

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА»  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ**

**УДК 539.12.04**

**ЛОБКО  
АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц**

**МИНСК 2007**

Работа выполнена в Научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Научный консультант **Барышевский Владимир Григорьевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
директор Института ядерных проблем БГУ

Официальные оппоненты **Рудак Эдуард Аркадьевич**  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, заведующий лабораторией  
ядерной спектроскопии ГНУ «Институт физики  
имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси

**Комаров Фадей Фадеевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий  
лабораторией элионики НИУ "Институт  
прикладных физических проблем имени  
А.Н. Севченко" БГУ

**Холмецкий Александр Леонидович**  
доктор технических наук, старший научный  
сотрудник, главный научный сотрудник кафедры  
ядерной физики БГУ

Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт энергетических и  
ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси

Защита состоится 20 апреля 2007 года в 14:00 часов на заседании  
совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики имени  
Б.И. Степанова НАН Беларуси (220072, г. Минск, пр. Независимости, д. 68;  
тел. +375 17 2840441).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
имени Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » марта 2007 года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
кандидат физ.-мат. наук

Ю.П. Выблый

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Исследования, составившие тему диссертации, выполнялись в 1986-2006 годах в соответствии с утвержденными планами научных работ Института ядерных проблем БГУ.

Тема диссертации соответствует следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь:

- физика фундаментальных взаимодействий, ядерных реакций, квантовых систем и топологически нетривиальных объектов;
- радиационные и ядерно-физические технологии с использованием релятивистских пучков электронов, гамма-квантов и нейтронов;

и приоритетному направлению научно-технической деятельности Республики Беларусь:

- новые материалы и новые источники энергии.

Изложенные в диссертации результаты были получены при участии соискателя в выполнении следующих заданий программ и крупных проектов:

- Программа Минвуза СССР «Кристалл», задание «Исследовать взаимодействие жесткого излучения с кристаллами, подверженными действию внешних полей» (1985-1990) №ГР 01850042528;
- Межвузовская программа фундаментальных исследований «Ядерная оптика поляризованных сред» (1991-1995) №ГР 199331;
- Межвузовская программа фундаментальных исследований «Ядерная оптика» (1996-2000) №ГР 19961817;
- ГПФИ «Физика взаимодействий» (2001-2005) задание 24 №ГР 20015202;
- ГПФИ «Поля и частицы» (2006-2010) задание 29 №ГР 20062608 и задание 30 №ГР 20062606;
- НИР «Исследование условий возникновения абсолютной неустойчивости в объемном лазере на свободных электронах (ОЛСЭ) при энергии электронов до 60 кэВ» (1999-2001) №ГР 19991386;
- НИР «Исследование механизмов генерации излучения мм-см диапазонов на принципе объемного лазера на свободных электронах» (2000-2001) №ГР 20001118;
- НИР «Теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных процессов взаимодействия релятивистских электронных пучков с электромагнитным полем в многомерных структурах с целью создания

нового класса когерентных источников излучения» (2000-2004) №ГР 20001121;

- Проект МНТЦ «Создание опытного образца перестраиваемого источника монохроматического рентгеновского излучения и разработка методов его применения для различных рентгеноструктурных исследований» (2002-2006) № В626;
- НИР «Исследование процессов генерации излучения в объемных лазерах на свободных электронах на импульсных электронных пучках большой мощности» (2003) №ГР 20031441;
- Проект БФФИ-РФФИ № Ф06Р-173 «Исследование параметрического рентгеновского излучения от нерелятивистских электронов для исследования поверхности наноструктур» (2006-2008) №ГР 20063022.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы состоит в установлении закономерностей в излучательных процессах, возникающих при прохождении заряженных частиц различных энергий через кристаллические мишени, и изучении возможностей создания источников перестраиваемого квазимонохроматического излучения на основе этих процессов.

Объектом исследования является параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) заряженных частиц. Предметами исследования являются интенсивность, угловые и спектральные распределения, поляризация излучения и установление их взаимосвязей с параметрами мишеней и характеристиками излучающих заряженных частиц.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- детально исследовать параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов в двухволновой геометрии генерации и экспериментально установить границы применимости кинематической теории ПРИ;
- методами численного эксперимента исследовать свойства ПРИ для определения параметров источника монохроматического перестраиваемого рентгеновского излучения и выработать рекомендации по выбору мишени оптимальной толщины и геометрии;
- исследовать генерацию ПРИ тяжелыми заряженными частицами;
- детально исследовать генерацию когерентного тормозного и параметрического рентгеновского излучений нерелятивистскими электронами;
- экспериментально изучить процесс генерации спонтанного ПРИ релятивистскими электронами в многоволновых геометриях генерации;

- экспериментально исследовать параметры индуцированного многоволнового излучения, возбуждаемого нерелятивистскими пучками электронов в периодической структуре прототипа объемного лазера на свободных электронах ОЛСЭ-10.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Первое в мире экспериментальное обнаружение явления спонтанного многоволнового ПРИ и доказательство возможности увеличения спектрально-угловой плотности излучения в условиях многоволновой дифракции;
2. Результаты измерения параметров индуцированного многоволнового излучения первого в мире объемного лазера на свободных электронах и демонстрация плавной перестройки его частоты, экспериментально подтвердившие основные выводы теории ОЛСЭ;
3. Результаты комплексного исследования спектрометрических и временных свойств кристаллического сцинтиллятора  $YAlO_3:Ce$  и разработанный на его основе быстродействующий рентгеновский детектор, позволивший впервые зарегистрировать ПРИ тяжелых заряженных частиц и обосновать возможность применения ПРИ для идентификации частиц сверхвысоких энергий;
4. Экспериментальное подтверждение предсказанных теорией спектральных характеристик когерентного тормозного и параметрического рентгеновского излучений нерелятивистских электронов;
5. Первое экспериментальное наблюдение перестройки частоты рентгеновского излучения нерелятивистских электронов в кристалле при вращении мишени;
6. Экспериментальное подтверждение основных результатов кинематической теории ПРИ, полученное при исследовании особенностей излучения релятивистских электронов в двухволновой геометрии генерации;
7. Экспериментальное установление области применимости кинематической теории ПРИ с феноменологическим учетом многократного рассеяния, выполненное на основе анализа степени влияния многократного рассеяния релятивистских электронов на спектральные и угловые характеристики ПРИ;
8. Результаты численных экспериментов по моделированию на основе динамической теории источника ПРИ на ускорителях электронов низкой энергии позволившие обосновать возможность их применения в научных

и прикладных целях, а также определить оптимальные геометрию, толщину и материал мишеней, установить степень влияния температуры кристаллических мишеней на параметры излучения.

### **Личный вклад соискателя**

Изложенные в диссертации результаты отражают личный вклад соискателя в выполненных исследованиях. Соискателем осуществлялась постановка задач, выбор объектов, разработка и подготовка измерительной аппаратуры, выполнение измерений, анализ и интерпретация полученных данных, их сопоставление с результатами, предсказываемыми теоретическими моделями, формулировка выводов.

В постановке задач участвовали научный консультант д.ф.-м.н., проф. В.Г. Барышевский и д.ф.-м.н., проф. И.Д. Феранчук.

В разработке и подготовке аппаратуры для исследований и выполнении измерений ПРИ релятивистских электронов и протонов участвовали сотрудники НИИ ЯП БГУ к.ф.-м.н. И.В. Поликарпов, В.П. Афанасенко, В.В. Панов, Р.Ф. Зуевский, П.Ф. Сафронов, В.П. Поцилуйко, Д.С. Шварков, А.П. Апанасевич, В.А. Ярмолкевич, В.И. Мороз, О.Т. Градовский, к.т.н. М.Г. Лившиц, А.О. Юрцев, С.В. Гациха, А.А. Москательников, С.В. Скороход. В разработке детектора на быстродействующем сцинтилляционном кристалла участвовали сотрудники НИИ ЯП БГУ д.ф.-м.н. М.В. Коржик и А.А. Федоров. В синтезе сцинтилляционных кристаллов и измерении их спектральных и сцинтилляционных характеристик участвовали: к.х.н. С.А. Смирнова и к.г.-м.н. А.Г. Давыдченко (ВНИИСИМС, Александров); Б.И. Минков (НИИ монокристаллов, Харьков); к.ф.-м.н. М.Л. Мейльман (МГРИ, Москва); д.ф.-м.н. В.А. Качанов, д.ф.-м.н. В.Л. Соловьянов, В.Ю. Ходырев (ИФВЭ, Протвино), А.Ф. Новгородов и к.ф.-м.н. Б.А. Хачатуров (ОИЯИ, Дубна); сотрудники НИИ ЯП БГУ В.Б. Павленко, А.П. Богатко, к.ф.-м.н. Г.Ю. Дробышев, А.М. Кузьмич. В проведении численного моделирования участвовали сотрудники НИИ ЯП БГУ к.ф.-м.н. О.М. Луговская, к.ф.-м.н. К.Г. Батраков, к.ф.-м.н., доц. И.Я. Дубовская, А.А. Гуринович. В исследовании свойств излучения нерелятивистских электронов участвовали сотрудники НИИ ЯП БГУ к.ф.-м.н. А.О. Грубич, Б.А. Тарнопольский, А.А. Ровба и к.ф.-м.н. А.П. Ульянчиков (Bruker, Германия). Мишени для экспериментов с нерелятивистскими электронами разработаны с участием сотрудников Минского НИИ радиоматериалов В.Б. Высоцкого и Э.В. Лобко. В измерениях, выполненных на синхротроне СИРИУС (Томск), принимали участие сотрудники НИИ ЯФ ТПУ д.ф.-м.н., проф. С.А. Воробьев, д.ф.-м.н., проф. А.П. Потылицын, д.ф.-м.н., проф. Ю.Н. Адищев, к.ф.-м.н. В.А. Верзилов, Г.А. Плешков, к.ф.-м.н.

С.Р. Углов. В измерениях, выполненных на протонном синхротроне У-70 (Протвино) принимали участие сотрудники ИФВЭ д.ф.-м.н., проф. С.Б. Нурушев и к.ф.-м.н. В.В. Рыкалин. Прототип объемного лазера на свободных электронах ОЛСЭ-10 был создан сотрудниками НИИ ЯП БГУ д.ф.-м.н., проф. В.Г. Барышевским В.И. Столярским, Н.А. Белоусом, А.А. Гуринович, В.А. Евдокимовым, П.Ф. Сафроновым, В.И. Морозом, И.И. Ильенко. В измерениях параметров излучения ОЛСЭ-10 участвовал П.В. Молчанов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на IV (Юрмала, 1988) и V (Симферополь, 1990) Всесоюзных Совещаниях по когерентному взаимодействию излучения с веществом; XVIII, XIX и XX Всесоюзных Совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1988, 1989, 1990); 3-м Совещании «Физика на УНК» (Протвино, 1990); 41-ом Совещании «Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра» (Минск, 1991); 1993 IEEE Nuclear Science Symposium (San Francisco, 1993); 22nd (Durham, 2000), 23th (Darmstadt, 2001), 24th (Argonne, 2002) International Free Electron Laser Conferences; 4-ом научном семинаре памяти В.П. Саранцева (Дубна, 2001); Юбилейных научных чтениях посвященных 80-летию БГУ (Минск, 2001); XXXII и XXXV Международных Конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2002, 2005); 4-й и 5-й Международных научно-практических конференциях «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество» (Минск, 2002, 2004); 7-й Международной школе-семинаре «Актуальные проблемы физики микромира» (Гомель, 2003); 33rd European Microwave Conference (Munich, 2003); International Workshops “Relativistic Channeling and Related Coherent Phenomena” (Frascati, 2004, 2005); NATO Advanced Research Workshop “Advanced Photon Sources and Their Application” (Armenia, 2004); International Conferences “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” (Frascati, 2004, 2006); XII annual Seminar “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (Minsk, 2005), European Conference on X-ray Spectrometry “EXRS-2006” (Paris, 2006), научных семинарах НИИ ЯП БГУ и кафедры ядерной физики БГУ.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в монографии объемом 13,3 авторских листа, 26-ти статьях в рецензируемых журналах общим

объемом 12,3 авторских листов, 12-ти статьях в сборниках работ и материалах конференций, 17-ти тезисах докладов, 6-ти препринтах и одном авторском свидетельстве СССР.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, приложения и библиографического списка из 265 наименований (202 использованных источника, 63 публикации соискателя). Объем работы составляет 234 страницы, включая 114 рисунков и 7 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во *введении* обосновывается актуальность темы диссертации.

Современное состояние естественных наук и технологий постоянно стимулирует поиск новых источников электромагнитного излучения в различных диапазонах частот, что в свою очередь способствует развитию теоретических и экспериментальных исследований различных типов электромагнитного излучения заряженных частиц в веществе и во внешних полях.

Рентгеновское излучение (диапазон длин волн от  $\sim 800 \text{ \AA}$  до  $10^{-2} \text{ \AA}$ ) крайне важно для современной науки, медицины и высоких технологий, так как именно объекты размерами порядка нескольких ангстрем вызывают сейчас наиболее пристальный интерес. Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) заряженных частиц в ориентированных кристаллах, описание экспериментов с которым составляет основной предмет обсуждения в настоящей диссертации, является одним из эффективных механизмов излучения рентгеновских фотонов заряженными частицами. В ряду известных радиационных механизмов по совокупности своих характеристик оно представляется чрезвычайно перспективным излучательным процессом для создания компактного монохроматического источника поляризованного рентгеновского излучения с возможностью плавной перестройки частоты.

Действительно, ПРИ обладает рядом привлекательных для применения свойств: оно имеет высокую спектральную яркость; его спектр состоит из набора квазимонохроматических линий; оно может излучаться в узконаправленные рефлексии под большими углами относительно направления скорости частиц, что позволяет уйти от фона пучка, отделить от других типов излучения; оно поляризовано. Наконец все его параметры легко изменяются простым изменением взаимной ориентации пучка, кристаллической мишени и



наблюдателя. Использование ПРИ в качестве основы для построения источника требует досконального понимания механизма его генерации, точного знания его параметров для возможности их варьирования с целью оптимизации под каждый конкретный вариант использования.

Кроме упомянутой перспективы применения того или иного механизма электромагнитного излучения в качестве источника для научных и прикладных целей, анализ излучения также позволяет получить важные сведения о свойствах вещества-радиатора, в котором оно формируется. В этом смысле интерес к процессам, возникающим при взаимодействии заряженных частиц с кристаллами также вполне закономерен.

