

На правах рукописи



Шкитов Дмитрий Андреевич

Диагностика электронных пучков по дифракционному излучению от щелевой мишени

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

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

Официальные оппоненты: Бордовицын Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры Теоретической физики Физического факультета

Сумбаев Анатолий Павлович, кандидат физико-математических наук, международная межправительственная научно-исследовательская организация «Объединенный институт ядерных исследований» (ОИЯИ), начальник научно-экспериментального отдела ускорительных систем Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Защита состоится «23» декабря 2014 г. в 16 час. 30 мин.

на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>

Автореферат разослан «22» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Кожевников Анатолий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время эксплуатируются и разрабатываются электронные ускорители с длиной электронного сгустка менее 1 мм. Для подобных ускорителей традиционные методы диагностики практически неприменимы (электрооптические методы, стрик-камеры измеряют длину сгустков более 1 мм). Проектная интенсивность электронных сгустков в планируемых ускорителях, как правило, не позволяет использовать твердотельные мишени, например, для мониторинга по оптическому переходному излучению. В связи с этим необходимость развития новых методов невозмущающей диагностики является актуальной (см. например [1-6]). Одним из перспективных методов является использование дифракционного излучения (ДИ) [7]. Так, например, в работе [8] проводилась диагностика электронных сгустков с помощью оптического дифракционного излучения на пучке электронов с энергией 1.28 ГэВ. Следует отметить, что по мере уменьшения энергии электронов (например, ниже 100 МэВ) диагностика по оптическому ДИ становится практически невозможной.

ДИ генерируется при пролёте вблизи поверхности идеально проводящей мишени. Щелевая мишень, часто используется в диагностике, представляет собой две пластины, расположенные, как правило, параллельно друг другу, через щель между которыми проходит пучок заряженных частиц. Обычно в экспериментах мишень располагают под углом 45 градусов к траектории электронного пучка. В этом случае дифракционное излучение распространяется под углом 90 градусов к пучку (под углом зеркального отражения), что упрощает его регистрацию в эксперименте.

Вследствие того, что при генерации дифракционного излучения частица непосредственно не взаимодействует с веществом мишени, ДИ применяется в так называемой невозмущающей диагностике различных параметров пучков заряженных частиц (например, для измерений продольного размера сгустка, поперечного размера сгустка, угловой расходимости пучка и т.д.). По сравнению с переходным излучением, которое генерируется при пересечении мишени, ДИ имеет очевидное преимущество.

Цель работы

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование характеристик дифракционного излучения от мишени, состоящей из двух пластин, при прохождении между ними релятивистских электронных сгустков для применения в диагностике пучков современных ускорителей. Соответственно были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработка математической модели, описывающей взаимодействие кулоновского поля электронного сгустка с дифракционной мишенью

произвольной геометрии, в том числе для мишени со сдвигом пластин вдоль траектории пучка. Разработка программного кода для расчёта различных характеристик излучения от подобной мишени для задаваемых характеристик электронного сгустка и разработка алгоритма определения продольного размера электронного сгустка на основе измеряемых интерферограмм. Под интерферограммой понимается зависимость интенсивности излучения от сдвига вдоль траектории пучка одной пластины щелевой мишени относительно другой;

- 2) Проведение экспериментальных измерений интерферограмм дифракционного излучения и определения длины электронного сгустка на основе предложенного алгоритма;
- 3) Анализ возможностей использования подобного интерферометра для определения пространственной структуры последовательности сгустков и обоснование эксперимента на ускорителе LUCX (КЕК, Япония).

Научная новизна работы

На основе метода псевдофотонов создана программа для описания характеристик когерентного дифракционного излучения от мишени при произвольном расположении составляющих её пластин, позволяющая рассчитать такие характеристики ДИ, как спектрально-угловое распределение (в дальней зоне) и пространственное распределение для любой частоты (в ближней зоне).

Проведён теоретический анализ характеристик дифракционного излучения (в том числе интерферограмм при сдвиге пластин) от щелевой мишени для разных параметров системы «пучок – мишень – детектор» и обоснована возможность использования измеренных интерферограмм для определения длины сгустка.

Впервые проведены измерения длины субпикосекундного электронного сгустка по интерферометрии когерентного дифракционного излучения, генерируемого электронным пучком ускорителя Шанхайского института прикладной физики в предложенной мишени, и обоснована новая методика измерений продольного размера сгустка.

Предложена и теоретически обоснована возможность применения интерферометрии дифракционного излучения от щелевой мишени для невозмущающей диагностики пространственного распределения коротких последовательностей сгустков.

Практическая значимость

Результаты проведённых исследований по интерферометрии дифракционного излучения от щелевой мишени могут быть использованы для создания диагностических станций для измерения продольных размеров электронных сгустков субпикосекундной длительности.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена тем, что в процессе теоретического анализа задач использовались хорошо разработанные и апробированные методы построения алгоритмов. При численных расчётах результаты, полученные с использованием программного пакета Wolfram Mathematica, сравнивались с результатами расчётов известных предельных случаев. При проведении экспериментальных исследований, полученные результаты сравнивались с данными моделирования и показали хорошее согласие.

Положения, выносимые на защиту

Методика определения продольного размера электронных сгустков на основе интерферометрии дифракционного излучения от щелевой мишени.

Результаты измерения длины субпикосекундных электронных сгустков с помощью интерферометрии дифракционного излучения от щелевой мишени, доказывающие возможность определения длины электронного сгустка, по измеренным интерферограммам дифракционного излучения.

Программный код для моделирования характеристик дифракционного излучения от различного вида плоских мишеней для различных экспериментальных геометрий.

Обоснование методики определения пространственного распределения сгруппированных пучков электронов с субпикосекундным периодом следования сгустков.

Личный вклад автора

Вклад автора заключался в проведении теоретического анализа и численного моделирования характеристик излучения (глава 1). Экспериментальные результаты получены при проведении совместного эксперимента на ускорителе Шанхайского института прикладной физики (SINAP) и на микротроне ТПУ с непосредственным участием автора (глава 2). Вклад автора в экспериментальных исследованиях заключался в подготовке экспериментов, настройке экспериментального оборудования, наборе экспериментальных данных, обработке полученных данных и формулировке основных выводов. Результаты, опубликованные в статьях [A1-A7] и представленные в докладах на конференциях, получены при основном участии автора.

