

**На правах рукописи**

Гостищев Николай Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ  
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Белгород – 2008

Работа выполнена в Белгородском государственном университете

- НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Доктор физико-математических наук,  
профессор Насонов Николай Николаевич
- ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Доктор физико-математических наук,  
профессор Гришин Владислав  
Константинович  
Доктор физико-математических наук,  
профессор Малышевский Вячеслав  
Сергеевич
- ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Томский политехнический университет

Защита состоится «26» ноября 2008г. в «16.00» часов на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при Белгородском государственном университете по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного университета.

Автореферат разослан « 25 » октября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Беленко Владимир Алексеевич

## **Общая характеристика работы.**

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Основным методом диагностики атомной структуры материалов является рентгеноструктурный анализ, основанный на измерении углового распределения рассеянного изучаемым объектом квазимонохроматического рентгеновского излучения [1']. Развитие техники рентгеновских детекторов позволило создать в последнее время новый метод диагностики, заключающийся в измерении спектральных характеристик широкополосного первичного рентгеновского излучения, рассеянного на заданный угол [1']. Известный как EDXD (energy dispersive X-ray diffraction) метод, обсуждаемый подход имеет ряд преимуществ, обусловленных, прежде всего, простотой и высокой скоростью набора спектрометрической информации.

Изучение поляризованного тормозного излучения (ПТИ) быстрых заряженных частиц на атомах в веществе [2'] привело к осознанию перспективности использования ПТИ для целей диагностики структуры вещества [3']. Основаниями для такого вывода служат такие свойства ПТИ, как большая величина эффективного прицельного параметра столкновения излучающей частицы с атомом, сравнимая с атомным размером (данное обстоятельство приводит к высокой чувствительности ПТИ к междуатомным корреляциям в конденсированном веществе и, как следствие, к тесной связи спектрально-угловых свойств обсуждаемого излучения с параметрами среды, а также возможность использования для измерения спектра ПТИ обычных рентгеновских детекторов. По-существу, ПТИ является модифицированным EDXD методом рентгеновской диагностики. Действительно, аналогия становится очевидной, если трактовать механизм ПТИ как рассеяние виртуальных фотонов кулоновского поля налетающей заряженной частицы на атомах мишени. К достоинствам ПТИ следует отнести фактически точное знание спектра первичных виртуальных фотонов, что существенно облегчает расчет и интерпретацию данных измерений спектра рассеянного излучения, а также возможность простого по сравнению с рентгеновскими пучками

управления параметрами исходного электронного пучка. Например, обсуждаемые в последнее время проекты создания рентгеновского микроскопа требуют решения сложнейшей проблемы получения сфокусированных пучков свободных рентгеновских фотонов малого поперечного сечения. С другой стороны, фокусировка электронных пучков представляет собой несравненно менее сложную задачу. Изложенное в полной мере относится и к проблеме формирования зондирующих пучков малого поперечного сечения, необходимых для увеличения пространственного разрешения диагностики неоднородных материалов.

Хотя исследования ПТИ как метода диагностики атомной структуры материалов в настоящее время только начинаются, полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют рассчитывать на создание эффективного метода структурной диагностики. Теоретически показана возможность использования когерентной составляющей ПТИ релятивистских электронов, движущихся в кристаллах (указанная составляющая идентична хорошо известному параметрическому рентгеновскому излучению (ПРИ) ), для определения особенностей углового распределения мозаичности кристалла [4'], обоснована возможность определения структурных амплитуд кристалла методом аномального рассеяния в процессе ПРИ [5'], теоретически предсказан и экспериментально исследован метод определения параметров решетки поликристаллических материалов на основе ПТИ [6'] (метод аналогичен методу Дебая-Шеррера определения структуры порошковых материалов с помощью свободных рентгеновских лучей), экспериментально показана высокая чувствительность ПТИ к текстуре в поликристаллических материалах [7'], теоретически показана существенная зависимость эффективности определения параметров поликристаллических материалов от геометрии процесса излучения, в частности показана возможность резкого увеличения спектрального разрешения измерений в геометрии излучения строго назад [8'], разработана теория и выполнены основополагающие эксперименты по ПРИ

нерелятивистских электронов в кристаллах [9'] и ПТИ таких электронов в металлических кластерах [10'].

В связи с проводящимися в настоящее время и планируемыми на ближайшее время экспериментальными исследованиями процессов ПТИ релятивистских электронов в кристаллических, поликристаллических и мелкодисперсных материалах возникает необходимость проведения теоретических исследований, направленных на расчет оптимальных условий проведения экспериментов, их интерпретацию, а также постановку новых экспериментов. Указанная проблема подчеркивает актуальность проведения теоретических исследований ПТИ, направленных на обоснование и развитие разрабатываемого метода диагностики упорядоченных и частично упорядоченных твердых тел.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Цель настоящей работы заключается в разработке теоретического описания ПТИ релятивистских электронов в поликристаллической мишени под произвольным углом к скорости излучающего электрона (ранее подробно описывалось лишь излучение под углом 90 градусов, что было обусловлено условиями проводимых экспериментов), выяснении влияния эффекта плотности на процесс формирования выхода ПТИ из поликристалла (ранее исследовалось влияние указанного эффекта на свойства ПТИ в аморфных средах, оказавшееся небольшим), анализ возможности подавления негативного влияния эффекта плотности на характеристики ПТИ, существенные для целей диагностики структуры материалов, а также исследование особенностей ПТИ в поликристалле в условиях проявления эффекта Вавилова-Черенкова.

