

На правах рукописи



Сухих Леонид Григорьевич

Фокусировка переходного
и дифракционного излучения
ИЗОГНУТЫМИ МИШЕНЯМИ

Специальность 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики
ГОУ ВПО “Томский политехнический университет”

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Бордовицын Владимир Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор
Мезенцев Николай Александрович

Ведущая организация: Национальный исследовательский
ядерный университет “МИФИ”

Защита состоится “2” декабря 2009 г. в 15⁰⁰ час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета университета.

Автореферат разослан “___” _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05,
кандидат физико-математических наук



А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность работы

На сегодняшний день различные типы поляризационного излучения, например, переходное, дифракционное, Смита-Парселла, имеют многочисленные практические приложения в физике ускорителей, лазеров, плазмы, сверхвысокочастотной электронике и т.д.

В последнее время теоретически и экспериментально исследуется т.н. “эффект предволновой зоны”, связанный с влиянием на характеристики излучения конечной излучающей области, пропорциональной в случае переходного излучения $\gamma\lambda$ (γ – Лоренц-фактор частицы, λ – длина волны излучения), которая в некоторых случаях не может рассматриваться как точечная. Влияние эффекта заключается в существенном снижении спектрально-угловой плотности излучения и деформации угловых распределений на расстояниях менее чем $L < \gamma^2\lambda$, что ведёт к ухудшению пространственного разрешения диагностических станций характеристик пучков заряженных частиц, особенно в современных ускорителях. Также ухудшаются характеристики источников излучения, основанных на использовании данных излучений.

Актуальность настоящего исследования связана с необходимостью увеличения спектрально-угловой мощности поляризационного излучения при расположении диагностических детекторов в предволновой зоне; разработки новых и модернизации существующих источников излучения в таких спектральных диапазонах, как терагерцовый и мягкий рентгеновский, которые планируются к использованию для медико-биологических исследований.

Цель работы

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик переходного и дифракционного излучений, а также излучения Смита-Парселла от мишеней и решёток фокусирующей формы, а именно сферических и параболических, в оптическом и миллиметровом диапазонах длин волн для того, чтобы увеличить угловую плотность излучения в предволновой зоне по сравнению с плоскими мишенями и решётками, а также с целью сравнения характеристик теоретически предсказанного эффекта фокусировки излучения в предволновой зоне [1–4] с экспериментальными данными.

Научная новизна работы

Впервые экспериментально обнаружена фокусировка переходного и дифракционного излучений, а также излучения Смита–Парселла в предволновой зоне изогнутыми мишенями в оптическом и миллиметровом диапазоне длин волн, т.е. зарегистрировано увеличение угловой плотности излучения от изогнутой мишени без применения средств внешней оптики по сравнению с плоской мишенью в соответствующих условиях.

Предложена оригинальная схема источника субмиллиметрового и мягкого рентгеновского излучения на основе когерентного дифракционного излучения коротких электронных сгустков и механизма обратного Томсоновского рассеяния.

Практическая значимость работы

Результаты проведённых экспериментальных исследований по фокусировке переходного и дифракционного излучений, а также излучения Смита–Парселла могут быть использованы при разработке новых и модернизации существующих диагностических станций для измерения поперечных и продольных профилей электронных сгустков, а также в схемах источников монохроматического излучения. Показано, что для наклонных фокусирующих мишеней необходимо учитывать обнаруженный астигматизм для улучшения пространственного разрешения диагностических станций.

Предложенная схема источника субмиллиметрового и мягкого рентгеновского излучения может составить конкуренцию существующим ныне источникам излучения в указанном диапазоне.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное подтверждение эффекта фокусировки некогерентных переходного и дифракционного излучений, генерируемых ультрарелятивистским электронным пучком в сферической мишени, расположенной в предволновой зоне, в оптическом диапазоне длин волн.
2. Экспериментальное подтверждение эффекта фокусировки когерентного переходного излучения, генерируемого умеренно релятивистским электронным пучком в параболической мишени, расположенной в существенно предволновой зоне, в миллиметровом диапазоне длин волн.

3. Экспериментальное подтверждение эффекта фокусировки когерентного излучения Смита-Парселла генерируемого умеренно релятивистским электронным пучком в параболических решётках двух типов, расположенных в предволновой зоне, в миллиметровом диапазоне длин волн.
4. Схема источника субмиллиметрового и мягкого рентгеновского излучения на основе когерентного дифракционного излучения коротких электронных сгустков и механизма обратного Томсоновского рассеяния.