Апробация работы

Полученные результаты обсуждались и докладывались на российских и международных конференциях: 4-й и 5-й международной конференции «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» (Феррара, Италия, 2010, Альгеро, Италия, 2012), 17-й международной научно-практической конференции студентов

и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, Томск, Россия, 2011), 8-й международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (ТПУ, Томск, Россия, 2011), 9-м и 10-м международном симпозиуме «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (Эгхем, Англия, 2011, Севан, Армения, 2013), 42-й международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (МГУ, Москва, 2012), 1-й International Beam Instrumentation Conference (Цукуба, Япония, 2012), 4-й International Particle Accelerator Conference (Шанхай, Китай, 2013), на семинарах Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams «AGTaX» (Цукуба, Япония, 2012, Севан, Армения, 2013) и рабочих семинарах лаборатории «Фотон» и кафедры Прикладной физики ФТИ ТПУ.

В целом по результатам опубликовано 17 научных работ, из которых: 3 статьи из списка ВАК (русские журналы) [A1,A3,A5], 6 статей индексируются базами Web of Science и Scopus, 5 статей индексируются базой РИНЦ, 1 публикация в журнале с импакт-фактором > 1 [A5] и 10 тезисов докладов по итогам конференций [B1-B10].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложений. Общий объём диссертации составляет 93 страницы машинописного текста, включая 46 рисунков и 6 таблиц. Список использованных литературных источников составляет 94 наименований.

Содержание работы

Во **введении** кратко описаны эксперименты по дифракционному излучению и его применению в диагностике пучков заряженных частиц с использованием простых мишеней (прямоугольные пластины, экраны с отверстием, пластины со щелью), а также с использованием мишеней со сложной геометрией. Здесь же приведены основные выводы из теоретических работ по интерферометрии ДИ от стандартной щелевой мишени. В этом же разделе обосновывается актуальность работы, обозначены цели и описана структура диссертационной работы.

В **первой главе** описан метод, на основе которого разработана модель для моделирования спектрально-угловых характеристик дифракционного излучения от мишеней произвольной геометрии. Был выбран широко используемый метод псевдофотонов в связи с простотой физической интерпретации и численной реализации. Метод основан на возможности описания электромагнитного поля ультрарелятивистской заряженной частицы полем поперечной электромагнитной волны. В этом приближении псевдофотоны будут рассеиваться на неоднородностях среды так же, как реальные фотоны. Для заряженной частицы такое приближение справедливо для ультрарелятивистской частицы, когда продольная компонента поля в γ раз меньше поперечной компоненты (γ – Лоренц-

фактор частицы). Соответственно, это приближение накладывает ограничения на применимость данного метода для $\gamma \lesssim 10$. Другие ограничения модели – выполнение условий:

$$1) \sin\theta_{ph} \cong \theta_{ph} \ll 1,$$

$$2) \gamma\lambda \gtrsim a \cdot \sin\theta.$$

В условиях 1) и 2) θ_{ph} – угол вылета фотонов относительно траектории пучка заряженных частиц, λ – длина волны наблюдаемого излучения, a – ширина щели мишени или диаметр отверстия, θ – угол наклона мишени (рис. 1).

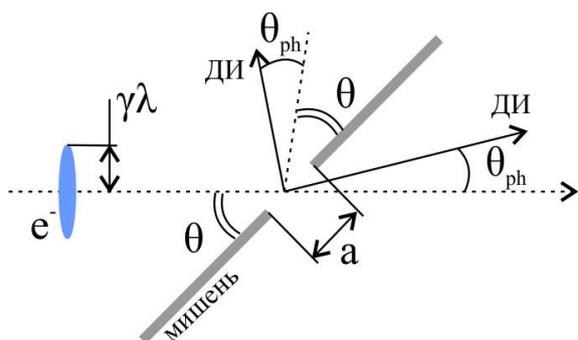


Рис. 1. Схема, поясняющая величины в соотношениях 1 и 2, $\lambda\gamma$ – эффективный радиус поля заряженной частицы.

Эти условия соответствуют малым углам вылета фотонов относительно траектории электронов для ДИ «вперёд» (либо от направления зеркального отражения для ДИ «назад») и малости диаметра отверстия (ширины щели) по сравнению с эффективным радиусом поля частицы, поскольку процесс дифракционного излучения в данном подходе рассматривается, как рассеяние поперечных электромагнитных волн и основан на принципе Гюйгенса. В работе рассматривается случай идеальной проводимости мишени. Это обосновано тем, что применяемые в экспериментах по изучению ДИ мишени состоят из металлов (Al, Cu, Au и другие), коэффициенты отражений которых для длин волн $\lambda \geq 1$ мкм близок к единице [9].

В модели псевдофотонов сравнительно просто рассматривается задача излучения заряженной частицы произвольного заряда и произвольной массы при взаимодействии с мишенью произвольной формы и конечной площади. На рис. 2 представлена геометрия такого взаимодействия, которая будет рассматриваться при разработке модели, как основная. Здесь электрон пролетает через щель между двумя плоскими прямоугольными пластинами, наклонёнными под углом θ к оси z относительно положительного направления, с прицельными параметрами h_1 и h_2 относительно края первой и второй пластины соответственно, s_x и s_z размеры пластин поперёк и вдоль щели соответственно. За прицельный параметр или импакт-параметр принимается минимальное расстояние от траектории частиц до края мишени. Щель расположена вдоль направления движения заряженной частицы, то есть ось, вдоль которой поворачивается мишень, поперечна щели мишени. При этом каждая из пластин может перемещаться вдоль оси z в обе стороны.

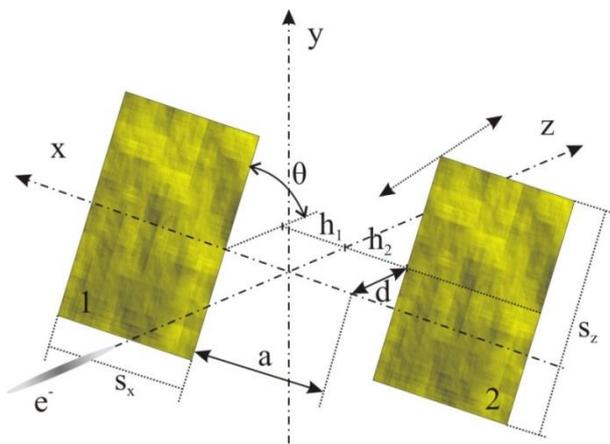


Рис. 2. Геометрия взаимодействия заряженной частицы со щелевой мишенью прямоугольной формы (a – ширина щели, d – сдвиг пластины, $h_{1,2}$ – прицельные параметры).

С использованием разработанного кода продемонстрировано хорошее согласие полученных результатов с известным аналитическим решением по методу изображений Пафомова [10], что показано на рис. 3. Здесь и далее на рисунках «а.у.» означает относительные единицы.