## **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

- Впервые получены формулы, описывающие спектрально-угловые характеристики ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах под произвольным углом к направлению вектора скорости излучающего электрона. Выполнены расчеты выхода ПТИ для конкретных мишеней и

значений угла наблюдения излучения. Проведены количественные сравнения результатов расчетов с данными выполненных измерений, показавшие согласие теории и эксперимента.

- Впервые установлен резкий рост влияния эффекта плотности на свойства ПТИ релятивистских электронов в поликристалле по сравнению с таким влиянием на ПТИ в аморфной среде (подавление выхода ПТИ в поликристалле вследствие эффекта плотности может достигать сотен процентов в противоположность подавлению в аморфной среде, уровень которого имеет величину порядка десяти процентов. Показано, что выявленный эффект обусловлен фиксированностью переданного в процессе ПТИ импульса.

- Впервые показана возможность существенной компенсации эффекта подавления ПТИ в поликристалле за счет вклада в процесс формирования ПТИ фотонов переходного излучения, испускаемых на входной поверхности мишени и рассеивающихся на флуктуациях электронной плотности в глубине мишени.

- Впервые предсказан резкий рост выхода когерентной составляющей ПТИ релятивистских электронов в поликристалле при преодолении быстрым электроном черенковского барьера.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ**

Выполненные в работе расчеты выхода ПТИ под различными углами позволили в сочетании с данными измерений обосновать метод идентификации структурных пиков в полном измеряемом спектре ПТИ (в эксперименте всегда возникает много пиков, имеющих различную природу), основанный на изменении положения структурных пиков при изменении угла наблюдения излучения.

Установленный эффект аномально большой степени подавления ПТИ в поликристаллах за счет эффекта плотности и выявленная возможность существенной компенсации негативного влияния этого эффекта на спектрально-угловые характеристики ПТИ позволяют выбрать схемы

измерения параметров атомной структуры поликристаллических материалов с помощью ПТИ ультрарелятивистских электронов, свободные от ограничений, налагаемых эффектом плотности.

### **ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

1. Разработанная модель процесса ПТИ релятивистских электронов в поликристаллических средах находится в количественном согласии с данными выполненными измерений и обосновывает метод идентификации структурных пиков в спектре ПТИ, основанный на зависимости положения максимумов этих пиков от угла наблюдения излучения.
2. Фиксированность переданного импульса в процессе когерентного ПТИ быстрых электронов в поликристаллических мишенях приводит к резкому росту (на порядки величины) степени подавления выхода когерентной составляющей ПТИ вследствие влияния эффекта плотности.
3. Вклад переходного излучения релятивистского электрона на входной поверхности поликристаллической мишени в процесс формирования ПТИ приводит к существенной компенсации обусловленного эффектом плотности подавления выхода ПТИ в направлении, противоположном скорости излучающего электрона.
4. Когерентное рассеяние излучаемых релятивистским электроном черенковских фотонов микрокристаллитами в поликристалле приводит к резкому росту интенсивности ПТИ при переходе электрона через черенковский барьер.

### **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ**

Материалы работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 36 международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 30 мая – 1 июня 2006 г.); 37 международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 29 - 31 мая 2007 г.); Международный симпозиум Channeling 2006 “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” (Frascati, INFN, 2-7 июля 2006 г.); 57 международная

конференция по ядерной спектроскопии Nucleus 2007 ( Воронеж, ВГУ 25-29 июня 2007 г.); 6 национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов РСНЭ-2007 (Москва, ИК РАН, 12-17 ноября 2007 г.).

## **ПУБЛИКАЦИИ**

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах (три из списка ВАК и один зарубежный), 5 тезисов докладов на международных конференциях и 1 тезис доклада на всероссийской конференции.

## **ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА**

Автором выполнены все численные расчеты по теме диссертации, а также проведена большая часть аналитических исследований под руководством руководителя диссертации. Автор участвовал в постановке рассмотренных задач (идеи, положенные в основу исследований, сформулированы Жуковой П.Н.), а также в интерпретации полученных результатов. Текст диссертации и автореферата написаны автором.

## **СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 87 наименований. Работа изложена на 102 страницах машинописного текста, включая 14 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава диссертации “Исследование зависимости положения максимумов спектральных пиков ПТИ релятивистских электронов в поликристалле от угла наблюдения”** посвящена теоретическому анализу зависимости спектра коллимированного ПТИ релятивистских электронов, движущихся в поликристаллической мишени, от значения угла наблюдения излучения. Ранее подобные исследования были выполнены применительно к излучению, распространяющемуся под углом 90 градусов к скорости излучающего электрона [11'] ( в работе [12'] выведена точная, но весьма громоздкая формула для спектрально-углового распределения ПТИ под



