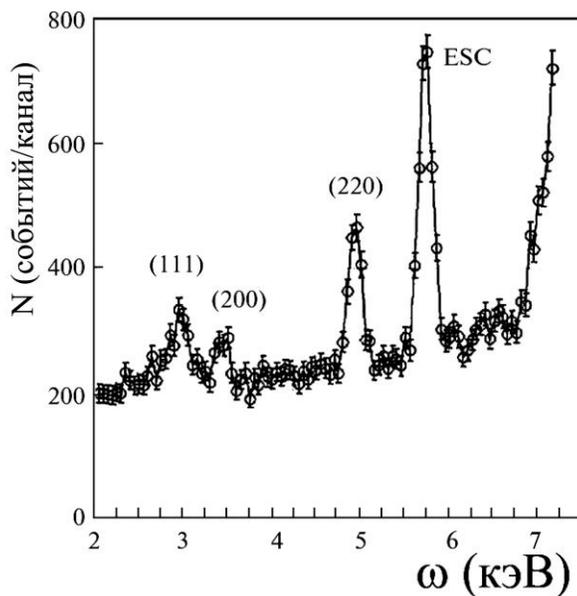


Рисунок 6- Спектр ПТИ назад, электронов из поликристаллической фольги никеля. Средний размер зерна 300 нм.

Результаты выполненных исследований демонстрируют перспективность развиваемого нового метода исследования атомной структуры поликристаллических сред, основанного на анализе спектра ПТИ в геометрии обратного рассеяния. Результаты демонстрируют чувствительность ПТИ к текстуре поликристаллических мишеней и возможность проведения

измерений структурных параметров поликристаллов с наномасштабными размерами зерен. Зафиксированная аномальная узость спектральной ширины когерентных пиков демонстрирует высокую точность возможных измерений. Измерение структурных характеристик в рамках предлагаемого подхода является более сложным по сравнению с классическими рентгеноструктурными измерениями, но обладают существенными преимуществами. Первое преимущество состоит в известном распределении спектра первичных виртуальных фотонов, что необходимо для реализации энергодисперсионной методики. Второе преимущество связано с относительно простой возможностью управления параметрами электронного пучка традиционной магнитооптикой в сравнении с аналогичной задачей для потока рентгеновского излучения.

В четвёртой главе рассматривается возможность диагностики мозаичности кристаллов, анализируются два подхода к измерению степени мозаичности с учётом анизотропии её распределения.

Используемые методы рентгеноструктурного анализа весьма популярны, но не лишены недостатков, одним из которых является исследование характеристик мозаичности на глубине не превышающей длину экстинкции. В первой части главы рассматривается метод, в котором рентгеновское излучение, несущее информацию о мозаичности кристалла, формируется в объёме исследуемого кристалла вследствие рассеяния кулоновского поля релятивистского электрона на атомах. В данном случае глубина исследуемого слоя ограничивается длиной фотопоглощения исследуемого сигнала, а не длиной экстинкции.

В первой части главы представлены результаты теоретического анализа возможности измерения анизотропии распределения мозаичности

кристаллов, основанной на измерении характеристик ПРИ релятивистских электронов.

В рамках рассматриваемой задачи можно воспользоваться кинематическим приближением для описания ПРИ в кристаллах [8]. С учётом разориентации блоков кристалла относительно равновесного положения, задаваемого условием отсутствия мозаичности, спектрально-угловое распределение ПРИ релятивистских электронов может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dN}{dt d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi} \frac{\omega_{\vec{g}}^4}{\omega g^2} F(\omega, \varphi, \Theta_{\parallel}, \Theta_{\perp}, \eta_{\parallel}, \eta_{\perp}) \delta(\omega - \omega'_B),$$

$$F(\omega, \Theta_{\parallel}, \Theta_{\perp}, \eta_{\parallel}, \eta_{\perp}) = \frac{(\Theta_{\parallel} - 2\eta_{\parallel})^2 \cos^2(\varphi) + \left(\Theta_{\perp} - 2\eta_{\perp} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)^2}{\left(\gamma^{-2} + \frac{\omega_0^2}{\omega^2} + (\Theta_{\parallel} - 2\eta_{\parallel})^2 + \left(\Theta_{\perp} - 2\eta_{\perp} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)^2\right)^2}$$

$$\omega'_B = \omega_B \left(1 + (\Theta_{\parallel} - \eta_{\parallel}) \cot\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right), \quad \omega_B = \frac{g}{2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2)$$

$$\omega_{\vec{g}}^2 = \omega_0^2 F(g) S(\vec{g}) e^{-\frac{1}{2} g^2 u_T^2},$$

где \vec{g} - вектор обратной решётки отражающей кристаллографической плоскости, η_{\parallel} и η_{\perp} - углы разориентации \vec{g} относительно направления соответствующего идеальному кристаллу, Θ_{\parallel} и Θ_{\perp} - угловые переменные, задающие угол наблюдения относительно направления зеркального отражения траектории заряженной частицы от кристаллографической плоскости (продольные компоненты η_{\parallel} и Θ_{\parallel} находится в плоскости реакции),

$\varphi/2$ - угол падения заряженной частицы на кристаллографическую плоскость, ω_0 - плазменная частота, γ - Лорентц-фактор излучающего электрона, $F(g)$ - нормированный на количество электронов в атоме атомный форм-фактор, $S(\vec{g})$ - нормированный на количество атомов в элементарной ячейке структурный фактор, $e^{-\frac{1}{2}g^2u_T^2}$ - фактор Дебая-Валлера.

Существенно, что энергия излучённого кванта ω'_B зависит только от продольной составляющей мозаичности. Такая зависимость позволяет исследовать мозаичность в плоскости реакции без влияния второй составляющей разориентации кристаллографической плоскости на спектр излучения. Можно заметить, что η_{\perp} входит в функцию $F(\omega, \varphi, \Theta_{\parallel}, \Theta_{\perp}, \eta_{\parallel}, \eta_{\perp})$ (2) только умноженной на $\sin(\varphi/2)$, что делает зависимость спектрально-углового распределения ПРИ в мозаичном кристалле от разориентации в поперечной плоскости более слабой при уменьшении угла падения излучающей частицы на рассматриваемую плоскость. С другой стороны, при уменьшении угла падения зависимость спектра от продольной составляющей разориентации усиливается. Таким образом, для исследования анизотропии мозаичности кристалла предпочтительно использовать малые углы падения излучающей частицы на рассматриваемую плоскость. Наиболее удобным способом исследования анизотропии мозаичности является схема с измерением сигнала ПРИ при вращении кристалла относительно нормали к исследуемой кристаллографической плоскости в скользящей геометрии взаимодействия излучающих частиц с плоскостью.