Следует отметить, что варианты условий генерации квазимонохроматического рентгеновского излучения быстрыми заряженными частицами в кристаллах весьма многообразны, параметры процессов могут существенно менять их спектрально-угловые характеристики, радиационные механизмы могут быть аддитивными или интерферировать. Все вместе вышесказанное делает исследования указанных вопросов весьма привлекательным объектом приложения усилий физиков как с точки зрения изучения фундаментальных аспектов физики электромагнитного излучения быстрыми заряженными частицами, так и с практической точки зрения создания перспективных квазимонохроматических источников излучения и методов определения характеристик самих излучающих частиц и исследования свойств вещества.

К началу в 1986 году работ, описываемых в настоящей диссертации, были выполнены только первоначальные эксперименты по обнаружению ПРИ в кристаллах [1-3]. В это время актуальным для развития понимания фундаментальных особенностей процесса его генерации являлось экспериментальное изучение спектральных, угловых, поляризационных характеристиках ПРИ, их зависимость от энергии электронов и материала, толщины, ориентации и типа мишени и сравнение результатов с предсказаниями теории.

Бесспорную актуальность имело проведенное нами исследование ПРИ тяжелых заряженных частиц, потому что все экспериментальные данные до определенного момента были получены с использованием только электронных пучков. Кроме того, ПРИ может служить механизмом идентификации заряженных частиц на пучках сверхвысоких энергий, что важно при развитии работ на таких современных ускорителях, как LHC в ЦЕРН (Швейцария) и Tevatron в Фермилаб (США). Дополнительно, развитие этих работ послужило одним из стимуляторов активного исследования свойств современных сцинтилляционных кристаллов с повышенными характеристиками быстродействия и эффективности поглощения ионизирующего излучения,

приведшего к настоящему времени к созданию ряда новых сцинтилляционных детекторов и импульсных источников света.

Несомненный интерес как с точки зрения повышения интенсивности источника ПРИ, так и с точки зрения развития теории ПРИ, составило первое в мире экспериментальное наблюдение явления многоволнового параметрического рентгеновского излучения.

При низких (нерелятивистских) энергиях электронов ПРИ и когерентное тормозное излучение начинают интерферировать, кроме того, многократное рассеяние электронов оказывает радикальное влияние на параметры излучения. Результаты нескольких известных экспериментов не были удовлетворительно проинтерпретированы, поскольку их авторы исходили только из наличия когерентного тормозного излучения. После появления адекватной теории возникла необходимость детального изучения рентгеновского излучения нерелятивистских электронов в кристаллических мишенях, особенно в свете доступности низкоэнергетических пучков и возможности их использования для генерации квазимонохроматического мягкого рентгеновского излучения.

Наряду со спонтанным параметрическим излучением существует, конечно же, и индуцированное параметрическое излучение. Параметрическое излучение в разных диапазонах частот является одним из механизмов спонтанного излучения, лежащего в основе принципиально нового типа лазеров на свободных электронах – объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ) [4, 5]. Концепция ОЛСЭ позволяет осуществлять перестройку частоты без изменения энергии пучка и допускает создание сверхмощных генераторов когерентного электромагнитного излучения в разных диапазонах частот. По этой причине разработка ОЛСЭ и исследование процессов генерации в них являются, бесспорно, актуальными.

Указанные актуальные проблемы определили выбор тематики диссертационной работы, направление исследований и круг решаемых задач.

**В *общей характеристике работы*** указываются приоритетные направления, которым соответствует тема диссертации, и перечисляются программы и крупные темы, в рамках которых выполнялась работа; определяется цель исследования и задачи, решаемые в диссертации; формулируются положения, выносимые на защиту; выделяется личный вклад соискателя; приводятся сведения об опубликованности и апробации результатов работы; кратко описывается структура и объем диссертации.

**В *первой главе*** приводится краткая история развития исследований ПРИ; дается качественное описание возникновения ПРИ и близких ему механизмов излучения релятивистских частиц в кристаллах; воспроизводятся основные результаты кинематической теории ПРИ и дается обзор современных экспериментов с ПРИ.

Экспериментальное исследование свойств и характеристик ПРИ в течение уже двадцати лет позволило достаточно подробно изучить многие аспекты этого излучения и близких к нему механизмов генерации рентгеновского излучения релятивистскими заряженными частицами. Более того, развитие экспериментальной техники и методики позволило в настоящее время говорить о возникновении такого экспериментального направления как «параметрическое рентгеновское излучение высокого разрешения». Важным этапом развития этих исследований стало недавнее появление в Японии и США первых прототипов источников ПРИ.

К началу работ, рассмотренных в диссертации, экспериментальных данных о ПРИ было крайне мало, поэтому было необходимо провести изучение влияния многократного рассеяния частиц на процесс генерации ПРИ и свойства источника; установить влияние температуры мишени; определить зависимости интенсивности излучения от энергии частиц; сделать выбор оптимального материала и толщины мишени. Кроме того, необходимо было экспериментально исследовать и другие возможности повышения интенсивности и спектральной яркости излучения: генерацию в режиме многоволновой дифракции излучаемых фотонов; излучение тяжелых заряженных частиц, поскольку интенсивность излучения пропорциональна  $Z^2$ , а их многократное рассеяние подавлено; и, наконец, определить возможности генерации индуцированного излучения. Разработка перечисленных вопросов составляет основное содержание диссертации.

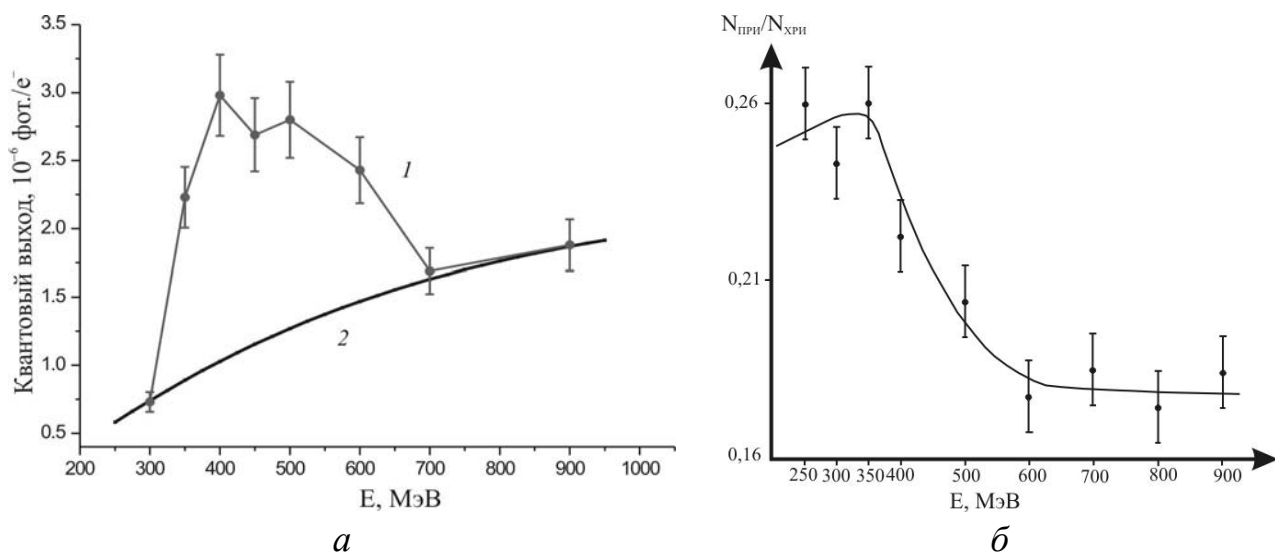
Во *второй главе* описывается экспериментальная установка и рассматриваются результаты экспериментов по изучению особенностей генерации ПРИ релятивистскими электронами в двухволновой геометрии; материалами мишеней служили алмаз, кремний, кварц и арсенид галлия, причем ПРИ в последних двух материалах нами было получено впервые в мире; производится сравнение результатов с кинематической теорией ПРИ и подтверждаются основные закономерности, следующие из этой теории; на основе анализа влияния многократного рассеяния на параметры излучения устанавливается, что кинематическая модель генерации ПРИ применима и при достаточно сильном многократном рассеянии.

В параграфе 2.1 кратко рассмотрена установка для исследования параметров ПРИ, использующая внутренний электронный пучок синхротрона СИРИУС (г. Томск). Описаны параметры пучка и система его мониторинга, приведены технические данные использованных детекторов и системы регистрации ПРИ, рассмотрена процедура предварительной юстировки кристаллических мишеней по угловой зависимости интенсивности излучения при каналировании, описаны использованные двухволновые геометрии

генерации ПРИ релятивистскими электронами (схемы Брэгга, Лауэ и ПАД – предельно асимметричная дифракция).

В параграфе 2.2 приведены результаты измерения квантового выхода ПРИ. Для определения оптимальных условий формирования пучков ПРИ с максимальной спектральной и угловой плотностью были произведены измерения квантового выхода излучения для двух углов Брэгга  $\theta_B$  ( $45^\circ$  и  $9,5^\circ$ ) в зависимости от толщины мишени, типа геометрии и энергии электронов. Измеренные величины квантового выхода излучения были сопоставлены с кинематической моделью ПРИ [6]. В большинстве случаев установлено хорошее количественное согласие теории и эксперимента.

Экспериментальное изучение зависимости выхода излучения в рефлекс от энергии частиц имеет большое значение для правильного понимания механизма генерации ПРИ. Ее вид существенно зависит от соотношения ПРИ и дифрагированного тормозного излучения (ДТИ) при энергии электронов ниже пороговой  $E_0^{\text{ПРИ}} = m \cdot |g'_0|^{-1/2}$  [6]. Энергетическая зависимость квантового выхода излучения в рефлекс (220) толстого ( $L_0 = 1300$  мкм) кристалла кремния была измерена нами в геометрии Лауэ под углом  $2\theta_B = 19^\circ$  (рисунок 1, а). Вместо предсказываемой теорией логарифмической зависимости выше  $E_0^{\text{ПРИ}}$  и резкого падения  $\sim E^{-4}$  ниже  $E_0^{\text{ПРИ}}$  наблюдается существенное увеличение выхода излучения в районе 400–600 МэВ. Теоретические оценки выхода ПРИ превышают экспериментально измеренные величины в  $\sim 2,5$ –5 раз.



а – зависимость выхода излучения в рефлекс (220) Si мишени толщиной 1300 мкм. 1 – экспериментальные точки, 2 – рассчитанная кривая; б – зависимость выхода излучения в рефлекс (400) GaAs мишени толщиной 400 мкм, нормированная на интенсивность характеристического рентгеновского излучения мишени

**Рисунок 1 – Энергетические зависимости выхода ПРИ**

Возможное нарушение корректности нормировки на число частиц при пониженных энергиях не может быть причиной указанных расхождений, что можно видеть из приведенной на рисунке 1, б энергетической зависимости выхода излучения из GaAs мишени. Нормировка при измерении этой зависимости производилась по интенсивности характеристического рентгеновского излучения мишени, регистрируемого одновременно с ПРИ, однако ее ход также качественно совпадает с формой зависимости, нормированной по интенсивности тормозного излучения вперед.

На основе численного эксперимента предложено объяснение, что расхождение результатов экспериментов и их теоретического описания может быть связано с неадекватным учетом геометрии генерации, а именно, генерацией не на плоскопараллельной, а на клиновидной мишени.

В параграфе 2.3 рассмотрены результаты измерений выполненных для изучения поведения параметров углового распределения ПРИ в зависимости от энергии электронов и величины многократного рассеяния. С целью повышения углового разрешения измерений нами была реализована методика сканирования, заключающаяся в определении интенсивности излучения в зависимости от пространственного расположения коллиматорного детектора. Перемещение детектора в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью системы позиционирования позволило определять параметры распределения с точностью до угловых размеров коллиматора. Измеренные нормированные одномерные распределения сравнивались со значениями проинтегрированной по окну детектора универсальной функции распределения излучения в рефлексе с учетом ДТИ [6]:

$$\left(\frac{dN}{d\theta}\right)_{\text{при+дти}} = \frac{x \cos^2 2\theta_B + y}{(x+y+1)^2} + \frac{1 + \cos^2 2\theta_B}{2} \cdot \frac{s}{(x+y+1)^2},$$

$$x, y = \frac{\theta_{x,y}^2}{\theta_{ph}^2}, \quad s = \frac{\bar{\theta}_s^2}{\theta_{ph}^2}, \quad \theta_{x,y} = \frac{(\vec{k} - \vec{k}_B)_{x,y}}{\omega_B}.$$

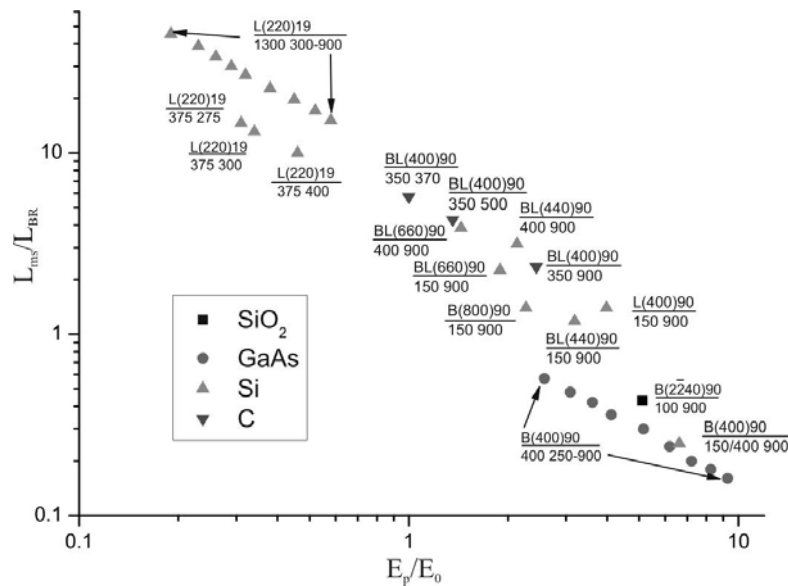
Эксперименты, поставленные в условиях заведомо малого многократного рассеяния, благодаря применению тонкого (150 мкм) кристалла кремния показали хорошее количественное согласие с теорией. В условиях геометрий ПАД (440) и Брэгга (400) при угле наблюдения  $2\theta_B = 90^\circ$  были измерены вертикальные и горизонтальные угловые распределения первой гармоники излучения.

Условия, при которых интенсивность ДТИ сравнима или даже превышает интенсивность ПРИ, были реализованы в экспериментах по измерению угловых распределений рефлекса (220) в геометрии Лауэ под углом  $2\theta_B = 19^\circ$  для мишеней Si толщиной 375 и 1300 мкм при энергиях электронов 275–500 МэВ. В этих случаях экспериментальные полуширины на 20–50% меньше

теоретических. Такие расхождения не могут быть отнесены на ошибки измерений и могут быть объяснены особенностями генерации на клиновидной части толстой мишени в условиях эксперимента на внутреннем пучке.