Личный вклад автора

Результаты, частично опубликованные в работах [a,b] (первая глава диссертации), получены при проведении совместного эксперимента в High energy research accelerator laboratory КЕК (г. Цукуба, Япония), на ускорителе КЕК-АТФ. Результаты, частично опубликованные в работах [c-e] (вторая глава диссертации), получены при проведении эксперимента в НИИ Ядерной Физики Томского политехнического университета. Вклад автора в экспериментальных исследованиях заключается в проведении теоретических оценок характеристик излучения, подготовке экспериментов, участии в экспериментальных сеансах, обработке полученных данных и формулировке основных выводов. В результатах, частично опубликованных в работе [f] (третья глава диссертации), вклад автора является основным.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на XX Российской конференции по ускорителям RuPAC-06 (Новосибирск, Россия, 2006); на VIII международной конференции по диагностике ускорителей заряженных частиц DIPAC-2007 (Венеция, Италия 2007); на 37-й международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (МГУ, Москва, 2007); на 7-м международном симпозиуме “Radiation of relativistic electrons in periodic structures” (Prague, Czech Republic, 2007); на международной конференции Channeling 2008, (Erice, Италия, 2008). По результатам работы опубликовано 3 статьи в отечественной и зарубежной печати и 3 доклада в материалах международных конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 108 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 107 страниц. Работа содержит 55 рисунков и 4 таблицы.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность темы работы, проводится краткое описание современного состояния исследований в данной области науки, описывается существующая проблема, ставится цель и описывается структура диссертации.

Первая глава посвящена фокусировке некогерентных переходного и дифракционного излучений, генерируемых в сферической мишени ультрарелятивистским электронным пучком, в оптическом диапазоне длин волн.

Раздел 1.1 посвящен теоретическому расчёту спектрально-угловых характеристик обратных некогерентных переходного и дифракционного излучений от параболической мишени при наклонном падении частицы, при расположении детектора в предволновой зоне. В начале раздела рассмотрены методы решения задачи переходного и дифракционного излучений, разработанные к настоящему времени. Для проведения расчёта автор остановился на недавно разработанном так называемом “методе двойного токового слоя” [5], с помощью которого было проведено сравнение характеристик излучения от параболической мишени в предволновой зоне, плоской в соответствующих условиях и от плоской мишени в волновой зоне. В конце раздела теоретическая модель была усложнена для учёта реальных характеристик экспериментальной установки, а именно, были учтены конечный поперечный размер электронного сгустка, спектральная чувствительность детектора и неидеальная проводимость мишеней.

В *разделе 1.2* описана экспериментальная установка на ускорителе КЕК-АТФ (Цукуба, Япония) с энергией электронов $E_e = 1280$ МэВ ($\gamma = 2500$) (рисунок 1). В эксперименте проводились измерения оптического переходного и дифракционного излучений от сферической и от плоской мишени, которые, впоследствии, сравнивались между собой и с теоретическими предсказаниями с целью экспериментального подтверждения эффекта фокусировки

данных излучений. Сферическое зеркало представляло собой прямоугольный сегмент сферической поверхности с фокусом $f = 500$ мм, размерами $7,5 \times 15$ мм² с напылённой алюминиевой отражающей поверхностью толщиной $2 \div 3$ мкм. При таком соотношении поперечных размеров сферического зеркала и его фокуса вполне возможно заменить параболическую поверхность сферической с ошибкой не более 1%. Плоское зеркало представляло собой пластину из кремния толщиной 300 мкм с напылённым золотым отражающим слоем толщиной $2 \div 3$ мкм. Размеры пластинки 9×7 мм².