Во второй части главы проводится экспериментальное исследование на основе теории, предсказывающей возможность разработки нового энергодисперсионного метода измерения функции распределения зерен

кристалла по углам ориентации (теория данного метода была разработана с участием соискателя [9]). В основе исследуемого подхода лежит процесс спектральных измерений рассеянного в образце широкополосного рентгеновского излучения при фиксированном положении детектора. Основное преимущество предлагаемого метода в сравнении с традиционными рентгеноструктурными способами измерения мозаичности кристаллов заключается в возможности определения двумерной функции распределения микроблоков по углам ориентации, а не усредненных параметров функции распределения с постулируемой формой. Следует также отметить, что для определения функции распределения мозаичности отсутствует необходимость проводить абсолютные измерения выхода рассеянного излучения. Кроме того, исследуемый метод позволяет измерить функцию распределения мозаичности в произвольной плоскости.

Основываясь на теории [9], была разработана экспериментальная установка для измерения функции распределения мозаичности кристаллов высокоориентированного пиролиитического графита, имеющих мозаичность 0.4° и 0.8° (паспортные данные). Угловое разрешение установки было определено на основе измерения ориентационной зависимости выхода рассеянного широкополосного излучения кристаллом SiO_2 (1,3, $\bar{4}$,0), имеющего мозаичность 0.16 мрад, что более чем на порядок меньше величины мозаичности высокоориентированного пиролиитического графита.

Энергия Брэгга рассеянных фотонов для угла рассеяния первичного излучения 135° составляла 4.9 кэВ для первого порядка дифракции. Детектор регистрировал три порядка дифракции. Соотношение сигнал/фон было лучше 0.1%. Ориентационная зависимость каждой мишени была измерена в двух ортогональных плоскостях (мишень вращалась относительно нормали к плоскости мишени). Сравнение ориентационных зависимостей выхода

рассеянных фотонов мишенью с мозаичностью 0.4° в горизонтальной и вертикальной плоскостях для первого порядка дифракции представлено на Рисунке 7.

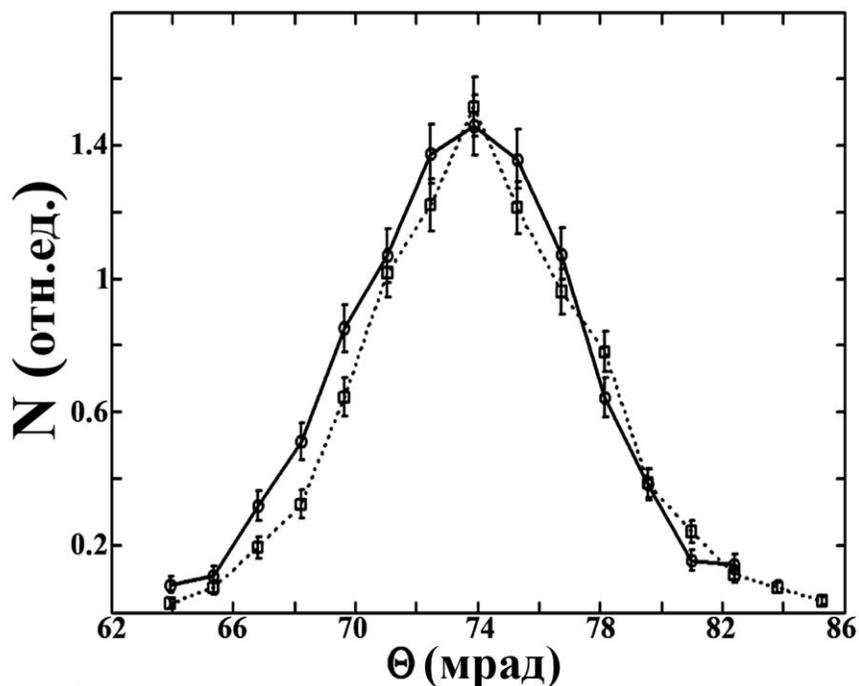


Рисунок 7- Распределение мозаичности высокоориентированного пиролитического графита с мозаичностью 0.4° . Кривые отличаются поворотом кристалла на 90° вокруг нормали к плоскости поверхности кристалла.

Стоит отметить, что исследовавшийся метод ранее был реализован многими исследователями (например [10]), но без обоснования и, как правило, в подобных исследованиях измеренная функция распределения мозаичности фитировалась функцией Гаусса, в то время как в работе [9] предсказана возможность измерения самой функции распределения.

Таким образом, выполненное в первой части главы теоретическое исследование возможности измерения анизотропии распределения

мозаичности кристаллов на основе ПРИ быстрых заряженных частиц предсказывает возможность проведения подобных измерений. В работе рассчитаны условия проведения измерений, в частности, предсказано преимущество использования малых углов взаимодействия излучающих частиц с исследуемым кристаллом. Изложенные результаты исследований демонстрируют потенциальные преимущества предложенных методов над стандартными методами рентгеноструктурного анализа. Во второй части главы проведено апробирование теории, предсказывающей возможность разработки нового метода измерения двумерной функции распределения мозаичности кристаллов. Измерение, выполненное на кристалле пиролиитического графита, показало хорошее согласие с паспортными данными кристалла, что позволяет рассчитывать на возможность дальнейшей разработки нового энергодисперсионного метода исследования качества кристаллов.

В пятой главе изложены результаты исследования эффектов в физике излучения заряженных частиц, на основе которых возможно создать новые источники рентгеновского излучения или увеличить яркость существующих источников. В первой части главы экспериментально исследуется эффект увеличения угловой плотности ПРИ в геометрии асимметричной дифракции при скользящем взаимодействии релятивистских электронов с кристаллической мишенью, теоретически предсказанный в [11]. Во второй части главы теоретически изучается возможность разработки источника рентгеновского излучения, основанного на многократном прохождении электронов через тонкую мишень, установленную в циклическом ускорителе.

Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов в кристаллах позволяет генерировать пучки квазимонохроматических

рентгеновских квантов с плавно перестраиваемой спектральной линией. Низкая интенсивность обсуждаемого механизма излучения, обусловленная, прежде всего, фотопоглощением в мишени, весьма затрудняет его практическое использование [12,13], поэтому поиск путей повышения выхода ПРИ является актуальной задачей физики излучения.