На основании измерений азимутальных зависимостей излучения в рефлекс для рефлекса (400) алмаза в геометрии ПАД ( $2\theta_B = 90^\circ$ ) и для рефлекса (400) арсенида галлия в геометрии Брэгга ( $2\theta_B = 90^\circ$ ) впервые была экспериментально подтверждена высокая степень поляризации ПРИ.

В параграфе 2.4 рассмотрено влияние многократного рассеяния (МР) на характеристики ПРИ. Количественно степень влияния МР выражается через соотношение между толщиной кристалла  $L_0$  и когерентной длиной тормозного излучения  $L_{BR} = \left( \omega \cdot \overline{(\theta'_s)^2} \right)^{-1/2}$ , где  $\overline{(\theta'_s)^2} = \left( \frac{E_s}{E_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{X_0}$  – среднеквадратический угол многократного рассеяния заряженной частицы с энергией  $E_p$  на единице пути в веществе. В случае  $L_0 \ll L_{BR}$  влияние МР на ПРИ сводится к появлению в интенсивности генерируемого в рефлекс излучения аддитивной добавки. В противоположном случае  $L_0 > L_{BR}$  многократное рассеяние существенно изменяет характеристики самого ПРИ.



Легенда:  $\frac{\text{геометрия(рефлекс)}2\theta_B}{L_0(\text{мкм}) \cdot E(\text{МэВ})}$ , геометрия – В (Брэгг), L (Лауэ), BL (ПАД)

**Рисунок 2 – Диаграмма для оценки вкладов ПРИ и ДТИ в интенсивность рентгеновского излучения в рефлекс**

Поскольку значение среднеквадратического угла многократного рассеяния  $\overline{\theta'_s^2}$  зависит не только от длины пути частицы в мишени, но и от ее энергии  $E_p$ , сведение понятия "слабое МР" только к условию  $L_0 \ll L_{BR}$  недостаточно. Следует, кроме этого, наложить дополнительное условие  $E_p > E_0$ . Для оценки областей совместного выполнения условий малости МР удобно

использовать диаграмму в координатах  $(E_p/E_0)$  и  $(L_{ms}/L_{BR})$  (см. рисунок 2, на который нанесены условия экспериментов из параграфов 2.2 и 2.3). Эксперименты, попадающие в области диаграммы  $[E_p \geq E_0, L_{ms} \approx L_{BR}]$ , имеют удовлетворительное количественное согласие с теорией [6], в которой влияние МР введено феноменологически. Интерпретация результатов, попавших в область  $[E_p < E_0, L_{ms} \gg L_{BR}]$ , требует более детального исследования на основе строгой теории [7].

В *третьей главе* приводятся результаты численного моделирования источника ПРИ на линейных ускорителях умеренно низкой энергии; на основе анализа результатов предлагается оптимальная толщина и геометрия кристаллической мишени; устанавливается степень влияния температуры мишени на параметры излучаемого ПРИ.

Для моделирования применялась программа, алгоритм которой основан на усреднении выражения для спектрально-угловой плотности излучения в рефлекс с учетом многократного рассеяния, полученного в [7] на основе динамической теории ПРИ, по всем возможным траекториям движения частиц в кристалле:

$$\frac{d^2 N_s}{d\omega d\vec{O}} = \frac{e^2 Q^2 \omega}{4\pi^2 \hbar c^3} (\vec{e}_{\tau s} \vec{v})^2 \left| \sum_{\mu=1,2} \xi_{\mu s}^{\tau} e^{i \frac{\omega}{c \gamma_0} \varepsilon_{\mu s} L} \left[ \frac{1}{\omega - \vec{k}_{\tau} \vec{v}} - \frac{1}{\omega - \vec{k}_{\mu \tau s} \vec{v}} \right] \left[ e^{\frac{i(\omega - \vec{k}_{\mu \tau s} \vec{v})}{c} L_0} - 1 \right] \right|^2.$$

Здесь  $eQ$  – заряд частицы,  $\vec{v}$  – вектор скорости частицы,  $\omega$  – частота испускаемого излучения,  $\vec{k}_{\tau} = \vec{k} + \vec{\tau}$ ,  $\vec{\tau}$  – вектор обратной решетки, определяющий семейство кристаллографических плоскостей, на которых дифрагирует испускаемое рентгеновское излучение ( $|\vec{\tau}| = 2\pi/d$ ,  $d$  – межплоскостное расстояние),  $\chi_0, \chi_{\tau}, \chi_{-\tau}$  – фурье-компоненты комплексных поляризуемостей кристалла,  $C_s = \vec{e}_s \vec{e}_{\tau s}$ ,  $\vec{e}_s, \vec{e}_{\tau s}$  – единичные вектора поляризации падающей и дифрагированной волн, где  $\vec{e}_1 \parallel [\vec{k} \vec{\tau}]$ ,  $\vec{e}_2 \parallel [\vec{k} \vec{e}_1]$ ,  $\vec{k}_{\mu \tau s} = \vec{k} + \vec{\tau} + \frac{\omega}{c \gamma_0} \varepsilon_{\mu s} \vec{N}$ ,

$L_0$  – толщина кристалла вдоль направления движения заряженной частицы.

$$\xi_{1(2)s}^{\tau} = \frac{-\beta C_s \chi_{\tau}}{2(\varepsilon_{2(1)s} - \varepsilon_{1(2)s})} \text{ для геометрии Лауэ,}$$

$$\varepsilon_{\mu s} = \frac{1}{4} \left\{ -\alpha_B \beta + \chi_0 (\beta + 1) \pm \sqrt{[-\alpha_B \beta + \chi_0 (\beta - 1)]^2 + 4\beta \chi_{\tau}^s \chi_{-\tau}^s} \right\}.$$

$\alpha_B = \frac{2\vec{k} \vec{\tau} + \tau^2}{k^2}$  – параметр, характеризующий отклонение от точного выполнения условия Брэгга (в случае точного выполнения условия Брэгга  $\alpha_B = 0$ ),  $\beta = \gamma_0 / \gamma_1$  – геометрический фактор, характеризующий симметрию,  $\gamma_0 = \vec{n}_{\gamma} \vec{N}$ ,

$$\vec{n}_\gamma = \frac{\vec{k}}{k}, \quad \vec{n}_{\gamma\tau} = \frac{\vec{k} + \vec{\tau}}{|\vec{k} + \vec{\tau}|}, \quad \gamma_1 = \vec{n}_{\gamma\tau} \vec{N}. \quad \text{Это выражение единым образом описывает ПРИ,}$$

тормозное и переходное излучения. Скорость представляется в виде  $\vec{v} = \vec{v}_0 \cos \theta + v_0 \vec{\theta}$ , где  $\vec{v}_0$  – направление начальной скорости заряженной частицы,  $\theta \equiv |\vec{\theta}|$  – угол многократного рассеяния ( $\theta \ll 1$ ),  $\vec{\theta}$  – двумерный вектор,  $\vec{\theta} \perp \vec{v}_0$  и  $\theta = 0$  при  $t \leq 0$ .

В параграфе 3.1 установлено, что, несмотря на уменьшение интенсивности излучения с энергией электронов и уширения линии ПРИ, интегральный выход излучения остается достаточно высоким для получения качественных рентгенографических изображений, требуемых современной медицинской диагностикой, при существенно (благодаря использованию квазимонохроматического излучения) пониженной дозе облучения пациента. При этом необходимые потоки рентгеновского излучения могут быть получены при существующих в терапевтических медицинских ускорителях токах пучка при, возможно, некоторой модернизации системы формирования пучка для снижения его расходимости.

Проведенное в параграфе 3.2 численное моделирование зависимости характеристик ПРИ от толщины мишени показывает, что и в условиях низких энергий и, соответственно, сильного многократного рассеяния существует оптимальная толщина мишени, когда интегральный квантовый выход излучения незначительно уступает величинам, полученным на энергиях электронов выше пороговой. Монохроматичность ПРИ  $\Delta\omega/\omega \sim 5 \times 10^{-2}$  остается при этом достаточной для применения в низкодозовой медицинской диагностике.

В параграфе 3.3 были численно проанализированы некоторые свойства гипотетического источника ПРИ на линейном ускорителе с энергией 100 МэВ. Расчеты, выполненные для симметричной геометрии Лауэ на плоскостях (111) кремниевой мишени толщиной 10 и 100 мкм показали, что интенсивность излучения такого источника изменяется незначительно при достаточно широком диапазоне перестройки энергии рентгеновского излучения. Особенно это справедливо для оптимальной толщины мишени близкой к когерентной длине тормозного излучения,  $L_0 \approx L_{Br}$ . С другой стороны, если перестройка частоты излучения в широком диапазоне не требуется, поток излучения может быть существенно увеличен применением мишени с толщиной большей, чем оптимальная. Было также продемонстрировано, что соответствующий выбор асимметричной геометрии генерации приводит к существенному увеличению выхода благодаря оптимизации поглощения выходящего излучения. Спектрально-угловые и угловые распределения ПРИ могут иметь тонкую структуру, обусловленную динамическим характером дифракции испускаемого



частицей излучения, что следует учитывать при постановке экспериментов с высоким разрешением.

Проведено численное моделирование влияния температуры мишени на свойства ПРИ (параграф 3.4). В качестве материалов мишеней были выбраны кристаллы природного алмаза, кремния, вольфрама и фторида лития, которые характеризуются сильно различающимися значениями температуры Дебая и коэффициентов теплового линейного расширения. Установлено, что температура заметно влияет на дифференциальные характеристики ПРИ. Интегральные характеристики ПРИ, в основном, слабо зависят от температуры в широком диапазоне, за исключением рефлексов высоких порядков. Результаты расчета хорошо согласуются с опубликованными экспериментальными данными.

В итоге можно констатировать, что генерация ПРИ на ускорителях низкой энергии с относительно небольшими, по сравнению с рентгеновскими трубками, токами позволит получить источники с характеристиками излучения, привлекательными для многих приложений.

В *четвертой главе* детально рассмотрен приоритетный эксперимент по генерации ПРИ тяжелыми заряженными частицами; описываются результаты исследований спектрометрических и временных свойств кристаллического сцинтиллятора  $YAlO_3:Ce$ , на основе которых был разработан оригинальный быстродействующий рентгеновский детектор, позволивший в режиме совпадений впервые зарегистрировать ПРИ от протонов с энергией 70 ГэВ; обсуждаются возможности применения ПРИ для идентификации заряженных частиц сверхвысоких энергий.

Важность экспериментов по измерению ПРИ от тяжелых (положительно) заряженных частиц заключается в установлении предсказываемой теорией зависимости характеристик ПРИ от лоренц-фактора частицы, а не от ее энергии, а также подтверждении независимости характеристик ПРИ от знака заряда. Кроме того, в силу значительно подавленного многократного рассеяния тяжелых частиц по сравнению с электронами можно было бы наблюдать "чистое" ПРИ, без примеси ДТИ.

В параграфе 4.1 приводятся результаты оценок квантового выхода ПРИ для доступных для наших экспериментов пучков предоставленных ИФВЭ (Протвино): электронов с энергией 25 ГэВ, пи-минус-мезонов с энергиями 10 и 40 ГэВ и протонов с энергией 70 ГэВ. При имеющихся интенсивностях пучков протонов и пионов выход ПРИ достигает значения 200–300 фотон/сброс в наиболее предпочтительном рефлексе Si (111). Максимум интенсивности достигается при  $\omega_B = 50$  кэВ, что соответствует углу падения частиц на плоскости  $\theta_B \approx 40$  мрад или  $\sim 2,3^\circ$ . Помимо расчетов, методическая работа по подготовке экспериментов включала в себя разработку аппаратуры и

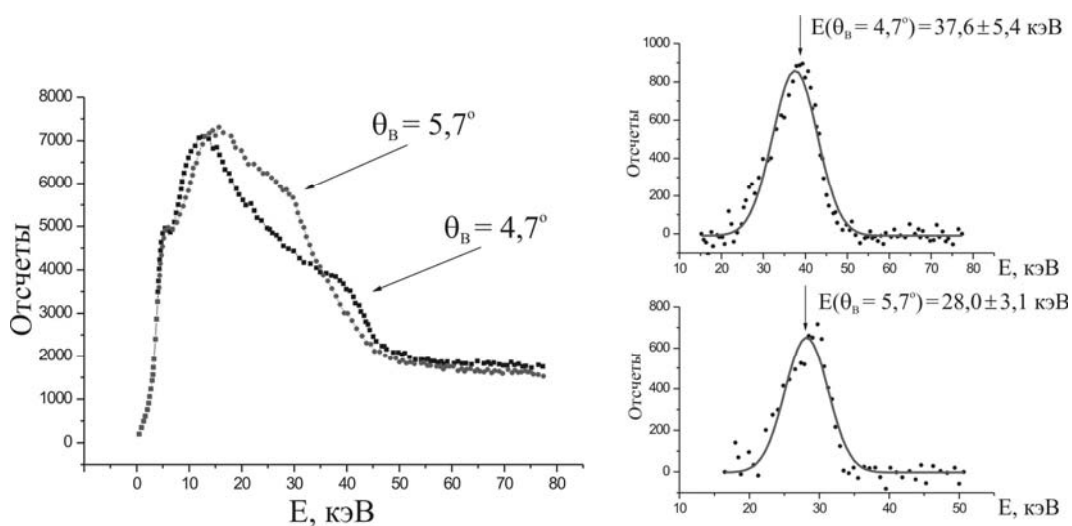
программного обеспечения, изготовление и тестирование мишеней, и наконец, проведение методических измерений на пучке для оценки уровней фона. Было установлено, что соотношение сигнал/шум составляет величину  $\sim 1:3$ , что требует принятия особых мер по борьбе с фоном. Интенсивный фон, который нельзя подавить пассивной защитой детектора, и слабые потоки полезных событий являются основными особенностями постановки экспериментов на пучках тяжелых частиц. Для подавления фона было принято решение о применении метода временной селекции. Для его реализации потребовалась разработка сцинтилляционного детектора нового поколения, так как основной проблемой было отсутствие в то время рентгеновских детекторов, сочетающих требуемые малую постоянную времени высвечивания  $\sim 20\text{--}30$  нс и менее, высокую эффективность и приемлемое энергетическое разрешение.