произвольными углами, проанализированная только для случая излучения строго против направления скорости быстрого электрона). Проведение настоящих исследований вызвано необходимостью количественной интерпретации проводящихся в настоящее время экспериментов по диагностике поликристаллических материалов с помощью ПТИ. В главе выводится точное выражение (в рамках кинематической теории дифракции) для спектрально-углового распределения когерентной и некогерентной составляющих ПТИ релятивистских электронов в поликристалле, которое существенно упрощается и используется для количественных расчетов выхода ПТИ из различных материалов (тонкие пленки алюминия и меди). Выведенное весьма простое выражение для спектрально-углового распределения интенсивности ПТИ

$$\omega \frac{dN_{\vec{g}}}{dtd\omega d\Omega} = A_{\vec{g}} \Phi_{\vec{g}},$$

$$A_{\vec{g}} = \frac{\pi e^6 n_0}{m^2 g^3} F^2(g) e^{-g^2 u_T^2},$$

$$\Phi_{\vec{g}} \approx 4 \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \left[ \frac{1 + \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cos \vartheta}{\left( \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right)^2 + \rho^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \right)^{\frac{1}{2}}} - 1 - \frac{\rho^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \frac{\cos^2 \vartheta}{2 \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}}{\left( \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right)^2 + \rho^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \right)^{\frac{3}{2}}} \frac{\omega_g^2}{\omega^2} \sigma \left( \frac{\omega_g}{\sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right)} - \omega \right) \right]$$

где  $\vartheta$  - угол наблюдения излучения, который не должен быть близок к нулю и к  $\pi$ ,  $\rho^2 = \gamma^{-2} + \omega_0^2 / \omega^2$ ,  $\gamma$  - Лоренц-фактор быстрого электрона,  $\omega_0$  - плазменная частота,  $\omega_g = g/2 \sin(\vartheta/2)$  - брэгговская частота,  $F(g)$  -

формфактор атома,  $g$  – вектор обратной решетки, задающий отражающую кристаллографическую плоскость (все плоскости вносят независимый вклад),  $u_T$  – среднеквадратичная амплитуда тепловых колебаний атомов,  $n_0$  – плотность атомов мишени, использовалось для количественной интерпретации результатов измерений, выполненных на микротроне ФИАН с энергией электронов 7 МэВ.

Результаты сравнения измеренных и рассчитанных по формуле (1) спектров ПТИ из алюминиевой мишени представлены на Рис.1. и Рис.2. Следует иметь в виду, что экспериментальный пик в области 6.4 кэВ на каждом из рисунков описывает характеристический пик железа, возбуждаемый электронами пучка, рассеянными на стенки электропровода и мишенной камеры.

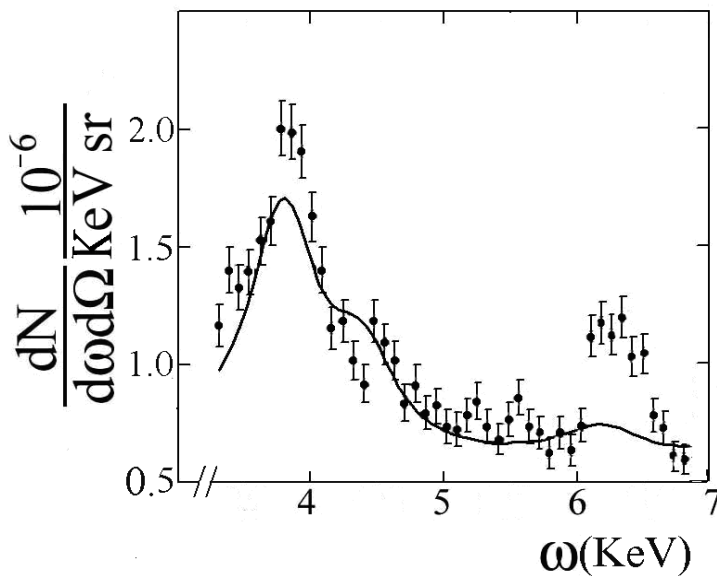
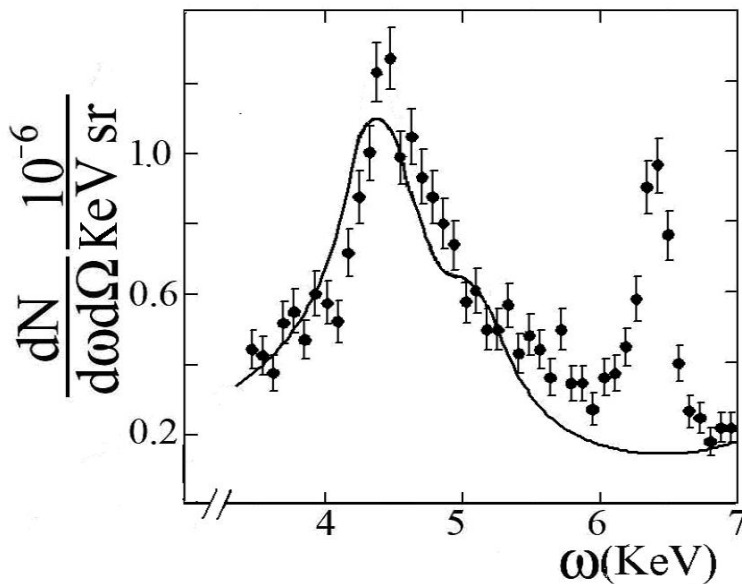


Рис.1. Спектр ПТИ из алюминиевой мишени, коллимированного под 90 градусов.