Предложенная недавно схема генерации ПРИ в условиях скользящего падения излучающих электронов на поверхность кристалла в асимметричной геометрии дифракции позволяет увеличить выход ПРИ более чем на порядок за счет увеличения эффективного пути быстрого электрона в кристалле, на котором происходит генерация фотонов, способных покинуть мишень.

В данном разделе описывается методика проведения эксперимента по исследованию обсуждаемой возможности повышения выхода ПРИ в условиях скользящего падения излучающих электронов на поверхность кристалла в асимметричной геометрии дифракции, а так же сообщается о первом измерении данного эффекта. Исследование выполнялось на модифицированной установке “Рентген”.

Для фиксирования искомого эффекта необходимо сравнить выходы ПРИ в симметричной и асимметричной геометриях. Расчёт, выполненный в рамках возможностей установки, показал, что для фиксирования эффекта наиболее удобно работать с кремниевыми мишенями на плоскости (111). В качестве мишени в скользящем случае был выбран кристалл кремния с плоскостью поверхности (100), в котором рабочая плоскость (111) расположена под углом 0.955 рад. Угол между осями пучка электронов и коллимирования излучения был выбран равным 40° , что позволило получить сигнал ПРИ в области 2100-2200 эВ, где длина фотопоглощения регистрируемого сигнала минимальна (данная область находится за К краем фотопоглощения кремния – 1840 эВ) и влиянием многократного рассеяния можно пренебречь. Толщина

мишеней существенно превышала длину фотопоглощения в области рефлекса ПРИ, что позволило получить максимальный выход в обоих случаях.

Направление регистрации ПРИ в скользящем и традиционном случаях не менялось, что позволило получить сигнал с одинаковой энергией квантов и избежать пересчёта выхода излучения из-за разного фотопоглощения. Результаты измерений ориентационной зависимости ПРИ в традиционном и скользящем случаях представлены на Рисунке 8. Так же, на рисунке показан результат сравнения экспериментальных данных с функцией ориентационной зависимости ПРИ, полученной в кинематическом приближении.

Таким образом, выполненные измерения позволили впервые зафиксировать эффект увеличения выхода ПРИ в геометрии асимметричной дифракции при скользящем режиме падения пучка электронов на плоскость поверхности кристаллической мишени, эффект соответствует коэффициенту 2.8, что хорошо согласуется с выполненными расчётами и является основой проведения дальнейших исследований для получения более яркого эффекта увеличения выхода ПРИ.

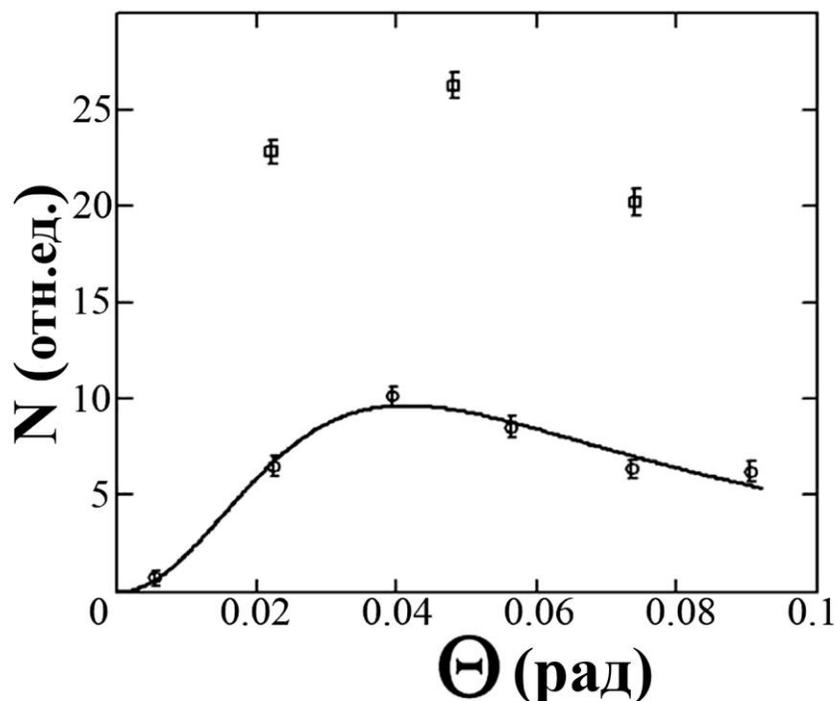


Рисунок 8- Ориентационные зависимости выхода ПРИ из кристалла кремния, рабочая плоскость (111). ○ - традиционный случай, □ – скользящий случай, кривая - расчёт.

Далее в главе теоретически разрабатывается модель источника рентгеновского излучения, основанного на многократном прохождении электронов через тонкую мишень, установленную в циклическом ускорителе. Такая схема предложена в [14] и в настоящее время рассматривается как одна из наиболее перспективных в области рентгеновских источников ввиду появления малогабаритных циклических ускорителей [15].

В рамках проделанной работы представлены результаты исследования источника рентгеновского излучения, состоящего из тонкой мишени, расположенной в вакуумной камере циклического ускорителя, и

рентгеновского зеркала, установленного вне ускорительной камеры для монохроматизации рентгеновского излучения. Разработанная модель источника учитывает многократное рассеяние и выбывание электронов из процесса излучения, что позволяет рассчитать спектрально-угловые характеристики коллимированного излучения, образовавшегося вследствие монохроматизации излучения радиатора рентгеновским зеркалом, достаточно точно.

В качестве источника излучения исследовались три возможных радиатора: аморфный радиатор для генерации переходного излучения, аморфный радиатор для генерации простого тормозного излучения и кристаллический радиатор для генерации когерентного тормозного излучения. Каждая из рассмотренных схем имеет свои достоинства и недостатки, анализируемые в работе. Показано, что реализация механизмов переходного и когерентного тормозного излучений позволяет существенно увеличить выход излучения в сравнении с механизмом обычного тормозного излучения.

Расчёт эффективности обсуждаемого рентгеновского источника, выполненный для параметров рассматриваемой задачи на основе работ [16,17] (энергия электронов 33 МэВ, толщина бериллиевой аморфной мишени 20 мкм, среднее количество прохождений электрона через мишень 200, многослойное зеркало с периодом 1.3 нм), показал возможность разработки источника с выходом порядка 0.14 фот./(эл.сп.) для тормозного механизма излучения.

