

Гоголев Алексей Сергеевич

**Генерация параметрического рентгеновского излучения
умеренно релятивистскими заряженными частицами**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Потылицын Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Крючков Юрий Юрьевич

доктор физико-математических наук,
профессор
Насонов Николай Николаевич

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Защита состоится “23” декабря 2008 г. в 14 часов 30 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 228 (10 корпус ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “20” ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

О.Ю. Долматов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

После экспериментального обнаружения нового типа поляризованного излучения – параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), началось детальное изучение его свойств. Исследования проводились во многих ускорительных лабораториях мира (США, Японии, Германии и др.) на различного рода установках и в широком диапазоне энергий электронов. Интерес к данному типу излучения был вызван, в первую очередь, возможностью создания на его основе квазимонохроматического источника рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны.

К настоящему времени в Лаборатории исследования и приложения электронных пучков при университете Нихон (Laboratory for Electron Beam Research and Application at Nihon University, Japan) и Лаборатории линейных ускорителей электронов Гаертнера при политехническом институте Ренселаера (Gaertner LINAC Laboratory at Rensselaer Polytechnic Institute, USA) созданы действующие источники рентгеновского излучения с использованием ПРИ на пучках электронов с энергией 100 и 56 МэВ, соответственно.

Исследования характеристик ПРИ, в основном, проводились на релятивистских пучках электронов. Однако следует указать на перспективность данного типа излучения от умеренно релятивистских частиц (Лоренц-фактор меньше 10) для анализа кристаллических структур, наноструктур, а также для диагностики ускоренных пучков заряженных частиц. К началу работы над диссертацией было проведено только несколько работ на умеренно релятивистских пучках. В силу разнородности и скудности экспериментальных данных нет никаких оснований утверждать, что проблема описания экспериментальных результатов и, тем более, экспериментального исследования ПРИ от умеренно релятивистских частиц решена полностью. В данной области энергий, как известно, при изучении электромагнитных явлений с участием легких заряженных частиц на исследуемый процесс начинают влиять такие эффекты, как многократное рассеяние, потери энергии и интерференция с конкурирующими процессами. Необходимо также отметить, что во всех экспериментах использовались кристаллы с малой мозаичностью.

В релятивистском случае основные свойства ПРИ с хорошей точностью описываются кинематической моделью, которая не учитывает влияние указанных выше эффектов на процесс генерации излучения.

Таким образом, экспериментальное исследование характеристик ПРИ в условиях подавления фоновых процессов, а также усовершенствование модели генерации ПРИ умеренно релятивистскими частицами с учётом влияния различных факторов на процесс излучения является весьма актуальной задачей.

Цели и задачи работы

Целью работы является экспериментальные и теоретические исследования свойств параметрического рентгеновского излучения, при его генерации умеренно релятивистскими частицами в кристаллах.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. разработка алгоритма и кода для моделирования процесса генерации ПРИ умеренно релятивистскими частицами в кинематическом приближении с учётом реальных условий эксперимента;
2. экспериментальное исследование характеристик ПРИ, генерируемое протонами и ядрами углерода с Лоренц-фактором $\gamma < 6$, и проверка адекватности разработанной модели при сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными;
3. обоснование создания монохроматического источника рентгеновского излучения с регулируемой энергией линии в широких пределах от 2 до 130 кэВ на пучке электронов с энергией меньше 10 МэВ используя механизм ПРИ и эффект глобальной кинематической группировки;
4. обоснование возможности использования эффекта ПРИ для контроля и мониторинга качества изогнутых монокристаллических дефлекторов, которые широко используются в ускорителях для управления и вывода пучков.

Научная новизна

Экспериментально обнаружено ПРИ от умеренно релятивистских ядер. Результаты экспериментов впервые показали увеличение интенсивности ПРИ с ростом заряда частицы. Экспериментально была подтверждена модель кинематической группировки рефлексов ПРИ.

Обнаружен эффект глобальной кинематической группировки рефлексов ПРИ, в результате которого наблюдалось увеличение интенсивности линии ПРИ до 800% для кубической объёмцентрированной решетки (кристалл вольфрама). Использование данного эффекта позволило впервые наблюдать ПРИ от ядер углерода с энергией 2 ГэВ/нуклон, что соответствует Лоренц-фактору $\gamma = 3,13$, в кристаллах вольфрама.

Предложена новая схема источника монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны.

Предложен монитор качества кристаллических дефлекторов, позволяющий контролировать состояние дефлектора в процессе эксплуатации.

Теоретическая и практическая ценность работы

Результаты работы вносят вклад не только в фундаментальную физику, но и в развитие рентгеновских технологий. Разработанная модель позволяет

исследовать характеристики рентгеновского пучка полученного на основе механизма ПРИ как от умеренно релятивистских частиц, так и от релятивистских пучков. Кроме того, ПРИ от умеренно релятивистских частиц можно использовать в качестве инструмента для исследования качества поликристаллических структур, в частности, определять их мозаичность и текстуру.

В диссертации предложена схема интенсивного источника монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой энергией линии в диапазоне от 2 до 130 кэВ на основе ПРИ от умеренно релятивистских электронов с энергией 5,6 МэВ. Оценки интенсивности рентгеновского пучка и ширины спектральной линии дают величины порядка 10^{-5} фотон/е⁻/ср и 1 кэВ, соответственно.

В диссертации предлагается и обосновывается возможность использования ПРИ для мониторинга качества кристаллических дефлекторов в режиме реального времени.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментов и моделирования по исследованию характеристик ПРИ от умеренно релятивистских ядер в кристаллах кремния и вольфрама, доказывающие ранее известную теоретическую зависимость интенсивности ПРИ от заряда частицы.
2. Эффект глобальной кинематической группировки рефлексов ПРИ, позволяющий увеличить дифференциальный выход излучения.
3. Схема монохроматического рентгеновского источника с регулируемой длиной волны на основе механизма ПРИ и эффекта глобальной кинематической группировки, результаты моделирования характеристик рентгеновского пучка.
4. Обоснование использования эффекта ПРИ для on-line монитора качества и характеристик кристаллических дефлекторов, которые могут повреждаться под действием интенсивного пучка.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке задач, разработке методов и алгоритмов для их решения, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке данных, формулировке выводов в статьях, докладах и диссертации. Основные результаты, опубликованные в работах [1–5], получены при основном участии автора. В статьях [6–8], где приводятся экспериментальные результаты, полученные в совместных экспериментах в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна), вклад автора состоит в моделировании экспериментов, обработке данных и проведении сравнений с моделью.

Апробация диссертации и публикации

Результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях: XXXV Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2005, Москва; XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 2005, Алушта, Крым; XXXVI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2006, Москва; Научная сессия МИФИ, 2006, Москва; 2nd International conference «Channeling 2006», 2006, Frascati (Rome), Italy; XXth Russian conference on charged particle accelerators «RUPAC'06», 2006, Novosibirsk; XXXVII Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2007, Москва; VII International symposium «RREPS-07», 2007, Prague, Czech Republic; IV Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной энергетики», 2007, Томск.