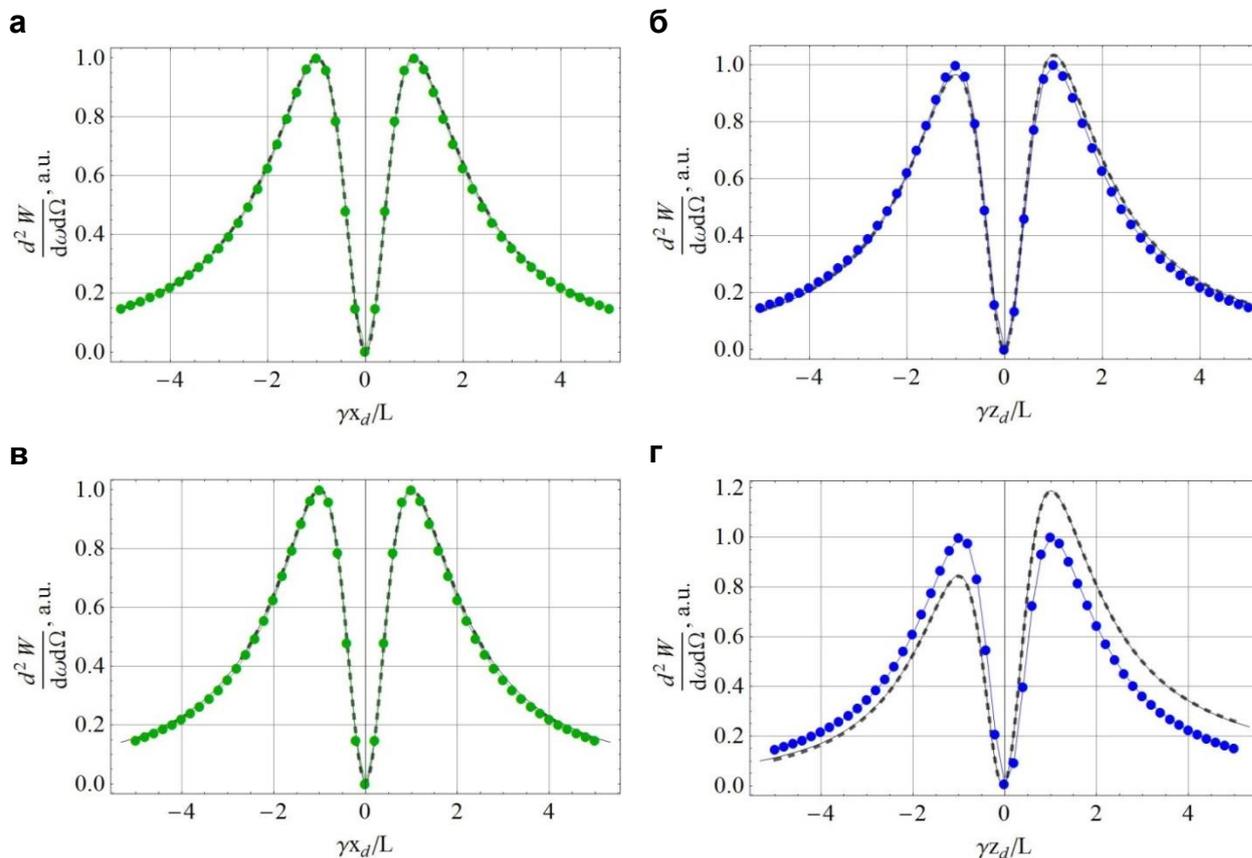


Рис. 3. Сравнение спектрально-угловой плотности переходного излучения при наклонном пролёте частицы рассчитанного разными способами для дальней зоны. Энергия частиц равна а, б – $E = 30$ МэВ, в, г – $E = 6$ МэВ, остальные параметры $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\lambda = 2$ мм. Штрихпунктирная линия – метод изображений, сплошная – обобщённый метод поверхностных токов, точки – разработанная модель псевдофотонов для разных сечений детектора x_d слева и z_d справа. Штрихпунктирная и сплошная линии слабо различимы.

Кривые нормированы по максимуму интенсивности для сечения x_d (графики на рисунке 3 с левой стороны) для каждой энергии соответственно. Для дальней зоны связь между углами и координатами на детекторе описывается соотношением $\frac{x_d}{L} = \theta_x$. В расчётах по разработанной модели параметры были выбраны следующие: $L = 10\gamma^2\lambda$, $s_x = 2\gamma\lambda$, $s_z = 4\gamma\lambda$ в соответствии с используемыми приближениями, описанными выше. Наблюдение ведётся под углом зеркального отражения от поверхности мишени, для двух сечений x_d и z_d . По оси абсцисс распределения построены в зависимости от приведённых координат $\frac{Yx_d}{L}$ и $\frac{Yz_d}{L}$. Видно, что распределения, рассчитанные на основе метода изображений и обобщённого метода поверхностных токов, полностью совпадают, как и ожидалось для исходных условий задачи. Хорошо видно, что используемая модель не описывает асимметрию углового распределения, что следует из принятых допущений (при уменьшении энергии асимметрия увеличивается).

Создаваемый код позволяет рассчитывать интенсивность ДИ от различных мишеней, в том числе от мишени, состоящей из двух пластин, одна из которых перемещается относительно другой. В этом случае зависимость интенсивности излучения $\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}$, d – расстояние между пластинами, может рассматриваться, как «естественная» интерферограмма.

Проведён теоретический анализ интерферограмм от предложенной мишени с учётом изменения различных параметров взаимодействия электронов и этой мишенью (в одночастичном приближении и с учётом продольного размера электронного сгустка). В этой же главе изложена методика оценки длины электронного сгустка по измеренной интерферограмме дифракционного излучения. Методика базируется на том, что центральная часть интерферограммы несёт информацию о коротковолновой части спектра когерентного излучения, которая, в основном, зависит от вида продольного форм-фактора сгустка: $f(\sigma_z, \lambda) = \exp\left(-\frac{2\pi\sigma_z^2}{\beta^2\lambda^2}\right)$ для гауссова распределения частиц в сгустке. Для того чтобы извлечь информацию о длине сгустка из интерферограммы необходимо построить оценочную функцию, например, $\sigma_z = S(x)$, где x критерий вида $x = \left. \frac{S(d) - S(0)}{\delta S / \delta d} \right|_{d=d_1}$, здесь d_1 – значение величины сдвига d в максимуме 1-ой производной интерферограммы [11]. Подобная оценочная функция находится численно.

