

На правах рукописи

НАУМЕНКО Геннадий Андреевич

**ДИФРАКЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ  
И ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Томск 2007

Работа выполнена в федеральном государственном научном учреждении Научно-исследовательский Институт Ядерной Физики, г. Томск

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Сербо Валерий Георгиевич  
(Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
г. Новосибирск)

доктор физико-математических наук  
профессор  
Усов Юрий Петрович  
(Томский политехнический университет, Томск)

доктор физико-математических наук  
Полевин Сергей Декабrevич  
(Институт сильноточной электроники Томского  
научного центра СО РАН)

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт

Защита состоится «15» октября 2007 г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.269.05 при Томском политехническом  
университете по адресу:  
634050, Томск, а.я 25, пр. Ленина, 2а, ГНУ НИИ ЯФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТПУ

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007г.

Учёный секретарь  
Диссертационного Совета \_\_\_\_\_ А.В. Кожевников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Термин “дифракционное излучение” (ДИ), изначально введён<sup>1</sup> для описания излучения, возникающего при пролёте заряженной частицы в вакууме вблизи края проводящей мишени. Однако под этим понятием часто объединяют такие виды излучения как резонансное дифракционное излучение, излучение Смита-Парселла и излучение в переходной области от дифракционного к переходному излучению. Внимание к дифракционному излучению в последнее время было вызвано возможностью использования его в невозмущающей диагностике ультрарелятивистских пучков современных ускорителей. Теоретические исследования дифракционного излучения, а именно, излучения, возникающего при движении заряженной частицы вблизи проводящей полуплоскости, были начаты более 40 лет назад<sup>1,2</sup>. Однако экспериментальные исследования дифракционного излучения ультрарелятивистских частиц до последнего времени носили разрозненный характер<sup>3,4</sup>, а в оптическом диапазоне, наиболее перспективном для диагностики ультрарелятивистских пучков, дифракционное излучение до начала наших исследований экспериментально не было зарегистрировано. В исследованиях переходного и дифракционного излучения в интервале от ультрафиолетового до миллиметрового диапазона длин волн большой интерес вызывает генерация излучения от проводящих мишеней, так как в этом случае обеспечивается максимальная интенсивность излучения. Однако детального сравнения экспериментальных данных с расчётами ДИ до начала исследований, положенных в основу диссертации, практически не проводились.

Измерения спектрально-угловых характеристик излучения ультрарелятивистских электронов в оптическом диапазоне и умеренно релятивистских электронов в миллиметровом диапазоне длин волн сталкиваются с проблемой предволновой зоны<sup>5</sup>, когда измеряется не угловое распределение излучения (в смысле направления его распространения), а его координатное распределение на заданном расстоянии, искажённое влиянием размера источника излучения. Само существование этого эффекта приводит к увеличению числа степеней свободы, в пространстве которых необходимо проводить исследования для сравнения экспериментальных результатов с теорией. Поэтому исследование особенностей излучения в предволновой зоне и разработка экспериментальной методики, обеспечивающей возможность корректного сравнения

<sup>1</sup> Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. ДАН СССР. 1957. С.377.

<sup>2</sup> А. П. Казанцев, Г. И. Сурдутович, Докл. Акад. Наук СССР 147-1 (1962).

<sup>3</sup> Shibata Y., Hasebe S., Ishi K. et al. Phys.Rev.E. 52 (1995) 6787

<sup>4</sup> D.W.Rule, R.B.Fiorito, and W.D.Kimura, Proc. of the 7th Beam Instrumentation Workshop, Argonne IL, 1996.

<sup>5</sup> V.A. Verzilov. Phys. Lett. A 273 (2000) 135.

экспериментальных результатов с теорией, а также проведение исследований дифракционного излучения в предволновой зоне с использованием этой методики является весьма актуальной задачей.

Анализ существующих средств измерения поперечных размеров пучков показывает, что ни один из современных методов не обеспечивает выполнения требований, предъявляемых к диагностике в проектах современных коллайдеров - возможность невозмущающего измерения поперечных размеров отдельных микронных электронных сгустков. Поэтому исследование дифракционного излучения в плане возможности использования его в этих целях оказывается весьма привлекательным, поскольку диагностика, основанная на ДИ, является практически невозмущающей (не приводящая к заметному увеличению эмиттанса пучка).

Ввиду периодичности и цикличности процесса ускорения электронов до релятивистских энергий, они обычно сгруппированы в электронные сгустки с размерами, зависящими от типа ускорителя. Учёт когерентных эффектов в расчёте характеристик излучения приводит к существенному различию спектрально-угловых свойств ДИ от отдельной частицы и от сгустка частиц, если размеры сгустка сравнимы с длиной волны излучения. Использование когерентного излучения от наклонных периодических мишеней и излучения Смита-Парселла (излучения, генерируемого заряженной частицей при параллельном пролёте над решёткой) предоставляет уникальные возможности для невозмущающей диагностики релятивистских пучков при измерениях продольных размеров электронных сгустков. Так, ввиду наличия жёсткой корреляции между длиной волны излучения и углом наблюдения (дисперсионное соотношение Смита-Парселла), периодическая мишень, генерирующая когерентное излучение Смита-Парселла, сама может выступать как решётка-монохроматор, значительно упрощая схему измерений. Поэтому исследование когерентного излучения от наклонных периодических мишеней и излучения Смита-Парселла, как разновидности дифракционного излучения, является на настоящее время актуальной задачей.

В отношении излучения Смита-Парселла до последнего времени не установилось определённого мнения об оптимальном профиле решётки, т.е. профиля, обеспечивающего максимальный выход излучения. Проблема состоит в том, что даже для одного и того же профиля решётки интенсивность излучения, рассчитанная с использованием разных теоретических подходов, различается на несколько порядков<sup>6</sup>. Теоретическая дискуссия о преимуществах того или иного профиля решётки идёт уже давно, однако имеющиеся экспериментальные

<sup>6</sup> D.V. Karlovets and A.P. Potylitsyn, Phys. Rev. ST-AB 9, 8 (2006)

результаты для решёток различного профиля несопоставимы, так как измерения проводились в разных физических условиях (периоды решёток, энергия пучка, условия когерентности, прицельные параметры и т.д.). Для разрешения этой проблемы необходимы экспериментальные исследования характеристик излучения Смита-Парселла в как в оптическом диапазоне, в отсутствие когерентных эффектов, так и исследование характеристик когерентного излучения от решёток с различным профилем в одинаковых экспериментальных условиях.

Когерентное переходное и дифракционное излучение рассматриваются как возможные источники стимулированного излучения для создания так называемых широкополосных лазеров на свободных электронах (broad band FEL), а также как источник для генерации мягкого рентгеновского излучения с использованием эффекта томсоновского рассеяния<sup>7</sup>. В указанных приложениях важнейшую роль играет такой параметр, как концентрация энергии излучения на единицу площади детектора или на единицу поперечного сечения электронного пучка в месте встречи пучков. Однако в ряде случаев фокусировка с использованием внешней оптики оказывается невозможной. Поэтому экспериментальное подтверждение возможности непосредственной фокусировки когерентного переходного и дифракционного излучения с использованием параболических мишеней может значительно упростить решение этих задач.