По теме диссертации опубликовано 10 статей в отечественной и зарубежной научной печати, а также 11 тезисов докладов на международных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 75 библиографических ссылки. Общий объем диссертации составляет 108 страниц. Работа содержит 46 рисунков и 8 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, проведен краткий обзор литературы. Дано описание структуры диссертации и сформулированы основные задачи, решаемые в ней.

В **первой главе** рассмотрена кинематическая теория ПРИ и получены основные формулы для построения модели ПРИ от умеренно релятивистских частиц:

1) энергия квантов ПРИ

$$\hbar\omega = \frac{\hbar\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}}{1 - \sqrt{\langle \varepsilon \rangle} \mathbf{n}^* \cdot \mathbf{v} / c} = \frac{2\pi\hbar c}{d} \frac{\beta \sin \theta_B}{1 - \sqrt{\langle \varepsilon \rangle} \beta \cos \theta}, \quad (1)$$

где \mathbf{g} – вектор обратной решётки, $\mathbf{n}^* = \mathbf{k}^* / |\mathbf{k}^*|$ – направление вылета фотона ПРИ, β – отношение скорости частицы $|\mathbf{v}|$ к скорости света c , $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя диэлектрическая проницаемость среды, $d = a/(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$ – межплоскостное расстояние (период структуры), a – постоянная решётки, h, k, l – индексы Миллера, θ_B – угол Брэгга, θ – угол наблюдения, \hbar – постоянная Планка;

2) угловая плотность квантов излучения на единицу длины с учётом интерференции с когерентным тормозным излучением¹

$$\begin{aligned} \frac{d^2 N}{dL d\Omega} &= \frac{c\sqrt{\langle \varepsilon \rangle}}{\hbar\omega} \frac{1}{L} \int |R(\mathbf{E}_{\text{PXR}}(\omega) + \mathbf{E}_{\text{CBS}}(\omega))|^2 d\omega = \\ &= \frac{e^2 \omega^3}{2\pi \langle \varepsilon \rangle^{3/2} \hbar c^4 \beta (1 - \sqrt{\langle \varepsilon \rangle} \mathbf{n}^* \mathbf{v} / c)} \sum_{\mathbf{g}} |\chi_{\mathbf{g}}|^2 \left[\mathbf{n}^*, \left[\mathbf{n}^*, \left\{ \frac{z \langle \varepsilon \rangle \omega \mathbf{v} / c^2 - \mathbf{g}}{((\mathbf{k}^* + \mathbf{g})^2 - k^{*2})} - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - \frac{z^2 (Z - F(\mathbf{g}))}{\gamma g^2 F(\mathbf{g}) (1 - \sqrt{\langle \varepsilon \rangle} \mathbf{n}^* \mathbf{v} / c)} \frac{m_e}{m} \left(\langle \varepsilon \rangle \omega \frac{\mathbf{v}}{c} \left(\frac{\mathbf{n}^* \mathbf{g}}{\mathbf{g} \mathbf{v}} - \frac{1}{c} \right) + \mathbf{g} \right) \right\} \right] \right]^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь e – заряд электрона, z – заряд падающей частицы, Z – порядковый номер химического элемента мишени, $F(\mathbf{g})$ – Фурье-преобразование распределения электронной плотности атома мишени, $\chi_{\mathbf{g}}$ – коэффициенты разложения поляризуемости среды χ в ряд Фурье по векторам обратной решётки, m , m_e – масса покоя налетающей частицы и электрона, соответственно.

На рис. 1 приведены угловые распределения излучения одного рефлекса (111) от электронов с разной энергией в кристалле кремния.

Во **второй главе** предложена модель ПРИ для умеренно релятивистского случая с учётом влияния на характеристики излучения таких факторов, как размеры пучка, расходимость, мозаичность, многократное рассеяние и конечная апертура детектора. Потери энергии учитываются в приближении непрерывного замедления. Поглощение рентгеновского излучения в мишени рассматривается в рамках классической теории дисперсии.

Эффективным и достаточно точным методом решения многопараметрических задач является метод Монте-Карло (МК). Выбор данного метода обусловлен тем, что в умеренно релятивистском случае распределения ПРИ с учётом указанных факторов невозможно выразить через элементарные функции.

Характеристики ПРИ определяются ориентацией кристалла относительно направления движения пучка, следовательно, спектральные и угловые распределения ПРИ, в первую очередь, обусловлены геометрией процесса. В реальной ситуации пучок обладает конечными размерами и расходимостью, кристаллическая мишень представляет собой поликристаллическую структуру с некоторой мозаичностью и апертура детектора имеет конечные размеры. Эти факторы приводят к нарушению геометрии рассматриваемого процесса. В связи с этим для сопоставления

¹ V.V. Morokhovskiy, J. Freudenberger, H. Genz et al. Theoretical description and experimental detection of the interference between parametric X radiation and coherent bremsstrahlung // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61. – P. 3347

теоретических оценок с результатами эксперимента необходимо учитывать влияние этих факторов.

