

На правах рукописи

Жандармов Юрий Валерьевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЗАИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО РЕГИСТРАЦИИ

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Белгород – 2013

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

Научный руководитель: **Внуков Игорь Евгеньевич**, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Блажевич Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники, доцент, Белгородский государственный университет, г. Белгород

Малышевский Вячеслав Сергеевич, доктор физико-математических наук, декан физического факультета, профессор кафедры теоретической и вычислительной физики физического факультета, г. Ростов-на-Дону.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО "Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина", г. Тамбов

Защита состоится _____ 2013 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при Белгородском государственном национальном исследовательском университете по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Студенческая, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Автореферат разослан _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



В.А. Беленко

Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы. Конец XX и начало XXI века отмечены активным внедрением достижений физики и техники в другие области естествознания и практической деятельности. Наиболее явно это заметно для такой, казалось бы, традиционной и консервативной области как медицина. Современные медицинские клиники уже невозможно представить без рентгеновских компьютерных томографов, ЯМР томографов и так далее. В последнее время началось использование пучков монохроматического остронаправленного рентгеновского излучения, получаемого в электронных накопителях с помощью рентгеновских монохроматоров и других элементов рентгеновской оптики для диагностики поражений сосудов сердца и головного мозга с помощью венозной коронарной ангиографии и ряда других приложений.

Достигнутых на настоящий момент интенсивностей и параметров получаемых пучков рентгеновского излучения не всегда хватает, к тому же строительство и эксплуатация электронных накопительных колец на энергию частиц несколько ГэВ, являющихся сейчас основным источником интенсивных пучков рентгеновского излучения, требует больших затрат. Поэтому сейчас активно изучаются механизмы генерации рентгеновского излучения, возникающего при прохождении быстрых заряженных частиц через периодические мишени: кристаллы, рентгеновские зеркала и тому подобное в надежде, что они в ряде случаев смогут заменить накопительные кольца. При использовании ускорителей электронов средних энергий (~50-100 МэВ) затраты на строительство и эксплуатацию уменьшаются в десятки и сотни раз, что позволит приблизить такие источники излучения к потребителю.

Исследования, проведенные в последнее время, показали, что для решения этой задачи целесообразно использовать мозаичные кристаллы, поскольку они обеспечивают больший выход квазимонохроматического излучения, чем совершенные. В соответствии с классификацией монографии [1] здесь необходимы мозаичные кристаллы класса $b\alpha$, так как они обеспечивают как высокую интенсивность, так и удовлетворительную монохроматичность получаемого излучения. Для безопасности применения в медицине желательно использовать схемы генерации излучения, обеспечивающие минимизацию фона в месте расположения объекта облучения, например, двухкристальную схему, предложенную в [2]. Интенсивность пучков рентгеновского излучения, получаемых с применением схемы [2], недостаточна для использования в медицине, поэтому задача сохранения безопасности и удобства применения источника рентгеновского излучения с перестраиваемой энергий при существенном увеличении интенсивности

фотонного пучка, например, с помощью эффекта излучения при осевом каналировании электронов в совершенных кристаллах, является важной и актуальной.

Мозаичные кристаллы могут применяться в качестве кристаллов анализаторов кристалл-дифракционных спектрометров (КДС) при измерении спектра рентгеновского излучения быстрых электронов в кристаллах при наличии высокоэнергетичного и интенсивного фона тормозного излучения [3]. Их основным достоинством является возможность абсолютизации результатов измерений. Они же могут использоваться и когда необходимо выделение узкой спектральной линии на фоне более жесткого излучения, распространяющегося в том же направлении, как, например, в эксперименте [4] по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения под малым углом к скорости частицы. Результаты цитируемой работы приведены в относительных единицах из-за отсутствия точной информации о разрешении и эффективности КДС на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита. Для решения этой задачи необходимо более точно учесть вклад вторичных отражений и геометрии измерений, чем это было сделано в работе [3], где такая методика измерений спектров излучения быстрых электронов в кристаллах была использована впервые.

Цель работы. Разработка новых методов генерации интенсивных пучков рентгеновского излучения для прикладных целей и его регистрации с помощью мозаичных кристаллов класса b .

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) Разработка методики расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса $b\alpha$ и характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на их основе методом статистического моделирования, не имеющей ограничений на число отражений фотонов в образце, геометрию измерений и распределение блоков мозаичности в нем.
- 2) Расчет характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на основе кристаллов пиролитического графита, использованных в эксперименте [4] по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения под малым углом к скорости частицы, обработка и абсолютизация результатов этого эксперимента.
- 3) Оптимизация источника рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией на основе взаимодействия электронов средних энергий с периодическими структурами для медицинских применений.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Методика расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса $b\alpha$ и характеристик кристалл-дифракционных спектромет-

ров на их основе методом статистического моделирования, не имеющая ограничений на число отражений фотонов в образце, геометрию измерений и распределение блоков мозаичности в нем.

2) Результаты обработки данных эксперимента по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения вдоль скорости частицы в кристалле и оценка выхода излучения.

3) При использовании ускорителя с соответствующими параметрами трехкристальная схема генерации квазимонохроматического рентгеновского излучения с использованием совершенного кристалла для генерации когерентного излучения и его последующей дифракции в двухкристальной схеме с применением мозаичных кристаллов с $\sigma_m \sim 0.2-0.6$ мрад может найти применение в маммографии, компьютерной томографии и радиационной терапии онкологических заболеваний.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

1) Разработана методика расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса ba и характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на их основе методом статистического моделирования, не имеющая ограничений на число отражений фотонов в образце, геометрию измерений и распределение блоков мозаичности в нем.