**Цель работы.** Исследование свойств излучения, индуцированного полем релятивистских электронов в проводящих структурах и развитие средств диагностики пучков на базе этого излучения. Эта проблема включает в себя:

- обнаружение ранее не наблюдавшегося оптического дифракционного излучения и экспериментальное исследование его характеристик, включая переходную область между дифракционным и переходным излучением;
- экспериментальное исследование когерентного дифракционного и переходного излучения, включая промежуточную область.
- исследование резонансного дифракционного излучения в оптическом и миллиметровом диапазоне длин волн.
- развитие средств диагностики релятивистских пучков заряженных частиц на основе дифракционного и резонансного дифракционного излучения, включая невозмущающие методы измерения размеров ускоренных электронных сгустков и измерение расходимости электронных пучков.

Положение пика и линейная поляризация излучения хорошо подтверждают теоретические предсказания.

<sup>7</sup> А.Р. Potylitsyn, NIM A 455 (2000) 213

**Научная новизна работы.** Основные результаты работы получены впервые. Ниже приведены наиболее значимые из них.

- Впервые зарегистрировано оптическое дифракционное излучение релятивистских электронов. Ранее дифракционное излучение было зарегистрировано в миллиметровом и далёком инфракрасном диапазоне. В то же время оптический диапазон является наиболее перспективным для диагностики ультрарелятивистских пучков.

- Впервые экспериментально исследованы спектрально-угловые характеристики оптического дифракционного излучения ультрарелятивистских электронов и исследован переход от дифракционного к переходному излучению. Показано хорошее совпадение измеренных характеристик с результатами теоретических расчётов ДИ от проводящей полуплоскости, подтверждена единая природа ДИ и ПИ.

- Впервые предложена и апробирована методика измерения характеристик излучения с подавлением эффекта предволновой зоны, что позволило провести сравнение измеренных характеристик ДИ, ПИ и излучения Смита-Парселла с расчётами, полученными с использованием существующих теоретических подходов, построенных в приближении дальней волновой зоны.

- Впервые проведено сравнение характеристик излучения Смита-Парселла от решёток с различным профилем, измеренных в одинаковых экспериментальных условиях. Показано, что решётки, состоящие из проводящих полосок с вакуумными (или диэлектрическими) промежутками более эффективны.

- Впервые продемонстрирована возможность измерения поперечных размеров отдельных электронных сгустков микронных ультрарелятивистских (более 1 ГэВ) пучков с использованием свойств дифракционного излучения без искажения характеристик электронного пучка (невозмущающая диагностика).

- Впервые продемонстрировано невозмущающее измерение продольного размера релятивистских электронных сгустков с использованием когерентного излучения Смита-Парселла без применения внешних спектрометрических приборов.

**Практическая значимость.** Весь цикл представленных в работе исследований был инициирован проблемой создания невозмущающих средств диагностики пучков современных ускорителей. Фактически это и определяет практическую значимость проведённых исследований. В результате исследований, проведённых на пучке КЕК ATF (Япония) два участника Томской группы, в том числе автор этой работы, были включены в число коллаборантов проекта КЕК ATF2,

имеющего целью создание коллайдера ILC<sup>8</sup>. Исследования по использованию дифракционного излучения в диагностике пучков начаты также на пучке ускорителя SLAC с энергией электронов 30 ГэВ в рамках проекта DOE "Beam Test Proposal of an Optical Diffraction Radiation Beam Size Monitor at the SLAC FFTB"<sup>9</sup>. Результаты исследований фокусировки когерентного переходного и дифракционного излучения от параболических мишеней могут быть использованы в разработке источников стимулированного излучения и создании источников для генерации мягкого рентгеновского излучения с использованием эффекта томсоновского рассеяния.

**Личный вклад автора** состоит в руководстве и непосредственном участии в постановке задач экспериментов, выборе и подготовке методик экспериментов, проведении измерений и анализе результатов исследований. Выбор направления исследований в целом сделан совместно с А.П. Потылицыным. К личному вкладу следует также отнести разработку теоретического подхода для излучения от наклонных решёток и параболических мишеней, теоретический анализ вклада излучения от поворотных и подстроечных магнитов тракта ускорителя, позволивший успешно решить задачу диагностики микронных пучков, а также теоретическое и методическое решение проблемы измерений характеристик излучения в пред-волновой зоне.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Обнаружение оптического дифракционного излучения ультрарелятивистских электронов.
2. Методы расчёта излучения от периодических решёток и параболических мишеней, позволяющих рассчитывать характеристики излучения для условий экспериментов; теоретический анализ вклада излучения от поворотных и подстроечных магнитов тракта ускорителя, позволивший успешно решить задачу диагностики микронных пучков.
3. Результаты исследований спектрально-угловых характеристик оптического дифракционного излучения ультрарелятивистских электронов, показавшие хорошее совпадение измеренных характеристик с результатами теоретических расчётов ДИ от проводящей полуплоскости. Показан плавный переход от дифракционного к переходному излучению, подтверждающий единую природу этих явлений. Показано, что используемое приближение хорошо описывает спектрально-угловые характеристики в переходной области.

<sup>8</sup> GLC Project — Linear Collider for TeV Physics, edited by N. Toge, KEK Internal Report No. 2003-7, 2003, А/Н.

<sup>9</sup> www.slac.stanford.edu/~fukui/ODR

4. Методическое решение проблемы измерений характеристик излучения с подавлением эффекта пред-волновой зоны, позволяющее проводить сравнение экспериментальных результатов с расчётами, полученными с использованием существующих теоретических методов, построенных в приближении дальней волновой зоны и таким образом решить проблему интерпретации экспериментальных данных.
5. Результаты исследования спектрально-угловых характеристик оптического излучения, индуцированного релятивистскими электронами в наклонных периодических мишенях и характеристик оптического излучения Смита-Парселла от плоских решёток. Показан монохроматический характер излучения. Подтверждена теоретическая зависимость положения линии в спектре излучения от угла наблюдения и от угла разворота мишени относительно электронного пучка.
6. Абсолютные спектрально-угловые характеристики когерентного дифракционного и переходного излучения, измеренные с подавлением эффекта предволновой зоны. Показано согласие угловых характеристик излучения с расчётами, полученными в приближении дальней зоны излучения. Экспериментально продемонстрирован эффект фокусировки когерентного переходного излучения от параболических мишеней.
7. Результаты экспериментального сравнения угловых характеристик когерентного излучения Смита-Парселла от решёток с различным профилем в одинаковых экспериментальных условиях. Показано, что решётки, состоящие из проводящих полос с вакуумными (или диэлектрическими) промежутками более эффективны.
8. Экспериментально показана возможность измерения поперечных размеров отдельных электронных сгустков ультрарелятивистских (с энергией более 1 ГэВ) пучков размером порядка 10 мкм с использованием оптического дифракционного излучения без искажения характеристик электронного пучка.
9. Экспериментально показана возможность невозмущающего измерения продольного размера релятивистских электронных сгустков с использованием когерентного излучения Смита-Парселла без применения внешней спектрометрической аппаратуры.

#### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на

- международной конференции "International Symposium on Global Colliders" (г. Цукуба, Япония, 2000);
- международной конференции "Electron-Photon Interaction in Dense Media" (г. Ереван, 2001)

- I-VI Международных симпозиумах "Излучение релятивистских электронов в периодических структурах"(г. Томск: 1993, 1995, 1997, 2003, г. Иркутск: 1999, г. Барнаул: 2001);
- XVIII конференции по ускорителям заряженных частиц "RUPAC-2002" (г. Обнинск, 2002);
- международной конференции "Quantum Aspects of Beam Physics" (г. Хиросима, Япония, 2003).
- международном совещании "Relativistic Channeling and Coherent Phenomena in Strong Fields" (г. Фраскати, Италия, 2005);
- международной конференции " Particle Accelerator Conference, PAC05." (Ноксвил, США, 2005);
- международной конференции "International Symposium on the Development of Detectors for Particle, Astro-Particle and Synchrotron Radiation Experiments" (Стенфорд, США, 2006);
- XX всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2006 (Новосибирск, 2006);
- семинарах ФГНУ НИИЯФ, ФТФ ТПУ, НИИЯФ МГУ, КЕК (г. Цукуба, Япония), Токийский университет «Metropolitan» (г. Токио, Япония), SLAC (г. Стенфорд, США)

Основные результаты работы опубликованы в отечественных и зарубежных физических журналах. Количество опубликованных работ в реферируемых отечественных и зарубежных журналах по теме диссертации **26**.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Объём диссертации составляет **250** страниц, включая **179** рисунков и списка литературы из **175** наименований

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описываются общие характеристики исследуемых явлений, обосновывается актуальность исследований, ставятся цели исследований и приводится описание общего содержания работы.

**Первая глава** посвящена анализу теоретических основ дифракционного, переходного, резонансного дифракционного излучения и излучения Смита-Парселла, а также проблеме форм-факторов когерентного излучения в описанных выше кинематических условиях. В приближениях, соответствующих условиям экспериментов получены простые выражения, позволяющие рассчитывать характеристики излучения для сравнения с экспериментальными результатами.

Согласно этим расчётам, в силу единой природы дифракционного и переходного излучения, ожидается плавный переход углового распределения по полярному углу  $\theta_x$  (см. Рис.1) при изменении прицельного параметра  $h$ , (Рис. 2;  $h < 0$  соответствует пересечение мишени пучком), при котором при  $h > 0$  излучение имеет свойства дифракционного, а при  $h \ll -\gamma\lambda$  - свойства переходного излучения (ПИ).

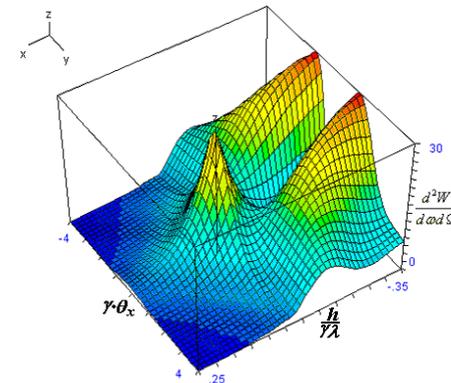


Рис. 2. Краевой эффект переходного излучения

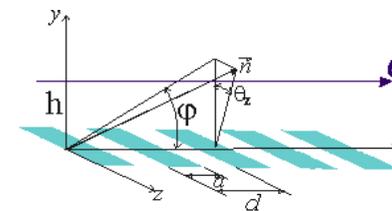


Рис. 3. Обозначение переменных к ИСП

искажение углового распределения излучения по сравнению с расчётами, выполненными в приближении дальней зоны. В результате этого сравнение экспериментальных характеристик, измеренных в ближней зоне, с расчётами, выполненными в приближении

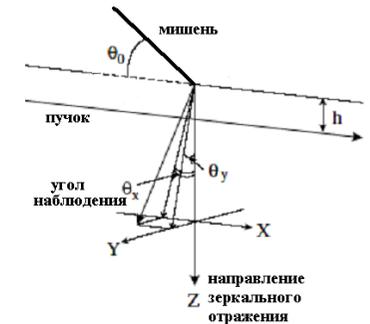


Рис. 1

Расчёт для геометрии Смита-Парселла (Рис. 3) показывает жёсткую корреляцию между углом наблюдения  $\varphi$  и длиной волны излучения  $\lambda$  (Рис. 4), что может быть использовано в целях спектromетрии непосредственно на электронном пучке.

Расчёт излучения в предволновой

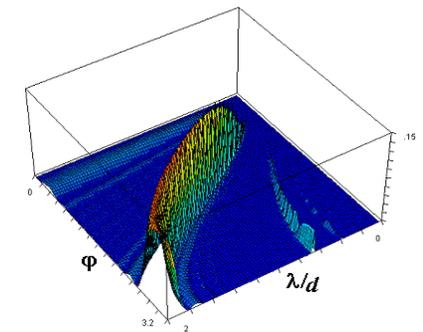


Рис.4. Спектрально-угловое распределение плотности ИСП

дальней зоны, некорректно. Решение этой проблемы изложено во второй главе диссертации.

Рассматриваемые здесь когерентные свойства излучения обусловлены коллективными эффектами излучения электронов в электронных сгустках. Наглядно это можно показать следующим образом. Предельный случай когерентного излучения сгустка из  $N$  электронов соответствует излучению заряженной частицы с зарядом  $q = N \cdot e$ . Интенсивность излучения такой частицы  $I_{coh} \sim q^2 = N^2 \cdot e^2$ , что в  $N$  раз больше интенсивности некогерентного излучения электронов сгустка

$$I_{inc} = N \cdot I_e \sim N \cdot e^2, \text{ где } I_e \sim e^2 -$$

интенсивность излучения отдельного электрона. Учитывая, что для современных ускорителей

$$N \approx 10^8 \div 10^{11}, \text{ эффект когерентности}$$

оказывается очень значительным. Часто интенсивность когерентного излучения

удается представить как  $I_{coh} = N^2 |f(\tilde{\sigma}_b, \lambda)|^2 \cdot I_{inc}$ , где  $\tilde{\sigma}_b$  - набор параметров,

определяющих геометрию электронного сгустка,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $f(\tilde{\sigma}_b, \lambda)$  - функция, определяющая переход от некогерентного к когерентному

характеру излучения и называемая, обычно, форм-фактором электронного

сгустка. Этот переход определяется соотношением  $\tilde{\sigma}_b$  и  $\lambda$ , а также

кинематикой излучения. Если когерентные свойства синхротронного и

тормозного излучения теоретически хорошо изучены<sup>10,11</sup>, то для ПИ, ДИ и

излучения Смита-Парселла рассматривались только отдельные частные случаи

для простейшей кинематики излучения. В связи с этим в этой главе

рассматривается схема построения форм-факторов для упомянутых типов

когерентного излучения.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям дифракционного излучения (ДИ) и переходной области между ПИ и ДИ.

В разделе 2.1 описаны исследования оптического дифракционного излучения ультрарелятивистских электронов, включая эксперименты по его обнаружению.