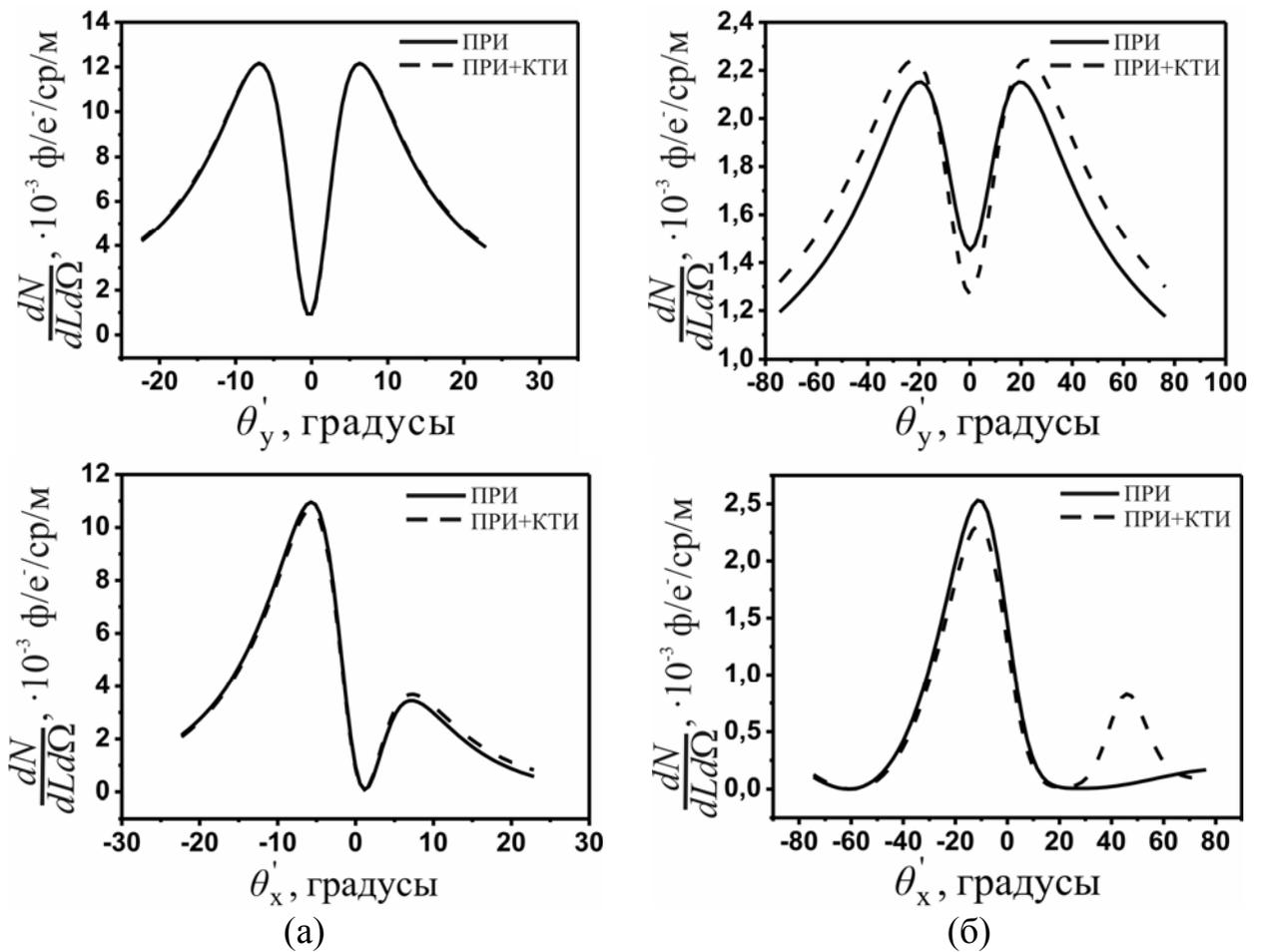


Рис. 1. Угловые распределения рефлекса (111) ПРИ от электронов с полной энергией 5 МэВ (а) и 1,5 МэВ (б) в кристалле Si с учётом интерференции с КТИ и без учёта для угла Брэгга $\theta_B = 20^\circ$.

Угловое распределение будет искажаться незначительно в силу того, что характерный угловой «раствор» конуса ПРИ от умеренно релятивистских частиц ($\sim \gamma^{-1}$) существенно превышает возможный вклад указанных факторов. Однако форма спектральной линии будет деформироваться (уширяться) заметным образом.

Параметры, которые определяют геометрию процесса генерации ПРИ – $\mathbf{n} = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$, $\mathbf{n}_g = \mathbf{g}/|\mathbf{g}|$, \mathbf{n}^* , соответствующие единичным векторам в направлении движения частицы, вектора обратной решётки кристалла и испущенного кванта ПРИ, соответственно. Данные параметры в эксперименте можно считать случайными величинами с заданной плотностью распределения. Таким образом, решение задачи влияния геометрических факторов на свойства ПРИ методом МК сводится к моделированию случайных величин с определёнными функциями распределения. В частности, распределение частиц в пучке, расходимость пучка и мозаичность описываются распределениями Гаусса.

Учёт влияния рассеяния электронов на характеристики ПРИ методом МК сводится к расчёту фазовых координат частицы после прохождения последней некоторого отрезка пути из существующих теорий многократного рассеяния. Моделирование фазовых координат проводилось по модели отрезков, которая обладает большим быстродействием.

Алгоритм расчёта: 1) определяем исходные параметры частицы на поверхности мишени с помощью генерации случайных величин из распределений, описывающие параметры пучка; 2) разыгрываем координату на детекторе и определяем направление излучения; 3) разыгрываем отклонение одного из векторов обратной решётки от его усредненного направления; 4) вычисляем характеристики ПРИ; 5) разыгрываем направление частицы на следующем отрезке из теории многократного рассеяния; 6) определяем энергию частицы в приближении непрерывного замедления; 7) повторяем всю процедуру, начиная со второго пункта до момента выхода частицы из мишени или потери полной энергии.

В третьей главе представлены результаты измерений и теоретических расчетов спектральных характеристик ПРИ от умеренно релятивистских протонов и ядер углерода в кристаллах кремния и их сравнение.

Эксперименты проводились в Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна) на выведенных из Нуклотрона пучках протонов и полностью ионизированных ядер углерода с энергией 5 ГэВ и 2,2 ГэВ/нуклон, соответственно, в которых, впервые, наблюдалось ПРИ от умеренно релятивистских ядер (рис. 2).