В параграфе 4.2 рассмотрены результаты комплексного исследования характеристик перспективных неорганических сцинтилляционных кристаллов. Анализ свойств известных сцинтилляционных материалов показал, что наиболее предпочтительными из них для нашей цели будут кристаллы ортосиликата гадолиния  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$  (GSO) и алюмо-иттриевого перовскита  $\text{YAlO}_3$  (YAP), активированного церием или празеодимом. Выполненное нами детальное экспериментальное изучение спектральных, временных и сцинтилляционных характеристик этих кристаллов позволило отобрать кристалл YAP:Ce как оптимальный для применения в быстродействующем детекторе ПРИ. Эти кристаллы имеют высокую эффективность регистрации в интересующем нас диапазоне энергий до 50 кэВ, где по оценкам ожидался максимальный выход ПРИ тяжелых частиц в кремниевой (111) мишени.

По совокупности максимального разрешения и максимальной эффективности в этом диапазоне было принято решение разработать для регистрации ПРИ тяжелых частиц детектор со спектрометрическим и временным выходами на основе кристалла YAP:Ce размерами  $\varnothing 25 \times 1$  мм<sup>2</sup> и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-85. Схема логики отбора полезных событий была построена таким образом, что давала разрешение на запись в амплитудный спектр только тех сигналов из зарегистрированных детектором ПРИ, временные отметки которых совпадали с сигналами пучкового телескопа канала, состоящего из трех пластиковых сцинтилляционных детекторов, сигналом пластикового детектора нормировки, расположенного вблизи мишени, и импульсом сброса ускорителя.

В параграфе 4.3 приводится схема экспериментальной установки и результаты измерения параметров излучения ПРИ протонами с энергией 70 ГэВ на плоскостях (220) кремниевой мишени толщиной 18 мм в геометрии Лауэ. На рисунке 3 приведены спектры, полученные для углов Брэгга  $\theta_{B_1} = 5,7^\circ$  и  $\theta_{B_2} = 4,7^\circ$ , а также пики ПРИ, полученные после вычитания фона. Зарегистрированные

энергии фотонов ПРИ после подгонки функциями Гаусса составили соответственно  $E(\theta_{B_1}) = 28,0 \pm 3,1$  кэВ и  $E(\theta_{B_2}) = 37,6 \pm 5,4$  кэВ. Расчетные значения энергий ПРИ составляют  $E_1 = 32,4$  кэВ и  $E_2 = 39,0$  кэВ. Определенные по спектрам квантовые выходы ПРИ составили  $N_1 = (7,87 \pm 1,57) \cdot 10^{-6}$  фотон/ $p^+$  и  $N_2 = (1,77 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$  фотон/ $p^+$ . Теоретический расчет дает в этих экспериментальных ситуациях значения  $N_1 = 8,42 \cdot 10^{-6}$  фотон/ $p^+$  и  $N_1 = 1,10 \cdot 10^{-5}$  фотон/ $p^+$ .



**Рисунок 3 – Экспериментальные спектры ПРИ от протонов, измеренные при двух различных углах Брэгга (слева); пики ПРИ после вычитания фона в спектрах и аппроксимации гауссианами (справа)**

Горизонтальное угловое распределение ПРИ от протонов было получено сканированием детектора с угловым шагом, равным 25 мрад. Экспериментальное значение полуширины углового распределения  $\Delta\theta_x^e = 50 \pm 7$  мрад, теоретическая величина  $\Delta\theta_x^t = 73$  мрад. Совокупность приведенных результатов показывает, что в наших экспериментах действительно наблюдалось ПРИ протонов. Измеренные значения частот и квантовых выходов излучения при двух углах наблюдения, полуширины углового распределения хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Экспериментальное обнаружение ПРИ от протонов позволило в параграфе 4.4 обосновать возможность применения ПРИ в качестве механизма для идентификации заряженных частиц в физике высоких энергий, особенно в области сверхвысоких энергий, характерных, в частности, для ЛНС. Особый интерес ПРИ может иметь для экспериментов с релятивистскими ионами в силу пропорциональности квантового выхода излучения квадрату заряда падающей частицы.

В *пятой главе* качественно рассмотрены отличия рентгеновского излучения в кристаллах в нерелятивистском случае от излучения, генерируемого релятивистскими частицами; изложены результаты экспериментов с когерентным тормозным и параметрическим рентгеновским излучением нерелятивистских электронов, приведшие к наблюдению перестройки частоты рентгеновских квантов при вращении мишени; проводится их интерпретация и сравнение с предсказаниями теории; описана экспериментальная установка и технология получения кристаллических мишеней в виде мембран субмикронной толщины.

При уменьшении энергий электронов от релятивистских в область порядка сотен кэВ интерференция ПРИ и КТИ становится все более существенной, в результате чего формируется суммарное когерентное рентгеновское излучение [8]. Поскольку его нельзя разделить на компоненты экспериментально, уместно называть его КТИ и ПРИ нерелятивистских электронов (КТПРИ). В случае нерелятивистских электронов угловое распределение тормозного излучения становится практически изотропным. Вследствие этого рефлекс излучения, обусловленные когерентными эффектами, будут наблюдаться в присутствии интенсивного пространственно-однородного фона, а их форма и амплитуда во многом будет определяться спектральным разрешением детектора и его угловой апертурой. Таким образом, экспериментальное исследование когерентного рентгеновского излучения нерелятивистских электронов принципиально возможно только с помощью коллимированных детекторов с высоким спектральным разрешением. Критическим для наблюдения КТПРИ является условие использования весьма тонкой (100–300 нм) кристаллической мишени высокой степени совершенства, так как многократное рассеяние создает сильный фон некогерентного тормозного излучения и приводит к уширению линий.

В параграфе 5.2 качественно рассмотрены особенности КТПРИ, которые определяют требования к условиям его экспериментального наблюдения. Оценки влияния многократного и неупругого рассеяния, выполненные для нескольких типов кристаллов в широком диапазоне частот излучения, дали достаточно жесткие требования на величину толщины мишени и параметры электронного пучка. Установлено, что для наблюдения КТПРИ толщина кристаллической мишени не должна превышать значения  $\sim 0,5$  мкм, энергия пучка должна быть не менее 50–60 кэВ и начальные разбросы по энергии и углам должны быть не более 0,01. Влияние многократного рассеяния на регистрируемые спектры можно несколько снизить, если регистрировать излучение под скользящим углом  $\psi \ll 1$  относительно поверхности мишени. Фотоны КТПРИ излучаются во всех направлениях, их частота зависит как от угла  $\theta_0$  между скоростью электронов и системой кристаллографических

плоскостей, так и от угла наблюдения  $\varphi$  между скоростью электронов  $\vec{v}$  и направлением наблюдения:  $\omega_n(\theta) = \frac{2\pi\nu \cos\theta_0}{d(1 - \frac{v}{c} \cos\varphi)} n$ ,  $n=1,2,\dots$ , где  $d$  – межплоскостное расстояние.

В параграфе 5.3 рассмотрена установка для наблюдения КТПРИ на пучке электронного микроскопа с энергией 50–100 кэВ. Изложены детали геометрии эксперимента, параметры регистрирующего тракта, подробно описана технология получения тонких (0,4–0,5 мкм) кремниевых мишеней в виде свободно подвешенных мембран и методика измерения их толщины по спектрам оптического пропускания.

Эксперименты проводились нами в основном на мишенях с ориентацией базовой плоскости (111) в геометриях Лауэ и Брэгга. Из формулы для частоты КТПРИ следует, что частота излучения в определенный рефлекс КТПРИ меняется при варьировании: угла наблюдения  $\varphi$ ; угла ориентации кристалла  $\theta_0$ ; скорости электронов  $v$ , то есть энергии электронного пучка.

Таким образом, изменяя какой-либо из этих трех параметров, можно выделить переменные элементы спектров и обнаружить линии КТПРИ среди других (характеристических) линий, не имеющих ориентационной зависимости. Обработка спектров показала, что частота пиков излучения зависит от энергии пучка в полном соответствии с теорией. Также в согласии с теорией меняется частота КТПРИ при изменении углов  $\theta_0$  и  $\varphi$ . Сдвиги частоты КТПРИ составляют 100–350 эВ в зависимости от индекса пика, рисунок 4, а.

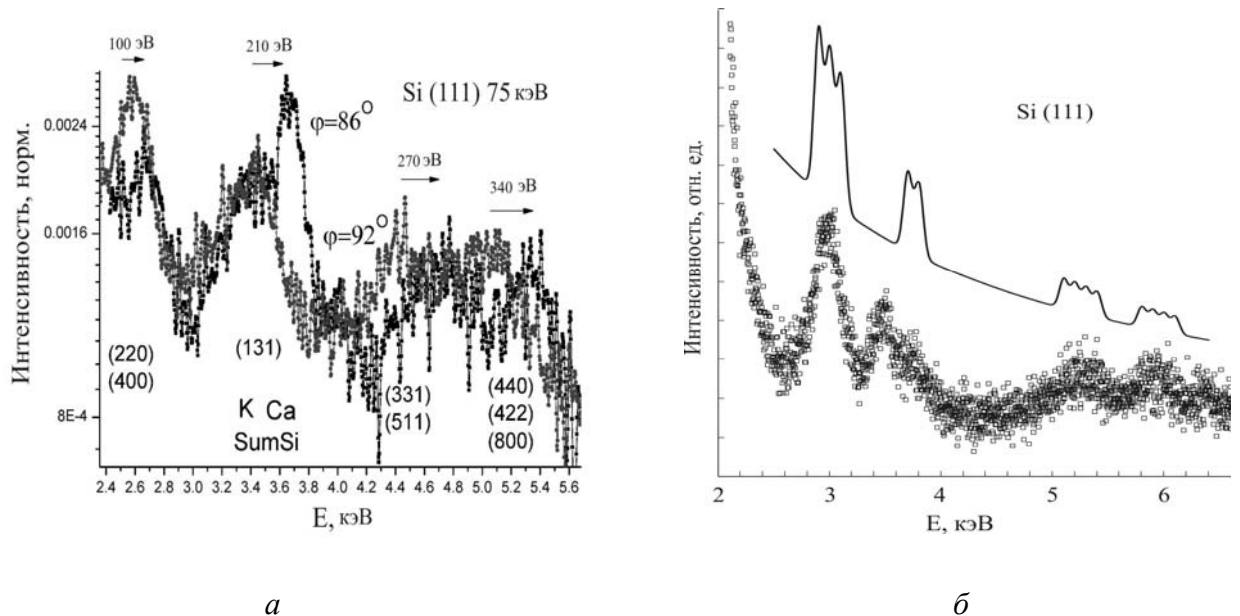


Рисунок 4 – Частотные сдвиги в спектрах КТПРИ и тонкая структура линий излучения

Нами также были получены линии мягкого рентгеновского излучения, перестраиваемые в диапазоне 850–950 эВ при варьировании угла падения  $\theta_0$ . Спектральные линии КТПРИ были соотнесены нами с соответствующими системами кристаллографических плоскостей. В реализованной геометрии генерации излучения отражения от кристаллографических плоскостей с одинаковой суммой индексов Миллера ( $S=h+k+l$ ) имеют близкие частоты. Таким образом, пики КТПРИ имеют тонкую структуру, см. рисунок 4, б. Оценка интегрального выхода излучения дает значение  $\sim 10^{-8}$  фотон/ $e^- \cdot$  ср, что близко к расчетному значению интенсивности.

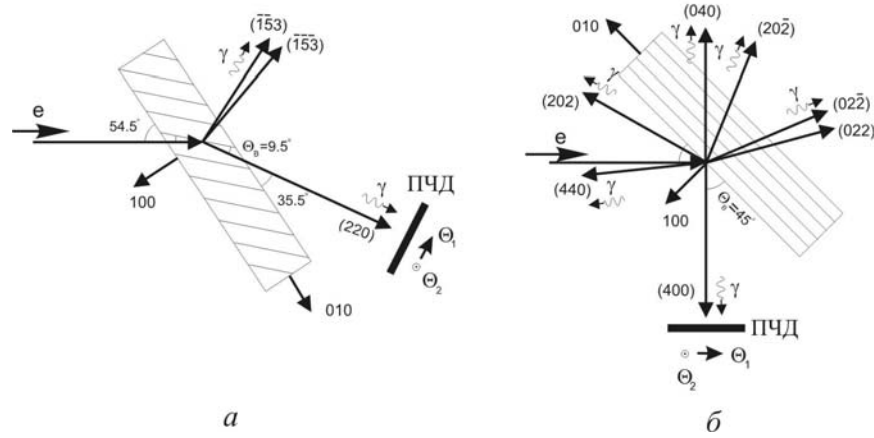
Проведенный анализ подтверждает, что нами зарегистрированы спектральные линии КТПРИ, частота и интенсивность которых, а также зависимости частоты от энергии пучка, углов ориентации мишени и угла наблюдения излучения хорошо согласуются с расчетами, выполненными по теории [8].

В *шестой главе* приводятся результаты приоритетных экспериментов, приведших к первым в мире наблюдениям явления генерации многоволнового ПРИ релятивистскими электронами; обосновывается возможность существования многоволновых эффектов в генерации ПРИ электронами умеренно низких энергий; рассмотрен принцип работы объемного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ), основанный на механизме многоволнового излучения; описана установка для электродинамического моделирования и результаты моделирования объемного резонатора ОЛСЭ; приводится блок-схема прототипа ОЛСЭ на электронной пушке с энергией 10 кэВ и первое наблюдение генерации в миллиметровом диапазоне длин волн; рассмотрены методика и результаты измерения параметров излучения прототипа ОЛСЭ подтверждающие принципиальную работоспособность концепции ОЛСЭ.

В параграфе 6.1 рассмотрены детали экспериментов, приведших к первому в мире наблюдению явления спонтанного многоволнового ПРИ. Принципиально повысить угловое разрешение экспериментальной установки удалось при использовании пропорционального позиционно-чувствительного детектора РКД-1, линейное пространственное разрешение которого составляет  $\sim 150$  мкм, что в использованной геометрии эксперимента обеспечивало угловое разрешение установки  $\sim 0,08$  мрад. Электроника считывания сигнала позволяла регистрировать распределения квантов определенной энергии, отбираемых из полного спектра излучения с помощью дифференциального дискриминатора, то есть получать практически очищенные от фона угловые распределения ПРИ.