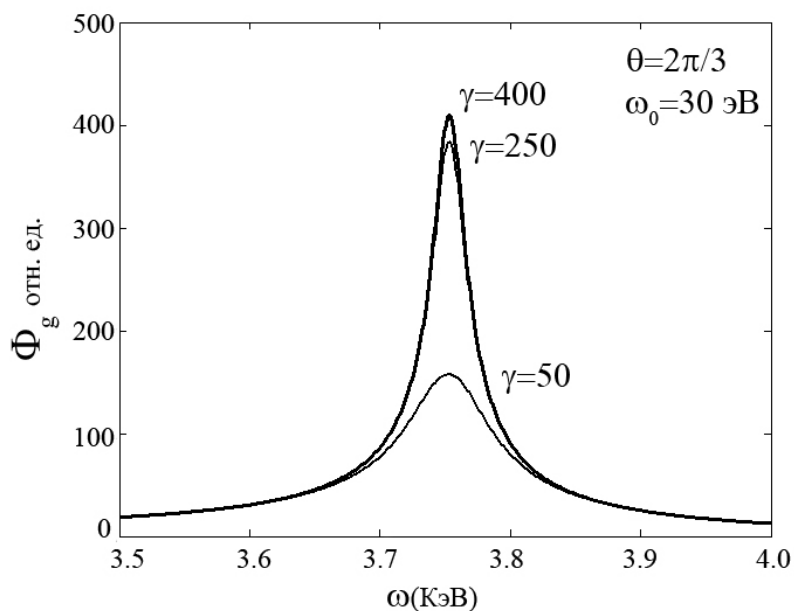


**Рис.2.** Спектр ПТИ из алюминиевой мишени, коллимированного под 75 градусов.

Полученное удовлетворительное согласие экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями подтверждает адекватность разработанной модели и обосновывает метод идентификации структурных пиков ПТИ в эксперименте, основанный на зависимости положения максимумов когерентных пиков ПТИ от угла наблюдения излучения. Кроме этого, результаты главы предсказывают существенное влияние эффекта плотности (эффект описывается коэффициентом  $\rho^2$  в (1), предсказывающим насыщение выхода ПТИ с ростом  $\gamma$ ) на характеристики ПТИ, важные с точки зрения постановки задачи диагностики материалов на основе ПТИ, и обосновывают необходимость проведения специальных исследований эффекта плотности в физике ПТИ. Результаты главы опубликованы в работах [3,10].

**Вторая глава** диссертации “**Аномальный эффект плотности в ПТИ релятивистских электронов в поликристалле**” посвящена непосредственному анализу влияния эффекта плотности (эффекта Ферми) на ПТИ. Вначале анализируется эффект в аморфной среде (ранее в ряде работ было показано, что влияние указанного эффекта незначительно и имеет

величину порядка 10% ) с целью показать, что физическая причина малости его воздействия на свойства ПТИ связана с отсутствием жесткой связи между частотой излучения и переданным импульсом в случае независимого формирования ПТИ на атомах аморфной среды (вследствие этого, интегрирование по переданному импульсу усредняет вклад окрестности резонансных значений этого импульса в соответствии с формулой (21) главы). В исследованиях главы показывается, что в случае взаимодействия релятивистских электронов с частично упорядоченной средой – поликристаллом влияние обсуждаемого эффекта резко возрастает и может достигать величины порядка сотен процентов. Выясняется, что аномально большое влияние эффекта плотности на ПТИ в поликристалле обусловлено фиксированностью переданного импульса в процессе когерентного ПТИ, однозначно связанного с частотой и углом излучения. Показывается, что эффект плотности может существенно снизить эффективность диагностики атомной структуры материалов вследствие насыщения роста амплитуды и насыщения уменьшения спектральной ширины структурных пиков, происходящих при увеличении энергии излучающих электронов. В частности, оценки показывают, что в проводимых в настоящее время экспериментальных исследованиях ПТИ в направлении, противоположном скорости излучающих в поликристалле релятивистских электронов, обсуждаемый эффект насыщения в случае медной мишени проявляется уже при энергии электронов 20 МэВ. Резкое насыщение выхода рефлекса когерентного ПТИ в поликристалле алюминия, происходящее с увеличением энергии излучающего электрона, показано на Рис.3, где приведены спектры рефлекса ПТИ, рассчитанные при заданном угле наблюдения и различных значениях Лоренц фактора электрона. Результаты главы опубликованы в работах [1,5,6]



**Рис.3.** Зависимость выхода ПТИ от энергии электрона при фиксированном значении угла наблюдения.

**Третья глава** диссертации **“Подавление эффекта плотности в ПТИ релятивистских электронов, пересекающих ограниченную поликристаллическую мишень”** посвящена исследованию возможности подавления влияния эффекта плотности на ПТИ релятивистских электронов в поликристаллической мишени. Первоначальная идея подавления эффекта плотности основывалась на эффекте Гарибьяна [13’], подавления эффекта плотности в ионизационных потерях энергии релятивистской заряженной частицы, пересекающей тонкий слой вещества с толщиной, меньшей длины, на которой происходит перестройка вакуумного кулоновского поля частицы в экранированное вследствие поляризации электронов среды кулоновское поле. В работе [14’] было показано, что действие эффекта плотности на ПТИ релятивистских электронов в тонкой аморфной пластине действительно ослабевает в случае достаточно малой толщины пластины. В исследованиях настоящей диссертации показывается, что подавление отрицательного влияния эффекта плотности на ПТИ возможно даже в случае полубесконечной мишени, что явно не согласуется с эффектом Гарибьяна. В исследованиях главы показывается, что обсуждаемый эффект обусловлен вкладом переходного излучения, образующегося на входной поверхности