2) Проведена обработка результатов эксперимента по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения вдоль скорости частицы в кристалле и получены оценки выхода излучения.

3) Предложена трехкристальная схема генерации монохроматического излучения для медицинских применений, определены достижимые параметры и область возможных применений.

4) Определены условия измерений спектрально-углового распределения излучения при осевом каналировании электронов в кристаллах на ускорителях средних энергий при помощи КДС на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита.

Практическая значимость:

- Развитая методика расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса ba и характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на их основе методом статистического моделирования не имеет ограничений на число отражений фотонов в образце, геометрию измерений и распределение блоков мозаичности в нем и может быть использована для определения параметров получаемых с помощью таких кристаллов пучков квазимонохроматического рентгеновского излучения, подготовки и проведения измерений.

- С небольшими изменениями она может быть использована и для расчета отражения нейтронов такими кристаллами, что может позво-

лить увеличить энергетический диапазон, в котором можно рассчитать отражающую способность, и избавиться от поправочных коэффициентов.

- Результаты исследований могут быть использованы для создания интенсивных пучков квазимонохроматического рентгеновского излучения для медицинских применений. При использовании ускорителя с соответствующими параметрами трехкристальная схема генерации квазимонохроматического рентгеновского излучения с использованием совершенного кристалла для генерации когерентного излучения и его последующей дифракции в двухкристальной схеме с применением мозаичных кристаллов с $\sigma_m \sim 0.2-0.6$ мрад может найти применение в маммографии, компьютерной томографии и радиационной терапии онкологических заболеваний.

Апробация результатов работы. Результаты, изложенные в диссертации, были представлены на XXXIX - XLI Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 2009-2011 гг.), VII - IX конференциях по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (г. Харьков, ННЦ ХФТИ, Украина, 2009-2011 гг.), Международном симпозиуме "Излучение релятивистских электронов в периодических структурах" (Звенигород, 2009), International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2010 (Феррара (Италия), 2010).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликовано в 10 печатных работах, из которых 7 статей опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и в реферируемых международными базами данных.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач исследования, разработке алгоритмов, написании компьютерных программ, обработке результатов измерений, анализе полученной информации и подготовке статей к публикации. Все результаты, приведённые в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Диссертация изложена на 125 страницах текста, содержит 20 рисунков, 7 таблиц и 112 библиографических ссылок.

Содержание работы. Во введении приведены историческая справка, обзор работ по проблеме, состояние исследований к моменту начала работы, обоснование необходимости проведения дальнейших исследований, формулируется цель, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложена структура и содержание диссертации.

Первая глава посвящена моделированию характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на основе мозаичных кристаллов класса

ба. В §1.1 описаны постановка задачи и обоснование использования мозаичных, а не совершенных кристаллов для создания КДС для измерения спектрально-угловых характеристик излучения неизвестного спектрального состава, в частности, излучения при осевом каналировании быстрых электронов в кристаллах. Объяснен выбор схемы измерений с использованием нескольких углов расположения детектора дифрагированного излучения и порядков отражения.

Принципиальная схема измерения спектрально-углового распределения излучения неизвестного состава с помощью кристалл-дифракционного спектрометра приведена на рисунке 1. Исследуемое излучение попадает на кристалл-анализатор, развернутый на угол Θ_B и вырезающий фотоны, попадающие в телесный угол $\Delta\Omega = \Delta\Theta_x \cdot \Delta\Theta_y$ определяемый размерами кристалла-анализатора и расстоянием между ним и кристаллической мишенью. Фотоны с энергиями, соответствующими этому углу Брэгга, отражаются и попадают в детектор (Д), расположенный под углом $\Theta_D = 2 \Theta_B$.

Перемещение кристалла-анализатора и соответствующее изменение угла расположения детектора в плоскости дифракции (горизонтальной) позволяет менять угол наблюдения относительно направления электронного пучка θ_n и таким образом измерять спектрально-угловое распределение угловой плотности интенсивности излучения.

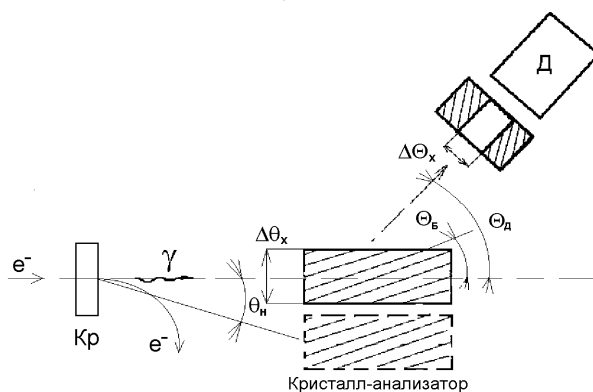


Рис. 1. Принципиальная схема измерения спектрально-углового распределения излучения с помощью кристалл-дифракционного спектрометра.