В первом эксперименте мишень из GaAs толщиной 400 мкм, вырезанная параллельно плоскости (100), помещалась в гониометр таким образом, что пучок электронов с энергией 500 МэВ входил в кристалл вблизи направления,

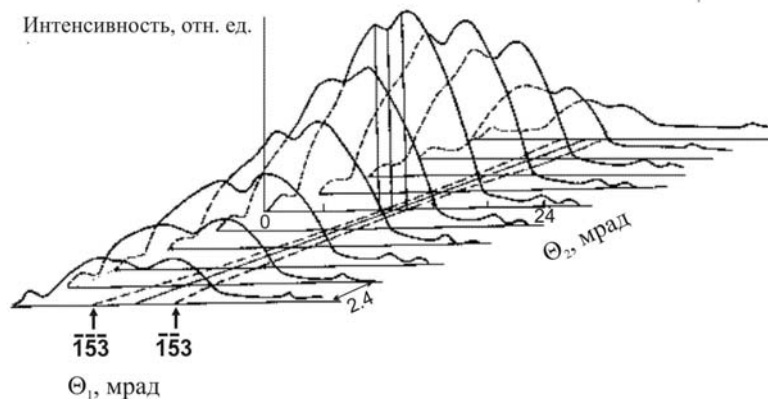
соответствующего условию четырехволновой дифракции  $(000)(220)(\bar{1}\bar{5}3)(\bar{1}\bar{5}3)$  для фотонов с энергией 18,4 кэВ (схема рисунка 5, а).



а – четырехволновая геометрия; б – восьмиволновая геометрия

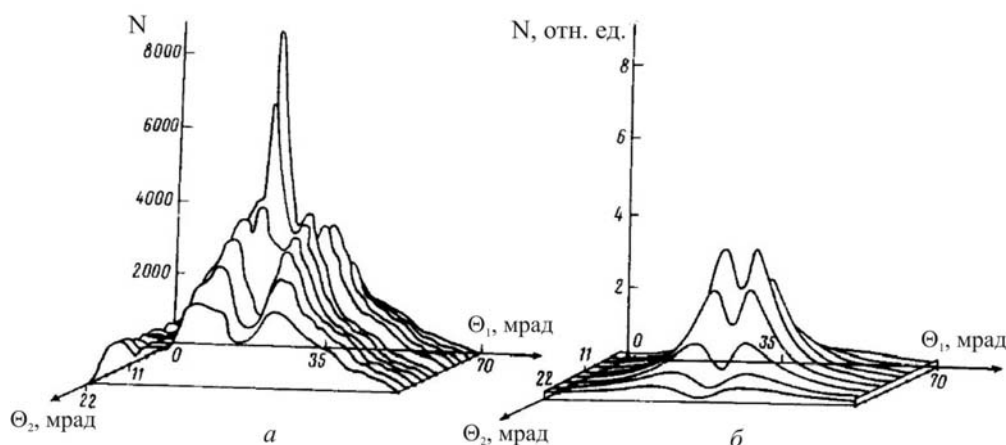
**Рисунок 5 – Схемы экспериментов (ПЧД – позиционно-чувствительный детектор)**

Измерялось угловое распределение рефлекса  $(220)$  под углом  $2\theta_b = 19^\circ$  в вертикальной плоскости (рисунок 6). Теоретическое двухволновое угловое распределение ПРИ в аналогичной геометрии эксперимента имеет колоколообразный вид. Многоволновая геометрия генерации делает распределение двугорбым, на фоне основного двухволнового рефлекса наблюдаются линии, соответствующие условиям трехволновой генерации ПРИ. Полуширины этих линий приблизительно в два раза меньше полуширины основного рефлекса  $(220)$ , расстояние между ними увеличивается с удалением от центра распределения. Наблюдаемое пространственное распределение рефлекса во многом аналогично пространственному распределению рентгеновских лучей в многоволновой дифракции.



**Рисунок 6 – Вид углового распределение рефлекса  $(220)$ , полученного в четырехволновом эксперименте**

Для подтверждения существования многоволнового режима генерации ПРИ был поставлен еще один эксперимент. Монокристалл GaAs толщиной 400 мкм устанавливался в гониометре таким образом, что электроны с энергией 900 МэВ двигались вблизи направления оси  $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$ . Эта геометрия характерна тем, что для рентгеновских квантов с энергией 6,2 кэВ возбуждается вырожденная восьмиволновая генерация  $(000)(400)(022)(02\bar{2})(202)(20\bar{2})(040)(400)$  (схема рисунка 5, б). Таким образом, одновременно "работают" два четырехволновых случая;  $(000)(022)(02\bar{2})(040)$  и  $(000)(202)(20\bar{2})(400)$ . Регистрация велась под углом  $2\theta_B = 90^\circ$  в направлении двухволнового рефлекса  $(400)$ . Расстояние от мишени до окна детектора составляло 710 мм, что позволяло иметь угловое разрешение  $\sim 0,2$  мрад и апертуру 15 мрад.



*a* – экспериментальное распределение в условиях многоволновой генерации;  
*б* – теоретическое распределение для двухволновой геометрии

**Рисунок 7 – Угловые распределения ПРИ**

На рисунке 7, *a* представлены угловые распределения ПРИ, измеренные с шагом по оси  $\Theta_2$ , равным 2,8 мрад. На рисунке 7, *б* приведены угловые распределения, теоретически рассчитанные для случая двухволновой генерации. В целом наблюдается близкое совпадение обоих распределений, за исключением области в центре рефлекса, где в экспериментальном распределении наблюдается четко выраженный интенсивный пик, обусловленный многоволновым режимом генерации. Интенсивность излучения в пике в 2,5 раза больше, а угловая ширина примерно в 4 раза меньше соответствующих величин основного рефлекса  $(400)$  для двухволновой генерации.

Стимулированное рассмотренными экспериментами развитие теории, основы которой кратко описаны в параграфе 6.2, позволило теоретической группе НИИ ЯП БГУ провести численное моделирование экспериментальных ситуаций и уверенно подтвердить, что интерпретации экспериментальной



группой были проведены корректно [9]. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных также обосновало существование возможности значительно повысить спектрально-угловую плотность ПРИ в узком угловом интервале благодаря использованию многоволнового режима генерации.

В параграфе 6.3 на примере описанной выше экспериментально апробированной восьмиволновой схемы и пучка с энергией 7 МэВ обсуждается возможность существования многоволновых эффектов для электронов низких энергий. Утверждается, что и в случае генерации в кристалле многоволнового ПРИ электронами низких энергий, то есть в условиях значительного многократного рассеяния, также, как и в случае высоких энергий электронов, в угловых распределениях излучения в рефлекс может наблюдаться узкий сильный пик расположенный вблизи точного выполнения условия Брэгга.

В параграфе 6.4 рассмотрены принципы генерации многоволнового параметрического излучения в объемном лазере на свободных электронах. Очевидно, существенное повышение интенсивности генерируемого излучения может быть получено при формировании условий для возникновения коллективных процессов. Однако, в стандартных условиях генерация индуцированного излучения в рентгеновском диапазоне требует весьма высоких стартовых плотностей тока ( $j_s > 10^{12}$  А/см<sup>2</sup>), поэтому представляется пока нереализуемой. С другой стороны, в [10, 11] было впервые показано, что из-за дифракции генерируемых фотонов при генерации ПРИ кристалл становится аналогом объемного резонатора благодаря возникновению трехмерной распределенной обратной связи, что может приводить к уменьшению величины стартового тока сразу на несколько порядков. В общем случае, в условиях дифракции фотонов, генерируемых пучком, инкремент неустойчивости электронного пучка оказывается зависящим как  $\rho_0^{1/(3+s)}$  от числа  $s$  электромагнитных волн, возникающих в результате дифракции (например, для двухволновой дифракции  $s=1$ , для трехволновой дифракции  $s=2$  и т.д.), где  $\rho_0$  – плотность тока пучка. Это показывает исключительную важность многоволновых процессов при генерации когерентного излучения электронными пучками.

Ввиду того, что процессы генерации ПРИ и генерации в вакуумных приборах и лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) во многих аспектах аналогичны [1], соединение принципов работы ЛСЭ и многоволновой распределенной обратной связи легло в основу концепции новой и чрезвычайно перспективной разновидности ЛСЭ – объемного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ) [1, 2]. Существование в условиях многоволновой распределенной обратной связи упомянутого выше эффекта  $\sim \rho_0^{1/(3+s)}$  приводит к резкому снижению плотности тока электронных пучков, необходимой для достижения порога генерации излучения, и к увеличению усиления, что в

ОЛСЭ может обеспечить более эффективный, по сравнению с традиционными ЛСЭ, процесс генерации.

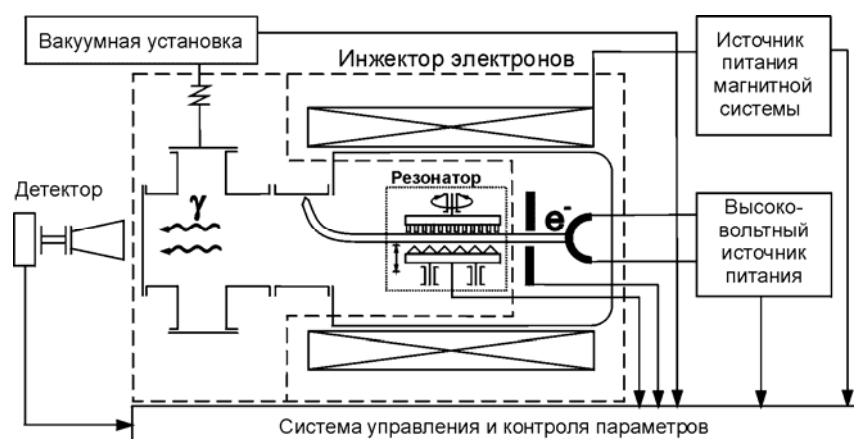
На основе детального теоретического и численного анализа пучковой неустойчивости в системе с многоволновой объемной распределенной обратной связью и оценки экспериментальных возможностей реализации ОЛСЭ с нерелятивистским пучком в [12] была предложена следующая идейная организация экспериментального прототипа для демонстрации работоспособности принципа ОЛСЭ на основе индуцированного многоволнового излучения:

1. нерелятивистский плоский электронный пучок распространяется между двумя плоскими дифракционными решетками: замедляющей и решеткой обратной связи;
2. в качестве механизма спонтанного излучения используется эффект Смита-Парселла, то есть излучение, генерируемое при прохождении электронов вблизи поверхности замедляющей дифракционной решетки с вектором обратной решетки  $\vec{\tau}_1$ . При этом выполняется условие синхронизма электромагнитной волны с электронным пучком  $\omega - \vec{k}u = \vec{\tau}_1 u$ ;
3. объемная распределенная обратная связь устанавливается за счет динамической дифракции спонтанного излучения на дифракционной решетке обратной связи с вектором обратной решетки  $\vec{\tau}_2$ . При этом выполняется условие Брэгга  $|\vec{k}| \approx |\vec{k} + \vec{\tau}_2|$  и в результате возникает трехволновая схема генерации с волновыми векторами  $\vec{k}$ ,  $\vec{k}_1 = \vec{k} + \vec{\tau}_1$  и  $\vec{k}_2 = \vec{k} + \vec{\tau}_2$ .

В параграфе 6.5 рассмотрены результаты экспериментального изучения индуцированного многоволнового излучения в СВЧ диапазоне прототипа ОЛСЭ, построенного на перечисленных выше принципах [12].

Существенной частью подготовки эксперимента по исследованию процессов генерации в прототипе ОЛСЭ явилось волновое моделирование процессов в макете объемного резонатора. Объемный резонатор ОЛСЭ – один из его важнейших элементов, так как именно им определяется спектральный состав излучения, стартовый ток генерации, диапазон перестройки и, частично, выходная мощность. Он является сложной электродинамической структурой в силу большого числа связанных между собой волновых процессов, протекающих в нем во время генерации. Несмотря на наличие к настоящему времени хорошо развитой теории дифракционного излучения для бесконечных структур, теоретический анализ резонаторов с дифракционными решетками весьма затруднителен в первую очередь в силу существенности влияния граничных условий. Таким образом, численные расчеты, основанные на такой теории, могут давать лишь приблизительные рекомендации при планировании

экспериментов по разработке ОЛСЭ, которые обязательно требуется дополнять экспериментальными сведениями о функционировании сложных объемных резонаторов с дифракционными решетками. В большом цикле измерений на специально созданных экспериментальных стендах было подробно изучено поведение проходящей через резонатор СВЧ мощности в зависимости от величины прицельного параметра, углов между направлением «пучка» и векторов обратной решетки решеток  $\vec{\tau}_1$  и  $\vec{\tau}_2$ , длины решеток, поперечных размеров резонатора, энергии пучка. С помощью этих измерений удалось установить положения резонансов генератора ОЛСЭ и уточнить расчетные геометрические параметры генератора. Циклы измерений были повторены на решетках с различными шагами и углами нарезки. Набранный материал после подробного анализа дополнил набор теоретически рассчитанных величин и дал возможность скорректировать расчетные параметры резонатора.

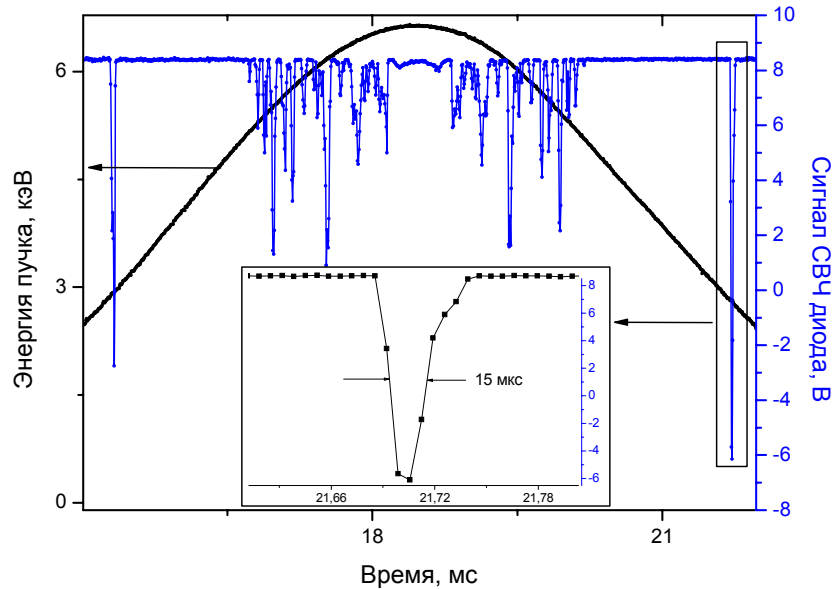


**Рисунок 8 – Блок-схема экспериментального стенда по изучению процессов генерации в ОЛСЭ**

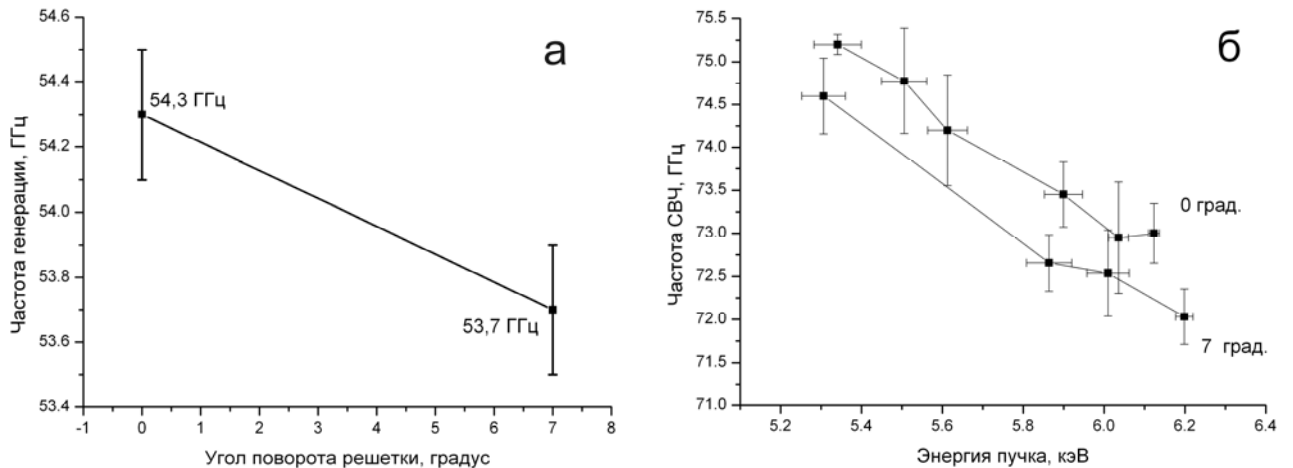
Исследования процессов генерации излучения в прототипе ОЛСЭ в четырехмиллиметровом диапазоне СВЧ выполнялись на экспериментальном стенде, функциональная схема которого изображена на рисунке 8. В результате цикла исследований, в ходе которых варьировались параметры установки, была зарегистрирована генерация СВЧ-излучения (рисунок 9) при энергии пучка  $\geq 5$  кэВ и следующих характеристиках резонатора: длины решеток – 100 мм; шаг нарезки замедляющей решетки – 0,67 мм; шаг нарезки решетки обратной связи – 3 мм.