Таким образом, в главе представлены два подхода, на основе которых возможно разработать источники рентгеновского излучения для прикладного использования. Представленное в первой части главы экспериментальное исследование ПРИ в геометрии асимметричной дифракции, выполненное впервые, показало хорошее согласие полученных результатов с аналогичной

теорией, что позволяет рассчитывать на развитие данного подхода к увеличению выхода ПРИ для расширения возможностей практического использования источников рентгеновского излучения на основе ПРИ. Теоретическое исследование источника рентгеновского излучения, основанного на многократном прохождении электронов через тонкую мишень, установленную в циклическом ускорителе, также показало перспективность данного направления разработки источников рентгеновского излучения. В рамках данного исследования разработана модель, учитывающая многократное рассеяние и выбывание электронов из процесса излучения, а также возможность монохроматизации излучения рентгеновским зеркалом.

В шестой главе изложены результаты исследования новых эффектов в физике излучения заряженных частиц, на основе которых возможно создать источники излучения в областях вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Глава состоит из четырёх частей.

В первой части главы рассматривается излучение Вавилова-Черенкова релятивистских электронов в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена в окрестности края фотопоглощения вещества мишени. Выполненные в последнее время эксперименты показали возможность разработки на основе данного механизма излучения источника рентгеновских квантов с уникальными параметрами [18], поэтому анализ различных схем конкретного исполнения источника, позволяющих улучшить характеристики излучения, представляют безусловный интерес.

Рассматривается случай, когда угол падения электрона на мишень становится меньше, чем характерный угол черенковского излучения. Подобный случай исследовался в [19,20], но в отличие от данных работ, основным результатом проведенного анализа является предсказание эффекта

существенной модификации конуса черенковского излучения в рассматриваемых условиях скользящего падения электрона на поверхность мишени. Обсуждаемый эффект имеет исключительно геометрическое происхождение и возникает по двум причинам – преломление излучения на поверхности радиатора и увеличение эффективной длины траектории частицы, с которой излучение выходит из радиатора. Благодаря обсуждаемому эффекту уменьшается угол раствора черенковского конуса $\theta_{Ch} \approx \sqrt{\chi'(\omega)}$ ($\chi'(\omega)$ - действительная часть диэлектрической восприимчивости вещества), при этом распределение излучения по азимутальному углу на поверхности конуса становится резко неоднородным и угловая плотность излучения резко возрастает. Данный эффект представлен на Рисунке 9 (кривые рассчитаны для мишени из Be при следующих параметрах: $\omega = 111.6 \text{ эВ}$; $1/\gamma\sqrt{\chi'_{\max}} = 0.4$; $\chi'_{\max} = 0.05$), где приведены угловые распределения черенковского излучения при различных углах ориентации плоскости поверхности мишени относительно траектории излучающих электронов (χ'_{\max} - максимальное значение $\chi'(\omega)$, φ - угол падения электрона на мишень).

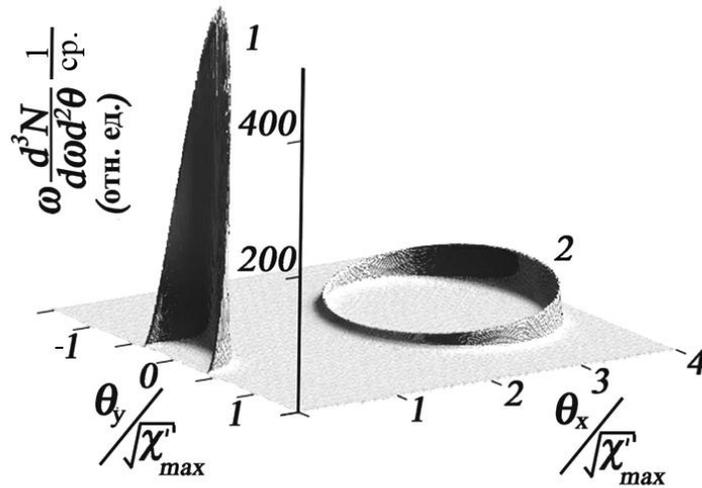


Рисунок 9- Угловое распределение излучения Вавилова-Черенкова.

$$1 - \varphi = 0.17 \sqrt{\chi'_{\max}}, \quad 2 - \varphi = 3 \sqrt{\chi'_{\max}}.$$

Выполненные исследования показали резкую зависимость увеличения угловой плотности излучения от угла ориентации и наличие оптимального угла ориентации для получения максимального выхода излучения. Ориентационный угол должен быть тщательно выбран в эксперименте, причем с ростом энергии электрона выбор угла должен производиться более тщательно.

Эффект увеличения угловой плотности излучения в режиме трансформации конуса черенковского излучения позволяет резко (на порядок и более) увеличить угловую плотность излучения без существенных изменений спектральных характеристик. Спектральное распределение коллимированного выхода излучения для мишени из Ве для различных углов ориентации скорости электрона относительно поверхности мишени, приведено на Рисунке 10 (представленные кривые построены при следующих

фиксированных параметрах: $\omega = 111.6 \text{ эВ}$; $1/\gamma\sqrt{\chi'_{\max}} = 0.1$; $\chi'_{\max} = 0.05$; $\Delta\theta_x = 0.3$; $\Delta\theta_y = 0.3$. $\Delta\theta_x$ и $\Delta\theta_y$ - угловые размеры коллиматора).

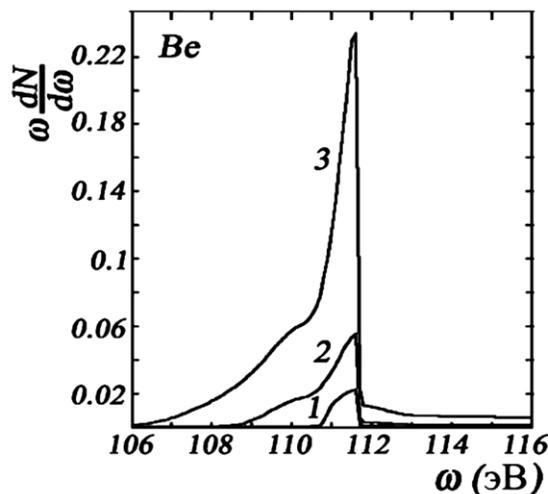


Рисунок 10- Спектр излучения Вавилова-Черенкова из бериллиевой мишени.