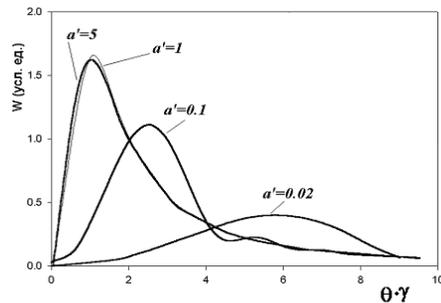


Рис.5. Угловое распределение ПИ при различных расстояниях  $a$  от мишени до экрана для цилиндрически симметричной геометрии в предволновой зоне ( $a' = a/\gamma^2 \lambda$ ).

Приводится теоретический анализ возможного вклада фона синхротронного излучения, где обнаружено, что его вклад может быть сравним или быть значительно больше вклада дифракционного излучения. Описаны возможные методы подавления этого фона. Далее приведены результаты экспериментальных исследований характеристик оптического дифракционного излучения от края плоской проводящей мишени и от щелевой мишени для разных компонент поляризации излучения на выведенном пучке КЕК ATF с поперечным размером около 10 мкм и энергией электронов 1.28 ГэВ.

На Рис. 6 приведена зависимость интенсивности излучения от прицельного

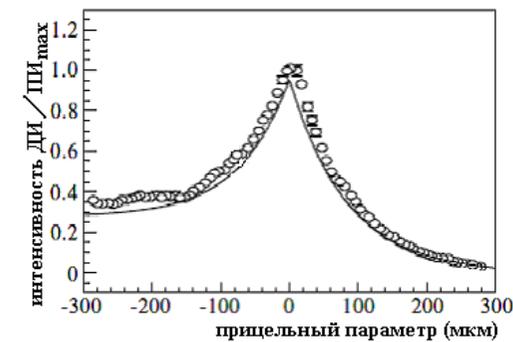


Рис. 6. Интенсивность оптического излучения как функция прицельного параметра. Линия - расчёт излучения от края мишени. Положительным значениям соответствует дифракционное излучение.

использования оптического дифракционного излучения в диагностике пучков, это излучение экспериментально не наблюдалось. Поэтому

регистрация его на внутреннем пучке Томского синхротрона

явилась важной вехой и

отправной точкой в цикле

дальнейших исследований. Опыт

этого эксперимента позволил

нам в должной мере оценить

параметра, показывающая

переход от дифракционного к

переходному излучению,

соответствующая  $\theta_x = 0$  на Рис.2.

Пример углового распределения

дифракционного излучения от

щелевой мишени в плоскости

отражения приведен на Рис.7

(здесь  $\gamma \cdot \theta_x = 5$  соответствует углу

0.023°).

Ко времени публикации работы

Кастеллиано<sup>12</sup>, в которой

рассматривается возможность

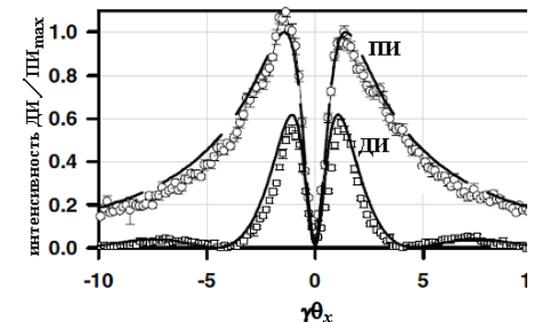


Рис. 7. Измеренное ПИ (круглые точки) и ДИ (квадратные точки) проекционное распределение вертикальной компоненты поляризации и расчетное ПИ (пунктирная линия) и ДИ (сплошная линия) с учётом размера электронного пучка.

<sup>10</sup> Bagrov V.G., Bordovitsyn V. A. Classical Theory of Synchrotron Radiation. Moscow, 2002

<sup>11</sup> I. F. Ginzburg, G.L. Kotkin, S.I. Polityko and V.G. Serbo. Physics Letters B 286 3-4 (1992) 392

<sup>12</sup> M.Castellano, NIM A 394, 275 (1997).

проблему фона синхротронного излучения от магнитных элементов ускорителя КЕК ATF, на пучке которого в то время планировалась программа исследований дифракционного излучения. Проведённые исследования на пучке КЕК ATF после подавления вклада фона синхротронного излучения с хорошей точностью подтвердили предсказания теории для дифракционного излучения и излучения в переходной области и позволили далее приступить к задаче невозмущающей диагностики микронных пучков на выведенном пучке ускорителя КЕК ATF.

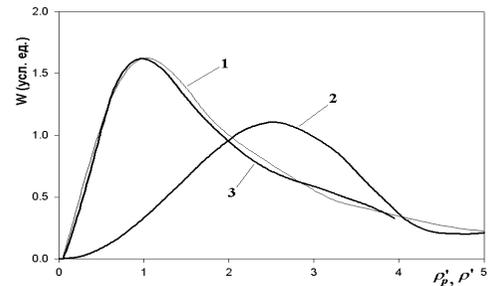


Рис. 8. 1 - угловое распределение интенсивности ПИ в дальней зоне, 2 - угловое распределение в предволновой зоне при  $R = 0.1\gamma^2\lambda$  и 3 - распределение в фокальной плоскости при  $R = 0.1\gamma^2\lambda$ .

предволновой зоне, что приводит к проблемам в интерпретации экспериментальных результатов.

Для создания методики подавления эффекта предволновой зоны нами было предложено разместить детектор в фокальной плоскости параболического телескопа. В этом случае угловые характеристики излучения не искажаются эффектом предволновой зоны. На Рис. 8 показаны расчетное угловое распределение ПИ в дальней зоне и в предволновой зоне с параболическим телескопом и без него.

Раздел 2.2 посвящён экспериментальным исследованиям когерентного дифракционного и переходного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн в предволновой и дальней зоне. По техническим причинам почти все исследования когерентного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн проводятся в

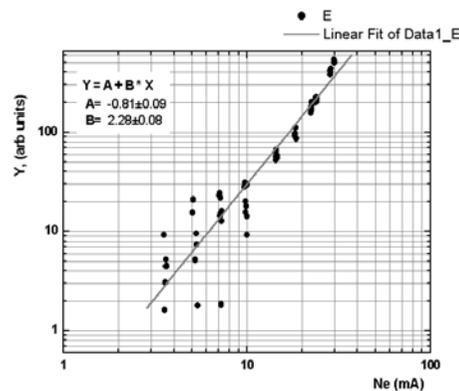


Рис. 9. Зависимость выхода КДИ от среднего тока микротрона

Достоверность этой методики была проверена при измерении углового распределения когерентного переходного излучения. Экспериментальная проверка методики и измерения характеристик когерентного дифракционного излучения проводились на выведенном пучке микротрона НИИ ЯФ г. Томска со следующими параметрами: энергия электронов 6.2 МэВ, населённость сгустка  $\approx 10^8$ , средний ток в макроимпульсе ( $\approx 10^4$  сгустков) 30 мА, 3.6 мм (полная ширина на полувысоте), размер пучка  $\approx 4 \times 4$  мм, расходимость пучка  $\approx 0.06$ .

Факт когерентности ДИ подтверждён квадратичной зависимостью интенсивности излучения от тока ускорителя (Рис. 9).