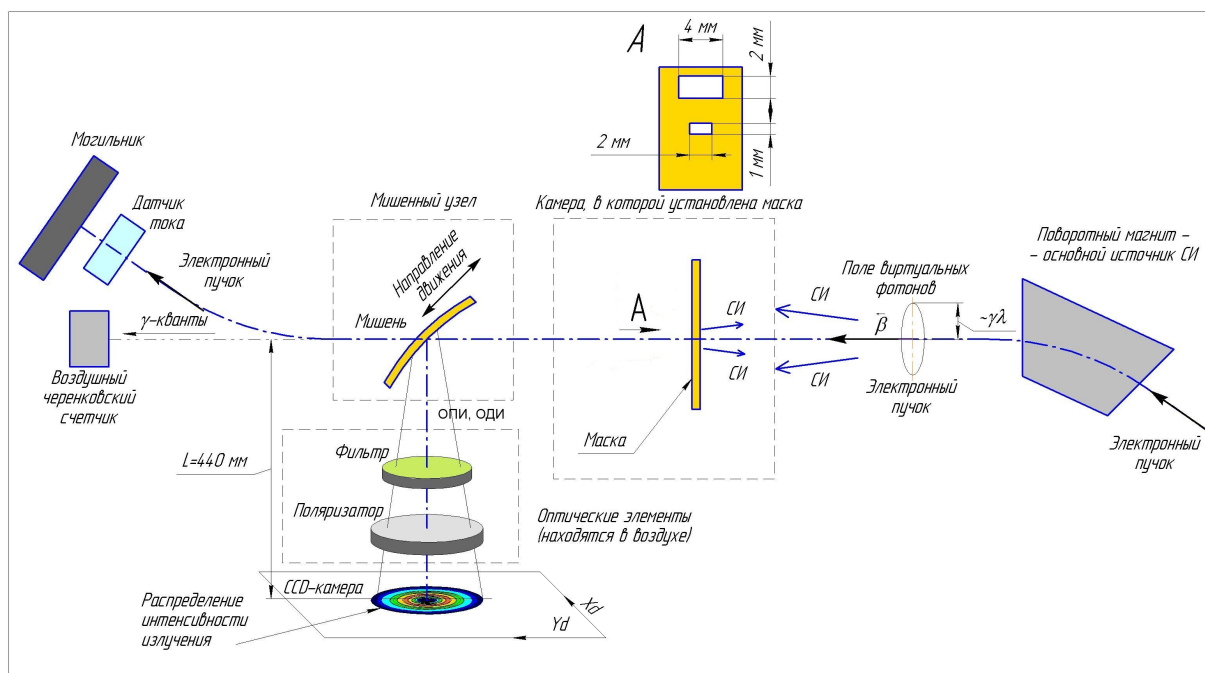


Рис. 1: Схема эксперимента по фокусировке оптического переходного и дифракционного излучений сферической мишенью.

Электронный пучок ускорителя с вертикальным размером $\sigma = 29,35$ мкм проходит поворотный магнит, являющийся основным источником синхротронного излучения и расположенный в восьми метрах от мишенного узла, маску, которая является защитой от синхротронного излучения, мишенный узел и поглощается в могильнике. На мишенях, расположенных в мишенном узле, генерируется переходное или дифракционное излучение в оптическом диапазоне длин волн. Кроме того, возможен процесс отражения от мишени части прошедшего через маску синхротронного излучения. Оптическое излучение мишеней проходит через выводное окно, поляризатор и/или фильтр и регистрируется CCD-камерой.

В мишенном узле были установлены плоская и сферическая мишени, а

также проволочный сканер для измерения вертикального размера пучка. В качестве детектора использовалась CCD-камера ALTA E4000 ($7,4 \times 7,4$ мкм² на пиксель), которая была установлена на расстоянии $L = 440$ мм от мишеней. Данное расстояние соответствовало $L = 440 \text{ мм} = 0,14\gamma^2\lambda$, т.е. детектор располагался в существенно предволновой зоне.

В разделе 1.3 приведены основные полученные экспериментальные результаты и проведено их сравнение с результатами теоретического расчёта. На рисунках 2 показаны теоретические и экспериментальные распределения вертикальной (σ -) компоненты поляризации оптического переходного излучения в двух направлениях.

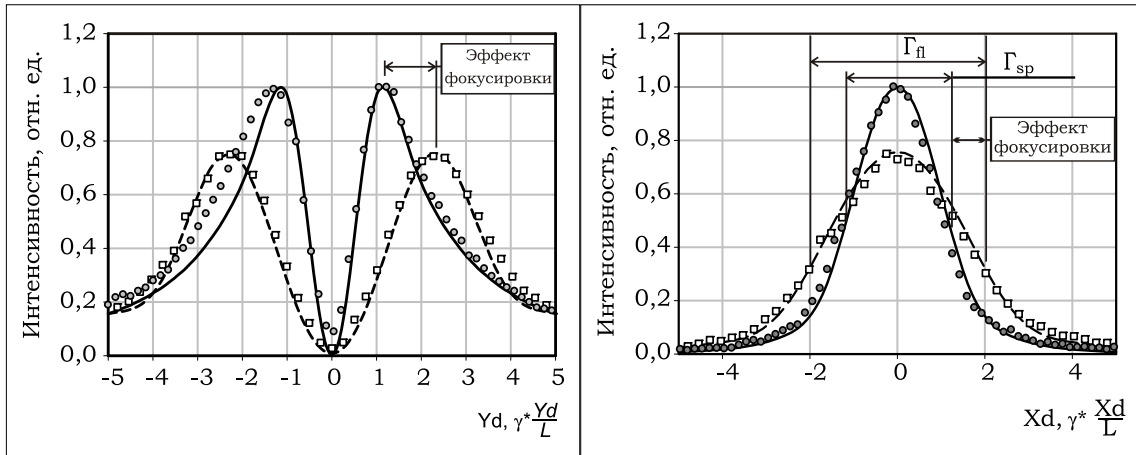


Рис. 2: Экспериментальные и теоретические распределения интенсивности вертикальной компоненты поляризации оптического переходного излучения вдоль направления Yd (для $Xd = 0$) (слева) и Xd (для $Yd = \max$) (справа) от плоской (штрихованная кривая – теория, белые квадраты – эксперимент) и от сферической (сплошная кривая – теория, серые точки – эксперимент) мишеней.