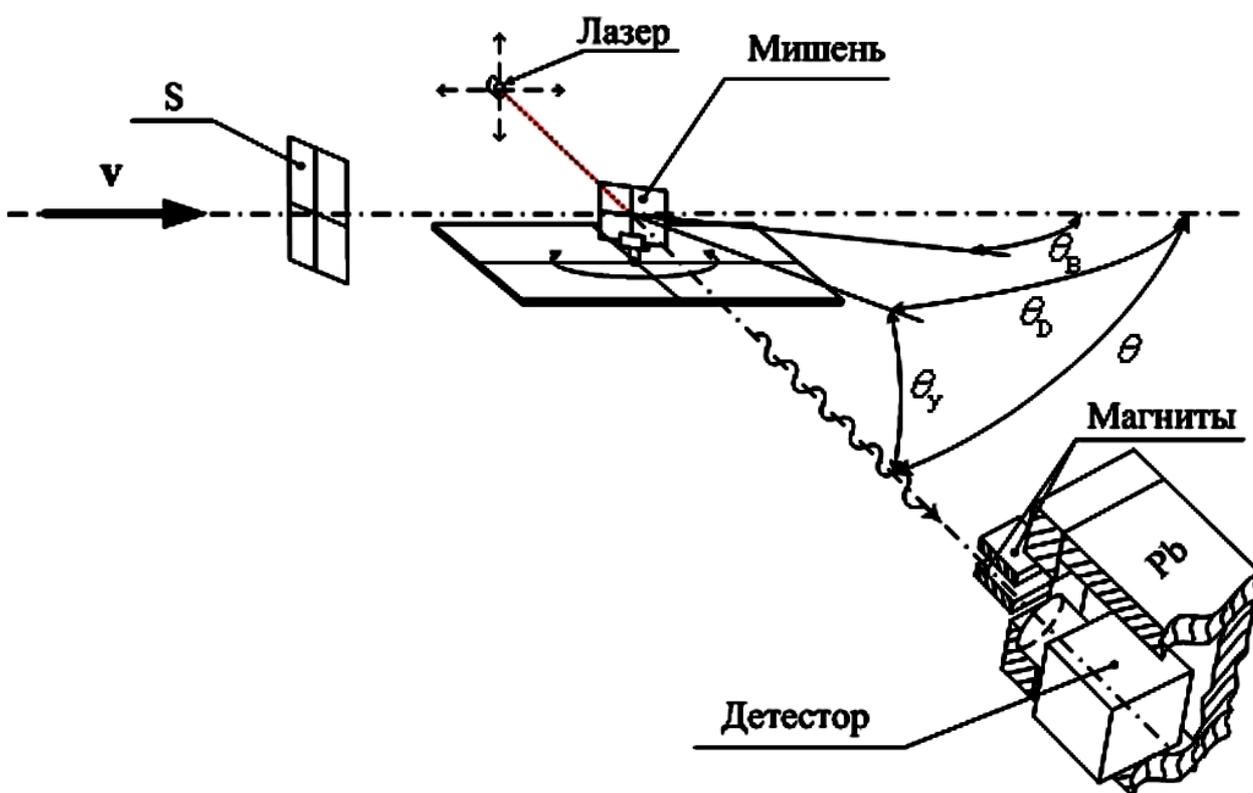


Рис. 2. Схема эксперимента. S – ионизационный монитор пучка, θ_D , θ_y – углы детектирования.

В экспериментах регистрировались кванты ПРИ рефлекса (004) в геометрии Брэгга полупроводниковым детектором с разрешением 1,9% на K_{α} -линии меди 8,046 кэВ. Положения пиков на измеренных спектрах зависят от угла ориентации (рис. 3), и соответствуют теоретическому описанию ПРИ (таб. 1 и 2). В исследованиях на протонном пучке толщина кристалла была 330 мкм. Для подавления фонового излучения в эксперименте на ядрах углерода использовался более тонкий кристалл толщиной 90 мкм.

Калибровка экспериментальных данных проводилась по характеристическому рентгеновскому излучению (ХРИ). Калибровочные измерения ХРИ K_{α} меди хорошо согласуются с теорией для отношения интенсивностей линий (разница 7% и 9% для ядер углерода и протонов, соответственно). По абсолютной же величине разница составляет величину $\sim 20\%$ для ядер и $\sim 70\%$ для протонов. Погрешность в основном определялась быстродействием спектрометра, в эксперименте на ядрах удалось существенно снизить фоновую загрузку, что привело к лучшему соответствию теории и эксперимента. Аналогичная разница наблюдается и для выхода ПРИ (таб. 1 и 2).

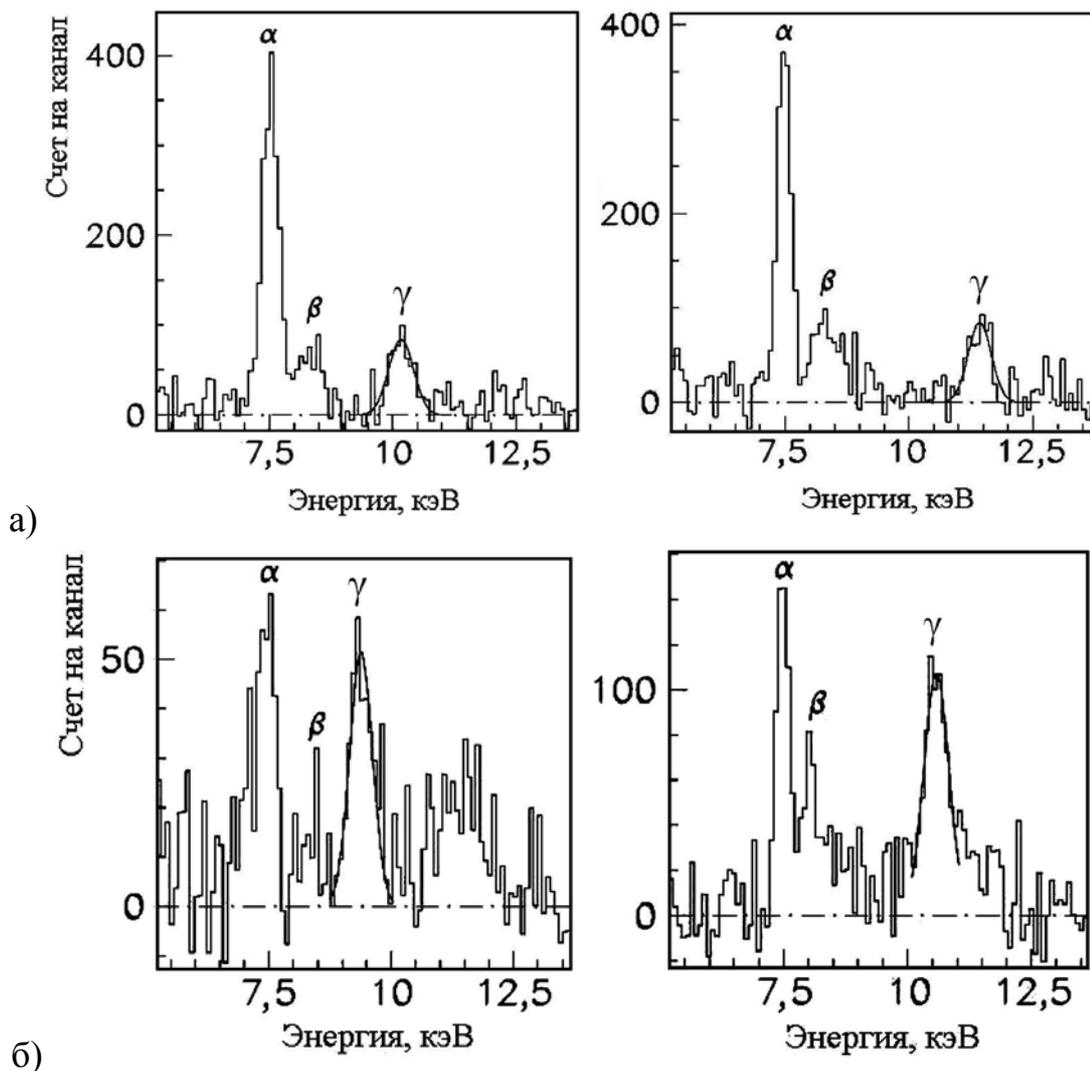


Рис. 3. Измеренные спектры от кристаллов кремния (001) после вычета фона для углов Брэгга 20° (слева) и $22,5^\circ$ (справа): а) протоны; б) ядра углерода.