мишени, в процесс формирования выхода ПТИ. Выводится простая формула, количественно описывающая обсуждаемый эффект в ПТИ, излучаемом в направлении, близком к направлению, противоположному скорости излучающего электрона

$$\omega \frac{dN^{pb}}{d\omega d^2\Omega} \approx \frac{e^2}{16\pi^2} \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \sum_{\bar{g}} \frac{\pi}{\chi''} \frac{|S(\bar{g})|^2 e^{-g^2 u_T^2}}{(1+g^2 R^2)^2}.$$

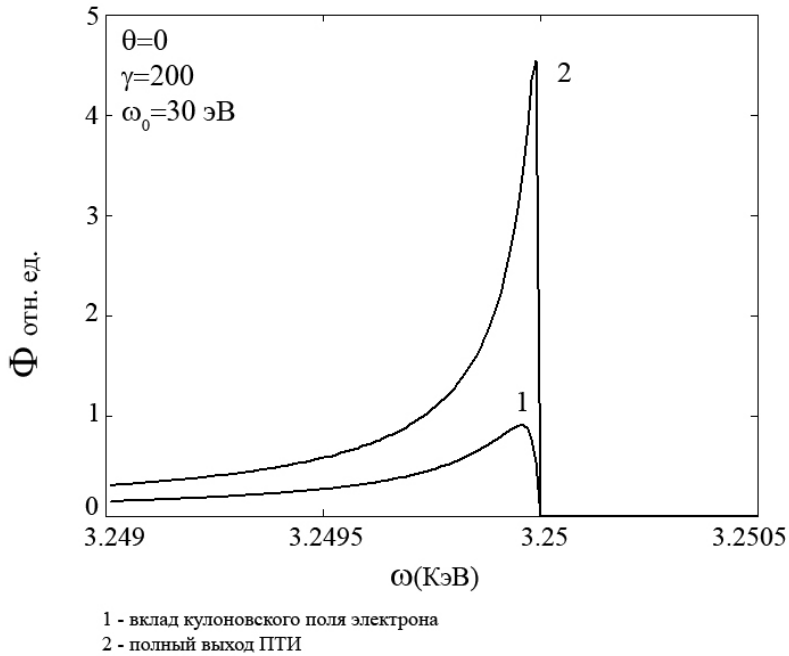
$$\cdot \sum_{l=1}^2 \Phi_l(\omega, \theta) \cdot \sigma\left(\frac{g}{2} - \omega\right)$$

$$\Phi_l \approx \frac{2\omega}{g} \cdot \frac{\left(\frac{g^2}{4\omega^2} - 1 - \frac{1}{4}\theta^2\right)^2 + \frac{1}{4}\rho_l^2 \left(\frac{g^2}{4\omega^2} - 1 + \frac{1}{4}\theta^2\right)}{\left(\left(\frac{g^2}{4\omega^2} - 1 - \frac{1}{4}\theta^2\right)^2 + \frac{1}{2}\rho_l^2 \left(\frac{g^2}{4\omega^2} - 1 + \frac{1}{4}\theta^2\right) + \frac{1}{16}\rho_l^4\right)^{\frac{3}{2}}}$$

где  $\rho_1^2 = \gamma^{-2}$ ,  $\rho_2^2 = \gamma^{-2} + \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \approx \gamma^{-2} + 4\left(\frac{\omega_0^2}{g^2}\right)$ , угол  $\theta$  отсчитывается от оси,

противоположной скорости пучка,  $\omega_0 =$  плазменная частота среды,  $\chi''$  - мнимая часть диэлектрической восприимчивости мишени,  $\sigma(x) = 1$  при  $x > 0$  и  $\sigma(x) = 0$  при  $x < 0$

Выясняется, что подавление эффекта плотности проявляется прежде всего в спектрально-угловом распределении жестко коллимированного излучения, что обусловлено высокой угловой плотностью переходного излучения по сравнению с аналогичной величиной для экранированного кулоновского поля электрона в условиях проявления эффекта плотности. На Рис.4 приведены спектры ПТИ, коллимированного в направлении строго назад, рассчитанные для условий, в которых эффект плотности является существенным. Кривые наглядно демонстрируют подавление влияния эффекта плотности на ПТИ.



**Рис.4** Спектр коллимированного ПТИ в условиях существенного влияния эффекта плотности.

При интегрировании угловой плотности ПТИ по углам наблюдения разность между выходами ПТИ, рассчитанными с учетом и без учета вклада переходного излучения в процесс формирования ПТИ убывает. Результаты главы опубликованы в работах [2,4,7].