Кривые 1, 2 и 3 построены при следующих значениях φ :

$$1 - \varphi = 5\sqrt{\chi'_{\max}}; \quad 2 - \varphi = 0.5\sqrt{\chi'_{\max}}; \quad 3 - \varphi = 0.05\sqrt{\chi'_{\max}}.$$

Во втором разделе главы, на основе динамической теории дифракции, исследуется механизм параметрического излучения релятивистских электронов, движущихся в многослойной структуре [21]. Исследуется случай генерации излучения в геометрии Брэгга, когда в одном из слоёв реализуются условия проявления эффекта Вавилова-Черенкова.

Анализ характеристик ПРИ в условиях проявления эффекта Вавилова-Черенкова проводился с учетом вклада дифрагированного переходного излучения (ДПИ). Исследование показало возможность увеличения выхода механизма параметрического излучения более чем на порядок за счёт генерации излучения Вавилова-Черенкова в многослойной структуре при отсутствии роста вклада ДПИ. Выход фотонов при таком механизме

генерации рентгеновских квантов порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ фотона на электрон в полный конус излучения, что на порядок превышает выход ПРИ в обычных условиях.

Далее в главе теоретически изучается ПИ слаборелятивистских электронов в области вакуумного ультрафиолета вблизи угла полного внешнего отражения.

Угловое распределение ПИ нерелятивистской заряженной частицы, нормально пересекающей границу раздела среда-вакуум, существенно зависит от соотношения между действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$. При $\varepsilon''(\omega) = 0$ максимум углового распределения ПИ совпадает с углом полного внешнего отражения излучения от границы раздела и амплитуда максимума имеет большее значение, чем для случаев когда $\varepsilon''(\omega) \neq 0$ [22]. Положение максимума углового распределения ПИ нерелятивистских частиц определяется только величинами $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$, а амплитуда энергией электрона. Форма углового распределения ПИ нерелятивистской заряженной частицы в зависимости от направления импульса электрона незначительно варьируется около положения, задаваемого нормальной ориентацией импульса частицы относительно плоскости раздела сред.

В третьем разделе главы исследуется более интересный случай ПИ слаборелятивистской частицы, когда кулоновское поле частицы начинает деформироваться и положение максимума углового распределения ПИ становится чувствительным не только к величинам $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$, но и к величине энергии излучающей частицы. При рассмотрении спектральных характеристик ПИ наиболее интересной является область вакуумного ультрафиолета, где соотношение между $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$ может принимать

различные значения и спектрально-угловые характеристики ПИ будут различны.

Анализ спектрально-углового распределения ПИ показал, что основной вклад в ПИ дают два механизма. Первый механизм соответствует случаю нерелятивистских электронов и определяется только величиной диэлектрической восприимчивости. Второй механизм проявляется при увеличении энергии частицы ε и имеет максимумы в угловом распределении, положение которых зависит от энергии электрона и определяется выражением $\frac{\pi}{2} - \varphi \pm \arccos\left(\frac{1}{4}(V + \sqrt{V^2 + 8})\right)$. Таким образом, наиболее оптимальным случаем для получения максимальной угловой плотности излучения при фиксированной энергии кванта является условие, при котором максимумы угловых зависимостей рассмотренных механизмов совпадают. На Рисунке 11 представлены спектрально-угловые распределения ПИ из углеродной мишени при фиксированной энергии кванта ω для разных углов падения φ излучающей частицы на границу раздела сред. Положение максимума углового распределения ПИ совпадает с углом полного внешнего отражения (угол наблюдения Θ отсчитывается от нормали к поверхности мишени, а угол падения электрона отсчитывается от плоскости раздела).

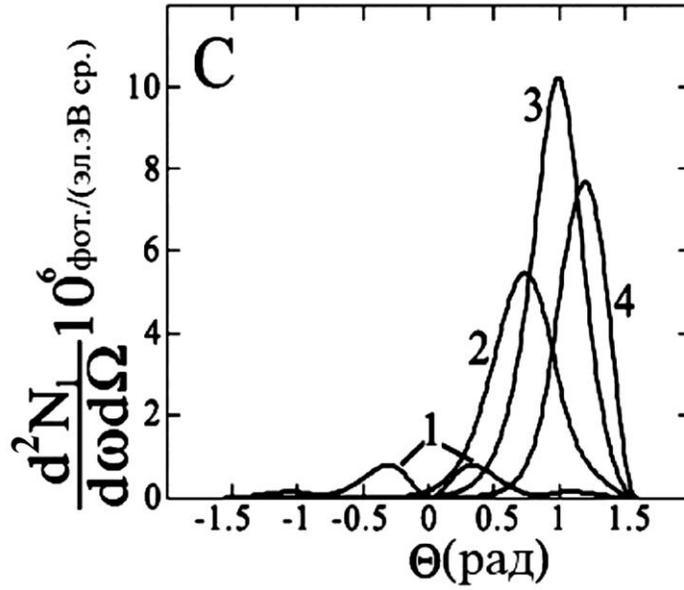


Рисунок 11- Эффект увеличения угловой плотности ПИ, угловое распределение. $\varepsilon = 0.5$ МэВ, $\omega = 50$ эВ. 1 - $\varphi = \pi/2$, 2 - $\varphi = 0.7$ рад, 3 - $\varphi = 0.45$ рад, 4 - $\varphi = 0.2$ рад.

Выполненное исследование предсказывает возможность существенного увеличения спектрально-угловой плотности переходного излучения слаборелятивистских электронов в области вакуумного ультрафиолета (рост интенсивности в десятки раз проявляется вблизи углов полного внутреннего отражения квантов от границы раздела среда-вакуум) при энергии электронов порядка 100 кэВ. Увеличение угловой плотности происходит в случае, когда максимум углового распределения ПИ, образующийся за счёт трансформации кулоновского поля электрона, близок к углу полного внутреннего отражения излучения от границы раздела среда-вакуум. Для получения наибольшей угловой плотности ПИ необходимо выполнение условия $\sqrt{2}(1+\chi') \gg \sqrt{\chi''/|\chi'|}$, в противном случае эффект проявляется несущественно и положение максимума углового распределения в

значительной степени определяется только степенью трансформации кулоновского поля излучающего электрона.