В результате экспериментов и моделирования получены следующие данные:

Таб. 1. Результаты экспериментов и расчёта для протонов

Угол	ω , кэВ		$\Delta\omega$, эВ		N_γ	N_p	n_γ , ф/(р·ср)	
	теор.	эксп.	теор.	эксп.			теор.	эксп.
20°	9,97	10,1±0,2	450	540±60	380±70	5,33·10 ¹²	7,19·10 ⁻⁶	(2,1±0,4)·10 ⁻⁶
22,5°	11,15	11,4±0,2	496	640±80	400±100	5,33·10 ¹²	7,86·10 ⁻⁶	(2,3±0,6)·10 ⁻⁶

Таб. 2. Результаты экспериментов и расчёта для ядер углерода

Угол	ω , кэВ		$\Delta\omega$, эВ		N_γ	N_C	n_γ , ф/(C ⁶ ·ср)	
	теор.	эксп.	теор.	эксп.			теор.	эксп.
20°	9,5	9,4±0,2	442	700±90	400±100	1,49·10 ¹¹	1,27·10 ⁻⁴	(1,5±0,4)·10 ⁻⁴
22,5°	10,62	10,5±0,2	486	800±100	900±100	4,35·10 ¹¹	1,22·10 ⁻⁴	(1,1±0,1)·10 ⁻⁴
25°	11,73	11,8±0,2	474	700±100	300±100	2,29·10 ¹¹	1,39·10 ⁻⁴	(0,8±0,1)·10 ⁻⁴
30°	13,88	–	580	–	–	1,93·10 ¹¹	7,03·10 ⁻⁵	–

Опираясь на результаты экспериментальных и теоретических работ по изучению флюоресценции с K -уровней можно выдвинуть гипотезу о том, что теоретические оценки выхода ХРИ являются достаточно точными, и полученная ошибка обусловлена фоновой перегрузкой детектора. Таким образом, следуя данной гипотезе, истинные величины угловой плотности ПРИ составляют величины:

$$n_{\gamma e} \approx (7 \pm 1) \cdot 10^{-6} (20^\circ), (8 \pm 2) \cdot 10^{-6} (22,5^\circ), \text{ для протонов,}$$

$$n_{\gamma e} \approx (1,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} (20^\circ), (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} (22,5^\circ), \text{ для ядер.}$$

Откуда видно, что интенсивность ПРИ на одну частицу наблюдаемая от ядер углерода примерно в 25 раз выше, чем от протонов. Измеренное увеличение выхода согласуется с теоретическим предсказанием зависимости интенсивности ПРИ от величины заряда частицы.

Четвёртая глава посвящена эффекту кинематической группировке рефлексов ПРИ, которая возникает при выполнении условия:

$$\mathbf{g}_i \cdot \mathbf{v} \approx \mathbf{g}_j \cdot \mathbf{v}.$$

И заключается в том, что различные рефлексы ПРИ дают линии вблизи фиксированного значения энергии.

В случае, когда пучок движется вдоль направления типа $\langle 111 \rangle$ в кристалле с кубической элементарной ячейкой, условие кинематической группировки выполняется для всех разрешённых рефлексов ПРИ. Данный эффект нами назван глобальная кинематическая группировка (global plane effect). Эффект рассмотрен на примере кристаллов вольфрама (кубическая объёмцентрированная решётка) и кремния (кубическая гранецентрированная решётка). Использование данного эффекта позволило впервые наблюдать ПРИ от ядер в кристаллах вольфрама (111) и (110). Эксперимент проводился на выведенном пучке Нуклотрона полностью ионизованных ядер углерода с энергией 2 ГэВ/нуклон, что соответствует $\gamma = 3,13$. В этом случае рефлексы ПРИ достаточно широкие, что приводит к их наложению. Более того, если

выполняется условие кинематической группировки, в результате получим увеличение интенсивности линии ПРИ.

Расчётная угловая плотность ПРИ $n_{\gamma t}$ в случае W(111) на энергии 13,17 кэВ составила величину $3,0 \cdot 10^{-4}$ ф/С⁶/ср. Для W(110) на энергии 15,97 кэВ $n_{\gamma t} = 1,7 \cdot 10^{-4}$ ф/С⁶/ср (рис. 4). В эксперименте угловая плотность составила величину $n_{\gamma} = (2,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$ и $n_{\gamma} = (2,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ ф/С⁶/ср для W(111) и W(110), соответственно. Согласно расчёту увеличение выхода составило ~ 800% и 600% относительно самого сильного рефлекса типа (11 $\bar{1}$) для кристалла W(111) и (02 $\bar{2}$) в случае с W(110), соответственно.