Из рисунков 2 видно, что пространственные распределения интенсивности вертикальной компоненты поляризации оптического переходного излучения от сферической мишени вдвое уже чем от плоской мишени и хорошо согласуются с предсказаниями теории. Расстояние между максимумами в распределении оптического переходного излучения от сферической мишени, выраженное в аналогах угловых единиц $Yd/L = \theta_y$ равно $2,36\gamma^{-1}$, а от плоской — $4,54\gamma^{-1}$. Пространственное распределение оптического переходного излучения от сферической мишени в предволновой зоне очень близко к распределению в волновой зоне, где угловое расстояние между максимумами равно $2\gamma^{-1}$. Небольшое отклонение от распределения в волновой зоне может объясняться геометрией наклонной мишени. Теоретическое отношение интен-

сивности оптического переходного излучения в максимуме пространственного распределения излучения от плоской мишени к соответствующему в распределении от сферической мишени в эксперименте составило $0,75 \pm 0,04$, а согласно теоретическим предсказаниям 0,79.

Одним из факторов, влияющих на пространственные распределения оптического переходного и дифракционного излучений от сферической мишени, является угол наклона мишени относительно траектории электрона. Даже в геометрии зеркального отражения согласно теоретическим предсказаниям должно наблюдаться искажение пространственного распределения вдоль координаты Yd в наших обозначениях. В работе [6] было экспериментально подтверждено с большой точностью, что в волновой зоне распределение оптического дифракционного излучения от наклонной плоской мишени симметрично в ультрарелятивистском случае. В нашем случае фокусное расстояние не совпадает с расстоянием до детектора, поэтому выделим два фактора, влияющих на асимметрию распределения оптического дифракционного излучения. Первый — не совпадение фокуса с расстоянием до детектора, второй — влияние наклона мишени. На рисунке 3 показаны теоретические и экспериментальные распределения интенсивности вертикальной компоненты оптического дифракционного излучения от плоской и сферической мишеней в геометрии эксперимента.

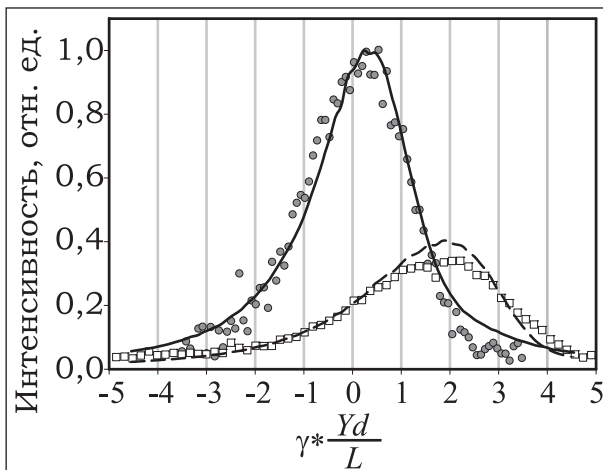


Рис. 3: Экспериментальные и теоретические пространственные распределения вертикальной компоненты поляризации оптического дифракционного излучения в направлении Yd от обеих мишеней ($Xd=0$) в случае наклона на угол $\psi = 45^\circ$. Серые точки — сферическая мишень, эксперимент, сплошная кривая — теория, белые квадраты — плоская мишень эксперимент, пунктирная кривая — теория. Импакт-параметр $h = 50$ мкм.

Из рисунка 3 видно, что распределение от сферической мишени деформировано. Для оценки степени деформации была введена аппроксимационная

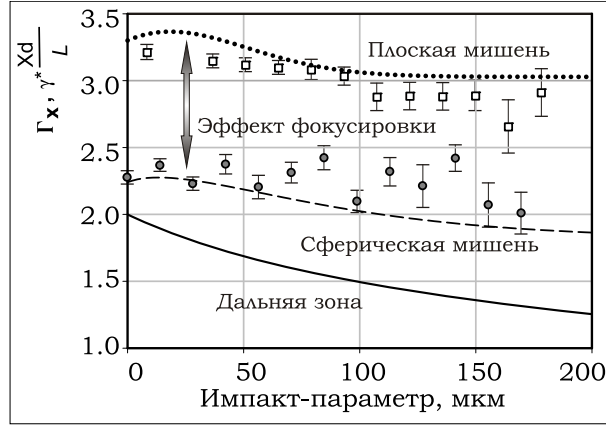


Рис. 4: Зависимость ширины на полувысоте пространственного распределения оптического дифракционного излучения от импакт-параметра для разных мишеней.