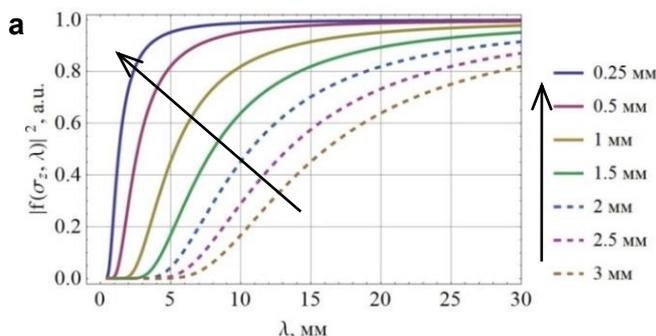
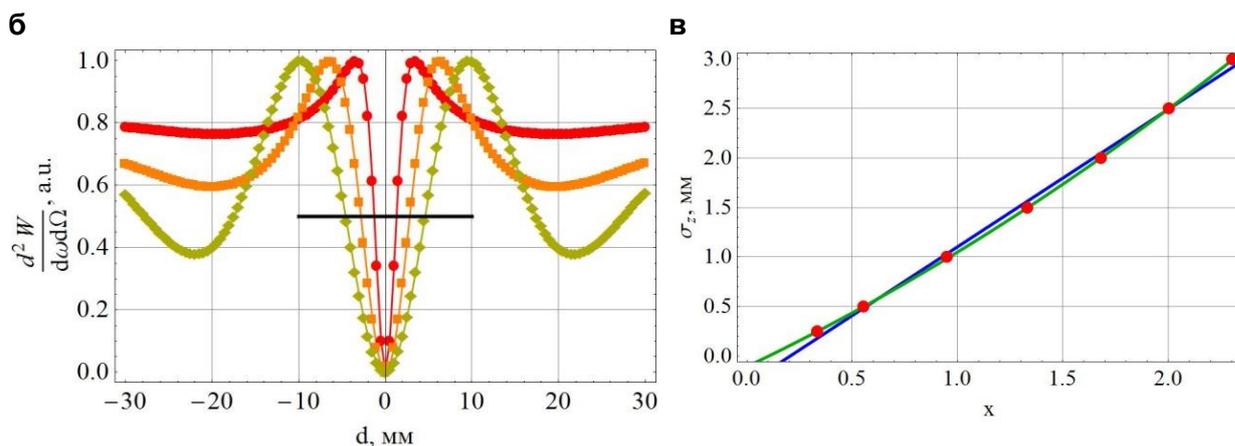


Рис. 4. Продольные форм-факторы списка длин сгустков (а), интерферограммы, нормализованные к максимуму распределения (б) для определения критерия x оценочной функции $S(x)$ (в). Точки – расчёт, линии – линейная и квадратичная аппроксимация.



На рис. 4а представлены форм-факторы для длин сгустков σ_z от 0.25 до 3 мм в приближении гауссова распределения электронов в сгустке в диапазоне длин волн от 0.5 до 30 мм, в том же, в каком рассчитаны интерферограммы (рис. 4б). Расчёт критерия x для каждого значения даёт результат, представленный на рис. 4в. Линейная аппроксимация точек в данном интервале даёт оценочную функцию вида $S(x) = 1.389x - 0.285$, квадратичная аппроксимация даёт результат вида $S(x) = 0.143x^2 + 1.013x - 0.106$. Разница между приведёнными аппроксимациями на данном интервале длин сгустков составляет до 10%. Как видно квадратичная зависимость более точно описывает расчётные точки.

Во **второй главе** представлены результаты проведённых экспериментов по применению щелевой мишени дифракционного излучения. Экспериментальные сеансы проводились на микротроне ТПУ и на линейном ускорителе Шанхайского института прикладной физики (Китай) с энергией электронов 6.1 МэВ и 28 МэВ соответственно.

Ниже представлено описание экспериментальной установки на микротроне ТПУ и результатов измерения интенсивности когерентного дифракционного излучения (интерферограммы) от прямоугольной щелевой мишени, состоящей из двух прямоугольных пластин из стеклотекстолита, покрытого медной фольгой размерами 198×109 мм каждая и шириной щели $a = 2$ мм. Общие размеры плоской мишени с учётом размеров щели составляют 198×220 мм, при этом эффективный радиус поля частицы равен 240 мм (для случая длины волны 20 мм и Лоренц-фактора $\gamma \approx 12$). Эксперимент был выполнен на выведенном электронном пучке микротрона ТПУ. Основные его параметры следующие: энергия электронов 6.1 МэВ, частота следования макроимпульсов 8 Гц, длительность макроимпульсов ≈ 4 мкс, количество электронных сгустков в макроимпульсе 104, период следования сгустков/расстояние между сгустками 380 пс/114 мм, населенность сгустка $\sim 10^8$, средний ток в макроимпульсе 30 мА, размер пучка на выходе микротрона 4 мм × 2 мм, угловая расходимость выведенного пучка 0.08 рад, продольный размер сгустка (среднеквадратичное отклонение) 2 – 2.5 мм.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Выведенный из вакуумного тракта через бериллиевое выходное окно толщиной 50 мкм электронный пучок пролетает через щель мишени, где генерируется дифракционное излучение. Дифракционное излучение «назад» распространяется в сторону параболического телескопа под углом зеркального отражения от поверхности мишени.

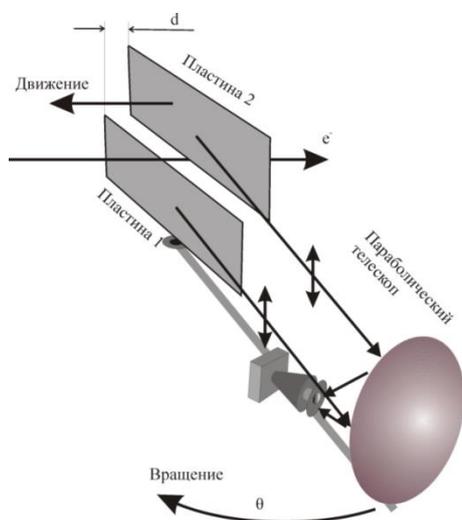


Рис. 5. Схема эксперимента со щелевой мишенью дифракционного излучения, d – сдвиг одной пластины относительно другой вдоль электронного пучка.

Для исключения влияния эффекта ближней волновой зоны измерение углового распределения дифракционного излучения и его интерферограммы проводилось с помощью фокусирующего параболического телескопа по методике, описанной в работе [12]. Детектор установлен в фокусе параболического отражателя, размещенного на штанге на расстоянии 440 мм, которая вращается вокруг оси, проходящей через середину мишени (рис. 5). В этом случае угловые характеристики излучения не искажаются за счет конечных размеров области излучения, и представляют собой характеристики, соответствующие дальней зоне. Для подавления фона ВЧ системы ускорителя на входе детектора был установлен запердельный волновод диаметром 15 мм, пропускающий излучение с длиной волны $\lambda < 24.5$ мм. В измерениях использовался детектор DP-20M на основе широкополосной антенны с низкobarьерным диодом. Данный детектор позволяет регистрировать излучение в области длин волн от 3 до 30 мм. Стоит отметить, что детектор также регистрирует излучение и с большей длиной волны, но с меньшей эффективностью. Средняя чувствительность детектора в указанном диапазоне длин волн составляет 0,3 В/мВт.