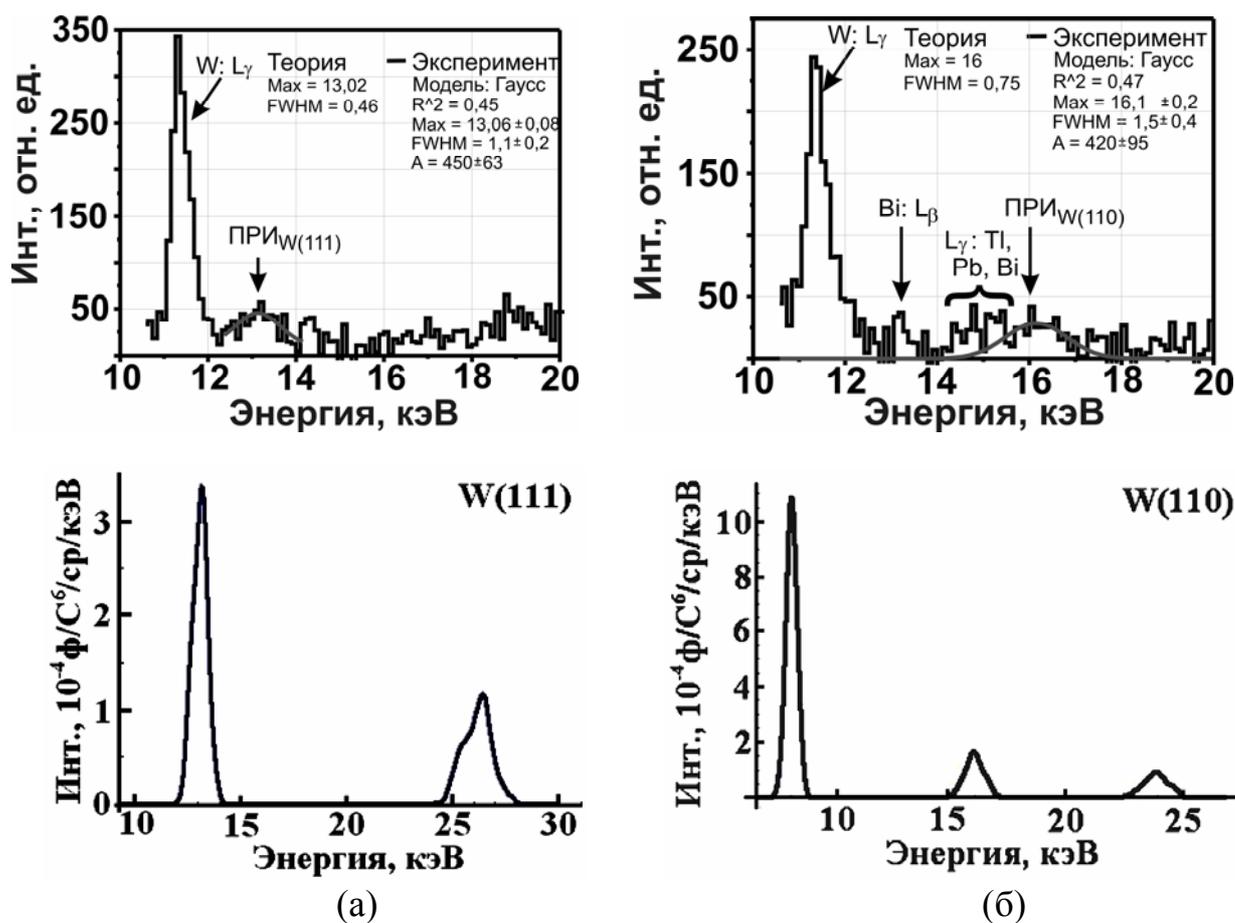


Рис. 4. Спектры ПРИ, полученные в эксперименте и расчетные: а) вольфрам (111); б) вольфрам (110). Расчётная полуширина линии в случае W(111) на энергии 13,17 кэВ составила величину 1,0 кэВ; в случае W(110) на энергии 16,0 кэВ 1,2 кэВ.

Из сравнения теории и эксперимента видно, что наблюдаемая в эксперименте интенсивность и ширина линий удовлетворительно согласуются с теорией. С другой стороны, положения максимумов для (111) и (110) вольфрама различны и не перекрываются. Толщины кристаллов примерно одинаковы. Это говорит о том, что максимумы не могут быть полностью образованы наложением линий ХРИ от вещества защиты (свинца

и его спутников), что также подтверждает образование наблюдаемых пиков механизмом ПРИ.

Значительная ширина пиков ПРИ объясняется большими размерами области облучения кристаллов и, следовательно, большим разбросом углов регистрации параметрического излучения, что подтверждается результатами моделирования.

В заключение главы рассмотрена принципиальная схема источника монохроматического рентгеновского излучения с изменяемой длиной волны на базе механизма ПРИ от электронов с энергией 5,6 МэВ. Использование эффекта глобальной кинематической группировки рефлексов ПРИ приводит к усилению линии на 3000%. Теоретические оценки интенсивности источника дают величину порядка 10^5 фотон/с при среднем токе пучка 100 мкА в энергетическом диапазоне от 2 до 130 кэВ и шириной линии порядка 1 кэВ (рис. 5).

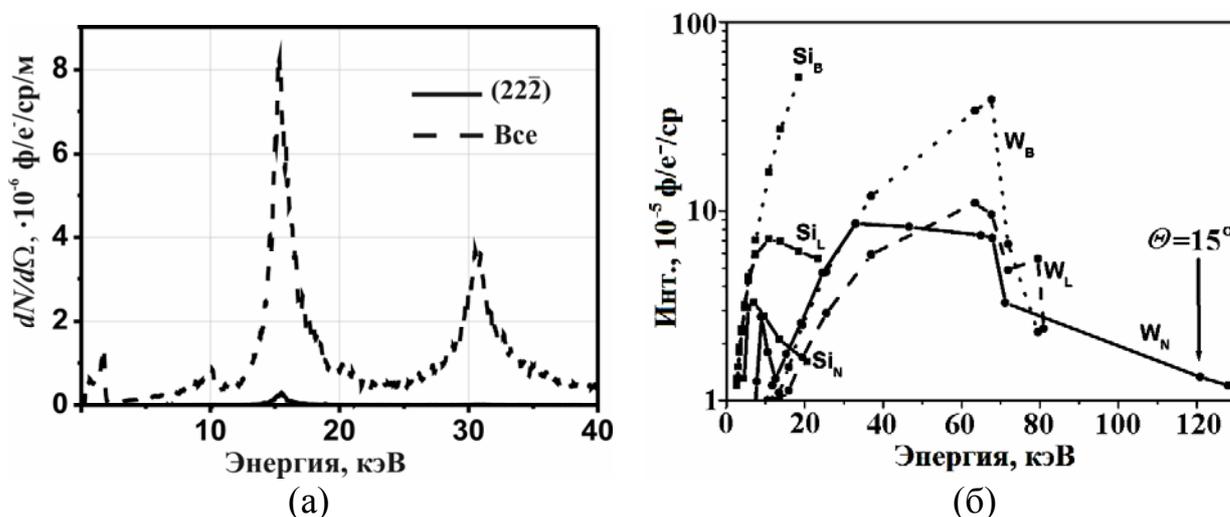


Рис. 5. а) расчётный спектр ПРИ от кристалла W (111) толщиной 100 мкм при угле наблюдения $\theta = 45^\circ$ (объемом выборки 10^3). Параметры пучка: размер $\sigma_{x,y} = 1$ мм; расходимость $\sigma_d = 5$ мрад. Апертура детектора 1 см^2 , расстояние между кристаллом и детектором 1 м. Сплошная линия – самый сильный рефлекс, штрихованная линия с учётом эффекта глобальной кинематической группировки; б) интенсивность линии ПРИ от мишеней из Si и W (111) толщиной 100 $\mu\text{м}$ для случаев Брэгга, Лауэ и геометрии глобальной кинематической группировки, индексы В, L и N, соответственно.

Из сравнения предложенного источника со стандартной рентгеновской трубкой следует, что первый будет обладать рядом преимуществ: 1) монохроматичность и возможность плавно изменять энергию излучения позволит увеличить контрастность исследуемого объекта; 2) дозовая нагрузка на объект уменьшается на порядок; 3) дифференциальная интенсивность излучения такого же порядка что и у рентгеновской трубки.

В проведённых экспериментах [6–8, 16] на умеренно релятивистских пучках Нуклотрона, впервые наблюдался эффект ПРИ от тяжелых заряженных частиц. Это открывает возможности использования данного

механизма в качестве инструмента, как для диагностики пучков ядер на имеющихся и строящихся ускорителях, так и мониторинга кристаллических дефлекторов, которые широко используются для управления пучками.

При взаимодействии пучка большой мощности с кристаллическим дефлектором, характеристики последнего могут изменяться. Результатом этих изменений может быть нарушение свойства дефлектора отклонять частицы пучка, в связи, с чем необходим on-line мониторинг его состояния. В рамках данной проблемы в **пятой главе** предлагается и обосновывается принципиальная схема on-line монитора кристаллических дефлекторов на основе параметрического рентгеновского излучения (рис. 6).