функция:

$$f(x) = a \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_0}{b(1 - M_3 \operatorname{sign}(x - x_0))} \right)^c \right].$$

Здесь a, b, c, x_0 коэффициенты аппроксимации и M_3 параметр асимметрии. Найденные коэффициенты асимметрии для экспериментальных распределений вертикальной компоненты поляризации оптического дифракционного излучения от сферической и плоской мишеней были равны $M_3 = 0,190 \pm 0,028$ и $M_3 = 0,300 \pm 0,023$, соответственно. Для теоретически рассчитанных распределений в геометрии эксперимента коэффициенты были равны $0,170 \pm 0,009$ и $0,350 \pm 0,008$, соответственно. Можно видеть, что теоретические оценки хорошо совпадают с экспериментальными результатами. В случае нормального падения для сферической и плоской мишеней теоретически рассчитанные коэффициенты были равны $0,100 \pm 0,008$ и $0,330 \pm 0,010$, соответственно. Коэффициенты асимметрии для наклонного и нормального падения на сферическую мишень отличаются примерно в два раза, тогда как для плоской мишени — совпадение в пределах ошибки.

На рисунке 4 показаны теоретически рассчитанные (линиями) и экспериментально измеренные (точками) зависимости ширин на полувысоте пространственных распределений интенсивности вертикальной компоненты поляризации оптического дифракционного излучения от импакт-параметра для плоской и сферической мишеней в предволновой зоне, а также для теоретический расчёт для плоской мишени в волновой зоне. Ширины на полувысоте как теоретические, так и экспериментальные взяты в плоскости Xd , где распределение симметрично, в максимуме.

Из рисунка видно 4, что пространственные распределения от сферической

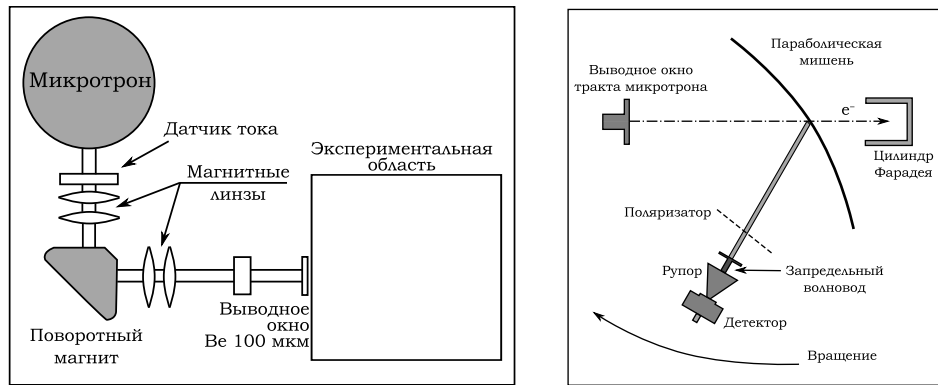


Рис. 5: Схема экспериментальной установки на основе микротрона по генерации когерентного переходного излучения от параболической мишени

мишени уже чем от плоской примерно в полтора раза. Из-за экспоненциальной зависимости интенсивности дифракционного излучения от импакт-параметра с ростом последнего ухудшается отношение пик-фон и, как следствие, растёт относительная ошибка. Экспериментальные результаты хорошо совпадают с теоретическими расчётами. Неэкспоненциальная зависимость в области малых импакт-параметров вызвана влиянием конечного вертикального размера электронного сгустка.

Вторая глава посвящена фокусировке когерентного переходного излучения и когерентного излучения Смита–Парселла при их генерации параболическими мишенями в предволновой зоне.

Раздел 2.1 посвящён теоретическим оценкам характеристик когерентного переходного излучения и излучения Смита–Парселла, генерируемых умеренно релятивистскими электронами в параболических мишенях при расположении детектора в предволновой зоне, и сравнению с аналогичными характеристиками от плоских мишеней в соответствующих условиях. На основе упоминавшегося метода двойного токового слоя получены спектрально–угловые распределения переходного излучения и излучения Смита–Парселла и показано, что в эксперименте должно наблюдаться увеличение спектрально–угловой плотности излучения от изогнутых мишеней по сравнению с излучением от плоских мишеней в соответствующих условиях.

Раздел 2.2 посвящен описанию экспериментальной установки на выведенном пучке микротрона НИИЯФ ТПУ. Угловое распределение когерентного переходного излучения от параболической мишени сравнивалось с распределением от плоской мишени в соответствующих условиях. Схема эксперимента приведена на рисунке 5. Были также проведены два эксперимента по фокусировке когерентного излучения Смита–Парселла. Схема экспериментов