**Четвертая глава диссертации “ПТИ релятивистских электронов, движущихся в поликристалле в условиях проявления эффекта Вавилова-Черенкова”** посвящена анализу свойств когерентной составляющей ПТИ релятивистских электронов, пересекающих поликристаллическую мишень в условиях проявления эффекта Вавилова-Черенкова. Вопрос о модификации излучения быстрой частицы в неоднородной (в частности, случайно неоднородной) среде при переходе через черенковский барьер неоднократно исследовался ранее. Так в работах Базылева и Жеваго [15’], рассматривалась задача о тормозном излучении частицы в условиях проявления черенковского эффекта. Показано, что в общем случае два указанных механизма разделить невозможно. Влияние черенковского эффекта на выход ПТИ релятивистского электрона, движущегося в аморфной среде, было рассмотрено в работе [16’]. Результат

цитируемой работы заключается в предсказании резкого увеличения роста выхода ПТИ при преодолении электроном черенковского порога. Причина эффекта состоит не только в добавлении к обычному выходу, обусловленному рассеянием виртуальных фотонов кулоновского поля частицы, рассеянных фотонов черенковского излучения, но и резким ростом длины формирования ПТИ за счет вклада рассеяния черенковских фотонов (при приближении к черенковскому конусу длина формирования бесконечно возрастает без учета поглощения). В случае поликристаллической мишени возникает эффект когерентного рассеяния черенковских фотонов микрокристаллитами, составляющими мишень, поэтому следует ожидать существенного роста выхода ПТИ.

Выполненный анализ позволил получить следующую формулу для спектрально-углового распределения интенсивности когерентной составляющей ПТИ релятивистского электрона в поликристалле:

$$\omega \frac{dN_{coh}}{dtd\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\sqrt{2\pi}} \omega^4 |\chi(\omega)|^2 \sum_{\vec{g}} \frac{1}{g^3} |S(\vec{g})|^2 e^{-g^2 u_T^2} \times$$

$$\frac{\sqrt{\sqrt{f^2(\omega) + (\chi''(\omega))^2 \operatorname{ctg}^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} + f(\omega)}}{\sqrt{f^2(\omega) + (\chi''(\omega))^2 \operatorname{ctg}^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \sigma \left( \frac{g}{2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} - \omega \right)$$

$$f(\omega) = \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \right)^2 + (\gamma^{-2} - \chi'(\omega)) \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad \omega_g = \frac{g}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Принятые в приведенной формуле обозначения совпадают с использованными выше, комплексная диэлектрическая восприимчивость определяется формулой  $\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega)$ .

Обратим внимание на существенную зависимость характера распределения от знака величины  $(\gamma^{-2} - \chi'(\omega))$ . В случае положительности этого выражения (легко видеть, что данное условие означает отсутствие



излучения Вавилова-Черенкова) в приведенной формуле величина  $f(\omega)$  не обращается в ноль, поэтому в формуле можно пренебречь малой величиной, пропорциональной квадрату мнимой части диэлектрической восприимчивости  $\chi''(\omega)$ . При этом обсуждаемая формула переходит в обычную формулу, описывающую спектрально-угловое распределение ПТИ. Как и в случае обычного ПТИ, максимальное значение распределения оказывается обратно пропорциональным величине  $\sqrt{\gamma^{-2} - \chi(\omega)}$  и растет с увеличением энергии излучающего электрона вплоть до насыщения, обусловленного эффектом плотности, проявляющимся в области энергий излучающего электрона  $\gamma > \omega/\omega_p$ .

Ситуация резко меняется в случае  $(\gamma^{-2} - \chi'(\omega)) < 0$ , что означает преодоление электроном черенковского барьера. В рассматриваемом случае величина  $f(\omega)$  может обращаться в ноль в окрестности брэгговской частоты. При этом максимальное значение спектрально-углового распределения интенсивности когерентной составляющей ПТИ оказывается обратно пропорциональным величине  $\sqrt{\chi''}$ , существенно меньшей соответствующей величины  $\sqrt{\gamma^{-2} - \chi(\omega)}$ , определяющей максимальное значение плотности ПТИ в случае невыполнения условий эффекта Вавилова-Черенкова. Таким образом, преодоление движущимся в поликристалле быстрым электроном черенковского барьера может привести к росту плотности ПТИ примерно на порядок. Результаты главы опубликованы в работах [8,9].

**В Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В настоящей диссертационной работе проведено подробное теоретическое исследование свойств ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах, имеющих важное значение с точки зрения создания метода диагностики материалов на основе измерения характеристик ПТИ электронов, пересекающих исследуемый образец. Показано, что на измеряемые в

эксперименте характеристики ПТИ релятивистских электронов существенное влияние оказывает дисперсия диэлектрической восприимчивости мишени, а также угол между направлением скорости быстрого электрона и направлением излучения кванта. Основные результаты выполненного анализа могут быть сформулированы в виде приведенных ниже физических выводов.