На рис. 6 представлено сравнение экспериментально измеренной интерферограммы и полученной с помощью моделирования по разработанной модели. Как видно из рис. 6а интерферограмма, рассчитанная по модели, качественно описывает экспериментально измеренную интерферограмму, однако количественно расходится с ней. Было сделано предположение, что данное расхождение объясняется влиянием функции чувствительности детектора. На рис. 6б изображено сравнение интерферограмм с учётом влияния чувствительности детектора, в качестве которой при моделировании была выбрана подгоночная функцию в виде гауссова распределения с максимумом при

19 мм и среднеквадратическом отклонении 3 мм. Хорошо видно, что в области сдвигов (-40 мм, 40 мм) интерферограммы практически полностью совпадают.

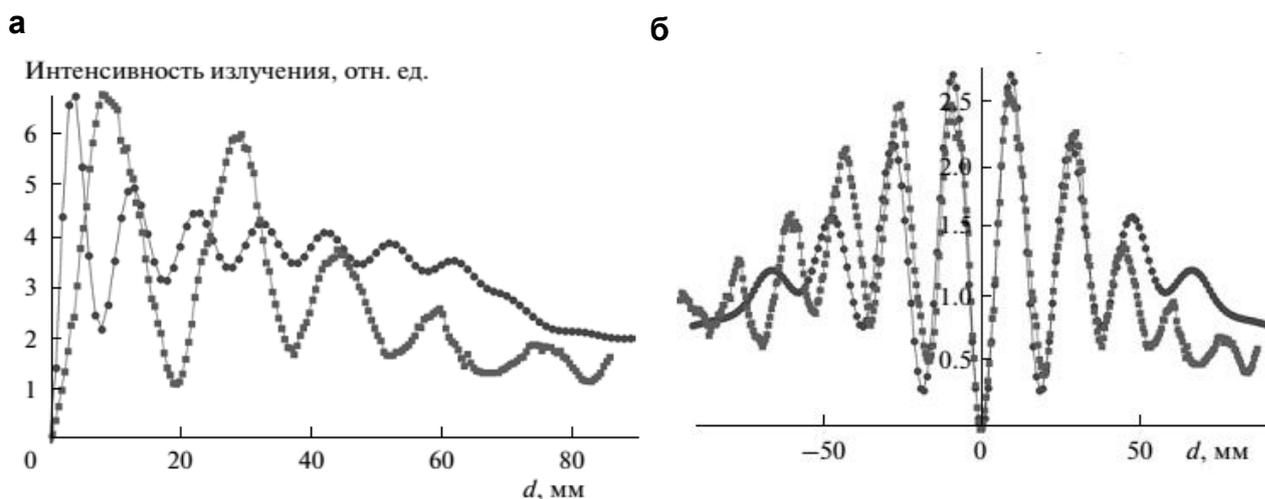


Рис. 6. Сравнение интерферограмм: квадраты – экспериментальные измерения, круги – расчет. Интерферограммы нормализованы по первому максимуму, (а) – расчётная интерферограмма не учитывает и (б) – учитывает подгоночную функцию чувствительности детектора.

Расчет проводился для параметров эксперимента при гауссовом продольном распределении сгустка со среднеквадратичным отклонением равным 2 мм. Оценка длины электронного сгустка по экспериментальной интерферограмме с помощью предложенного метода для случая, когда зависимость длины сгустка от критерия x : $\sigma_z = S(x) = x$ (см. первую главу), даёт значение $\sigma_z = 2.3$ мм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными с помощью другой методики [11].

На следующем этапе исследований эксперименты проводились на линейном ускорителе Шанхайского института прикладной физики (SINAP). Ускоритель состоит из термоэмиссионной электронной пушки S-диапазона, поворотного α -магнита и ускоряющей секции SLAC-типа, что позволяет получать электронные сгустки субпикосекундной длительности. После предварительного ускорения в пушке электронный пучок транспортируется через системы фокусировки и контроля в α -магнит, который используется для сжатия сгустка от нескольких сотен пикосекунд до нескольких сотен фемтосекунд по длине. Ускоряющая секция используется для ускорения электронов до высоких энергий. Основные параметры ускорителя представлены следующие: энергия электронов 20 – 30 МэВ, заряд сгустка 0.068 нК, населенность сгустка $\sim 0.44 \times 10^9$, средний ток в макроимпульсе 200 мА, частота следования макроимпульсов 3.125 – 12.5 Гц, длительность макроимпульсов 2 – 3 мкс, частота следования сгустков 2856.2 МГц, угловая расходимость выведенного пучка ~ 10 мм×мрад, продольный размер сгустка 0.3 – 3 псек (0.09 – 0.9 мм), поперечный размер сгустка ~ 200 мкм.

Дифракционная мишень представляла собой две плоские прямоугольные пластины, размером 46×20 мм² каждая, сделанные из алюминиевой фольги

толщиной 2 мкм с подложкой из полиамидной плёнки толщиной 0.3 мм, зажатые в держатель из алюминия с возможностью крепления их к шаговым моторам. Мишени были наклонены под углом 45 градусов к траектории движения электронного пучка. Внешние размеры держателя составляли 50 мм и 25 мм, толщина 5 мм. Мишень устанавливалась в вакуумной камере и с помощью двух шаговых двигателей одна пластина могла перемещаться поперёк траектории электронного пучка, а вторая – вдоль траектории. Излучение от мишени выводилось через нижнее выходное окно в камере. Окно состояло из закалённого стекла диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, расположенное на расстоянии 185 мм от центральной оси вакуумной камеры, измеренное по внешней поверхности.

В экспериментах использовался широкополосный пьезоэлектрический детектор на основе LiTaO₃, с органическим покрытием для улучшения абсорбции излучения, который использовался в измерениях. Этот детектор отличается достаточно широким диапазоном регистрации излучения, высокой чувствительностью и хорошим соотношением сигнал/шум.

На рис. 7 изображена схема эксперимента на ускорителе SINAP. В тракте ускорителя электронный пучок пролетает через щель мишени, где генерируется ДИ. Дифракционное излучение «назад» распространяется под углом зеркального отражения от поверхности мишени через выходное окно вакуумной камеры в сторону параболического зеркала и фокусируется в детектор (также вместо детектора возможна установка интерферометра Майкельсона).