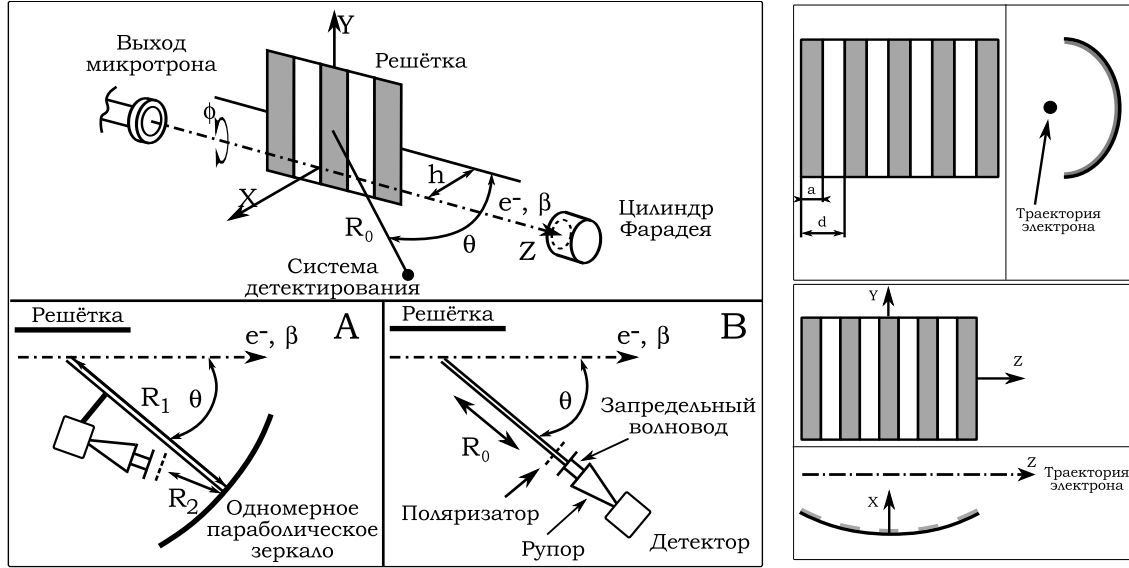


Рис. 6: Схема экспериментов по фокусировке когерентного излучения Смита-Парселла и некоторые обозначения. На врезках **A** и **B** показаны детектирующие системы для экспериментов с азимутально-фокусирующей (справа сверху) и полярно-фокусирующей (справа снизу) решётками, соответственно.

показана на рисунке 6.

Электроны ускоряются в микротроне до энергии $E_e = 6,1$ МэВ. Макроимпульс электронов, состоящий из $n_b = 10526$ сгустков, продолжительностью $\tau = 4$ мкс с частотой $f = 6$ Гц выводится через Ve окно толщиной 100 мкм и взаимодействует с находящейся в воздухе мишенью. Максимальная населённость электронного сгустка $N_e \simeq 10^8$ электронов. Поперечные размеры электронного сгустка на выходе из тракта 4×4 мм², характерная длина сгустка в Гауссовом приближении $\sigma_z = 1,1$ мм (среднеквадратичное отклонение).

В ходе экспериментов по фокусировке когерентного переходного излучения использовались две мишени. Первая мишень — параболическая, рабочим диаметром $d = 160$ мм и фокусным расстоянием $f = 150$ мм. Вторая мишень представляла собой плоскую пластину фольгированного медью стеклотекстолита с толщиной медного слоя 30 мкм квадратной формы поперечными размерами 170 мм $\times$ 170 мм. Мишени устанавливались на пучке, и при этом расстояние от центра мишени до детектора могло изменяться в пределах от 120 до 220 мм, что соответствует существенно предволновой зоне ($L \ll \gamma^2 \lambda$).

В экспериментах по фокусировке когерентного излучения Смита-Парселла использовались решётки трех типов: плоская, азимутально-фокусирующая с фокусным расстоянием $f_{azim} = 150$ мм, полярно-фокусирующая с фокусным расстоянием $f_{pol} = 190$ мм. Решётки с периодом $d = 12$ мм ($a = d/2$) и чис-

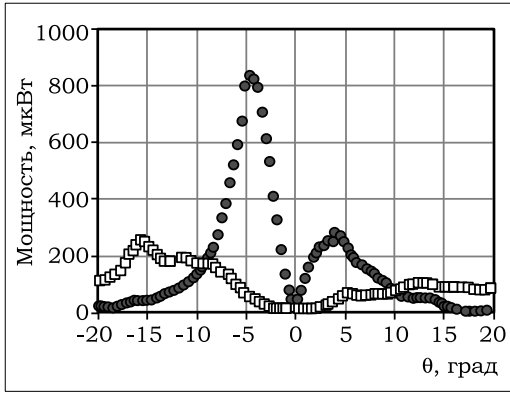


Рис. 7: Экспериментальное угловое распределение горизонтальной компоненты КПИ от параболической (серые круги) и плоской (белые квадраты) мишеней в точке фокуса $f = L = 150$ мм.

лом периодов $N = 13$ представляли собой металлические полосы толщиной 20 мкм на диэлектрической подложке. Ширина всех решёток 120 мм. В эксперименте сравнивались между собой азимутальные распределения угловой плотности когерентного излучения Смита-Парселла от плоской и одной из вогнутых решёток.

В качестве детектора использовался детектор DP-21M1 на основе широкополосной микрополосковой антенны и низкочастотного ВЧ диода. Детектор позволяет регистрировать излучение в области длин волн $\lambda_{min} \div \lambda_{max} = 3 \div 17$ мм. Средняя чувствительность в области длин волн от 11 до 17 мм составляет 0,3 В/мВт. В данном диапазоне длин волн излучение сгустка электронов микротрона является когерентным.