1. Выведенная весьма простая формула (19) позволяет описать спектрально-угловое распределение ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах для произвольных значений угла наблюдения, исключая окрестность  $\vartheta = \pi$ , а также область малых углов  $\vartheta \leq \gamma^{-1}$ , в которой превалирует вклад тормозного излучения.
2. Предсказываемая теорией зависимость положения максимума структурного пика в спектре ПТИ релятивистских электронов в поликристалле от значения угла наблюдения согласуется с данными проведенных измерений, что доказывает адекватность развитой модели и обосновывает метод идентификации структурных пиков ПТИ, основанный на указанной зависимости.
3. Полученная формула, описывающая спектрально-угловое распределение когерентной составляющей ПТИ, предсказывает рост эффективности диагностики поликристаллических материалов на основе ПТИ с увеличением энергии излучающих электронов (повышение энергии электронов влечет за собой рост амплитуды и уменьшение спектральной ширины структурных пиков). Однако, эта же формула указывает на возможные существенные ограничения повышения эффективности измерений вследствие влияния эффекта плотности.
4. Экранирование кулоновского поля движущегося в конденсированной среде релятивистского электрона приводит к насыщению количества атомов среды, эффективно возбуждаемых быстрым электроном. Поскольку экранируется прежде всего низкочастотная составляющая кулоновского

поля, то подавление выхода ПТИ происходит в основном в области низких частот.

5. Степень подавления выхода ПТИ резко зависит от характера упорядочения атомов среды. В случае аморфной среды, когда выход ПТИ формируется независимыми вкладами отдельных атомов, эффект подавления сравнительно невелик (порядка 10%). В случае частично упорядоченной поликристаллической среды подавление выхода ПТИ может быть аномально большим (в несколько раз). Данное обстоятельство обусловлено когерентным характером ПТИ в рассматриваемых условиях, что приводит к фиксации величины вектора переданного в процессе излучения импульса, отражающему факт когерентной дифракции кулоновского поля на системе атомных плоскостей кристаллита. При этом излучение формируется в большом объеме, ограничение которого вследствие эффекта плотности приводит к насыщению выхода ПТИ.

6. Обсуждаемый эффект резко ограничивает возможность повышения точности измерений структуры поликристаллов с помощью ПТИ за счет увеличения энергии налетающих электронов.

7. Вклад процесса рассеяния фотонов переходного излучения на входной поверхности полубесконечной поликристаллической мишени в формирование выхода ПТИ приводит к существенному подавлению негативного влияния эффекта плотности на когерентную составляющую ПТИ в заднюю полусферу. Обсуждаемый эффект обусловлен несколькими обстоятельствами, среди которых прежде всего выделяется фиксированность переданного импульса и частоты излучения, благодаря которой существенная для излучения спектральная составляющая экранированного в среде кулоновского поля быстрого электрона оказывается малой по сравнению с аналогичной составляющей кулоновского поля в вакууме. При этом поле переходного излучения оказывается почти равным вакуумному кулоновскому полю и, как следствие, ПТИ формируется этим полем.

8. Обсуждаемый эффект, особенно значительный для пика ПТИ, излучаемого строго назад, позволяет снять ограничения, налагаемые эффектом плотности на спектральное разрешение методов диагностики атомной структуры частично упорядоченных веществ, основанных на использовании ПТИ релятивистских электронов.

9. Структура ПТИ в условиях проявления черенковского эффекта резко меняется. В спектре ПТИ возникает узкий пик со спектральной шириной  $\chi''(\omega)ctg^2(\vartheta/2)$ , обусловленный когерентным рассеянием черенковских фотонов микрокристаллитами, составляющими поликристалл.

Выход ПТИ увеличивается примерно на порядок при преодолении быстрым электроном черенковского барьера. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении структурных исследований вещества на основе измерения спектрально-угловых характеристик ПТИ релятивистских электронов, пересекающих исследуемый образец.

10. Приведенные результаты создают теоретическую основу для разработки конкретных схем диагностики атомной структуры поликристаллических материалов на основе ПТИ. Количественное согласие теоретических предсказаний с измеренными спектрами коллимированного ПТИ при различных значениях угла излучения доказывают адекватность развитого подхода и дает основания рассчитывать на разработку более сложных моделей, способных описать более тонкие характеристики атомного строения как поликристаллических, так и других частично упорядоченных веществ (в частности, наноматериалов, интерес к которым в настоящее время исключительно велик).

#### **Список цитируемой литературы:**

- 1'. Фетисов, Г.В. Синхротронное излучение / Г.В. Фетисов. – М.: Физматлит, 2007. – 672 с.

- 2'. Амусья, М.Я. Поляризационное тормозное излучение частиц и атомов / М.Я. Амусья, В.М. Буймистров, Б.А. Зон Б.А. и др. – М.: Наука, 1987. – 335 с.
- 3'. Nasonov, N.N. Collective effects in polarization bremsstrahlung from relativistic electrons / N.N. Nasonov // Nucl. Instr. Meth. – B145. – 1998. – P. 24-29.
- 4'. Кубанкин, А.С. Определение анизотропии мозаичности кристалла на основе поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов / А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов // Поверхность, 2008. – №4. – С. 76–79.
- 5'. Feranchuk, I.D., Realization of the anomalous scattering method in crystallography on the basis of the parametric X-rays / I.D. Feranchuk, A.P. Ulyanenko // arXiv: cond-mat/031230v1 12 Dec, 2003.
- 6'. Астапенко, В.А. Экспериментальное измерение поляризационного тормозного излучения электронов с энергией 7 МэВ в поликристаллах Al, Cu, Ni / В.А. Астапенко, А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, Г.П. Похил, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло // Письма ЖЭТФ 84. – 2006. – С. 341-344.
- 7'. Takabayashi, Y. Parametric X-rays of relativistic electrons in textured polycrystals / Y. Takabayashi, I. Endo, K. Ueda, C. Moriushi, A. Shchagin // Nucl. Instr. Meth. B243 . – 2006. – P.453-456.
- 8'. Astapenko, V.A. Anomalous peak of polarization bremsstrahlung from relativistic electrons crossing a polycrystal / V.A. Astapenko, N.N. Nasonov, P. Zhukova // Journal of Physics B: Atomic, Molecular & Optical Physics 40 . – 2007. – P.1-10.
- 9'. Feranchuk, I. Parametric X-ray radiation and coherent bremsstrahlung from non-relativistic electrons / I. Feranchuk, A. Ulyanenko, J. Harada, J. Spence // Phys.Rev. E62 . – 2000. – P. 4225-4234.