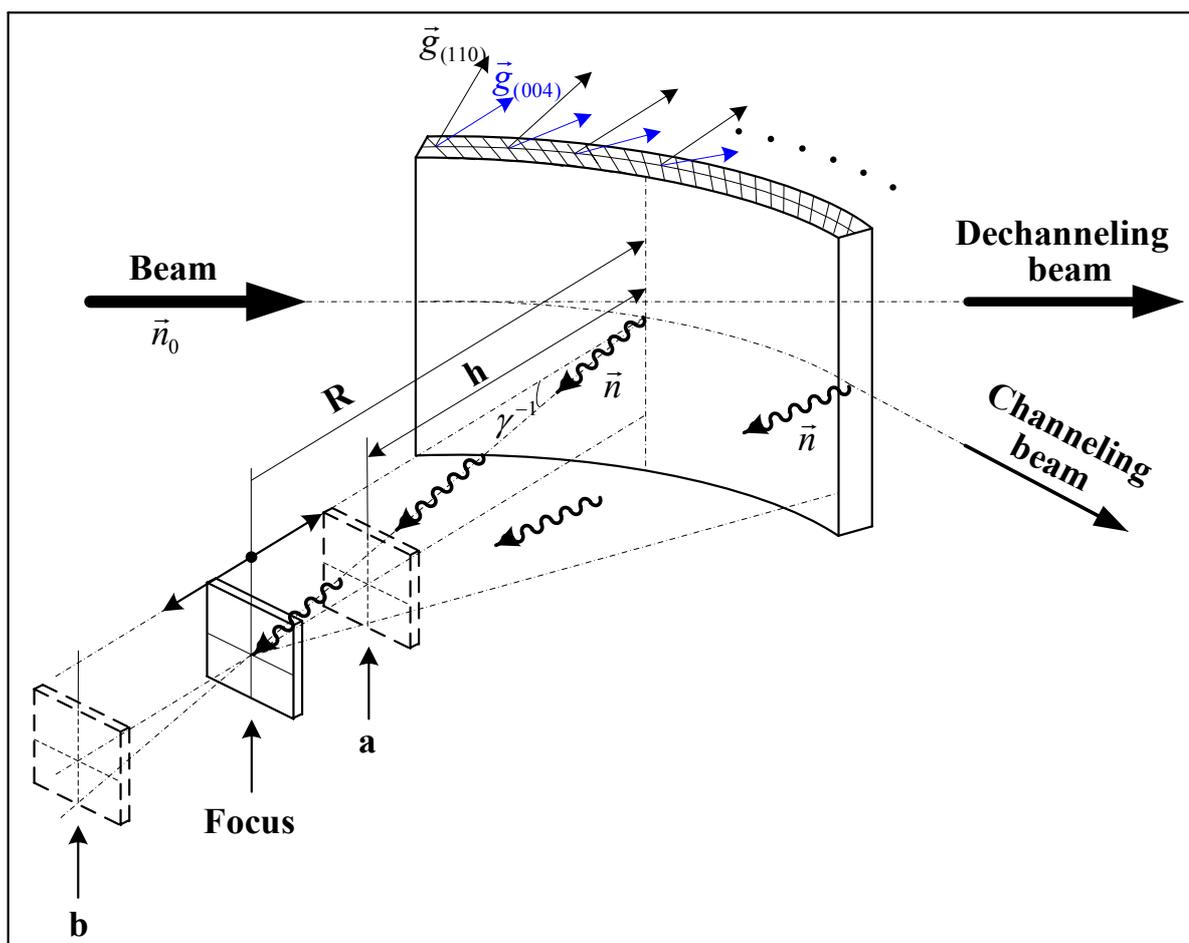


Рис. 6. Схема on-line монитора, где R - радиус изгиба дефлектора, h - расстояние между центром дефлектора и плоскостью детектора.

Как показывают оценки, методика позволит получать информацию не только о состоянии кристаллической структуры дефлектора, но и о радиусе изгиба кристалла, доле отклонённых частиц, радиационном нагреве дефлектора (рис. 7).

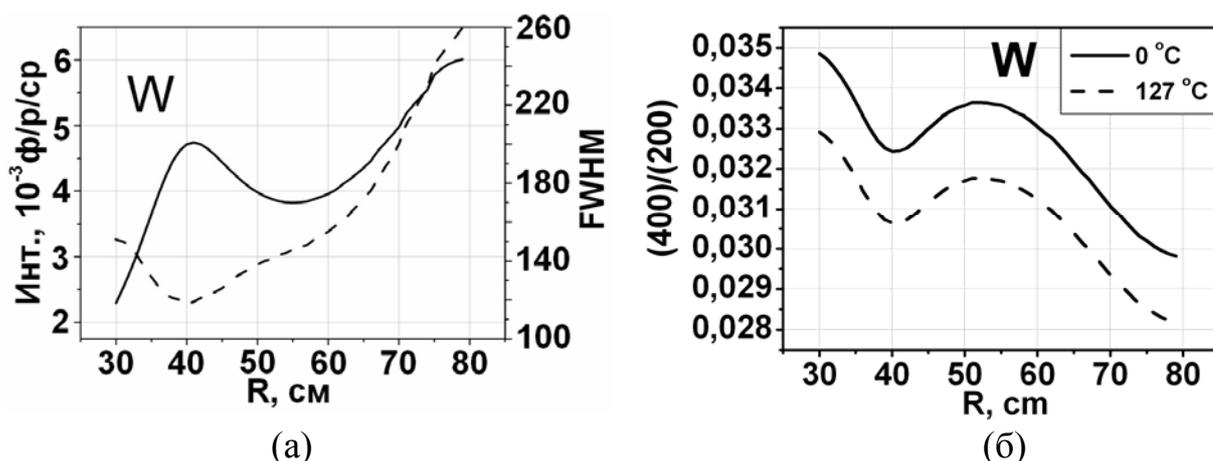


Рис. 7. а) расчётные зависимости интенсивности и полуширины линии ПРИ от радиуса изгиба вольфрамового дефлектора при доле отклонённых частиц 50% и фиксированном положении детектора $h = 40$ см, сплошная кривая и штрихованная, соответственно; б) зависимость отношения интенсивностей рефлексов ПРИ от радиуса изгиба кристалла при $h = 40$ см для разных температур кристалла (127°C – температура Дебая вольфрама).

В **Приложении I** представлена блок-схема программы для моделирования процесса генерации ПРИ.

В **Приложении II** приводятся табличные данные для выхода флюоресценции вблизи краёв поглощения.