Для каждой пары углов расположения кристалла-анализатора и детектора измеряется спектр дифрагированного излучения. Зная эффективность спектрометра для этих условий и каждого порядка отражения i , спектрально-угловую плотность интенсивности излучения $Y(\omega, \theta_n)$ можно определить следующим образом:

Здесь $\Delta N(\omega, \theta_n, i)$ - зарегистрированный выход излучения для этих ω , θ_n и i -того порядка отражения, $P(\omega, \theta_n, i)$ - эффективность спектрометра для этих условий, усредненная по энергетическому захвату спектрометра $\Delta\omega_i$, $\Delta\Omega(\theta_n)$ - телесный угол, перекрываемый кристаллом-анализатором. Эффективность кристалл-дифракционного спектрометра определяется отражающей способностью кристалла для этой энергии фотонов, порядком отражения, геометрией взаимного расположения мишени, кристалла-анализатора и детектора, а также эффективностью используемого детектора дифрагированного излучения.

В §1.2 описана разработанная в диссертации методика расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса ba методом статистического моделирования. Методика основана на теории дифракции рентгеновского излучения в мозаичных кристаллах класса b [1] и не имеет ограничений на количество отражений, угол разориентации кристалла относительно брэгговского направления, толщину кристалла и распределение мозаичности в нем.

Для отражения мононаправленного и моноэнергетического фотонного пучка от элемента мозаичного кристалла объемом ΔV можно записать $\int P(\theta) d\theta = Q\Delta V$ [1], где $P(\theta)$ - отражающая способность кристаллического элемента под углом θ , пропорциональная распределению блоков мозаичности в кристалле. $Q\Delta V$ - интегральное отражение от элемента ΔV , где Q - интегральная отражающая способность зависит от параметров кристалла и энергии излучения следующим образом:

$$Q = \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \frac{N^2 \lambda^3}{\sin(2\theta)} |F_p| |F(\vec{g})|^2$$

Здесь N - концентрация рассеивающих центров, λ - длина волны излучения, θ - угол разворота плоскости кристалла относительно направления фотонного пучка. $|F(\vec{g})|^2 = |S(\vec{g})|^2 \cdot |f(\vec{g})|^2 \cdot \exp(-2W)$, где $|S(\vec{g})|^2$ - структурный фактор, $\exp(-2W)$ - фактор Дебая-Уоллера, $f(\vec{g})$ - Фурье-компонента пространственного распределения электронов в атоме кристалла, $(f(0) = Z$, где Z - число электронов в атоме). $|F_p|$ - поляризационный множитель, зависящий от поляризации падающего на кристалл излучения.

Используя подход работы [3] можно показать, что плотность вероятности отражения фотона с фиксированными энергией ω и направлением

движения в мозаичном кристалле толщиной Δt записывается в виде: $f(\omega, \vec{n}) = q(\omega, \vec{n}) Q(\omega) \Delta t$, где: $q(\omega, \vec{n})$ - коэффициент, учитывающий мозаичность кристалла

. Здесь $P_m(\alpha_x, \alpha_y)$ – двумерное распределение мозаичности кристалла, где α_x, α_y - углы разориентации микроблоков относительно основного направления. В этом случае изменение числа фотонов вследствие процесса дифракции в кристалле после прохождения слоя толщиной Δt можно записать в виде: $\Delta N_\gamma(\omega, \vec{n}) = -N_\gamma \cdot q(\omega, \vec{n}) Q(\omega) \Delta t = -N_\gamma \cdot \mu_{dif}(\omega, \vec{n}, \vec{g}) \Delta t$, где $\mu_{dif}(\omega, \vec{n}, \vec{g})$ - линейный коэффициент поглощения излучения с энергией ω и направлением движения \vec{n} из-за процесса дифракции в мозаичном

кристалле, \vec{g} - вектор обратной решетки микроблока, на котором происходит отражение.

С учетом этого факта зависимость числа фотонов $N_\gamma(\omega, \vec{n}, t)$ от толщины пройденного слоя кристалла t может быть записана в традиционной форме: $N_\gamma(\omega, \vec{n}, t) = N_0(\omega, \vec{n}) \exp(-\mu_{tot} t)$, где $N_0(\omega, \vec{n})$ - спектрально-угловое распределение падающего на кристалл излучения, а $\mu_{tot} = \mu_{dif}(\omega, \vec{n}, \vec{g}) + \mu_{pr}(\omega) + \mu_{inc}(\omega) + \mu_{coh}(\omega) + \mu_{pair}(\omega)$ - полный линейный коэффициент поглощения первичного излучения, обусловленный процессами дифракции - $\mu_{dif}(\omega, \vec{n}, \vec{g})$, фотопоглощения $\mu_{pr}(\omega)$, некогерентного (комптоновского) рассеяния - $\mu_{inc}(\omega)$, когерентного рассеяния - $\mu_{coh}(\omega)$ и процесса рождения электрон-позитронных пар - $\mu_{pair}(\omega)$. Возможность такой формы записи позволяет применить для описания процесса прохождения фотонов через мозаичный кристалл хорошо известный в

экспериментальной ядерной физике метод статистического моделирования (метод Монте-Карло).

Для фотона с энергией ω и волновым вектором $\vec{k} = \omega \vec{n} \sqrt{\epsilon_0}$ определялась точка попадания на кристалл пиролитического графита. С учетом известного распределения мозаичности кристалла разыгрывался угол разориентации микроблока относительно оси y в системе кристалла - α_y . Исходя из значений $\omega, \vec{k}, \theta_n$ определялся угол разориентации микроблока, на котором может дифрагировать фотон с такими ω, \vec{k} , относительно оси x - α_x . Далее, исходя из известного распределения мозаичности относительно оси x определялась вероятность существования такого блока в кристалле $w(\alpha_x)$ и линейный коэффициент поглощения первичных фотонов, обусловленного процессом дифракции - $\mu_{diff} = wQ$.