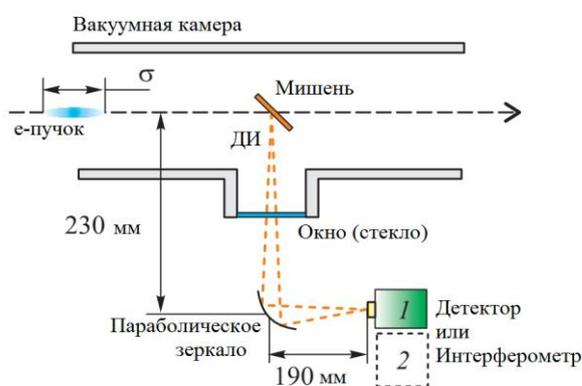


Рис. 7. Схема экспериментальной установки, где 1 детектор, расположенный в фокусе параболы, 2 интерферометр Майкельсона.

На рис. 8 с приведены экспериментально измеренные интерферограммы когерентного дифракционного излучения в абсолютных единицах для трёх значений тока α -магнита, что соответствует трём различным значениям длины электронного сгустка. В этих измерениях прицельный параметр равен 9 мм для каждой из пластин. С увеличением тока α -магнита длина сгустка увеличивается.

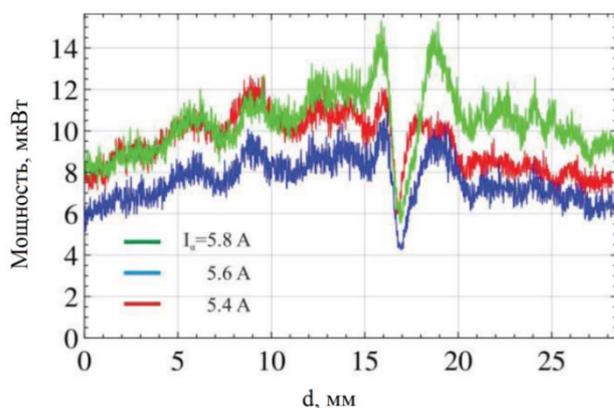


Рис. 8. Измеренные экспериментально интерферограммы ДИ от щелевой мишени для трёх значений тока α -магнита. Ток 5.4 А – средняя, 5.6 А – нижняя, 5.8 А – верхняя кривая.

Оценка длины электронного сгустка по разработанной методике даёт следующие результаты, для тока α -магнита равного 5.4 А – $\sigma_z = 0.22$ мм, 5.6 А – $\sigma_z = 0.24$ мм и для 5.8 А – $\sigma_z = 0.25$ мм (левая часть интерферограммы) и 0.12 мм, 0.23 мм и 0.68 мм соответственно (правая часть интерферограммы). Здесь выбрана зависимость длины сгустка от критерия x , следующая: $\sigma_z = S(x) = x$. Различия в левой и правой центральной части измеренных интерферограмм возможно объясняются неточностью настройки в углах наклона пластин и неточностью в прицельных параметрах для каждой из пластин мишени. Из измеренных интерферограмм можно получить спектры когерентного дифракционного излучения. При моделировании интерферограмм излучения, аналогичного этим экспериментальным спектрам, параметры длины электронных сгустков были следующими: 0.1 мм, 0.2 мм и 0.6 мм, что в большей степени соответствует оценкам по правой части измеренных интерферограмм. Проведённые измерения продемонстрировали принципиальную возможность измерения длины электронного сгустка в субпикосекундном диапазоне (<0.3 мм).

В **третьей главе** в первом разделе предлагается использовать дисфазную мишень, разновидность щелевой мишени, для диагностики поперечного размера сгустка заряженных частиц и кратко приводятся результаты моделирования. Далее во втором разделе приводится анализ возможности применения интерферометрии дифракционного излучения от щелевой мишени для диагностики пространственной структуры последовательности электронных сгустков.

На рис. 9 изображены интерферограммы, рассчитанные для параметров ускорителя LUCX [13], для различных комбинаций энергии, длины сгустков σ_z и расстояний между ними l_{ij} . Как видно из рисунка существует некоторое предельное значение расстояния l_{min} между сгустками в микротрейне, которое невозможно определить из интерферограммы. При расстояниях же больших, чем предельное $l_{ij} > l_{min}$, из формы интерферограмм легко определить количество сгустков в микротрейне по числу максимумов в ней, а расстояние l_{ij} определяется по расположению первого минимума, следующего за центральным минимумом.

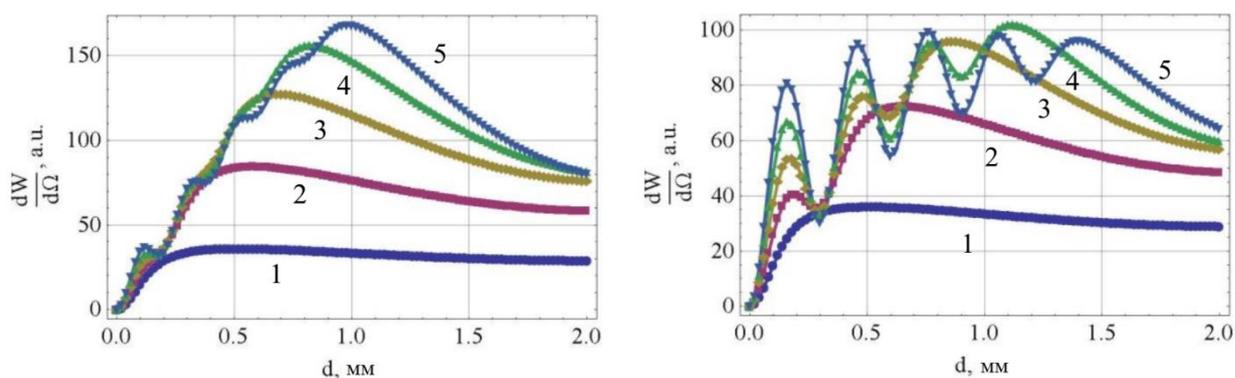


Рис. 9. Интерферограммы для различного количества сгустков в микротрейне (от 1 до 5) и разными расстояниями между ними. Параметры 8.25 МэВ, $\sigma_z = 30$ мкм, $l_{ij} = 200$ мкм (слева), $l_{ij} = 300$ мкм (справа).

Следует сказать, что отмеченное предельное значение зависит от длины сгустка. При увеличении длины сгустка форма интерферограмм становится менее выраженной, что затрудняет возможность определения количества сгустков и расстояния между ними.

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать вывод, что форма интерферограммы зависит от числа сгустков и от расстояния между сгустками в микротрейне. Следовательно, имеется возможность непосредственно определять количество сгустков в микротрейне по форме интерферограммы и среднее расстояние между сгустками по первому минимуму для заданных значений энергии частиц и длины сгустка.