После первого получения генерации эксперименты по подробному изучению характерных особенностей излучения прототипа ОЛСЭ были начаты с оценки несущей частоты генерации и исследования возможности ее плавной перестройки. Ввиду особенностей сигнала прототипа ОЛСЭ, представляющего собой непериодические импульсы миллиметрового диапазона микросекундной

длительности и учитывая необходимость проведения измерений в достаточно широком диапазоне, стандартные методы измерения частоты и параметров спектра оказались неприменимыми. В этой связи для измерения несущей частоты импульсов ОЛСЭ потребовалась разработка оригинальной квазиоптической методики, основанной на интерференционном методе, часто применяемом в миллиметровом диапазоне длин волн.



**Рисунок 9 – Характерный вид сигнала прототипа ОЛСЭ**



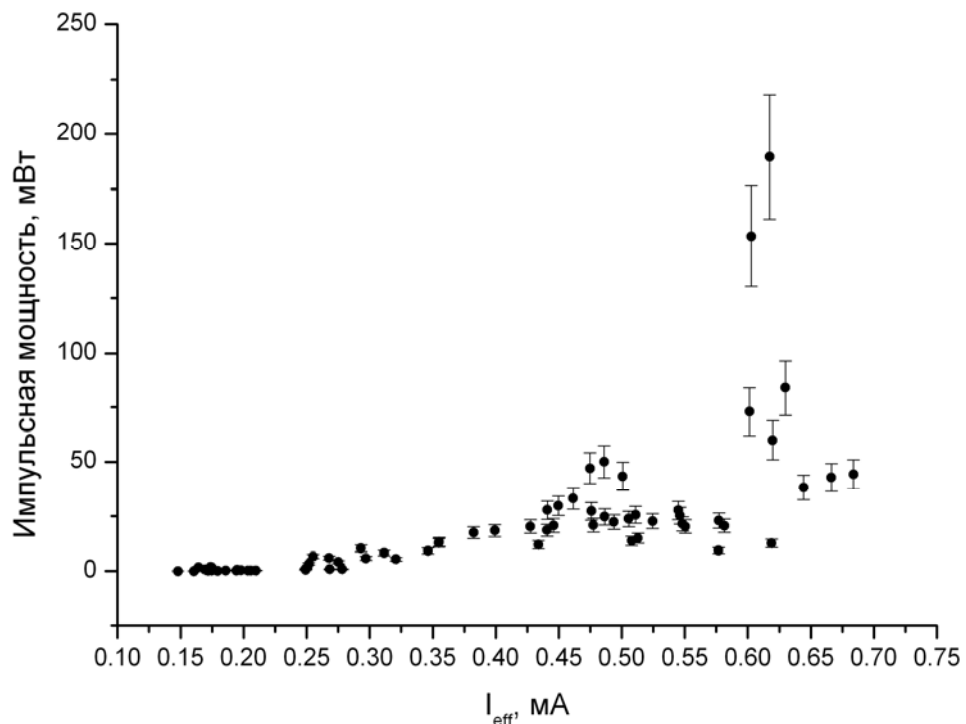
а – измеренные частоты несущей импульсов СВЧ при энергии пучка 2.9 кэВ при повороте решетки обратной связи; б – частоты несущей импульсов СВЧ при энергиях пучка 5.3÷6.2 кэВ измеренные при двух положениях решетки обратной связи.

**Рисунок 10 – Перестройка несущей частоты импульсов СВЧ в прототипе ОЛСЭ**

Информацию о частоте (длине волны) излучения можно получить, находя коэффициент отражения электромагнитной волны от диэлектрической

пластинки с известной диэлектрической проницаемостью и толщиной  $d$ , сравнимой с длиной волны  $\lambda$  в пластинке. Технически квазиоптическая методика была реализована в устройстве, изготовленном на основе полых диэлектрических лучеводов круглого сечения, предназначенных для диапазона 53,57...600 ГГц. Измеряемой величиной в этой схеме является не зависящее от падающей мощности отношение мощностей отраженной и прошедшей волн  $R/T$ . Анализ калибровочных кривых установки показывает, что точность измерения несущей частоты составляет  $\sim 0,5\%$ . Разработанная методика была применена для оценки несущей частоты импульсов СВЧ-излучения прототипа ОЛСЭ и подтверждения возможности ее плавной перестройки, рисунок 10.

Для определения пороговых условий генерации и получения зависимости полной СВЧ мощности генератора от эффективного тока был проделан цикл измерений, результаты которых приведены на рисунке 11. Максимальная измеренная импульсная мощность на детекторе составила примерно 170 мВт, что дает мощность излучения непосредственно на выходе резонатора около 850 мВт. Учитывая, что импульсное значение эффективного тока было в этом случае  $\sim 600$  мА, достигнутый к.п.д. преобразования мощности пучка в излучение можно оценить как равный примерно 0,05%.



**Рисунок 11 – Зависимость импульсной мощности СВЧ сигнала на энергии пучка 2.9 кэВ от эффективного тока пучка.**

Таким образом, на экспериментальном прототипе ОЛСЭ продемонстрирована работоспособность концепции объемного лазера на свободных электронах. Измерения основных параметров миллиметрового СВЧ

излучения прототипа ОЛСЭ с энергией пучка до 10 кэВ подтвердили особенности, предсказанные ранее теоретически. Это позволило, опираясь на результаты экспериментов с прототипом, перейти к проектированию мощного ОЛСЭ с объемным сеточным резонатором на пучке с энергией 200 кэВ и током 2 кА.

В *Заключении* изложены основные научные результаты, полученные в диссертации, и обсуждены возможности их практического использования.

В *Приложении* приведены справки об использовании результатов диссертации.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ю.Н. Адищев и др. // Письма в ЖЭТФ **41** (1985) 295.
- 2 A.N. Didenko et al. // Phys. Lett. A **110** (1985) 177.
- 3 V.G. Baryshevsky et al. // Phys. Lett. A **110** (1985) 477.
- 4 В.Г. Барышевский // Докл. АН СССР **299** (1988) 1363.
- 5 V.G. Baryshevsky // Nucl. Instr. Meth. A **445** (2000) 281.
- 6 I.D. Feranchuk, A.V. Ivashin // J. de Physique **46** (1985) 1981.
- 7 В.Г. Барышевский, А.О. Грубич, Ле Тьен Хай // ЖЭТФ **94** (1988) 51.
- 8 I.D. Feranchuk et al. // Phys. Rev. E **62** (2000) 4225.
- 9 S.A. Stepanov et al. // Nucl. Instr. Meth. B **974** (1996) 55.
- 10 V.G. Baryshevsky, I.D. Feranchuk // Phys. Lett. A **102** (1984) 141.
- 11 V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, I.Ya. Dubovskaya // Nucl. Instr. Meth. A **358** (1995) 493.
- 12 V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, V.I. Stolyarsky // Free Electron Lasers – 1999: Proc. Intl. Conf. / Elsevier. – Holland, 2000. – Vol. 2. – P. 37–38.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

В диссертации изложены результаты экспериментов и численного моделирования, направленных на детальное изучение особенностей генерации параметрического излучения заряженными частицами в кристаллах. Достоверность и обоснованность этих результатов подтверждается хорошим согласием полученных экспериментальных данных с результатами вычислений по признанным теоретическим моделям; многократными последующими независимыми измерениями, выполненными в известных научных центрах мира; апробацией на многочисленных профильных международных конференциях и других научных собраниях. Благодаря выполненным

экспериментам были значительно расширены представления о физике процессов излучения заряженных частиц в периодических структурах.

Наиболее важные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом.

1. **Впервые в мире** обнаружено ПРИ в режиме многоволновой (четырёхволновой и восьмиволновой) дифракции [1, 4-6]. Экспериментально продемонстрирована возможность существенного увеличения спектрально-угловой плотности ПРИ в узком угловом диапазоне;
2. Результаты исследования характеристик индуцированного многоволнового излучения **первого в мире** объемного лазера на свободных электронах подтвердили основные выводы теории ОЛСЭ [17, 18, 26, 32, 34-36]. В частности, продемонстрирована возможность плавной перестройки частоты генерируемого излучения;
3. **Впервые** получена генерация ПРИ релятивистскими электронами в мишенях из кварца и арсенида галлия и измерены его параметры [2, 5, 28, 29]. Нормировка ПРИ по характеристическому рентгеновскому излучению GaAs, регистрируемому одновременно с ПРИ, позволила получить более надежные оценки величины квантового выхода ПРИ по сравнению с нормировкой по тормозному излучению;
4. Обоснована возможность [1, 31, 39] применения ПРИ для идентификации частиц сверхвысоких энергий характерных, в частности, для адронного коллайдера ЛНС на основании **впервые в мире** экспериментально обнаруженного [10, 14] ПРИ тяжелых заряженных частиц – протонов с энергией 70 ГэВ;
5. Для регистрации ПРИ тяжелых заряженных частиц в режиме совпадений был разработан и создан быстродействующий детектор на основе сцинтилляционного кристалла ортоалюмината иттрия активированного церием –  $YAlO_3:Ce$ . Был проделан цикл исследований спектрометрических и временных характеристик ряда современных сцинтилляционных кристаллов [1, 7-9, 11-13, 15, 30], результаты которого позволили по комплексу характеристик отобрать  $YAlO_3:Ce$  как наиболее адекватный для решения задачи регистрации ПРИ на пучке тяжелых заряженных частиц в условиях сильного фона;
6. Экспериментально показано [1-3, 28, 29], что параметры ПРИ, генерируемого ультрарелятивистскими электронами в двухволновой геометрии, хорошо описываются кинематической теорией ПРИ;
7. На основе численного анализа предложено объяснение существенного расхождения экспериментальных и теоретических зависимостей квантового выхода ПРИ от энергии электронов в толстых кристаллах

- кремния и арсенида галлия. Показано, что оно обусловлено особенностями геометрии экспериментов на внутреннем пучке синхротрона СИРИУС [1];
8. Анализ более трех десятков измерений параметров ПРИ релятивистских электронов позволил сделать вывод, что кинематическая теория ПРИ с феноменологическим учетом влияния многократного рассеяния удовлетворительно согласуется с экспериментом в области энергий выше пороговой  $E_0$  и при эффективной длине многократного рассеяния меньшей или равной когерентной длине тормозного излучения [1, 16];
  9. Цикл численных экспериментов по моделированию на основе динамической теории источника ПРИ на ускорителях электронов низкой энергии показал: максимальная толщина мишени, при которой многократное рассеяние еще не изменяет свойства излучения значительно, равна примерно десятикратной когерентной длине тормозного излучения; существует оптимальная асимметричная геометрия генерации ПРИ, позволяющая существенно повысить интенсивность излучения по сравнению с симметричной геометрией; интегральные характеристики ПРИ слабо зависят от температуры за исключением рефлексов высоких порядков, однако она заметно влияет на дифференциальные характеристики ПРИ [1, 22, 24, 25];
  10. Экспериментально полученные данные о зависимости спектров когерентного тормозного и параметрического рентгеновского излучения нерелятивистских (50-100 кэВ) электронов от энергии пучка, углов падения и наблюдения подтвердили предсказанные теорией качественные и частично количественные характеристики этого типа излучения [1, 23, 27]. Постановка экспериментов с нерелятивистскими электронами потребовала разработки кристаллических мишеней субмикронной толщины в виде самоподдерживающихся мембран [1, 38, 61];
  11. Разработана квазиоптическая методика измерения параметров непериодических импульсов СВЧ малой длительности на базе полых диэлектрических лучеводов [19, 20].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные использовались для проверки корректности существующих теоретических моделей излучения заряженных частиц. В случае генерации ПРИ в многоволновых режимах появление этих результатов стимулировало



разработку детальной теории допускающей численное моделирование. Результаты цикла исследований в совокупности привели к существенному улучшению понимания физики процессов генерации спонтанного и индуцированного электромагнитного излучения в объемных периодических структурах, а также к развитию техники и методики экспериментальных исследований. Эти результаты используются в учебном процессе кафедры ядерной физики БГУ при выполнении курсовых и дипломных работ и при чтении спецкурсов «Взаимодействие излучения с веществом», «Физика пучков» и «Современный физический эксперимент».

Результаты численных экспериментов по исследованию характеристик ПРИ на ускорителях умеренной энергии могут использоваться для оптимизации источников на ПРИ, создаваемых в настоящее время в США (LINAC, Rensselaer Polytechnic Institute) и Японии (LEBRA, Nihon University), а также в экспериментах, планируемых в настоящее время на установке ВТФ в Laboratori Nazionali di Frascati (Италия).