На Рис. 10 приведены угловая зависимость мощности когерентного переходного излучения в макро-импульсе в единицу телесного угла, измеренная с использованием параболической

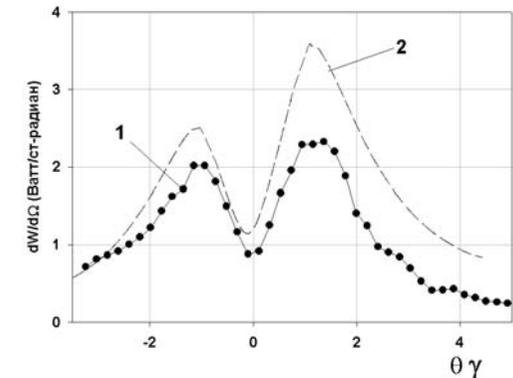


Рис.10. 1 - угловая зависимость мощности КПИ в макро-импульсе в единицу телесного угла, измеренная с использованием параболической оптики при  $R = 0.3\gamma^2\lambda$ , 2- теоретическая зависимость в приближении дальней зоны с учётом апертуры детектора.

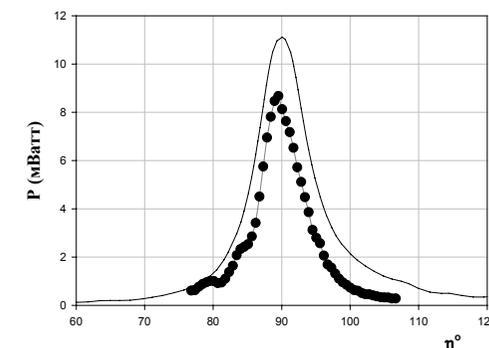


Рис. 11. Экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошная линия) зависимости мощности ДИ в импульсе ускорителя от угла наблюдения.

оптики при  $R = 0.3\gamma^2\lambda$ , и теоретическая зависимость в приближении дальней зоны с учётом расходимости пучка. Дальнейшие исследования всех типов излучения проводились с использованием описанной методики. На Рис. 11 приведён пример измерения углового распределения когерентного дифракционного излучения от края плоской мишени.

В ряде задач, например, при генерации стимулированного излучения или при генерации мягкого

рентгеновского излучения с использованием эффекта томсоновского рассеяния,

где требуется высокая концентрация излучения, фокусировка с использованием внешней оптики оказывается невозможной. Для этих случаев была экспериментально исследована возможность непосредственной фокусировки когерентного переходного излучения от параболических мишеней.

На Рис. 12 показано угловое распределение ПИ в глубоко предволновой зоне ( $L/\gamma^2\lambda < 0.065$ ) от плоской мишени (кривая *a*) и от параболической мишени: кривая *б* – детектор вне зоны фокусировки, кривая *в* – детектор в фокусе параболы. Сравнение показывает существенный эффект фокусировки излучения.

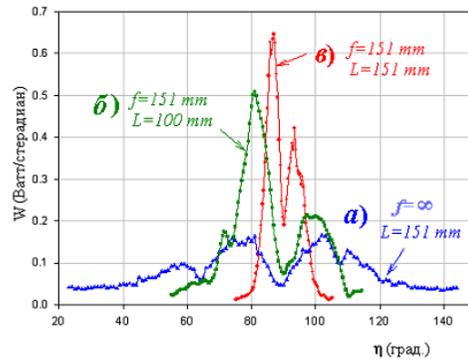


Рис. 12. Измеренное угловое распределение ПИ от плоской и параболической мишени для различных условий фокусировки.  $f$  – фокусное расстояние.  $L$  – расстояние от мишени до детектора.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям резонансного дифракционного излучения релятивистских электронов.

В разделе 3.1 описываются экспериментальные исследования излучения релятивистских электронов высокой и промежуточной энергии на наклонных периодических мишенях, изучение его угловых и спектральных характеристик.

В проведенных экспериментах на Томском синхротроне были измерены ориентационные зависимости и спектры оптического резонансного дифракционного излучения электронов с энергией 200 МэВ в плоских алюминиевых мишенях толщиной 30 мкм с периодом решетки 0.2, 0.4 и 0.8 мм под углом  $4.2^\circ$  к направлению движения электронов. На Рис. 13 показан пример ориентационной зависимости резонансного дифракционного излучения от периодической проводящей мишени с периодом 0.2 мм в области резонансного пика первого порядка для длины волны  $\lambda=404$  нм. Положение пика и линейная поляризация излучения хорошо подтверждают теоретические предсказания.

Раздел 3.2 посвящён исследованию спектрально-угловых характеристик оптического и когерентного (в миллиметровом диапазоне длин волн) излучения Смита-Парселла.

В оптическом диапазоне измерялись спектры излучения релятивистских электронов микротрона с энергией 6.2 МэВ, проходящих вблизи периодической мишени в геометрии Смита-Парселла (Рис. 14) и частично пересекающих её. Результаты измерения показаны на Рис. 15. В миллиметровом диапазоне длин волн проведены исследования угловых характеристик когерентного излучения Смита-Парселла резонансным детектором на пучке линейного ускорителя

НИИ ЯФ МГУ с энергией электронов 5 МэВ и широкополосным детектором на пучке Томского микротрона с энергией электронов 6.2 МэВ.

Полученные результаты позволили сделать заключение о возможности измерения длины отдельных сгустков с населённостью  $10^{11}$  электронов, используя плоскую проводящую решётку и набор датчиков,

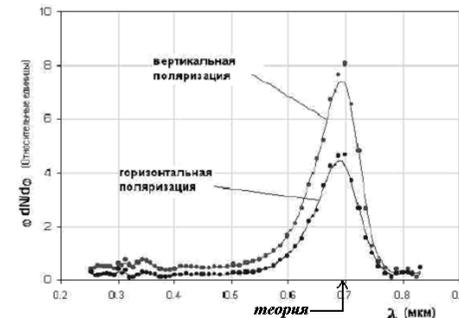


Рис. 15. Экспериментальный спектр излучения Смита-Парселла для вертикальной (в плоскости излучения) и горизонтальной поляризации излучения.

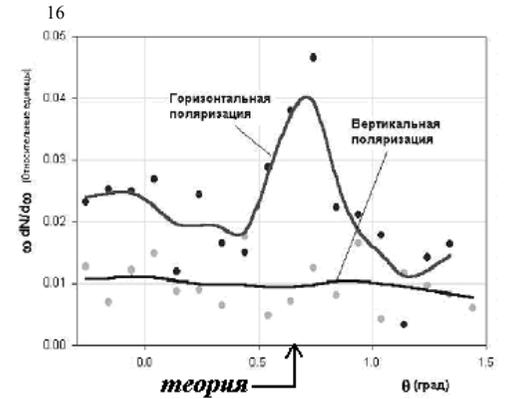


Рис. 13. Экспериментальная ориентационная зависимость резонансного дифракционного излучения от периодической проводящей мишени в области резонансного пика для длины волны  $\lambda=404$  нм для горизонтальной (в плоскости излучения) и вертикальной поляризации излучения.



Рис.14. Геометрия установки мишени,  $h$  – импакт-параметр;  $0.3/\gamma$  – ширина оптического коллиматора;  $\gamma$  – Лоренц-фактор;  $d=100$  мкм,  $a=50$  мкм.