Далее в третьем разделе этой главы представлены результаты абсолютных измерений когерентного дифракционного излучения в терагерцовом и миллиметровом диапазоне от плоской мишени, состоящей из одной пластины, для короткого электронного сгустка и проведён их анализ. На рис. 10 представлено сравнение экспериментально измеренной зависимости интенсивности ДИ от прицельного параметра и зависимости, полученной в результате моделирования.

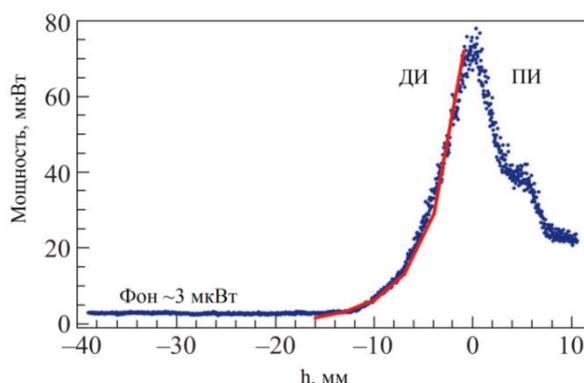


Рис. 10. Экспериментальная зависимость (точки) и расчётная зависимость (кривая) интенсивности ДИ от прицельного параметра мишени.

Моделирование проводилось по разработанной модели с учётом апертуры параболического зеркала, фокусирующего излучение на детектор, с учётом

чувствительности детектора и свойств выходного окна камеры. Положительные значения по оси «X» соответствуют переходному излучению, а отрицательные – дифракционному излучению. Шаг изменения прицельного параметра был равен 32 мкм при поперечном размере пучка порядка 200 мкм.

При моделировании учитывались реальное расстояние до параболического зеркала 230 мм, телесный угол которого составлял 0.04 ср, диапазон чувствительности детектора от 0.33 до 3 мм, Лоренц-фактор был равен 40, прицельный параметр изменялся от 1 до 16 мм, длина сгустка принималась равной 0.2 мм (667 фсек). Из сравнения видно, что результаты моделирования хорошо описывают экспериментальную зависимость для области ДИ. На рис. 10 расчётная кривая уменьшена в 1.5 раза для лучшего сравнения. Это говорит о том, что разработанная модель позволяет рассчитать абсолютный выход ДИ при учёте конкретных свойств оборудования и геометрии эксперимента с разумной точностью.

На рис. 11 приведено сравнение спектров полученных с помощью моделирования и восстановленного из измеренной интерферограммы Майкельсона для прицельного параметра $h = 1$ мм.

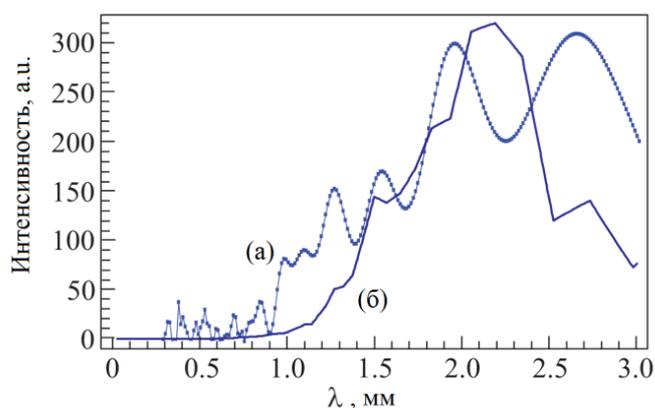


Рис. 11. Сравнение восстановленного из интерферограммы Майкельсона спектра (а – точки) и промоделированного спектра (б – линия) для прицельного параметра 1 мм.

Хорошо видно, что оба спектра достаточно близки друг к другу. Разница между ними может быть объяснена совокупным эффектом оборудования, входящим в интерферометр Майкельсона (в значительной степени это расщепитель излучения), влияние которого не учитывалось при моделировании, а также возможным влиянием влажности воздуха в помещении, где проводились измерения.

Измерения показали, что для $h=1$ мм измеренная мощность излучения была равна 70 мкВт. Если учесть поглощение в выходном окне камеры и исключить чувствительность детектора, то оценка мощности источника будет равна порядка 5 мВт (на 2 порядка больше), что в пересчёте на один сгусток соответствует энергии ~ 91.5 нДж. Полученный результат хорошо согласуется с данными из работы [14], где использовался сгусток с большей населённостью (заряд сгустка 13.5 нК), для генерации переходного излучения в качестве источника излучения.

В **заключении** излагаются основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Предложена методика, основанная на исследованиях свойств характеристик когерентного дифракционного излучения (в том числе интерферограмм при сдвиге пластин) от щелевой мишени для сгруппированного электронного пучка для различных параметров, и обоснована возможность определения длины электронного сгустка невозмущающим способом, измеряя интерферограмму дифракционного излучения.
2. Измерены новые зависимости выхода дифракционного излучения от сдвига между пластинами щелевой мишени (интерферограммы когерентного дифракционного излучения) при проведении экспериментов на микротроне ТПУ и линейном электронном ускорителе Шанхайского института прикладной физики. Была апробирована предложенная методика, доказывающая возможность невозмущающего определения длины электронных сгустков с миллиметровым и субмиллиметровым размером по интерферограммам когерентного дифракционного излучения измеренным от предложенной мишени и получены значения длины электронных сгустков на обоих ускорителях.
3. Разработана и апробирована программа для расчёта различных характеристик дифракционного излучения с учётом реальных параметров системы, с возможностью моделирования различных геометрий взаимодействия налетающих заряженных частиц на заданную плоскую мишень (как в геометрии переходного излучения, так и дифракционного излучения). Программа реализована для случая идеальной проводимости мишени и апробирована для излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн.
4. Предложена схема невозмущающей диагностики для определения пространственной структуры электронного пучка, содержащего от единиц до десятков коротких сгустков, с помощью интерферометра на основе щелевой мишени дифракционного излучения. Анализ данной схемы показывает принципиальную возможность определения пространственной структуры электронного пучка с субмиллиметровым расстоянием между сгустками.
5. Представлены результаты абсолютных измерений когерентного дифракционного излучения в субмиллиметровом диапазоне от мишени, состоящей из одной пластины, для сгруппированного релятивистского электронного пучка. Проведён их анализ и показана принципиальная возможность использования пучка когерентного дифракционного излучения, которое испускается под углом 90 градусов к траектории электронного пучка, для проведения прикладных исследований без нарушения основного режима работы ускорителя.