Результаты исследований КТПРИ нерелятивистских электронов используются в настоящее время в Томском политехническом университете (Россия) при выполнении совместного с НИИ ЯП БГУ (отв. исполнитель от НИИ ЯП БГУ – А.С. Лобко) проекта БФФИ-РФФИ №Ф06Р-173 «Исследование параметрического рентгеновского излучения от нерелятивистских электронов для исследования поверхности наноструктур».

Исследования сцинтилляционных кристаллов, часть из которых представлена в данной работе, привели к созданию ряда современных детекторов ионизирующих излучений с улучшенными характеристиками быстродействия и стабильности для применения в науке (детекторы физики высоких энергий, экспрессная мессбауэровская спектроскопия), ядерной медицине (позитронная эмиссионная томография) и практике ( $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -спектрометрия). В частности, на их основе соискателем разработан альфа-бета радиометр в рамках Государственной программы по преодолению последствий аварии на Чернобыльской АЭС (Разработка экспериментального образца портативного радиометра поверхностной загрязненности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателями: отчет о НИР (заключ.) / Ин-т ядерных проблем БГУ; рук. темы А.С. Лобко. – Минск, 1993. – 31 с. – №ГР 199330). Результаты, полученные при исследовании характеристик сцинтилляционного кристалла ортоалюмината иттрия активированного церием ( $YAlO_3:Ce$ ), используются на ОАО «Богородицкий завод техно-химических изделий» (Российская Федерация) при производстве сцинтилляционных кристаллов  $(Lu-Y)AlO_3:Ce$ , применяемых для создания детекторных элементов для регистрации интенсивного рентгеновского и гамма-излучения мягкой и средней энергии.

Технология получения и контроля толщины сверхтонких кристаллических мембран может использоваться для изготовления датчиков давления и других изделий микромеханики.

Результаты исследования излучения прототипа ОЛСЭ использованы при планировании дальнейших экспериментов, ведущихся в настоящее время в НИИ ЯП БГУ с целью получения мощных перестраиваемых источников излучения в сверхвысокочастотном и терагерцовом диапазонах.

## Список публикаций соискателя

### Монографии

1. Лобко, А.С. Экспериментальные исследования параметрического рентгеновского излучения / А.С. Лобко. – Минск: БГУ, 2006. – 210 с.

### Статьи

2. Обнаружение параметрического рентгеновского излучения монокристалла арсенида галлия / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, О.Т. Градовский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов, П.Ф. Сафронов // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14, Вып. 1. – С. 57–60.
3. Угловые распределения параметрического рентгеновского излучения монокристалла алмаза / Ю.Н. Адищев, А.П. Апанасевич, В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, С.А. Воробьев, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, Г.А. Плешков, И.В. Поликарпов, С.Р. Углов, В.А. Ярмолкевич // Известия вузов: Физика. – 1989. – № 8. – С. 112–114.
4. Обнаружение многоволновой генерации параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов, П.Ф. Сафронов, Д.С. Шварков, А.О. Юрцев // Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15, Вып. 1. – С. 33–36.
5. Detection of parametric X-ray radiation of a GaAs monocrystal / V.P. Afanasenko, V.G. Baryshevsky, O.T. Gradovsky, R.F. Zuevsky, M.G. Livshits, A.S. Lobko, V.I. Moroz, V.V. Panov, I.V. Polikarpov, P.F. Safronov, D.S. Shvarkov, A.O. Yurtsev // Phys. Lett. A. – 1989. – Vol. 141, № 5, 6. – P. 311–313.
6. Обнаружение аномалии в угловом распределении параметрического рентгеновского излучения / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, С.В. Гациха, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов, В.П. Поцилуйко, П.Ф. Сафронов, А.О. Юрцев // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51, Вып. 4. – С. 213–215.
7. Быстродействующие сцинтилляционные кристаллы для детекторов ядерных излучений / В.Г. Барышевский, А.Г. Давыдченко, М.В. Коржик, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, С.А. Смирнова, А.А. Федоров // Письма в ЖТФ. – 1990. – Т. 16, Вып. 22. – С. 75–78.

8. Быстродействующие сцинтилляционные кристаллы  $\text{YAlO}_3:\text{Pr}$  / В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, М.В. Коржик, А.С. Лобко, В.И. Мороз, С.А. Смирнова, В.Б. Павленко, А.А. Федоров // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 17, Вып. 24. – С. 82–85.
9. Сцинтилляционные характеристики кристаллов  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$  / В.Г. Барышевский, М.В. Коржик, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, Б.И. Минков, М.Л. Мейльман, В.И. Мороз, В.Б. Павленко, А.А. Федоров // Весці Акадэміі навук БССР, сер. фіз.-энерг. навук. – 1991. – № 4. – С. 114–117.
10. Обнаружение параметрического рентгеновского излучения протонов / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, А.С. Лобко, А.А. Москательников, В.В. Панов, В.П. Поцилуйко, С.В. Скороход, Д.С. Шварков // Письма в ЖЭТФ. – 1991. – Т. 54, Вып. 9. – С. 493–495.
11. Монокристаллический сцинтиллятор  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}^{3+}$  для спектрометрии альфа-излучения / В.Г. Барышевский, А.П. Богатко, Г.Ю. Дробышев, М.В. Коржик, А.М. Кузьмич, А.С. Лобко, В.И. Мороз, С.А. Смирнова, А.А. Федоров // Весці Акадэміі навук БССР, сер. фіз.-энерг. навук. – 1992. – №2. – С. 5–7.
12. Light source for energy stabilization of calorimetric detectors based on photodetectors / V.A. Kachanov, V.V. Rykalin, V.L. Solovyanov, V.Yu. Hodyrev, M.V. Korzhik, V.I. Moroz, A.S. Lobko, A.A. Fyodorov, A.F. Novgorodov, B.A. Khachaturov, S.A. Smirnova // Nucl. Instr. Meth. A. – 1992. – Vol. 314. – P. 215–218.
13. Установка для измерения временных параметров сцинтилляций / Р.Ф. Зуевский, М.В. Коржик, А.С. Лобко, А.А. Федоров // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 6. – С. 101–104.
14. Detection of proton parametric X-ray radiation in silicon / V.P. Afanasenko, V.G. Baryshevsky, R.F. Zuevsky, A.S. Lobko, A.A. Moskatelnikov, S.B. Nurushev, V.V. Panov, V.P. Potsilujko, V.V. Rykalin, S.V. Skorokhod, D.S. Shvarkov // Phys. Lett. A. – 1992. – Vol. 170. – P. 315–318.
15. Реперные световые источники для мониторинга многоканальных электромагнитных и адронных калориметров / В.А. Качанов, М.В. Коржик, А.С. Лобко, В.И. Мороз, С.А. Смирнова, В.Л. Соловьянов, А.Ф. Новгородов, В.В. Рыкалин, Б.А. Хачатуров, А.А. Федоров, В.Ю. Ходырев // Приборы и техника эксперимента. – 1993. – № 1. – С. 99–102.
16. Experimental study of the influence of multiple scattering on the parametric X-rays characteristics / V.P. Afanasenko, V.G. Baryshevsky,

- A.S. Lobko, V.V. Panov, R.F. Zuevsky // Nucl. Instr. Meth. A. – 1993. – Vol. 334. – P. 631–637.
17. First lasing of a volume FEL (VFEL) at a wavelength range  $\lambda \sim 4\text{-}6$  mm / V. Baryshevsky, K. Batrakov, A. Gurinovich, I. Iliencko, A. Lobko, V. Moroz, P. Sofronov, V. Stolyarsky // Nucl. Instr. Meth. A. – 2002. – Vol. 483. – P. 21–23.
  18. Progress of the volume FEL (VFEL) experiments in millimeter range / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, I.I. Iliencko, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, V.I. Moroz, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // Nucl. Instr. Meth. A. – 2003. – Vol. 507. – P. 137–140.
  19. Батраков, К.Г. Оценка несущей частоты одиночного СВЧ импульса объемного лазера на свободных электронах ОЛСЭ-10 / К.Г. Батраков, А.С. Лобко, П.В. Молчанов // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 6. – С. 56–60.
  20. Батраков, К.Г. Квазиоптический метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне / К.Г. Батраков, А.С. Лобко // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика, Математика, Информатика. – 2004. – № 3. – С. 35–38.
  21. Dubovskaya, I.Ya. Multiwave mode of parametric x-rays generation / I.Ya. Dubovskaya, A.S. Lobko // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5974. – P. 59740R-1–59740R-8.
  22. Lobko, A. X-ray source based on parametric x-rays mechanism / A. Lobko, O. Lugovskaya // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Физика, Математика. – 2005. – № 2. – С. 104–110.
  23. Когерентное тормозное и параметрическое рентгеновское излучение от нерелятивистских электронов в кристалле / В.Г. Барышевский, К.Г. Батраков, А.О. Грубич, А.А. Гуринович, А.С. Лобко, А.А. Ровба, П.Ф. Сафронов, В.И. Столярский, Б.А. Тарнопольский, А.П. Ульяненок, И.Д. Феранчук // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, Вып. 9. – С. 50–57.
  24. Lobko, A. Choice of optimal target for monochromatic tunable x-ray source based on low-energy accelerator / A. Lobko, O. Lugovskaya // Advanced Radiation Sources and Applications / Ed. H. Wiedemann. – NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry. – 2006. – Vol. 199. – P. 47–54.
  25. Лобко, А.С. Влияние температуры мишени на характеристики параметрического рентгеновского излучения / А.С. Лобко, О.М. Луговская // Поверхность: рентг., синхр., нейтр. иссл. – 2006. – № 11. – С. 39–43.

26. Experimental observation of radiation frequency tuning in “OLSE-10” prototype of volume free electron laser / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, V.A. Evdokimov, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // Nucl. Instr. Meth. B. – 2006. – Vol. 252, No 1. – P. 86–91.
27. Experimental observation of frequency tuning of x-ray radiation from nonrelativistic electrons in crystals / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, I.D. Feranchuk, A.A. Gurinovich, A.O. Grubich, A.S. Lobko, A.A. Rouba, B.A. Tarnopolsky, P.F. Safronov, V.I. Stolyarsky, A.P. Ulyanenko // Phys. Lett. A. – 2007. – Vol. 363. – P. 448–452.

### **Материалы конференций и сборники трудов**

28. Экспериментальное исследование параметрического рентгеновского излучения кристаллов кремния, кварца и алмаза / Ю.Н. Адищев, А.П. Апанасевич, В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, В.А. Верзилов, С.А. Воробьев, О.Т. Градовский, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, Г.А. Плешков, И.В. Поликарпов, А.П. Потылицын, П.Ф. Сафронов, С.Р. Углов, В.А. Ярмолкевич // XVIII Всес. Совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: материалы, Москва, 30 мая–1 июня 1988 г. / МГУ. – Москва, 1989. – С. 99–101.
29. Параметрическое рентгеновское излучение монокристалла арсенида галлия / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов // XX Всес. Совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: материалы, Москва, 30 мая–1 июня 1990 г. / МГУ. – Москва, 1991. – С. 112–114.
30.  $\alpha$ -Particle spectrometer based on  $YAlO_3:Ce^{3+}$  crystal scintillator / V.A. Kachanov, V.V. Rykalin, V.Yu. Khodyrev, V.G. Baryshevsky, A.G. Davydchenko, M.V. Korzhik, A.S. Lobko, V.I. Moroz, S.A. Smirnova, A.A. Fedorov, B.A. Khachaturov // Physics at UNK: proceedings of 3rd Workshop, Protvino, 25–28 Sept., 1990 / ИИЕР. – Protvino, 1991, P. 148–153.
31. Afanasenko, V.P. Parametric X-rays as a promising radiation mechanism for high energy particle identification / V.P. Afanasenko, V.G. Baryshevsky, A.S. Lobko // 1993 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imaging Conf.: conf. record, San Francisco, 31 Oct.–6 Nov., 1993 / IEEE. – Catalog Number 93CH3374–6. – 1994. – Vol. 1. – P. 103–107.

32. Первое наблюдение генерации в объемном лазере на свободных электронах / В.Г. Барышевский, К.Г. Батраков, А.А. Гуринович, И.И. Ильенко, А.С. Лобко, В.И. Мороз, П.Ф. Сафронов, В.И. Столярский // *Фундаментальные и прикладные физические исследования: сб. научн. трудов / БГУ; под ред. В.Г. Барышевского.* – Минск, 2001. – С. 170–174.
33. Батраков, К.Г. Квазиоптический метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне частот / К.Г. Батраков, А.С. Лобко // *Фундаментальные и прикладные физические исследования: сб. научн. трудов / БГУ; под ред. В.Г. Барышевского.* – Минск, 2001. – С. 226–231.
34. Первое наблюдение генерации в объемном лазере на свободных электронах / В.Г. Барышевский, К.Г. Батраков, А.А. Гуринович, И.И. Ильенко, А.С. Лобко, В.И. Мороз, П.Ф. Сафронов, В.И. Столярский // *IV научный семинар памяти В.П. Саранцева: труды, Дубна, 26–28 сентября 2001 г. / ОИЯИ.* – Дубна, 2002. – С. 27–32.
35. Экспериментальные исследования процессов генерации излучения в объемных лазерах на свободных электронах / В.Г. Барышевский, К.Г. Батраков, А.А. Гуринович, И.И. Ильенко, А.С. Лобко, П.В. Молчанов, В.И. Мороз, П.Ф. Сафронов, В.И. Столярский // *Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: материалы 4-й межд. научно-практ. конф., Минск, 17–18 окт. 2002 г. / БГУ.* – Минск, 2002. – Ч. 2. – С. 84–93.
36. Wide range frequency tuning in vacuum electronic devices / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // *33rd Europ. Microwave Conf.: proceedings, Munich, 6–10 Oct. 2003 / Horizon House Publ.* – London, 2003. – P. 1329–1332.
37. Зуевский, Р.Ф. Численный расчет характеристик параметрического рентгеновского излучения в рамках кинематической модели Феранчука-Ивашина / Р.Ф. Зуевский, А.С. Лобко // *Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: материалы 5-й межд. научно-практ. конф., Минск, 13–15 окт. 2004 г. / БГУ.* – Минск, 2004. – С. 328–332.
38. Высоцкий, В.Б. Технология изготовления и контроля тонких мембран из кристаллического кремния / В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко, А.С. Лобко // *Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: материалы 5-й межд. научно-практ. конф., Минск, 13–15 окт. 2004 г. / БГУ.* – Минск, 2004. – С. 268–271.