расположенных под различными углами наблюдения.

На пучке Томского микротрона проведено экспериментальное сравнение свойств ИСП от мишеней различного профиля (Таблица 1) в одинаковых экспериментальных условиях и для одинаковых общих параметрах мишеней. Проведённые исследования показали, что плоская мишень с разделёнными стрипами наиболее эффективна для

генерации монохроматического излучения (см. Таблицу 2).

Таблица 1. Параметры мишеней

1 Плоская тонкая мишень	
2 Плоская толстая мишень	
3 Объёмная мишень с прямоугольным профилем	
4 Объёмная мишень с треугольным профилем	

Таблица 2. Эффективность мишеней

мишень	Максимальный выход КИСП (отн. ед.)
1 тонкая плоская мишень	0.87
2 толстая плоская мишень	0.22
3 мишень с треугольным профилем	0.07
4 мишень с прямоугольным профилем	0.14

При измерении угловых распределений излучения Смита-Парселла в широком диапазоне было обнаружено аномально интенсивное излучение под малыми углами наблюдения к направлению движения электронов (Рис. 16), на порядок превосходящий по спектрально-угловой плотности излучение Смита-Парселла.

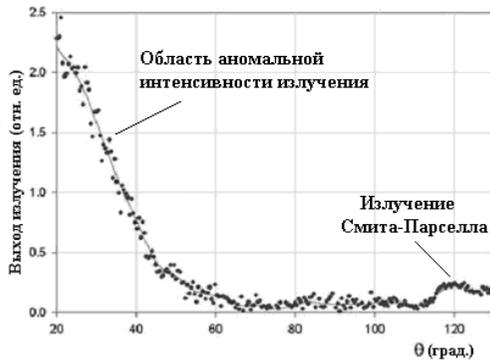


Рис. 16. Полярная зависимость КИСП от мишени 1, h=7 мм.

Экспериментальных исследований когерентного излучения в области малых углов до настоящего времени не проводилось. Выяснение механизма этого излучения требует дополнительных исследований.

В разделе 3.3 описаны экспериментальные исследования стимулированного ИСП с использованием периодичности поступления электронных

сгустков в экспериментальную зону (Рис. 17). Здесь использовалась та

особенность мишени, что если ширина стрипа равна половине периода  $d$  решетки, то коэффициент отражения такой решетки для длин волн  $\lambda \approx d$  близок к единице. При этом условие резонанса примет вид:

$$\begin{cases} 2L = k \cdot \lambda \\ \lambda_{RF} = m \cdot 2L \\ \lambda = d \end{cases}$$

(см. Рис. 17). Здесь  $k$  и  $m$  – целые числа. В эксперименте  $m=1, k=9$ .

Измерения показали, что использование резонанса ИСП на гармониках частоты следования электронных сгустков может почти на порядок увеличить интенсивность излучения в миллиметровом диапазоне длин волн.

**В четвёртой главе** представлены результаты исследований по развитию средств диагностики релятивистских пучков с использованием дифракционного, переходного излучения и излучения Смита-Парселла.

Раздел 4.1 посвящён развитию средств невозмущающего измерения поперечных размеров микронных электронных пучков с энергией более 1 ГэВ по оптическому дифракционному излучению. Задел, сделанный для выполнения этой задачи описан в разделе 2.1. Принцип измерения поперечных размеров пучка состоит в следующем.

Интенсивность в провале между двумя пиками в угловом распределении (Рис. 18(a)) дифракционного излучения от щелевой мишени зависит от поперечного размера пучка  $\sigma_y$  (для отдельного электрона интенсивность равна нулю). Поэтому, лучший путь реализации измерения размера пучка состоит в измерении проекции вертикальной компоненты поляризации.

Расчетное проекционное распределение для двух размеров пучка представлено на Рис. 18(б). Можно видеть, что при увеличении размера пучка значение интенсивности в минимуме углового распределения  $I_{\min}$  увеличивается. В качестве критерия чувствительности можно использовать отношение интенсивности в минимуме к максимальному значению  $I_{\max}$ . Это отношение, показанное на Рис. 18(в), рассчитано для трёх различных длин волн излучения. Чувствительность к размеру пучка определяется отношением  $\sigma_y^2 / \gamma^2 \lambda^2$ , и из Рис. 18(в) видно что чувствительность метода к размеру пучка возрастает для более коротких длин волн.

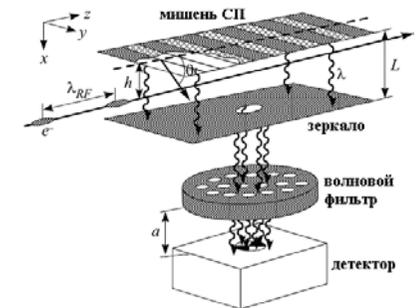


Рис. 17. Геометрия реализации стимулированного излучения

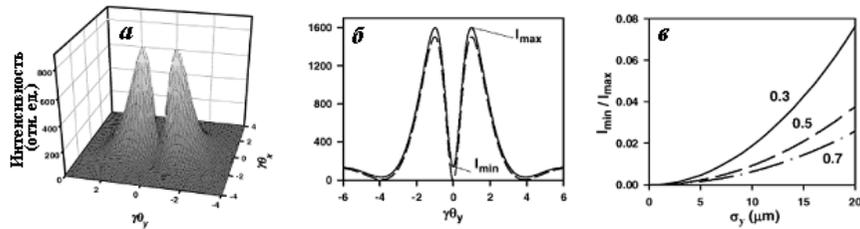


Рис. 18. (а) Двумерное распределение вертикальной компоненты поляризации, рассчитанной для  $\gamma = 2500$ ,  $\lambda = 500$  нм,  $a = 0.2$  мм,  $\theta_0 = 45^\circ$ , и  $b = 0$ . (б) Проекционное распределение вертикальной компоненты поляризации, рассчитанное для  $\sigma_y = 0$  (пунктирная линия), и  $\sigma_y = 30$  мкм (сплошная линия). (в) отношение минимума к максимуму для проекционного распределения вертикальной компоненты поляризации, рассчитанное для различных длин волн, показанных в мкм.

Таким образом, измерение поперечного размера пучка состоит в измерении отношения минимума к максимуму в угловом распределении дифракционного излучения и использовании его теоретической зависимости от размера пучка. Эксперимент проводился на выведенном пучке ускорителя КЕК ATF (Япония) со следующими параметрами: энергия

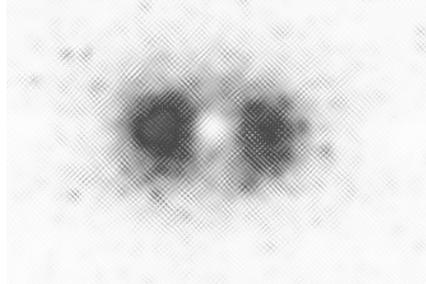


Рис. 19. Угловое распределение ОДИ измеренное с использованием полупроводниковой камеры и оптического фильтра с длиной волны  $\lambda = 550 \pm 20$  нм для отдельного импульса ускорителя ( $\approx 10^{11}$  электронов).