В отличие от ПРИ релятивистских электронов, менее изученным является ПРИ слаборелятивистских и нерелятивистских электронов. В заключительной части главы проводится исследование параметрического механизма генерации излучения слаборелятивистскими и нерелятивистскими электронами, пересекающими слоистую мишень в геометрии Брэгга.

В отличие от имевшейся теории [23], рассматривающей процесс излучения нерелятивистских электронов нормально взаимодействующих со слоистой мишенью, в настоящей работе получены выражения для расчёта спектрально-угловых характеристик параметрического излучения при произвольных углах взаимодействия частицы с мишенью. Исследование выполнено на основе классических уравнений Максвелла, записанных для среды с периодически изменяющейся диэлектрической восприимчивостью. Учитывая малость влияния динамических эффектов на процесс излучения нерелятивистских электронов, в работе использована модель двухволнового приближения кинематической теории дифракции для параметрического излучения, записанная в предположении $V \ll 1$ (V - скорость электрона). Наряду с параметрическим излучением, рассмотрены вклады ДПИ и обычного ПИ. Таким образом, в рассматриваемой модели учитываются три механизма излучения – ПИ, ДПИ и параметрический.

Исследование вкладов ПИ и ДПИ в полный выход излучения показали их малую величину относительно основного вклада параметрического механизма излучения, причём вклад ПИ даёт просто широкий спектральный фон. Стоит отметить, что в проделанном в настоящем разделе анализе выполнено разделение полной амплитуды излучения на сумму амплитуд

ПРИ и ДПИ, что позволило четко разделить вклады указанных механизмов излучения и выяснить роль интерференции между ними.

Интерес к решаемой задаче обусловлен исследованием перспективы разработки недорогого источника квазимонохроматического излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена на основе параметрического механизма генерации излучения.

Результаты, полученные в настоящей работе, открывают возможности использования параметрического механизма нерелятивистских электронов для разработки недорогого источника излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Численные расчёты показали возможность разработки направленного квазимонохроматического источника вакуумного ультрафиолета с плавно перестраиваемой спектральной линией. При низкой энергии излучающих частиц выход излучения высок и составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ фот./электрон в коллиматор с угловым размером 0.005 ср. при спектральной ширине сигнала в единицы эВ и энергии электронов порядка 100 кэВ.

В области вакуумного ультрафиолета некоторые вещества имеют область аномальной дисперсии ($\chi' > 0$), что делает возможным проявление эффекта Вавилова-Черенкова. Исследование параметрического механизма нерелятивистских электронов в области аномальной дисперсии показали возможность увеличить выход излучения в десятки раз за счёт увеличения разности действительных частей диэлектрической восприимчивости соседних слоёв структуры.

Таким образом, проделанное исследование показало возможность разработки интенсивного источника вакуумного ультрафиолета на основе параметрического механизма генерации излучения нерелятивистскими

электронами. Эффективность таких источников резко возрастает при генерации излучения в области аномальной дисперсии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- На основе ускорительного комплекса Отдела Физики Высоких Энергий ФИАН разработана установка для измерения спектрально-угловых характеристик рентгеновского излучения, генерирующегося при взаимодействии релятивистских электронов с веществом. В процессе проведения исследований установка была модернизирована несколько раз.
- Выполнен расчёт оптимальных условий проведения эксперимента по исследованию ПТИ релятивистских электронов в поликристаллических средах при различных углах наблюдения. Разработана методика проведения эксперимента по исследованию ПТИ при различных углах регистрации сигнала относительно пучка электронов. Измерены спектры ПТИ при различных углах регистрации сигнала относительно пучка электронов.
- Выполнен расчёт оптимальных условий проведения эксперимента по исследованию сигнала ПТИ релятивистских электронов в поликристаллических средах, распространяющегося в направлении противоположном импульсу излучающего электрона. Разработана методика проведения эксперимента по изучению эффекта сужения спектральной линии ПТИ в геометрии обратного рассеяния. На основе разработанной методики выполнено экспериментальное исследование эффекта сужения спектральной линии ПТИ в текстурированных

поликристаллах и поликристаллах с субмикронным размером зёрен. Выполнен анализ результатов исследования с целью определения эффективности использования ПТИ в геометрии обратного рассеяния для диагностики атомной структуры поликристаллических сред.

- Выполнен расчёт оптимальных условий проведения эксперимента по исследованию эффекта увеличения выхода ПРИ в геометрии скользящего падения излучающего электрона на плоскость поверхности кристаллической мишени в асимметричной геометрии дифракции. Разработана методика экспериментального исследования эффекта увеличения выхода ПРИ. На основе разработанной методики выполнен эксперимент.
- Выполнен расчёт оптимальных условий проведения измерений функции распределения разориентации микроблоков мозаичных кристаллов в произвольно заданной плоскости на основе рассеяния широкополосного излучения исследуемой мишенью. Разработаны методика и установка для измерения двухмерной функции распределения разориентации микроблоков мозаичных кристаллов. Выполнен эксперимент.
- Разработана математическая модель источника рентгеновского излучения, основанного на рассмотрении механизмов переходного, тормозного и когерентного тормозного излучения при многократном прохождении электронного пучка через внутреннюю мишень в циклическом ускорителе.
- Теоретически исследована возможность увеличения угловой плотности излучения Вавилова-Черенкова в области вакуумного ультрафиолета и

мягкого рентгена при скользящем падении излучающего электрона на поверхность тонкой аморфной мишени в режиме трансформации конуса излучения. Рассчитаны оптимальные условия соответствующего эксперимента.

- Теоретически исследована возможность генерации излучения Вавилова-Черенкова в слоистой наноструктуре в геометрии рассеяния Брэгга. Рассчитаны характеристики возможного источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена на основе рассматриваемого процесса.
- Теоретически исследована возможность увеличения выхода переходного излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена в скользящей геометрии взаимодействия слаборелятивистского электрона с плоскостью поверхности радиатора. Рассчитаны характеристики возможного источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена, основанного на переходном излучении слаборелятивистского электрона в рассматриваемой геометрии.
- Теоретически исследован механизм параметрического излучения нерелятивистских электронов в области вакуумного ультрафиолета, взаимодействующих с многослойной структурой. Рассчитаны характеристики возможного источника вакуумного ультрафиолета, в том числе в области аномальной дисперсии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