- 10'. Король, А.В. Поляризационное тормозное излучение / А.В. Король, А.Г. Лялин, А.В. Соловьев. – Санкт-Петербург: Изд. СПбГУ, 2004. – 300 с.
- 11'. Blazhevich, S.V. Polarization bremsstrahlung of relativistic electrons in aluminium / S.V. Blazhevich, A.S. Cherpurnov, V.K. Grishin et.al. // Phys. Lett. A. – 1999. - V.254. - P.230-232.
- 12'. Astapenko, V. Polarization bremsstrahlung from relativistic electrons for medium structure diagnostics/ V. Astapenko, V. Khablo, A. Kubankin, N. Nasonov, G. Pokhil, V. Polyansky, V. Sergienko, P. Zhukova // SPIE 6634. – 2007 .
- 13'. Гарибян, Г.М. Рентгеновское переходное излучение / Г.М. Гарибян, Ши Янг. – Ереван: Изд. Арм. ССР, 1983. – 320с..
- 14'. Kamyshanchenko, N. The density effect in polarization bremsstrahlung from relativistic electrons in a dense media / N. Kamyshanchenko, N. Nasonov, G. Pokhil // Nucl. Instr. Meth. B . – 2001. – v. 173. – P.195- 202.
- 15'. Базылев, В.А. /В.А.Базылев, А.А.Варфоломеев, Н.К.Жеваго. //ЖЭТФ. – 1974. – 66. – С. 464-475.
- 16'. Платонов, К.Ю. Поляризационное излучение в условиях эффекта Вавилова-Черенкова /К.Ю. Платонов, И.Н. Топтыгин // ЖЭТФ 98. – 1980. – С. 80-92

**Список публикаций по теме диссертации:**

1. Gostishchev, N. Anomalous density effect in polarization bremsstrahlung from relativistic electrons moving through a solid target / N. Gostishchev, N. Nasonov, P. Zhukova // SPIE 6634 . – 2007 .
2. Астапенко, В.А. Модификация Edxd метода диагностики поликристаллических и мелкозернистых сред / В.А. Астапенко, Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко, В.А.

Хабло // Известия РАН. Серия Физическая. – №6. – 2008. – Т. 72. – С.926-929.

3. Гостищев, Н.А. Угловая зависимость положения когерентного пика в спектре поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристалле / Н.А. Гостищев, А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т.34. – вып. 17, 12 сентября.

4. Гостищев, Н.А. О вкладе переходного излучения в формирование выхода поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов из поликристалла / Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, Н.Н. Насонов // Поверхность. – №4. – 2008. – С. 1-5.

5. Nasonov, N. Anomalous Density Effect In Polarization Bremsstrahlung From Relativistic Electrons Moving Through Solid Targets / N. Nasonov, N. Gostishchev, P. Zhukova // Abstracts of International conference Channeling 2006 “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” Frascati. – 2-7 July 2006. – P. 93.

6. Гостищев, Н.А. Аномальный эффект плотности в поляризационном тормозном излучении релятивистских электронов в поликристалле / Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, Н.Н. Насонов // Тезисы докладов 36 международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. МГУ Москва. – 30мая -1 июня 2006. – С. 70.

7. Astapenko, V.A. Modification of EDXD method for the diagnostics of polycrystalline and small-grained media / V.A.Astapenko, N.A.Gostishchev, P.N.Zhukova, A.S.Kubankin, N.N.Nasonov, V.I.Sergienko, V.A.Khablo // Abstracts of 57 international conference on nuclear physics. Voronezh. – June 25-29. – 2007. – P. 340.

8. Гостищев, Н.А. О вкладе переходного излучения в формирование выхода поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов из поликристалла / Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, Н.Н. Насонов // Тезисы

докладов 37 международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. МГУ Москва. – 29 -31мая 2007 . – С. 72.

9. Астапенко, В.А. Теоретические и экспериментальные исследования поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристаллах / В.А. Астапенко, Н.А. Гостищев, П.Н. Жукова, А.В. Копыльцов, А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло //Тезисы докладов 37 международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. МГУ Москва. – 29 - 31мая 2007 . – С. 58.

10. Гостищев, Н.А. Экспериментальное исследование структуры поликристаллов на основе поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов / Н.А. Гостищев, А.С. Кубанкин, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, В.И. Сергиенко, В.А. Хабло // Тезисы докладов 6 национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов. ИК РАН Москва. – 12-17 ноября 2007 . – С. 47.