электронов 1.26 ГэВ, размеры пучка от 5 до 70 мкм, вертикальный эмиттанс  $1.5 \times 10^{-11}$  м·рад, горизонтальный эмиттанс  $1.4 \times 10^{-9}$  м·рад, населённость сгустка  $1.2 \times 10^{10}$ . Использование полупроводниковой видео матрицы обеспечивает измерение углового распределения при пролёте отдельного электронного сгустка. На Рис. 19 приведён пример регистрации углового распределения ОДИ от щелевой мишени с помощью полупроводниковой видео матрицы за один импульс ускорителя ( $\approx 10^{11}$  электронов).

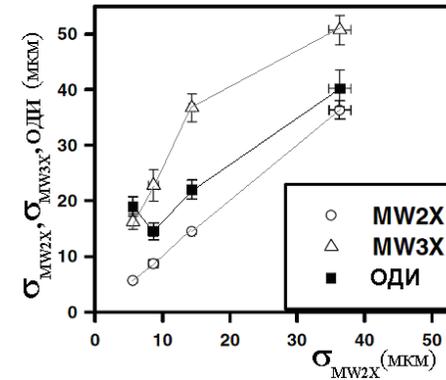


Рис. 20. Корреляция между размером пучка, измеренным с ОДИ (черные квадраты) и показаниями двух проволочных сканеров установленных на пучке перед (MW2X - кружки) и после (MW3X - треугольники) мишени.

оптимизация измерительного тракта может обеспечить регистрацию поперечных размеров отдельных сгустков до 3~5 мкм.

В разделе 4.2 описаны исследования возможности применения переходного излучения для измерения расходимости и профиля релятивистских электронных пучков низкой энергии и использования когерентного ИСП в невозмущающей диагностике для измерения длины электронных сгустков.

На сегодняшний день использование оптического переходного излучения для измерения размеров и профиля пучка частиц высокой энергии можно считать одним из основных методов диагностики. При низких энергиях электронов основные трудности возникают из-за широкого конуса оптического переходного излучения, что создаёт проблемы при сборе и транспортировке излучения для регистрации профиля пучка. Применение сложной оптики позволило провести конус переходного излучения через

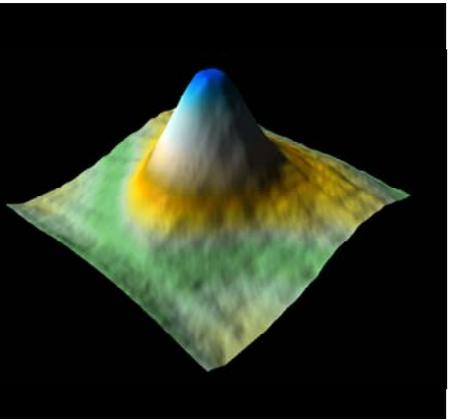


Рис. 21. Профиль пучка микротрона.

Измеренные размеры электронного пучка по описанной методике и контрольные измерения с помощью проволочных сканеров, расположенных в тракте пучка до и после мишени дифракционного излучения приведены на Рис. 20. Как видно из рисунка, размеры пучка более 10 мкм с достаточной точностью измерены предлагаемым методом. Оценки показывают, что применение дополнительных средств подавления фона синхротронного излучения и

окно вакуумной камеры и построить изображение профиля (Рис.21) пучка микротрона с энергией электронов 6.2 МэВ на полупроводниковой коммерчески доступной видео матрице за один импульс ускорителя ( $\approx 5 \cdot 10^{11}$  электронов).

Излучение Смита Парселла также может быть использовано для невозмущающей диагностики пучков. Дисперсионное соотношения Смита-

Парселла  $\lambda_k = \frac{d}{k} \left( \frac{1}{\beta} - \cos \theta \right)$ , (здесь  $d$  - период решётки,  $\theta$  - угол наблюдения,

$\lambda_k$  - длина волны монохроматического излучения Смита-Парселла,  $k$  – порядок дифракции,  $\beta$  -

скорость электронов в единицах скорости света) и когерентные свойства излучения в миллиметровом диапазоне длин волн позволяют использовать этот тип излучения для измерения длины сгустка без применения внешних приборов для измерения спектров. В предположении гауссовского

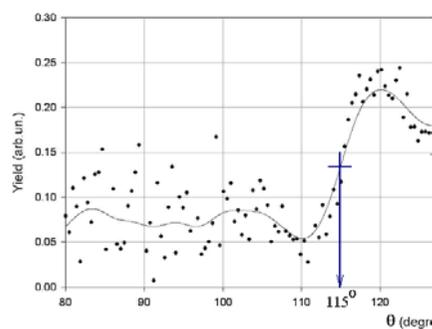


Рис. 22. Зависимость ИСП от полярного угла наблюдения

распределения электронов в сгустке и учитывая плавный характер зависимости интенсивности некогерентного излучения Смита-Парселла от угла наблюдения, можно получить зависимость длины сгустка  $\sigma_z$  от угла  $\theta_{1/2}$ , на котором интенсивность когерентного излучения уменьшается до половины максимальной интенсивности:

$$\sigma_z = d \cdot \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi\beta} \left( \frac{1}{\beta} - \cos \theta_{1/2} \right).$$

Измерение углового распределения излучения Смита-Парселла (Рис. 22) от мишени с периодом 8 мм проводилось на пучке микротрона с помощью широкополосного детектора, работающего при комнатной температуре. Полученный угол на половине спада интенсивности когерентного излучения соответствует длине сгустка  $\sigma_z = 1.52$  мм (или полной ширине на полувысоте 3.6 мм), что соответствует оценкам по фазовым характеристикам микротрона.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

## Основные результаты диссертации

1. Впервые зарегистрировано оптическое дифракционное излучение ультрарелятивистских электронов, проведено экспериментальное исследование его спектрально-угловых характеристик и показано хорошее согласие экспериментальных результатов с теоретическими расчётами.
2. Впервые предложена и апробирована в эксперименте методика подавления эффекта предволновой зоны, которая даёт возможность корректно интерпретировать результаты экспериментов в миллиметровом диапазоне длин волн.
3. Впервые выполнены абсолютные измерения угловых характеристик когерентного дифракционного и переходного излучения с подавлением эффекта предволновой зоны, продемонстрирован эффект фокусировки когерентного переходного излучения от параболических мишеней. Показано согласие угловых характеристик излучения с расчётами, полученными в приближении дальней зоны излучения.
4. Проведено экспериментальное сравнение углового распределение когерентного излучения Смита-Парселла от решёток различного профиля в одинаковых экспериментальных условиях. Показано, что наиболее эффективными являются плоские решётки с вакуумными промежутками.
5. Впервые продемонстрирована возможность измерения поперечных размеров отдельных электронных сгустков микронных ультрарелятивистских (с энергией более 1 ГэВ) пучков с использованием свойств дифракционного излучения без искажения характеристик электронного пучка (невозмущающая диагностика).
6. Выполнено измерение расходимости и профиля электронного пучка с энергией 6.2 МэВ за один импульс ускорителя на основе оптического переходного излучения с использованием коммерчески доступной видеокамеры.