Для гауссовского распределения микроблоков искомая вероятность равна: $w = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha_x^2}{2\sigma^2}\right)$, где σ - характерный угол мозаичности используемого кристалла в горизонтальной плоскости.

Затем разыгрывался пробег фотонов до точки взаимодействия, определялись координаты точки взаимодействия, и разыгрывалось какой процесс произошел: дифракция, фотопоглощение, комптоновское рассеяние или когерентное рассеяние. Если точка взаимодействия не принадлежала кристаллу, проверялось попадание фотона в детектор, и розыгрыш начинался снова.

Дальнейший процесс моделирования определялся типом взаимодействия. Если произошел процесс фотопоглощения, моделирование начиналось снова. Если фотон рассеивался, то с помощью известных способов моделирования процессов взаимодействия фотонов с веществом определялись энергия рассеянного фотона ω' и направление его движения \vec{n}' . Далее для этих ω' и \vec{n}' снова разыгрывался угол разориентации микроблока α_y , определялся угол α_x , разыгрывалась длина свободного пробега и тип взаимодействия.

Если происходил процесс дифракции, то в соответствии с законом сохранения импульса можно записать: $\vec{k} = \vec{k}' + \vec{g}$. здесь \vec{k}' - волновой вектор дифрагированного фотона, \vec{g} - вектор обратной решетки микроблока кристалла, на котором произошел процесс дифракции. Далее исходя из ω и векторов \vec{g}, \vec{n} определялось направление движения дифрагированного фотона:

$$\vec{n}' = \vec{n} - \frac{\vec{g}}{\omega \sqrt{\epsilon_0}}.$$

Для фотона с энергией ω и направлением движения \vec{n} снова разыгрывался угол разориентации микроблока α_y , определялся угол α_x и весь процесс розыгрыша длины свободного пробега, определения координаты точки взаимодействия, проверки условия вылета из кристалла и процесса взаимодействия повторялся. Основное отличие второго и всех последующих четных отражений состоит в том, что фотон отражается с противоположной стороны плоскости, что эквивалентно развороту вектора \vec{b} вокруг оси y на 180° . История каждого фотона прослеживалась вплоть до его поглощения в кристалле или вылета из него с проверкой на попадание в детектор.

Развитая методика не имеет ограничений на толщину и геометрию используемого кристалла, который может состоять из нескольких образцов, угловое распределение блоков мозаики в них и тому подобное. Главные условия применимости методики: используемый кристалл должен быть кристаллом типа b , то есть характерный размер блоков в нем должен быть меньше длины первичной экстинкции для этого отражения и энергии фотонов, и наличие достоверной информации о двумерном угловом распределении блоков мозаичности в этом кристалле.

Поскольку процесс дифракции низкоэнергетических нейтронов в кристаллах описывается по аналогии с процессом дифракции рентгеновского излучения в мозаичных и совершенных кристаллах, развитая методика с небольшими изменениями может быть использована и для расчета отражения нейтронов такими кристаллами. Это позволит более точно учесть поглощение нейтронов в кристалле, увеличить энергетический диапазон, в котором можно рассчитать отражающую способность, и избавиться от поправочного коэффициента ~ 0.8 , используемого в большинстве работ по дифракции нейтронов для учета вклада поглощения и "остаточного" упругого рассеяния.

В §1.3 описана методика моделирования формы линии рентгеновских детекторов NaI(Tl) методом статистического моделирования, использованная в дальнейшем для определения абсолютных значений выходов излучения с фиксированной энергией в эксперименте [4].

На рисунке 2 показан участок спектра (\circ), измеренного NaI(Tl) детектором, в максимуме дифракционной кривой для угла расположения детектора $\Theta_D=5.306^\circ$, соответствующего энергии фотонов первого порядка отражения $\omega_1=40$ кэВ в эксперименте [4] после вычета фона. Здесь же приведен сглаженный спектр, полученный при моделировании прохождения фотонов с энергией $\omega=40$ кэВ через детектор (кривая). Гистограммой показано положение и соотношение амплитуд пиков, соответствующих регист-

рации полной энергии фотона (1) и вылету K_α и K_β квантов ХРИ йода, соответственно 2 и 3.

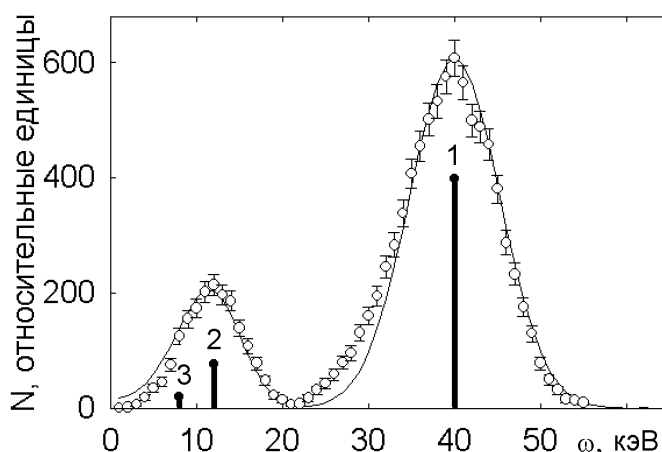


Рис. 2. Спектры, измеренные $NaI(Tl)$ детектором, при регистрации излучения с $\omega_1 = 40$ кэВ в эксперименте [4]:

кривая - моделирование; точки - эксперимент для $\Theta_D = 5.306^\circ$.