Статьи, опубликованные по теме диссертации

- A1. Д.А. Шкитов, А.П. Потылицын, Интерференционные эффекты в дифракционном излучении от дисфазной мишени // Изв. вузов. Физика 54, 11/2, 285-289 (2011)
- A2. J.B. Zhang, D.A. Shkitov, S.L. Lu et al., Measurement of sub-picosecond bunch length with the interferometry from double diffraction radiation target // Proceedings of IBIC, Tsukuba, 218-221 (2012)
- A3. Д. А. Шкитов, Г. А. Науменко, М. В. Шевелёв и др., Интерферограмма дифракционного излучения, получаемая при прохождении электронного пучка через щелевую мишень // Поверхность. рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 8, 86-89 (2013) [D.A. Shkitov, G.A. Naumenko, M.V. Shevelev et al., Diffraction radiation interferogram obtained after the interaction of an electron beam with a slit target // Journal of Surface Investigation, X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques 7, 4, 784-787 (2013)]
- A4. D.A. Shkitov, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn et al., Non-invasive bunch length diagnostics based on interferometry from double diffraction radiation target // Proceedings of IPAC, Shanghai, 583-585 (2013)
- A5. D. A. Shkitov, A. P. Potylitsyn, G. A. Naumenko et al., Coherent diffraction radiation as a source of radiation in far-infrared and terahertz range // Письма в ЖЭТФ 99, 3, 138-140 (2014) [JETP Letters 99, 3, 121-123 (2014)]
- A6. D.A. Shkitov, A.P. Potylitsyn, A.S. Aryshev et al., Feasibility of double diffraction radiation target interferometry for compact linear accelerator micro-train bunch spacing diagnostics // Journal of Physics: Conference Series 517, 012024 (2014)
- A7. D. Shkitov, A. Aryshev, A. Potylitsyn, J. Urakawa. Double diffraction radiation target interferometry for micro-train beam diagnostics // Proceedings of IPAC, Germany, 3635-3637 (2014)

Тезисы докладов

- B1. G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, et al. and D.A. Shkitov. Short electron bunch length measurements using coherent Diffraction radiation interferometry // Book of abstracts Channeling10, Italy, 206 (2010)
- B2. D.A. Shkitov, A.P. Potylitsyn. Feasibility of diffraction radiation from doubled target for beam diagnostics // Book of abstracts RREPS11, United Kindom, 70 (2011)
- B3. D.A. Shkitov, G.A. Naumenko, M.V. Shevelev, et al. Application of the diffraction radiation interferogram obtained after the interaction of an electron beam with a slit target // Book of abstracts of the 42 International Conference of Particle Crystal Interaction, Moscow, 48 (2012)
- B4. Zhang J.B., Shkitov D.A., Lu S.L., et al. First measurement of sub-picosecond electron bunch length with coherent diffraction radiation interferometry // Book of abstracts Channeling12, Italy, 176 (2012)

- B5. Zhang J.B., Shkitov D.A., Lu S.L., et al. Measurement of sub-picosecond bunch length with the interferometry from double diffraction radiation target // Book of abstracts IBIC 2012, Japan, 49 (2012)
- B6. J. B. Zhang, S. L. Lu, T. M. Yu, H. X. Deng, D. Shkitov, et al. Status of non-destructive bunch length measurement based on coherent Cherenkov radiation // Abstracts brochure of IPAC13, China, 43 (2013)
- B7. D.A. Shkitov, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, et al. Non-invasive bunch length diagnostics based on interferometry from double diffraction radiation target // Abstracts brochure of IPAC13, China, 45 (2013)
- B8. D.A. Shkitov, A.P. Potylitsyn, H. X. Deng, et al. Coherent diffraction radiation as a source of electromagnetic radiation // Book of abstracts RREPS13, Armenia, 55 (2013)
- B9. D.A. Shkitov, A.P. Potylitsyn, A.S. Aryshev, et al. Feasibility of double diffraction radiation target interferometry for compact linear accelerator micro-train bunch spacing diagnostics // Book of abstracts RREPS13, Armenia, 145 (2013)
- B10. D. Shkitov, A. Aryshev, A. Potylitsyn, et al. Double diffraction radiation target interferometry for micro-train beam diagnostics // Abstracts brochure of IPAC14, Germany, (2014)

Цитированная литература

- [1] Г.А. Науменко, Дифракционное излучение релятивистских электронов и диагностика пучков // автореферат на соиск. док. физ.–мат. наук: 01.04.20, Томск (2007)
- [2] K. Lekomtsev, Investigation of Coherent Diffraction Radiation from a dual target system at CTF3 and its application for longitudinal bunch profile diagnostics // PhD thesis, Department of Physics, Royal Holloway, University of London (2012)
- [3] В.С. Шпаков, Диагностика ультрарелятивистских электронных пучков с помощью двухщелевой системы дифракционного излучения // автореферат на соиск. канд. физ.–мат. наук: 01.04.20, Москва (2014)
- [4] М.В. Шевелёв, Исследование свойств когерентного излучения релятивистских электронов в макроскопических структурах для создания средств диагностики пучков // автореферат на соиск. канд. физ.–мат. наук: 01.04.20, Томск (2012)
- [5] С.А. Гаврилов, Исследование метода двумерной неразрушающей диагностики поперечных характеристик пучков ускоренных заряженных частиц на основе ионизации остаточного газа // автореферат на соиск. канд. физ.–мат. наук: 01.04.01, Долгопрудный (2013)
- [6] R. Pompili, Longitudinal diagnostics for comb-like electron beams by means of Electro-Optic Sampling // PhD thesis, University of Rome Tor Vergata (2013)
- [7] A.P. Potylitsyn, M.I. Ryazanov, M.N. Strikhanov et al., Diffraction radiation from relativistic particles // Berlin, Springer (2011)
- [8] P. Karataev, S. Araki, R. Hamatsu, et al., Beam-size measurement with optical diffraction radiation at KEK accelerator test facility // PRL 93, 244802 (2004)

- [9] Металлооптика, Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. – М.: Советская энциклопедия (1988)
- [10] В.Е. Пафомов, Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела // Труды ФИАН XLIV, 28-167 (1969)
- [11] M. Shevelev, H. Deng, A. Potylitsyn et al., Sub-millimeter bunch length non-invasive diagnostic based on the diffraction and Cherenkov radiation // Journal of Physics: Conference Series 357, 012023 (2012)
- [12] Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П. и др., Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. № 3. С. 136
- [13] A. Aryshev, S. Araki, M. Fukuda et al., Development of advanced THz generation schemes at KEK LUCX facility // Proc. PASJ, SUP020 (2013)
- [14] S. Okuda, T. Kojima, R. Taniguchi et al., High-intensity far-infrared light source using the coherent transition radiation from a short electron bunch // NIM A 528, 130-133 (2004)