В разделе 2.3 приведены основные результаты экспериментов и проведено сравнение с теоретическими оценками. В результате проведения основного эксперимента были получены угловые распределения горизонтальной компоненты поляризации когерентного переходного излучения на четырех расстояниях от параболической мишени в условиях фокусировки и дефокусировки. Также было получено угловое распределение от плоской мишени в точке фокуса параболической. Угловые распределения от плоской и параболической мишеней в точке фокуса показаны на Рис. 7. Расстояние между центром мишени и детектором в единицах $\gamma^2 \lambda$ ($\lambda = 12$ мм) равно $L_1 = 0,09 \gamma^2 \lambda$, а в единицах $\gamma \lambda$ ($\lambda = 12$ мм) — $L_1 = 1,05 \gamma \lambda$. Такое расстояние соответствует существенно предволновой зоне. По оси ординат на Рис. 7 отложена мощность излучения, измеренная детектором. По оси абсцисс отложен угол наблюдения, где “0” соответствует направлению зеркального отражения.

Из Рис. 7 видно, что применение параболической мишени позволяет существенно увеличить мощность излучения по сравнению с плоской мишенью (примерно в 4 раза), несмотря на расположение в существенно предволновой



Рис. 8: Теоретически рассчитанные (кривые) и экспериментально измеренные (точки) расстояния между максимумами в угловом распределении когерентного переходного излучения для параболической мишени (серые точки и сплошная кривая) и для плоской мишени (белые квадраты и пунктирная кривая).

зоне.

На Рис. 8 показаны экспериментально измеренные расстояния между максимумами в угловом распределении когерентного переходного излучения для параболической мишени на разных расстояниях от детектора и от плоской мишени. Также на Рис. 8 показаны теоретически рассчитанные зависимости расстояний между максимумами от расстояния между центром мишени и детектора по формулам когерентного переходного излучения для экспериментальных параметров: $\gamma = 12$, $a = b = 80$ мм, $f = 150$ мм, $N_e = 4,75 \cdot 10^7$, $n_b = 10526$, $\tau = 4$ мкс, $\sigma_z = 1,1$ мм. Населённость сгустка определялась из среднего тока макроимпульса, который составлял 20 мА. Из Рис. 8 видно, что теоретические предсказания и экспериментальные данные для плоской мишени совпадают в пределах ошибки. Совпадение теоретических предсказаний и экспериментальных данных для параболических мишеней не очень хорошее как по значению расстояния между максимумами, так и по поведению зависимостей. Расхождения между теоретическими и экспериментальными распределениями для параболической мишени могут быть вызваны влиянием неучтённых при расчётах параметров, таких как когерентные эффекты, вызванные поперечными размерами сгустка, его расходимость в воздухе после прохождения бериллиевой фольги, прямое когерентное переходное излучение от фольги и конечная апертура детектора.

На Рис. 9 показана экспериментально измеренная угловая плотность мощности когерентного переходного излучения от параболической мишени в левом максимуме углового распределения в зависимости от расстояния между мишенью и детектором. Из рисунка 9 видно, что угловая плотность мощности излучения в случае расположения детектора на расстоянии, равном фокусному, примерно в 3,5 раза больше, чем от плоской мишени.

Результаты эксперимента по фокусировке когерентного излучения Смита–

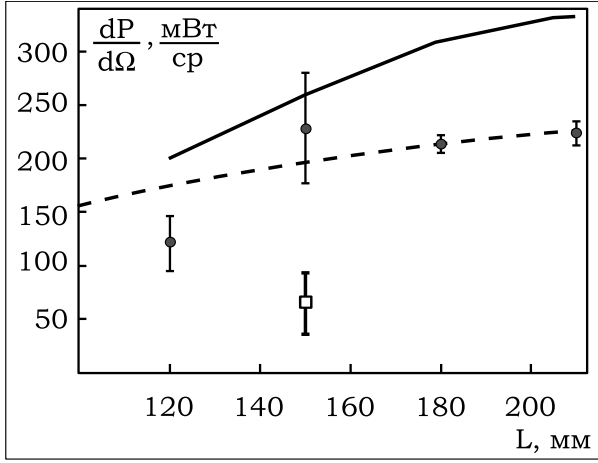


Рис. 9: Зависимости угловой плотности мощности когерентного переходного излучения от расстояния. Параболическая мишень эксперимент — серые точки, теория — сплошная кривая, плоская мишень эксперимент — белые квадраты, теория — пунктирная кривая. Теоретические кривые разделены на 6.

Парселла азимутально-фокусирующей решёткой приведены на рисунке 10. Видно, что интенсивность излучения от азимутально-фокусирующей решётки в максимуме больше, чем от плоской примерно на 30%. На рисунке 11 показана азимутальная зависимость излучения для полярно-фокусирующей и плоской решёток в одинаковых условиях. Из рисунка 11 видно, что интенсивность излучения от полярно-фокусирующей решётки в максимуме больше, чем от плоской примерно в 3 раза.