Как видно из рисунка, форма рассчитанного и измеренного спектров удовлетворительно согласуются между собой. Наиболее вероятным процессом взаимодействия фотонов с веществом детектора в диапазоне энергий квантов $\omega < 150$ кэВ является фотоэффект, поэтому основной сложностью является корректный учет вылета фотонов ХРИ йода из рабочего объема детектора, влияющего на соотношение амплитуд основного пика и пика "вылета". Измеренное соотношение площадей под этими пиками совпадает с результатами моделирования с точностью не хуже нескольких процентов. Для энергии фотонов первого порядка отражения $\omega = 40$ кэВ, где измерения проведены с наибольшей статистикой, обработка спектров дает значение этого соотношения 0.246 ± 0.002 . Моделирование дает величину 0.244. Другими словами, результаты моделирования и эксперимента хорошо согласуются между собой.

В §1.4 приведены результаты расчета характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на основе мозаичных кристаллов пироли-тического графита с использованием развитой методики расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса $b\alpha$. Проведено сопоставление результатов расчетов по развитой в диссертации методике с результатами уже известных методик. Проанализировано влияние экспериментальных факторов на характеристики КДС на основе мозаичных кристаллов класса $b\alpha$.

На рисунке 3 приведены результаты расчета эффективности спектрометра для энергии фотонов первого порядка отражения $\omega \sim 67$ кэВ и

условий эксперимента [4]. Зависимости 1,2 рассчитаны по методике [3] для точечного электронного пучка. Кривая 1 без учета координаты попадания фотона на кристалл-анализатор. Для фотона, летящего не вдоль оси экспериментальной установки, детектор расположен под углом, отличным от $\Theta_D = 2 \cdot \Theta_B$, что приводит к изменению спектральной зависимости эффективности отражения (см. зависимость 2).

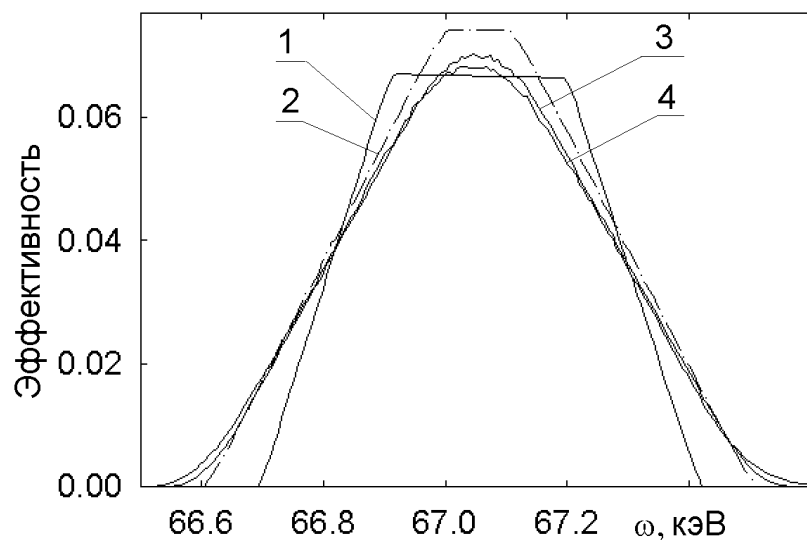


Рис. 3. Расчетная эффективность спектрометра для $\omega=40$ кэВ и условий эксперимента [4].

Результаты моделирования с учетом известных экспериментальных факторов (кривые 3, 4) отличаются от полученных по методике [3]. Учет поворота кристалла, точки вылета дифрагированного фотона из него и многократных отражений приводит к ухудшению разрешения и уменьшению эффективности отражения. Расчет зависимости 3 выполнен для точечного пучка, как и зависимости 1, 2. Учет пространственного распределения пучка электронов, падающих на внутреннюю мишень синхротрона, (кривая 4) показал, что этот фактор слабо влияет на характеристики спектрометра.

Исследовано влияние многократных отражений на характеристики кристалл-дифракционных спектрометров на основе мозаичных кристаллов класса *b*. Показано, что влияние многократных переотражений приводит к изменению ориентационной зависимости выхода дифрагированного излучения, то есть может привести к ошибкам определения характеристик кристаллов по результатам таких измерений. В §1.5 приведены выводы по результатам исследований, описанных в первой главе.

Вторая глава диссертации посвящена обработке результатов эксперимента [4] по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения под малым углом к скорости частицы в кристалле вольфрама с

помощью КДС кристалл-дифракционного спектрометра на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита.

В §2.1 приведено краткое описание схемы этого эксперимента, параметров КДС и результатов измерений. В эксперименте исследовалась зависимость выхода фотонов с фиксированной энергией от ориентации монокристалла вольфрама.