39. Lobko, A.S. Parametric x-rays (PXR) of charged heavy particles / A.S. Lobko, O.M. Lugovskaya // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings of 11th Annual Seminar NPC'S'2005, Minsk, 17-20 May, 2005 / Joint Institute of Power and Nuclear Research "Sosny"; eds. L. Babichev and V. Kuvshinov. – Minsk, 2005. – Vol. 12. – P. 77–83.

### Тезисы докладов

40. Поляризационные характеристики ПРИ и его угловые распределения / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, О.Т. Градовский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов, П.Ф. Сафронов // IV Всес. Собрание по когерентному взаимодействию излучения с веществом: тезисы докладов, Юрмала, 17–21 октября 1988 г. / ВНИИФТРИ. – Москва, 1988. – С. 336–337.
41. Угловые распределения параметрического рентгеновского излучения монокристалла алмаза / Ю.Н. Адищев, А.П. Апанасевич, В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, С.А. Воробьев, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, Г.А. Плешков, И.В. Поликарпов, А.П. Потылицын, С.Р. Углов, В.А. Ярмолкевич // IV Всес. Собрание по когерентному взаимодействию излучения с веществом: тезисы докладов, Юрмала, 17–21 октября 1988 г. / ВНИИФТРИ. – Москва, 1988. – С. 338.
42. Изучение влияния многократного рассеяния на характеристики параметрического рентгеновского излучения / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов, В.П. Поцилуйко, П.Ф. Сафронов, Д.С. Шварков, А.О. Юрцев // XIX Всес. Собрание по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов, Москва, 29–31 мая 1989 г. / МГУ. – Москва, 1989. – С. 80.
43. Параметрическое рентгеновское излучение монокристалла арсенида галлия / В.П. Афанасенко, В.Г. Барышевский, Р.Ф. Зуевский, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, В.В. Панов, И.В. Поликарпов // XX Всес. Собрание по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов, Москва, 1990 г.) / МГУ. – Москва, 1990. – С. 87.
44. Быстродействующий сцинтилляционный детектор рентгеновского и гамма-излучения / В.Г. Барышевский, М.В. Коржик, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, А.А. Федоров, С.А. Смирнова, А.Г. Давыдченко // V Всес. Собрание по когерентному взаимодействию излучения с веществом: тезисы докладов,



- Симферополь, 2–8 октября 1990 г. / ВНИИФТРИ. – Москва, 1990. – С. 153–154.
45. Эффективные сцинтилляционные монокристаллические материалы для быстродействующих детекторов ядерных излучений / В.Г. Барышевский, М.В. Коржик, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, В.И. Мороз, М.Л. Мейльман, Б.И. Минков, С.А. Смирнова, В.Б. Павленко, А.А. Федоров // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра: тезисы докладов 41-го совещания / Наука. – Ленинград, 1991. – С. 444.
  46. Experimental investigation of 4-mm quasi-Cherenkov volume FEL / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, I.I. Iliencko, A.S. Lobko, V.I. Moroz, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // 22nd Intl. Free Electron Laser Conference: abstracts, Durham, USA, 13–18 August 2000 / Durham. – 2000.
  47. First lasing of volume FEL (VFEL) at wavelength range 4-6 mm / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, I.I. Iliencko, A.S. Lobko, V.I. Moroz, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // 23th Intl. Free Electron Laser Conference: abstracts, Darmstadt, Germany, 20–24 August 2001 / Technical University. – Darmstadt, 2001. – P. 6.
  48. Лобко, А.С. Объемный лазер на свободных электронах / А.С. Лобко // Юбилейные научные чтения посв. 80-летию БГУ: программа, Минск, 23–24 октября 2001 г. / БГУ. – Минск, 2001. – С. 12.
  49. Численный расчет дифференциальной и интегральной интенсивностей параметрического рентгеновского излучения / В.Г. Барышевский, А.С. Лобко, О.М. Луговская, Р.Ф. Зуевский // XXXII Межд. Конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов, Москва, 2002 г. / МГУ. – Москва, 2002. – С. 63.
  50. Progress of the volume FEL (VFEL) experiments in millimeter range / V. Baryshevsky, K. Batrakov, A. Gurinovich, I. Iliencko, A. Lobko, P. Molchanov, V. Moroz, P. Sofronov, V. Stolyarsky // 24th Intl. Free Electron Laser Conference: abstracts, Argonne, USA, 9–13 Sept. 2002 / Argonne National Laboratory. – Argonne, 2002. – P. 29.
  51. Lobko, A.S. To x-ray source based on parametric x-radiation mechanism / A.S. Lobko, O.M. Lugovskaya // Relativistic Channeling and Related Coherent Phenomena: abstracts of International Workshop, Frascati, Italy, 22–26 March, 2004 / LNF. – Frascati, 2004. – P. 16.
  52. Dubovskaya, I.Ya. Multiwave mode of parametric x-rays generation / I.Ya. Dubovskaya, A.S. Lobko // Charged and Neutral Particles Channeling

- Phenomena: abstracts of International Workshop, Frascati, Italy, 2–6 November, 2004 / LNF. – Frascati, 2004. – P. 30.
53. Lobko, A. Parametric x-rays (PXR) of charged heavy particles / A. Lobko, O. Lugovskaya // Non-linear phenomena in complex systems: program of XII Intl. Annual Seminar, Minsk, Belarus, 17–20 May, 2005 // JIPNR “Sosny”. – Minsk, 2005. – P. 6.
  54. Лобко, А.С. Влияние температуры мишени на характеристики параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) / А.С. Лобко, О.М. Луговская // XXXV Межд. Конф по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов, Москва, 31 мая–2 июня 2005 г.) // МГУ. – Москва, 2005. – С. 78.
  55. The experimental model of the tunable source of monochromatic x-rays and possibility of its application for different types of x-ray analysis / V. Baryshevsky, K. Batrakov, I. Feranchuk, A. Gurinovich, A. Grubich, A. Lobko, A. Rouba, B. Tarnopolsky, P. Safronov, V. Stolyarsky, A. Ulyanenko // European Conf. on X-ray Spectrometry: abstracts, Paris, France, 19 – 23 June 2006 / Paris. – 2006. – P. 72.
  56. Lobko, A. Numerical simulation of a PXR source / A. Lobko, O. Lugovskaya // Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: abstracts of International Conference, Frascati, Italy, 2–7 July 2006 / LNF. – Frascati, 2006. – P. 38.

## Препринты

57. First lasing of volume FEL (VFEL) at wavelength range 4-6 mm / V. Baryshevsky, K. Batrakov, A. Gurinovich, I. Iliencko, A. Lobko, V. Moroz, P. Sofronov, V. Stolyarsky // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2001. – 7 P. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/physics/0107043>. Date of access: 31.08.2006.
58. Progress of the volume FEL (VFEL) experiments in millimeter range / V. Baryshevsky, K. Batrakov, A. Gurinovich, I. Iliencko, A. Lobko, P. Molchanov, V. Moroz, P. Sofronov, V. Stolyarsky // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2002. – 8 P. – Mode of access: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0209/0209022.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0209/0209022.pdf). Date of access: 31.08.2006.
59. First observation of generation in the backward wave oscillator with a ”grid” diffraction grating and lasing of the volume FEL with a ”grid” volume resonator / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2004. – 4 P. –

Mode of access: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0409/0409125.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0409/0409125.pdf).  
Date of access: 31.08.2006.

60. Experiments with parametric X-ray radiation (PXR) from non-relativistic electrons / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, I.D. Feranchuk, A.A. Gurinovich, A.O. Grubich, A.S. Lobko, A.A. Rouba, B.A. Tarnopolsky, P.F. Safronov, V.I. Stolyarsky, A.P. Ulyanenkov // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2005. – 8 P. – Mode of access: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0507/0507036.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0507/0507036.pdf). Date of access: 31.08.2006.
61. Vyssotsky, V.B. Technology for production of ultra-thin crystal silicon membranes / V.B. Vyssotsky, E.V. Lobko, A.S. Lobko // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2005. – 3 P. – Mode of access: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0508/0508079.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0508/0508079.pdf). Date of access: 31.08.2006.
62. Lobko, A. X-ray source based on the parametric x-rays / A. Lobko, O. Lugovskaya // LANL e-Print archive [Electronic resource]. – 2005. – 9 P. – Mode of access: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0509/0509015.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0509/0509015.pdf). Date of access: 31.08.2006.

## **Другие**

63. Способ идентификации колебательных и электронно-колебательных переходов атомов вещества: а. с. 1136606 СССР / В.Г. Барышевский, В.В. Кузьмин, М.Г. Лившиц, А.С. Лобко, А.А. Федоров; Бел. гос. ун-т. – № 3629918; заявл. 22.07.1984; опубл. 22.09.1984.

## РЭЗІЮМЭ

Лабко Аляксандр Сяргеевіч

### ПАРАМЕТРЫЧНАЕ РЭНТГЕНАЎСКАЕ ВЫПРАМЕНЬВАННЕ ЗАРАДЖАННЫХ ЧАСЦІЦ У КРЫШТАЛЯХ

*Ключавыя словы:* генерацыя спантаннага і індукцыраванага электрамагнітнага выпраменьвання; параметрычнае рэнтгенаўскае выпраменьванне (ПРВ); аб'ёмны лазер на свабодных электронах; шматхвалевыя эфекты.

Работа мае на мэце ўстанаўленне заканамернасцей у выпраменьвальных працэсах, узнікаючых пры праходжанні зараджаных часціц розных энергій праз крышталічныя мішэні, і вывучэнні магчымасцей стварэння крыніц пераладжваемага квазімонахраматычнага выпраменьвання на аснове гэтых працэсаў.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца параметрычнае рэнтгенаўскае выпраменьванне зараджаных часціц. Прадметамі даследавання з'яўляюцца інтенсіўнасць, вуглавая і спектральная размеркаванні, палярызацыя выпраменьвання і ўстанаўленне іх узаемасувязей з параметрамі мішэняў і характарыстыкамі выпраменьваючых зараджаных часціц.

Асноўныя навуковыя вынікі:

- Першае ў свеце эксперыментальнае нагляданне з'явы спантаннага шматхвалевага ПРВ і доказ магчымасці павелічэння спектральна-вуглавой шчыльнасці выпраменьвання ва ўмовах шматхвалевай дыфракцыі;
- Вымярэнні параметраў індукцыраванага шматхвалевага выпраменьвання першага ў свеце аб'ёмнага лазера на свабодных электронах якія эксперыментальна пацвердзілі асноўныя палажэнні яго тэорыі і дэманстрацыя плаўнай пераладкі яго частаты;
- Даследаванне спектраметрычных і часавых уласцівасцей крышталічнага сцынтылятара  $YAlO_3:Ce$  і распрацоўка на яго аснове хуткадзейнага рэнтгенаўскага дэтэктара, дазволіўшага ўпершыню выявіць ПРВ цяжкіх зараджаных часціц і эксперыментальна абгрунтаваць магчымасць прымянення ПРВ для ідэнтыфікацыі часціц звышвысокіх энергій.

У сукупнасці вынікі цыкла даследаванняў прывялі к істотнаму паляпшэнню разумення фізікі працэсаў генерацыі спантаннага і індукцыраванага электрамагнітнага выпраменьвання ў аб'ёмных перыядычных структурах, а таксама к развіццю тэхнікі і метадыкі эксперыментальных даследаванняў.

## Резюме

Лобко Александр Сергеевич

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ

*Ключевые слова:* генерация спонтанного и индуцированного электромагнитного излучения, параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), объемный лазер на свободных электронах, многоволновые эффекты.

Цель работы состоит в установлении закономерностей в излучательных процессах, возникающих при прохождении заряженных частиц различных энергий через кристаллические мишени, и изучении возможностей создания источников перестраиваемого квазимонохроматического излучения на основе этих процессов.

Объектом исследования является параметрическое рентгеновское излучение заряженных частиц. Предметами исследования являются интенсивность, угловые и спектральные распределения, поляризация излучения и установление их взаимосвязей с параметрами мишеней и характеристиками излучающих заряженных частиц.

Основные научные результаты:

- Первое в мире экспериментальное наблюдение явления спонтанного многоволнового ПРИ и доказательство возможности увеличения спектрально-угловой плотности излучения в условиях многоволновой дифракции;
- Измерения параметров индуцированного многоволнового излучения первого в мире объемного лазера на свободных электронах экспериментально подтвердившие основные положения его теории и демонстрация плавной перестройки его частоты;
- Исследование спектрометрических и временных свойств кристаллического сцинтиллятора  $YAlO_3:Ce$  и разработка на его основе быстродействующего рентгеновского детектора, позволившего впервые зарегистрировать ПРИ тяжелых заряженных частиц и экспериментально обосновать возможность применения ПРИ для идентификации частиц сверхвысоких энергий.

В совокупности результаты цикла исследований привели к существенному улучшению понимания физики процессов генерации спонтанного и индуцированного электромагнитного излучения в объемных периодических структурах, а также к развитию техники и методики экспериментальных исследований.

## Summary

**Lobko Alexander Sergeevich**

### **PARAMETRIC X-RAYS OF CHARGED PARTICLES IN CRYSTALS**

*Keywords:* generation of spontaneous and stimulated electromagnetic radiation; parametric x-rays (PXR), volume free electron laser, multi-wave effects.

The research objective consists in the determination of the fundamental features of radiative processes appeared during passage of charged particles of various energies through crystal targets and in the feasibility study of the development of sources of the quasi-monochromatic tunable radiation based on these processes.

The research object is the parametric x-rays produced by charged particles. Subjects of investigations are intensity, angular and spectral distributions, and polarization of the radiation as well as determination of interrelations between the radiation characteristics and parameters of the targets and properties of the radiating particles.

Main R&D results are as follows:

- Pioneered experimental detection of the effect of spontaneous multi-wave PXR and proof of the possibility to increase spectral-angular density of the radiation in conditions of the multi-wave diffraction;
- Measurements of the parameters of the stimulated multi-wave radiation of the first in the world volume free electron laser confirmed basic conclusions of its theory and its frequency smooth tuning was also demonstrated;
- Research of the spectrometric and timing properties of the  $YAlO_3:Ce$  crystal scintillator and development of the fast-acting x-ray detector on its base gave possibility to detect PXR from heavy charged particles for the first time and experimentally validate the possibility of the PXR application for super-high energy particles identification.

In total, the results of the series of research efforts have brought towards considerable gain of the physics insight of generation processes of spontaneous and stimulated electromagnetic radiation in the volume periodic structures and to the further development of experimental techniques and equipment.

**Лобко Александр Сергеевич**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ**

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2007 г.

Формат 60 × 90 1/16. Бумага офисная.

Печать офсетная. Печ. л. \_\_\_\_\_ Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_

Тираж 60 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68

Отпечатано на ризографе Института физики НАНБ

Лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.