В **заключении** излагаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана модель генерации параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) умеренно релятивистскими частицами в кинематическом приближении с учётом многократного рассеяния, конечных размеров пучка и апертуры детектора, расходимости пучка, потерь энергии на ионизацию, мозаичности, интерференцией ПРИ с когерентным тормозным излучением и поглощения излучения в кристалле-мишени.
2. Экспериментально обнаружено ПРИ от умеренно релятивистских ядер в кристаллах кремния и вольфрама. Результаты экспериментов показали удовлетворительное согласие с расчётом.
3. Впервые показана возможность глобальной кинематической группировки рефлексов ПРИ для кристаллов с кубической элементарной ячейкой, при которой все разрешённые рефлексы ПРИ в заданном направлении имеют линию вблизи одной энергии.
4. Впервые экспериментально наблюдался эффект глобальной кинематической группировки рефлексов ПРИ, который позволил исследовать ПРИ от ядер в кристаллах вольфрама.
5. Исследованы возможности использования ПРИ от умеренно релятивистских частиц для создания монохроматического рентгеновского

излучения с регулируемой длиной волны. Оценены интенсивность источника и ширина спектральной линии с использованием пучка электронов с энергией 5,6 МэВ, которые составили величины порядка 10^{-5} ф/е⁻/ср и 1 кэВ, соответственно. Проведён сравнительный анализ подобного источника с источником на основе стандартной рентгеновской трубки, который показал ряд преимуществ предлагаемого источника перед рентгеновской трубкой: ширина линии порядка 1 кэВ и возможность плавно изменять энергию излучения позволит увеличить разрешение исследуемого объекта; на порядок уменьшается дозовая нагрузка на объект; дифференциальная интенсивность излучения такого же порядка что и у рентгеновской трубки.

6. Предложена и обоснована методика on-line мониторинга дефлекторов пучков заряженных частиц, созданных на основе изогнутых монокристаллов с использованием параметрического рентгеновского излучения. Результаты моделирования демонстрируют следующие возможности методики: мониторинг состояния кристаллической структуры дефлектора (по наличию линии ПРИ и по соотношению сигнал/шум); определение радиуса изгиба кристалла (по ширине линии ПРИ); оценка доли отклонённых частиц (по интенсивности линии ПРИ); оценка радиационного нагрева дефлектора (по отношению интенсивности различных рефлексов).

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. А.С. Гоголев, А.П. Потылицын. Сравнение источников рентгеновского излучения на основе тормозного и параметрического // Известия ТПУ. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 57
2. А.С. Гоголев, А.П. Потылицын, С.Р. Углов. Кинематическая группировка рефлексов параметрического рентгеновского излучения // Поверхность. – 2008. – № 3. – С. 53
3. А.С. Гоголев, А.П. Потылицын. Источник параметрического рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. – № 11. – С. 64
4. A.S. Gogolev, A.P. Potylitsyn, A.M. Taratin. Method of crystal deflector monitoring // Proceedings of the RUPAC 2006, Novosibirsk, Russia (September 2006) <http://rupac2006.inp.nsk.su/ready/thdo03.pdf>
5. A.S. Gogolev, A.P. Potylitsyn, A.M. Taratin, Yu.S. Tropin. On-line control of crystal deflector quality // NIMB. – 2008. – Vol. 266. – P. 3876
6. Ю.Н. Адищев, А.С. Артёмов, С.В. Афанасьев, В.В. Бойко, М.А. Воеводин, В.И. Волков, А.С. Гоголев и др. Обнаружение параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских протонов в кристаллах // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 81. – № 6. – С. 305
7. Ю.Н. Адищев, А.С. Артёмов, С.В. Афанасьев, В.В. Бойко, М.А. Воеводин, В.И. Волков, А.С. Гоголев и др. Обнаружение параметрического

- рентгеновского излучения умеренно релятивистских ядер в кристаллах // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 10/3. – 177 С.
8. Yu.N. Adishev, S.V. Afanasiev, V.V. Boiko, A.N. Efimov, Yu.V. Efremov, A.S. Gogolev et al. First observation of parametric X-rays produced by moderate relativistic protons and carbon nuclei in Si crystals // NIMB. – 2006. – V. 252. – P. 111
 9. Ю.Н. Адищев, А.С. Гоголев, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын. Характеристическое и параметрическое рентгеновское излучение релятивистских заряженных частиц // Поверхность. – 2006. – № 3. – С. 13
 10. H. Backe, W. Lauth, A.F. Scharafutdinov, P. Kunz, A.S. Gogolev, A.P. Potylitsyn. Observation of forward diffracted parametric X radiation from single crystals at ultrarelativistic electron energy // [Proc. SPIE Vol. 6634, 66340Z](#) (arXiv:physics/0609151 v1 18 Sep 2006)
 11. Ю.Н. Адищев, А.С. Гоголев, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын. Характеристическое и параметрическое рентгеновское излучение релятивистских заряженных частиц // Тезисы докладов XXXV международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва: УНЦ ДО, 2005. – С. 71
 12. Backe H., Lauth W., Scharafutdinov A.F., Gogolev A.S., Potylitsyn A.P. Observation of forward diffracted parametric X radiation from single crystals at ultrarelativistic electron energy // Book of Abstracts of 2th International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena. – Frascati, Italy. – Rome: INFN, 2006. – P. 36
 13. Gogolev A.S., Potylitsyn A.P., Taratin A.M. Method of monitoring crystal deflectors // Abstracts of XXth Russian conference on charged particle accelerators. – Novosibirsk: BINP, 2006. – P. 53
 14. Гоголев А.С., Потылицын А.П., Таратин А.М. Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских заряженных частиц в изогнутом кристалле // Тезисы докладов XXXVI международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва: МГУ, 2006. – С. 61
 15. Гоголев А.С., Потылицын А.П., Таратин А.М., Углов С.Р. Параметрическое рентгеновское излучение умеренно релятивистских заряженных частиц // Научная сессия МИФИ-2006. – Москва: МИФИ, 2006. – Т. 7. – С. 226
 16. Adishev Yu.N., Afanasiev S.V., Boiko V.V., Efimov A.N., Yu.V. Efremov, Gogolev A.S. et al. Observation of parametric X-rays from moderate relativistic carbon nuclei in W crystals // International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (RREPS-07): Book of Abstracts - Prague, Czech Republic. – Prague: Czech Technical University, 2007. – P. 79
 17. Gogolev A.S., Potylitsyn A.P., Taratin A.M., Tropin Ig.S. On-line control of crystal deflector quality // International Symposium «Radiation from

- Relativistic Electrons in Periodic Structures» (RREPS-07): Book of Abstracts - Prague, Czech Republic. – Prague: Czech Technical University, 2007. – P. 19
18. Backe H., Lauth W., Scharafutdinov A.F., Kunz P., Gogolev A.S., Potylitsyn A.P. Forward diffracted parametric X radiation from a thick Tungsten single crystal at 855 MeV electron energy // International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena II: Proceedings of SPIE – V. 6634. – P. 663402-1
19. Гоголев А.С., Потылицын А.П. Кинематическая группировка рефлексов параметрического рентгеновского излучения // Тезисы докладов XXXVII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва: МГУ, 2007. – С. 74
20. Гоголев А.С., Потылицын А.П. Сравнение источников рентгеновского излучения на основе тормозного и параметрического излучения // Физико-технические проблемы атомной энергетики: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 40
21. Гоголев А.С., Потылицын А.П. Контроль параметров кристаллических дефлекторов в «on-line» режиме // Физико-технические проблемы атомной энергетики: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 39