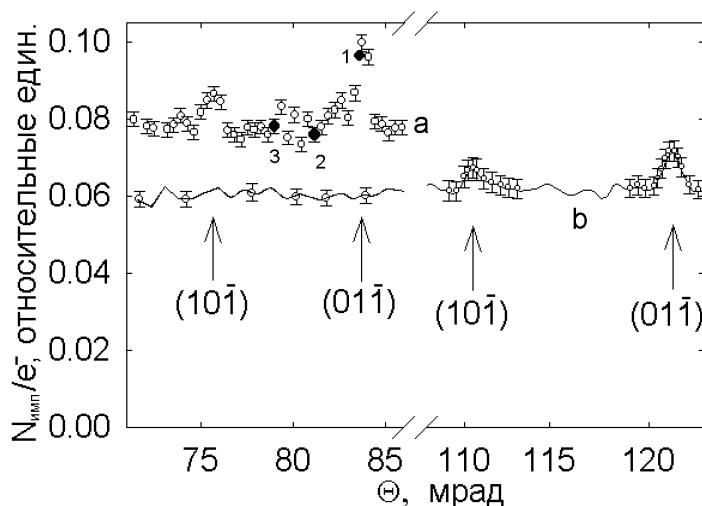


Рис.4. Ориентационная зависимость выхода излучения для энергий фотонов $\omega < \gamma\omega_p/2$ [4]: а - $\omega = 40$ кэВ; б - $\omega = 28.3$ кэВ; 1-3 - точки измерения спектров дифрагированного излучения для $\omega_1 = 40$ кэВ

Главным результатом цитируемой работы было обнаружение максимумов в области энергий фотонов $\omega < \gamma\omega_p/2$, где γ - Лоренц-фактор, а ω_p - плазменная частота (см. рис. 4), положение которых согласовывалось с законом Брэгга, что явилось доказательством обнаружения нового динамического эффекта излучения быстрых электронов в кристаллах - параметрического рентгеновского излучения под малым углом к скорости частицы.

В §2.2 приведено описание рабочих формул для расчета спектрально-углового распределения γ -излучения из кристалла вольфрама в эксперименте [4] и регистрируемого выхода излучения, в телесный угол, вырезаемый кристалл-дифракционными спектрометрами, необходимых для сопоставления результатов измерений этого эксперимента с теорией и проверки адекватности рассчитанных значений эффективности КДС.

В §2.3 приведены результаты обработки экспериментальных данных по выходу фотонов фиксированной энергии в эксперименте [4], измеренные с помощью КДС, и проведено сопоставление результатов расчета и эксперимента.

Таблица 1

Результаты измерения выхода излучения с помощью КДС.

ω , кэВ	Y , имп./элект.	P_{al}^{-1}	$P_{\text{воз}}^{-1}$	ϵ_{ω}	K_{Σ}
28.3	$0.48 \cdot 10^{-9}$	1.21	1.82	0.91	2.4
40	$1.24 \cdot 10^{-9}$	1.07	1.504	1	1.61
67	$3.07 \cdot 10^{-9}$	1.031	1.352	0.74	1.88
80	$0.13 \cdot 10^{-9}$	1.025	1.325	0.45	3.00
96	$1.45 \cdot 10^{-9}$	1.022	1.316	0.36	3.76
120	$0.57 \cdot 10^{-10}$	1.02	1.297	0.21	6.30

В таблице 1 приведены результаты обработки данных по измерению выхода излучения в эксперименте [4]. Здесь Y – зарегистрированное число срабатываний детектора NaI(Tl) на один электрон. Две следующие колонки таблицы учитывают поглощение излучения в выходном фланце ускорителя и в воздухе на пути от ускорителя до детектора P_{al} и $P_{\text{воз}}$, соответственно. ϵ_{ω} - эффективность NaI(Tl)-детекторов рассчитанная методом Монте-Карло. - итоговый поправочный коэффициент, связывающий измеренное значение выхода излучения с истинным значением. $Y_{\text{exp}} = Y \cdot K_{\Sigma}$.

Для подтверждения адекватности методики расчета выхода излучения, приведенной в предыдущем разделе, и методов определения эффективностей КДС и Na(Tl)-детекторов, в таблице 2 приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных выходов излучения.

Таблица 2

Сравнение результатов измерения и расчета выхода излучения.

ω , кэВ	Y_{exp} фот./элект	Y_{calc} фот./элект	$Y_{\text{exp}} / Y_{\text{calc}}$
28.3	$1.16 \cdot 10^{-9}$	1.2740^{-9}	0.96
40	$2.00 \cdot 10^{-9}$	2.1310^{-9}	0.95
67	$14.8 \cdot 10^{-9}$	15.540^{-9}	0.95
80	$0.40 \cdot 10^{-9}$	0.3640^{-9}	1.1
96	5.140^{-9}	5.1540^{-9}	0.99
120	$3.6 \cdot 10^{-10}$	$3.47 \cdot 10^{-10}$	1.04

В расчете учтены подавление интенсивности тормозного излучения из-за эффекта плотности, поглощение излучения в кристалле, вклад переходного излучения с выходной грани мишени и спектральную зависимость эффективности использованных в эксперименте КДС на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита (см. рис. 3) .

Из таблицы 2 видно, что, несмотря на большое различие значений измеренных выходов излучения, зависимость эффективности регистрации и поглощения фотонов от их энергии (см. таблицу 1) результаты измерений согласуются с расчетом в пределах погрешности абсолютизации экспериментальных данных. Согласие результатов измерений и расчетов позволяет восстановить по результатам измерений спектр излучения, падающего на кристалл-анализатор, с достаточно высокой точностью и определить выход фотонов нового механизма излучения быстрых электронов в кристаллах - параметрического рентгеновского излучения под малым углом к скорости частицы в кристалле (ПРИ вперед) на основе данных, полученных в эксперименте [4] для энергии фотонов $\omega=40$ кэВ и 28.3 кэВ (см. рисунок 4).