Проведённые исследования позволили сформировать новое направление в диагностике пучков современных ускорителей. В настоящее время исследования в этом направлении с участием Томской группы проводятся в Японии (КЕК, Цукуба) и в США (SLAC, Стенфорд).

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Г.А. Саруев, Л.Г. Сухих, В.А. Ча. Измерение угловых характеристик когерентного переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах. Письма в ЖЭТФ 84 3 (2006) 136-140
2. А.Н. Алейник, А.С. Арышев, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Г.А. Саруев, А.Ф. Шарафутдинов, О.Ю. Малаховский, Е.А. Монастырёв. Когерентное дифракционное излучение пучка электронов 6-МэВ-ного микротрона. Письма в ЖЭТФ 76 6 (2002) 397-400
3. T. Muto, S. Araki, R. Hamatsu, H. Hayano, T. Hirose, P. Karataev, G. Naumenko, A. Potylitsyn, and J. Urakawa, Observation of Incoherent Diffraction Radiation from a Single-Edge Target in the Visible-Light Region, Physical Review Letters 90, 10 (2003) 104801-1
4. A.N. Aleinik, O.V. Chefonov, B.N. Kalinin, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, A.F. Sharafutdinov, W. Wagner. Low-energy electron-beam diagnostics based on the optical transition radiation. NIM B 201 (2003) 34-43
5. A.P. Potylitsyn, P.V. Karataev, and G.A. Naumenko, Resonant Diffraction Radiation from an Ultrarelativistic Particle Moving Close to a Tilted Grating, Phys. Rev. E 61 6 (2000) 7039-7045
6. И.Е. Внуков, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, Д.В. Падалко, А.П. Потылицын, О.В. Чегонов. Экспериментальное обнаружение оптического дифракционного излучения. Письма в ЖЭТФ 67 10 (1998) 760-764
7. J. Urakawa, H. Hayano, K. Kubo, S. Kuroda, N. Terunuma, M. Kuriki, T. Okugi, T. Naito, S. Araki, A. Potylitsyn, G. Naumenko, P. Karataev, N. Potylitsyna, I. Vnukov, T. Hirose, R. Hamatsu, T. Muto, M. Ikezawa, Y. Shibata, Feasibility of optical diffraction radiation for a non-invasive low-emittance beam diagnostics. NIM B 201 (2001) 309
8. Pavel Karataev, Sakae Araki, Ryosuke Hamatsu, Hitoshi Hayano, Toshiya Muto, Gennady Naumenko, Alexander Potylitsyn, Nobuhiro Terunuma, and Junji Urakawa. Beam-Size Measurement with Optical Diffraction Radiation at KEK Accelerator Test Facility. PRL 93, 244802 (2004) 1-4
9. A. Aryshev, B. Kalinin, G. Naumenko, A. Potylitsyn, R. Bardai, B. Ishkhanov, V. Shvedunov. Experimental investigation of coherent Smith-Purcell radiation from a "flat" grating. NIM B 227 (2005) 175-179
10. Алейник А.Н., Арышев А.С., Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Саруев Г.А., Чегонов О.В. Возможная схема лазера на свободных электронах на основе эффекта Смита-Парселла. Известия высших учебных заведений. Физика. - Томск: ТГУ, 2004 - т. 47, - № 1. - с. 85

11. Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Б.Н. Калинин, Г.А. Саруев, А.Ф. Шарафутдинов, Диагностика электронных пучков низких энергий на основе оптического переходного излучения - Известия ТПУ, том 307, №2, 2004
12. P. Karataev, G. Naumenko, A. Potylitsyn. Quasimonochromatic resonant diffraction radiation as a possible tool for non-invasive beam diagnostics. NIM B 201 (2003) 133-139.
13. A.N. Aleinik, O.V. Chefonov, B.N. Kalinin, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, A.F. Sharafutdinov. Investigation of resonant polarization radiation of relativistic electrons in gratings at small angles. NIM B 201 (2003) 191-200.
14. G.A. Naumenko. Some features of diffraction and transition radiation at the distance less than  $\gamma^2\lambda$ . NIM B 227 (2005) 87-94.
15. P. Karataev, S. Araki, R. Hamatsu, H. Hayano, T. Hirose, T. Muto, G. Naumenko, A. Potylitsyn, J. Urakawa. Grating optical diffraction radiation Promising technique for non-invasive beam diagnostics. NIM B 201 (2003) 201-211.
16. G.A. Naumenko, A.N. Aleinik, A.S. Aryshev, B.N. Kalinin, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, A.F. Sharafutdinov. Coherent transition and diffraction radiation from a bunched 6.1 MeV electron beam. NIM B 227 (2005) 70-77.
17. P. Karataev, S. Araki, R. Hamatsu, H. Hayano, T. Muto, G. Naumenko, A. Potylitsyn, N. Terunuma, J. Urakawa. Observation of optical diffraction radiation from a slit target at KEK accelerator test facility. NIM B 227 (2005) 158-169.
18. P. Karataev, S. Araki, R. Hamatsu, H. Hayano, T. Hirose, T. Muto, G. Naumenko, A. Potylitsyn, J. Urakawa. Status of optical diffraction radiation experiment at KEK-ATF extraction line. NIM B 201 (2003) 140-152.
19. G.N. Naumenko, A.P. Potylitsyn, O.V. Chefonov. Smith-Purcell effect for angles of order  $\gamma^{-1}$  on the grating with spaced strips. NIM B 173 (2001) 88-92
20. G.A. Naumenko. Synchrotron radiation contributions to optical diffraction radiation measurements. NIM B 201 (2003) 184-190
21. И.Е. Внуков, Б.Н. Калинин, П.В. Каратаев, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, О.В. Чегонов. Исследование резонансного дифракционного излучения релятивистских электронов в проводящих периодических мишенях. Ядерная Физика, 2000, том 63, № 10, с. 1-4
22. Г.А. Науменко, А.Ф. Алейник, А.С. Арышев, В.Н. Калинин, П.В. Каратаев, А.П. Потылицын, Г.А. Саруев, О.В. Чегонов, А.Н. Шарафутдинов. Оптическое поляризационное излучение релятивистских электронов в проводящих мишенях. Известия высших учебных заведений, Физика 9 (2000)
23. O.V. Chefonov, B.N. Kalinin, P.V. Karataev, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, I.E. Vnukov, Y. Shibata. Investigation of resonant polarisation radiation from

relativistic electrons passing through a tilted conducting periodical target. NIM B 173 (2001) 262-268

24. Алейник А.Н., Андряшкин М.Ю., Калинин Б.Н., Каратаев П.В., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Саруев Г.А., Шарафутдинов А.Ф. Известия высших учебных заведений, Физика 3 (2001)
25. B.N. Kalinin, D.V. Karlovets, A.S. Kostousov, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, L.G. Sukhikh. Comparison of Smith-Purcell radiation characteristics from gratings with different profiles. NIM B 252 (2006) 62-68
26. А. Н. Алейник, А. С. Арышев, Е. А. Богомазова, Б. Н. Калинин, Г. А. Науменко, А. П. Потылицын, Г. А. Саруев, А. Ф. Шарафутдинов. Стимулированное излучение Смита-Парселла. Письма в ЖЭТФ, 79 7 (2004) 396-399.