- [A1] Adischev Y.N., Arishev S.N., Vnukov A.V., Potylitsyn A.P., Kuznetsov S.I., Zabaev V.N., Kalinin B.N., Kaplin V.V., Uglov S.R., Nasonov N.N., **Kubankin A.S.** Angular Distributions of X-ray Radiation by 500MeV Electrons in a Tungsten. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2003. – V. 201. – P. 114-122.
- [A2] **Kubankin A.**, Nasonov N., Sergienko V., Vnukov I. An investigation of the parametric X-rays along the velocity of emitting particle // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2003. – V. 201. – P. 97-113.
- [A3] А.Н. Алейник, А.Н. Балдин, Е.А. Богомазова, И.Е. Внуков, Б.Н. Калинин, **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, А.Ф. Шарафутдинов Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения вдоль скорости релятивистских электронов, движущихся в кристалле вольфрама // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 80. – Вып. 6 – С. 447-451.
- [A4] C.Gary, V.Kaplin, **A.Kubankin**, N.Nasonov, M.Piestrup, S.Uglov An investigation of the Cherenkov X-rays from relativistic electrons // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2005. – V. 227. – P. 95-103.
- [A5] C.K. Gary, V.V. Kaplin, **A.S. Kubankin**, N.N. Nasonov, M.A. Piestrup, S.R.Uglov X-ray generation from relativistic electrons passing through thin targets in cyclical accelerators // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2005. – V. 225. – P. 216-229.
- [A6] Kaplin V.V., Uglov S.R., Bulaev O.F., Goncharov V.J., Voronin A.A., Vaskovsky I., Sergeev G., Nasonov N.N., **Kubankin A.S.**, Piestrup M.A., Fuller M.K., Gary C.K. X-ray generation from thin targets mounted inside a compact betatron // Proc. SPIE. – 2005. – V. 5917. – P. 1-7.

- [A7] Ишханов Б.С., **Кубанкин А.С.**, Насонов Н.Н., Сергиенко В.И. О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ // Проблемы региональной экологии. – 2005. – № 6. – С. 77-81.
- [A8] С. Gary, V. Kaplin, **A. Kubankin**, V. Likhachev, N. Nasonov, M. Piestrup, S. Uglov On X-ray sources based on Cherenkov and quasi-Cherenkov emission mechanisms // H. Wiedemann (ed.), Advanced Radiation Sources and Applications. – 2006. – V. 199. – P. 235-265.
- [A9] **A. Kubankin**, N. Nasonov, V. Kaplin, S. Uglov, M. Piestrup, C. Gary X-ray Cherenkov radiation under conditions of grazing incidence of relativistic electrons onto a target surface // Radiation Physics and Chemistry. – 2006. – V. 75. – P. 913-919.
- [A10] **A. Kubankin**, V. Likhachev, N. Nasonov, A. Rakitjansky, P. Zhukova Cherenkov effect and parametric X-rays // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2006. – V. 252. – P. 124-130.
- [A11] В.А. Астапенко, **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, Г.П. Похил, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло Экспериментальное измерение поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристаллических мишенях // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – Вып. 6. – С. 341-344.
- [A12] N.N. Nasonov, **A.S. Kubankin**, P.N. Zhukova, M. Goldstein, D.L. Williams, M.A. Piestrup, H. Park Extreme ultraviolet emission from non-relativistic electrons penetrating a multilayer nanostructure // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 2007. – V. 254. – P. 259-267.
- [A13] V. Astapenko, V. Khablo, **A. Kubankin**, N. Nasonov, G. Pokhil, V. Polyansky, V. Sergienko, P. Zhukova Polarization bremsstrahlung from

relativistic electrons for medium structure diagnostics // Proc. SPIE. – 2007. – V. 6634. – P. 1-9.

[A14] Алейник А.Н., Арышев С.И., Вуколов А.В., Забаев В.Н., **Кубанкин А.С.**, Насонов Н.Н., Потылицын А.П., Разин С.В., Тимченко Н.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА В РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА МИКРОТРОНЕ С ЭНЕРГИЕЙ 6 МЭВ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 4. – С. 73-75.

[A15] В.Н.Забаев, **А.С. Кубанкин**, Д.А. Веригин, Н.Н.Насонов, А.П.Потылицын, С.В.Разин, Н.А. Тимченко Излучение Вавилова - Черенкова в рентгеновской области спектра. Эксперимент на микротроне с энергией 6 МэВ // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – № 10/3. – С.155-158.

[A16] П.Н. Жукова, **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко. Модификация EDXD метода диагностики структурированных сред // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74. – № 10. – С. 32-37.

[A17] В.А. Астапенко, Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло Модификация EDXD метода диагностики поликристаллических и мелкозернистых сред // Известия РАН. Серия Физическая. – 2008. – Т.72. – № 6. – С.912-915.

[A18] **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов О возможности использования параметрического рентгеновского излучения для исследования анизотропии мозаичности кристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 3. – С. 76-79.

- [A19] Н.А. Гостищев, **А.С. Кубанкин**, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло Угловая зависимость положения когерентного пика в спектре поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристалле // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 17. – С.78-82.
- [A20] **А.С. Кубанкин** Особенности переходного излучения в режиме скользящих углов вылета слабoreлятивистского электрона из плоской мишени // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 21. – С. 46-51.
- [A21] **А.С. Кубанкин** Особенности переходного механизма излучения электронов в области вакуумного ультрафиолета // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 4. – С. 72-76.
- [A22] А.Н. Елисеев, **А.С. Кубанкин**, Р.М. Нажмудинов, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко, А.В. Субботин, Г.Г. Субботин, В.А. Хабло Обнаружение эффекта усиления параметрического излучения в условиях скользящего падения релятивистских электронов на поверхность кристалла // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90. – Вып. 6. – С. 482-485.
- [A23] A.N. Eliseev, V.A. Khablo, **A.S. Kubankin**, N.N. Nasonov, R.M. Nazhmudinov, V.I. Sergienko, A.V. Subbotin First observation of parametric X-ray radiation enhancement for grazing incident electrons // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – V. 236. – P. 012018-012022.
- [A24] V.I. Alekseev, P.N. Zhukova, E. Irribarra, **A.S. Kubankin**, N.N. Nasonov, R.M. Nazhmudinov, V.I. Sergienko X-ray studies of the distribution function of crystalline grains over orientation angles in mosaic crystals // NUOVO CIMENTO C. – 2011. – V. 34. – Iss. 4. – P. 349-357.
- [A25] Жукова П.Н., **Кубанкин А.С.**, Ладных М.С., Насонов Н.Н. Определение функции распределения микроблоков мозаичного кристалла

по углам ориентации на основе рассеяния синхротронного излучения // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2011. – Т. 75. – № 2. – С. 244-246.