Для энергии фотонов $\omega=40$ кэВ, телесного угла $\Delta\Omega = 2.27 \cdot 10^{-7}$ ср и энергетического захвата спектрометра $\Delta\omega=0.628$ кэВ (полная ширина) зарегистрированное превышение выхода в максимуме ОЗ для плоскости $(01\bar{1})$ $\Delta Y_{\text{exp}}=0.58 \cdot 10^{-9}$ фотон/электрон $\sim 28\%$ от суммарного выхода тормозного и переходного излучений вне области влияния дифракционных эффектов. Следовательно, спектрально-угловая плотность интенсивности ПРИ вперед в кристалле вольфрама в эксперименте [4] $I(\omega) = 2.58$ (ср*электрон) $^{-1}$.

Для энергии фотонов $\omega=28.3$ кэВ, телесного угла $\Delta\Omega = 2.26 \cdot 10^{-7}$ ср и энергетического захвата спектрометра $\Delta\omega=0.433$ кэВ $I(\omega) = 0.96$ (ср.*электрон) $^{-1}$ ($\sim 22\%$ от уровня некогерентной подложки). Меньшее значение вклада ПРИ вперед для этой энергии фотонов обусловлено большим сечением их поглощения в кристалле. В §2.4 приведены выводы по результатам исследований, описанных во второй главе.

Большая часть выполненных ранее исследований, направленных на создание источника рентгеновского излучения для прикладных целей, имела поисковый характер и не касалась требований на интенсивность, монохроматичность и безопасность применения, предъявляемых к такому источнику. Проблеме, возникающим при попытке использовать излучение быстрых частиц в периодических структурах для использования в медицине, и возможных путях их решения посвящена **глава 3**.

В §3.1 приведены результаты анализа реального применения монохроматических пучков рентгеновского излучения, получаемых на источниках синхротронного излучения, в медицине. Определены требования, предъявляемые к таким источникам в зависимости от энергии фотонов и области применения.

§3.2 посвящен анализу известных вариантов источника рентгеновского излучения с перестраиваемой длиной волны на основе взаимодействия электронов средних энергий с периодическими структурами. С точки зрения безопасности применения оптимальной представляется схема генерации излучения на основе двух мозаичных кристаллов $b\alpha$ [2], где один кристалл используется для получения излучения через механизм дифрагированного тормозного излучения, а второй обеспечивает параллельный перенос и отсутствие фона тормозного излучения в месте расположения объекта облучения.

Выход излучения, который способна обеспечить двухкристальная схема, недостаточен для большинства приложений, рассмотренных в §3.1. Одним из возможных способов увеличения выхода полезного излучения является отказ от схемы [2], где процесс генерации фотонов и их дифракция происходит в первом кристалле, и использовать внешний источник излучения повышенной интенсивности.

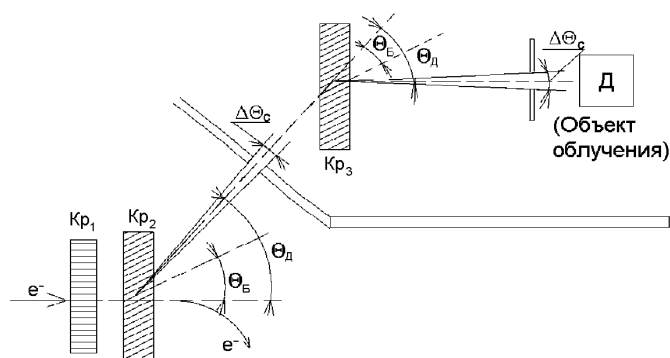


Рис.5. Схема установки для реализации трех кристальной системы.

В §3.3 в качестве такого источника предложено использовать излучение при осевом каналировании электронов средних энергий в совершенных кристаллах. В этом случае нет жестких ограничений на толщину такого кристалла, и она может быть выбрана достаточно большой (порядка длины поглощения фотонов требуемых энергий) для получения требуемых потоков излучения. На основе известных экспериментальных данных сделана оценка выхода полезного излучения в такой трехкристальной схеме (см. рисунок 5) и определены области возможных применений этого источника в медицине.

Излучение при осевом каналировании электронов средних энергий изучено существенно слабее, чем излучение при плоскостном каналировании, поскольку в нем нет таких ярко выраженных особенностей. К тому же, все исследования излучения при каналировании электронов средних энергий выполнялись для сравнительно тонких кристаллов, что бы уверенно

но выделить эти особенности и исследовать физику процесса, тогда как для источника излучения в предлагаемой схеме это скорее недостаток. Поэтому для выбора оптимальных характеристик источника внешнего излучения и, в первую очередь, энергии электронов и толщины кристалла необходимо проводить измерения спектрально-угловых распределений излучения при осевом каналировании для этих условий. Так как в этом случае самым важным является значение интенсивности излучения для требуемых энергий фотонов и истинный фотонный спектр, не искаженный формой линии детектора, такие измерения удобнее проводить при помощи КДС на основе мозаичных кристаллов класса ba .

В §3.4 приведены результаты расчетов характеристик КДС на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита для условий двух электронных ускорителей средних энергий, исследовано влияние размеров пучка электронов на кристалле на эффективность и разрешение КДС и определена оптимальная методика проведения таких измерений. Показано, для перекрытия энергетического диапазона 16-80 кэВ, требуемого для медицинских приложений, необходимо проводить измерения для нескольких углов и порядков отражения. В §3.5 приведены выводы по результатам исследований, описанных в третьей главе.

В заключении формулируются выводы и основные результаты.

В приложении приведена программа расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса ba , разработанная автором для решения задач диссертационного исследования и зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ.

Результаты проведенных исследований кратко можно изложить следующим образом:

1. Кристалл-дифракционные спектрометры на основе мозаичных кристаллов класса bb , например, пиролитического графита могут быть использованы для анализа спектрально-угловых распределений излучения быстрых электронов в ориентированных кристаллах. Из-за многократного рассеяния электронов в кристалле перекрытие требуемого для медицинских приложений диапазона энергий фотонов 15-100 кэВ на ускорителях электронов средних энергий можно обеспечить только при использовании спектральных измерений и нескольких порядков отражения.
2. Предложена и реализована методика расчета отражающей способности мозаичных кристаллов класса b и кристалл-дифракционных спектрометров на их основе методом Монте-Карло, позволяющая корректно учесть переотражение фотонов внутри кристалла и геометрию эксперимента для произвольного распределения мозаичности.

3. С помощью развитых методик моделирования характеристик кристалл-дифракционных спектрометров на основе мозаичных кристаллов класса ba и эффективности тонких кристаллов NaI(Tl) проведена количественная обработка результатов эксперимента [4].
4. Трехкристальная схема генерации монохроматического излучения в состоянии в несколько раз увеличить интенсивность полезного излучения по сравнению с двухкристальной схемой.
5. При использовании ускорителя с соответствующими параметрами трехкристальная схема генерации квазимонохроматического рентгеновского излучения с использованием совершенного кристалла для генерации когерентного излучения и его последующей дифракции в двухкристальной схеме с применением мозаичных кристаллов с $\sigma_m \sim 0.2-0.6$ мрад может найти применение в маммографии, компьютерной томографии и радиационной терапии онкологических заболеваний.

Список цитируемой литературы

1. Джеймс Р., Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей, М.: Изд. Иностран. Лит., 1950, 464с.
2. Внуков И.Е., Жандармов Ю.В., Шатохин Р.А. Источник рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией для медицинских целей // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. 2008, т. 808, серия физическая, "Ядра, частицы, поля", вып. 2(38), С. 25-36.
3. Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Кирьяков А.А. и др. Мягкая компонента излучения каналированных электронов в кристалле кремния // Известия ВУЗов "Физика". 2001. Т.44. №3. С.71-80.
4. Алейник А.Н., Балдин А.Н., Богомазова Е.А. и др. Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения вдоль скорости релятивистских электронов, движущихся в кристалле вольфрама // Письма в ЖЭТФ. - 2004. - Т.80. - Вып.6. - С.446-451.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Д.А. Бакланов, И.Е. Внуков, Ю.В. Жандармов, С.А. Лактионова, Р.А. Шатохин Использование мозаичных кристаллов для измерения спектрально-угловых характеристик излучения быстрых электронов в кристаллах. // Научные ведомости Белгородского государственного университета Математика Физика, 23(118), вып. 25, 2011. с. 177-191
2. Д.А. Бакланов, И.Е. Внуков, Ю.В. Жандармов, Ж.Т. Зыонг, С.А. Лактионова, Р.А. Шатохин Расчет отражающей способности мозаичных кристал-

- лов класса В методом Монте-Карло // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, No.4, С.13-18
3. D.A. Baklanov, T.G. Duong, S.A. Laktionova, R.A. Shatokhin, I.E. Vnukov, Yu.V. Zhandarmov Calculation of class b mosaic crystals reflectivity by Monte-Carlo technique//IL Nuovo Cimento C V 34, N 4, P.439-446
4. Бакланов Д.А., Внуков И.Е., Гришин В.К., Жандармов, Шатохин Р.А. Предложение эксперимента по поиску и исследованию дифрагированного излучения каналированных электронов //Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010, No.3, С.26- 36
5. D.A. Baklanov, T.G. Duong, S.A. Laktionova, R.A. Shatokhin, I.E. Vnukov, Yu.V. Zhandarmov Influence of crystals mosaicity on observed characteristics of X-ray emission along the propagation velocity of fast electrons in thick tungsten crystals //IL Nuovo Cimento C V 34, N 4, P.125-132
6. Бакланов Д.А., Внуков И.Е., Жандармов Ю.В., Ж.Т. Зыонг, С.А. Лактионова, Шатохин Р.А. Влияние мозаичности кристаллов на наблюдаемые характеристики рентгеновского излучения под малым углом к направлению скорости частицы // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, No.4, С.5-12
7. R.A. Shatokhin, I.E. Vnukov, Y.V. Zhandarmov X-ray source with variable photons energy for medicine applications.// Problems of Atomic Science and Technology 2009, N3, Series "Nuclear Physics Investigations" (51) P.113-119
8. Внуков И.Е., Жандармов Ю.В., Шатохин Р.А. Источник рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией для медицинских целей // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. 2008, т. 808, серия физическая, "Ядра, частицы, поля", вып.2(38), С. 25-36.
9. Жандармов Ю.В., Внуков И.Е. Программа расчета отражающей способности мозаичных кристаллов методом Монте-Карло "RMCMS 2011"// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012610524, Зарегистрировано в Реестре программ 10 января 2012 г.
10. Д.А. Бакланов, И.Е. Внуков, Ю.В. Жандармов, Зыонг Тхи Жанг, С.А. Лактионова, Р.А. Шатохин Перестраиваемый источник рентгеновского излучения на основе мозаичных кристаллов и его практические применения. // Научные ведомости БелГУ 2009 г., серия физико-математическая, вып. 2, С.41-70

Подписано в печать 25.12.2012. Гарнитура Times New Roman.
Формат 64x84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ
Оригинал макет подготовлен и тиражирован в ИД «Белгород»
308015, г.Белгород, ул. Победы 85.