[A26] Алексеев В.И., Вохмянина К.А., Елисеев А.Н., Жукова П.Н., **Кубанкин А.С.**, Нажмудинов Р.М., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Сергиенко В.И. Обнаружение когерентных пиков поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристалле в геометрии обратного рассеяния // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – № 6. – С. 83-89.

[A27] В.И. Алексеев, Э.Ф. Иррибарра, **А.С. Кубанкин**, Р.М. Нажмудинов, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, В.И. Сергиенко Экспериментальное исследование поляризационного тормозного излучения в мелкозернистых поликристаллах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 3. – С. 88-90.

[A28] В.И. Алексеев, А.Н. Елисеев, Э.Ф. Иррибарра, Р.М. Нажмудинов, Н.Н. Насонов, **А.С. Кубанкин**, В.В. Полянский, В.И. Диагностика нанодисперсных поликристаллов на основе поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 4. – С. 46-58.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

[1] П.Н. Жукова Коллективные эффекты в процессах рассеяния электромагнитного поля релятивистских электронов в конденсированных структурированных средах. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. – 2010. – 274 с.

- [2] Амусья М.Я., Буймистров В.М., Зон Б.А., Цытович В.Н. и др. Поляризационное тормозное излучение частиц и атомов. – М.: Наука, 1987. – 334 с.
- [3] S. Blazhevich, A. Chepurnov, V. Grishin et al. Polarization Bremsstrahlung of relativistic electron in aluminium // *Phys. Lett. A.* – 1999. – V. 254. – P. 230-236.
- [4] Y. Takabayashi, I. Endo, K. Ueda, C. Moriyoshi, A. V. Shchagin Observation of intense PXR from textured polycrystal // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* – 2006. – V. 195. – P. 453-457.
- [5] S. Nawang, I. Endo, M. Iinuma et al. Parametric X-ray Study from Textured Molybdenum Polycrystal // *Journal of the Physical Society of Japan.* – 2006. – V. 75. – Iss. 12. – P. 124705-124710.
- [6] V. Astapenko, N. Nasonov, P. Zhukova Anomalous peak in the spectrum of polarizational bremsstrahlung from relativistic electrons moving through a solid target // *J. Phys. B.* – 2007. – V. 40. – P. 1337-1346.
- [7] V. Astapenko, V. Khablo, A. Kubankin, N. Nasonov, G. Pokhil, V. Polyansky, V. Sergienko, P. Zhukova Polarization bremsstrahlung from relativistic electrons for medium structure diagnostics // *Proc. SPIE.* – 2007. – V. 6634. – P. 1-9.
- [8] Feranchuk I.D., A.I. Ivashin Theoretical investigation of parametric X-ray features // *J. Physique.* – 1985. – V. 46. – P. 1981-1986.
- [9] Жукова П.Н., Кубанкин А.С., Ладных М.С., Насонов Н.Н. Определение функции распределения микроблоков мозаичного кристалла по углам ориентации на основе рассеяния синхротронного излучения // *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* – 2011. – Т. 75. – № 2. – С. 244-246.

- [10] И.Е. Внуков, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, Д.В. Падалко, А.П. Потылицын Параметрическое рентгеновское излучение электронов в мозаичных кристаллах // Известия ВУЗов, Физика. – 2001. – Т. 44. - № 3. – С.53-65.
- [11] Nasonov N., Zhukova P. Anomalous photoabsorption in the parametric X rays in conditions of Cherenkov effect // Phys. Lett. A. – 2005. – V. 346. – P. 367 - 370.
- [12] B. Sones, Y. Danon, R.C. Block Lithium fluoride (LiF) crystal for parametric X-ray (PXR) production // Nuc. Instr. Methods B. – 2005. – V. 227. – Iss. 1. – P. 22–31..
- [13] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa et al. Status of the parametric X-ray generator at LEBRA, Nihon University // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 2006. – V. 252. – P. 102-110.
- [14] M. A. Piestrup, L. W. Lombardo, J. T. Cremer, G. A. Retzlaf, R. M. Silzer, D. M. Skopik, V. V. Kaplin Increased x-ray production efficiency from transition radiators utilizing a multiple-pass electron beam // Rev. Sci. Instrum. – 1998. – V. 69. – P. 2223-2229.
- [15] V.V. Kaplin, S.R. Uglov, O.F. Bulaev, V.J. Goncharov, M.A. Piestrup, and C.K. Gary Observation of multiple passes of electrons through thin internal targets of a betatron // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 2001. – V. 173. – P. 3-15.
- [16] V.V. Kaplin, S.R. Uglov, V.N. Zabaev, M.A. Piestrup, C.K. Gary, N.N. Nasonov, M.K. Fuller Observation of bright monochromatic x rays generated by relativistic electrons passing through a multilayer mirror // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V. 76. – P. 3647-3655.
- [17] V.I. Bespalov, V.V. Kashkovsky, V.L. Chakhlov Generation of bremsstrahlung during multiple passes of accelerated electrons through a thin

- target in a betatron // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 2003. – V. 201. – P. 292-299.
- [18] W. Knulst, M. van der Wiel, O. Luiten and J. Verhoeven High-brightness compact X-ray source based on Cherenkov radiation // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5196.
- [19] N. K. Zhevago, V. I. Glebov X-ray Cherenkov radiation at grazing incidence of electrons // Phys. Lett. A. – 1991. – V. 160. – P. 564-570.
- [20] M. Moran, B. Chang, M. Schneider, X. Maruyama Grazing-incidence Cherenkov X—ray generation // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 1993. – V. 48. – P. 287-293.
- [21] N.N. Nasonov, V.V. Kaplin, S.R. Uglov, M.A. Piestrup, C.K. Gary X rays from relativistic electrons in a multilayer structure // Phys. Rev. E. – 2003. – V. 68. – P.3604-3610.
- [22] И.М. Франк, А.П. Кобзев, С. Михалык, Е. Рутковский Излучение под углом полного внутреннего отражения света от среды // Ядер. Физика. – 1973. – Т. 18. – № 4. – С. 865-869.
- [23] B. Pardo, J.M. Andre Parametric and resonant transition radiation in periodic stratified structures // Phys. Rev. E. – 2002. – V. 65. – P. 1240-1247.