Следует отметить, что при использовании полярно-фокусирующей решётки максимальное усиление излучения приходится на расстояние равное фокусному. В случае азимутально-фокусирующей решётки — удвоенному фокусному расстоянию.

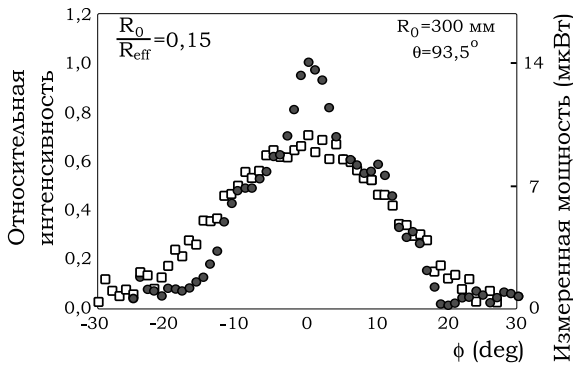


Рис. 10: Сравнение экспериментально измеренных азимутальных распределений КИСП от азимутально-фокусирующей (серые круги) и плоской (белые квадраты) решёток в одинаковых условиях.

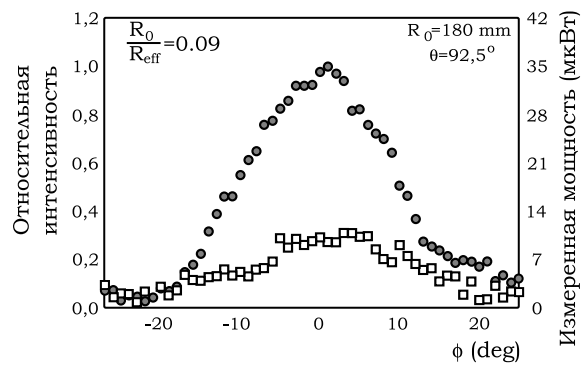


Рис. 11: Сравнение экспериментально измеренных азимутальных ориентационных распределений КИСП от полярно-фокусирующей (серые круги) и плоской (белые квадраты) решёток в одинаковых условиях.

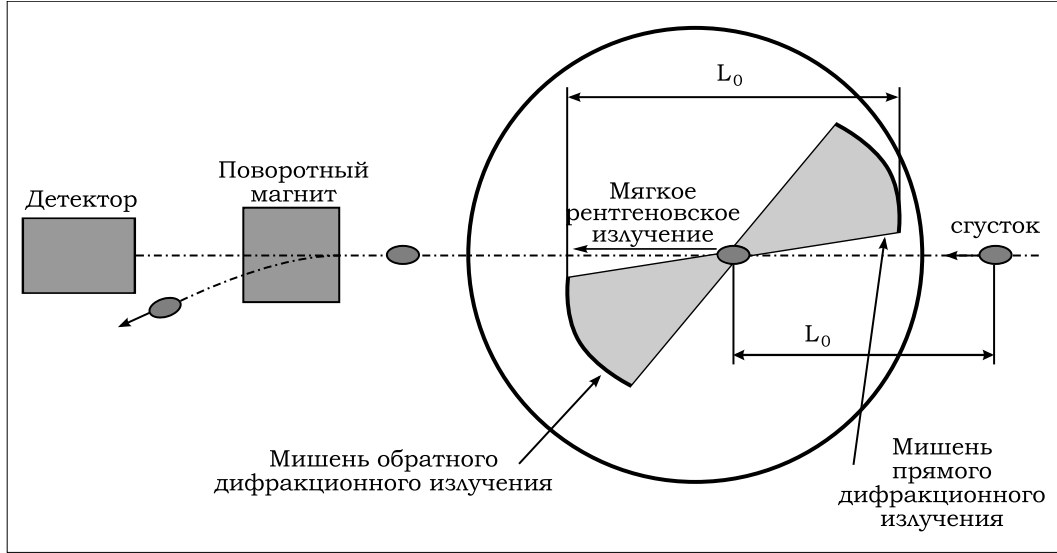


Рис. 12: Схема источника мягкого рентгеновского излучения на основе Томсоновского рассеяния когерентного дифракционного излучения на электронных сгустках.

Третья глава посвящена расчёту характеристик излучения от компактного источника в субмиллиметровом и мягком рентгеновском диапазонах.

В *разделе 3.1* рассмотрена схема, показанная на рисунке 12, которая предполагает использование когерентного дифракционного излучения миллиметрового диапазона, которое могло бы, рассеиваясь на электронных сгустках, генерировать мягкое рентгеновское излучение.

В *разделе 3.2* проведён расчёт характеристик когерентного дифракционного излучения от одной полупараболической мишени для параметров ускорителя “проект LUCX”, который создается в лаборатории КЕК-ATF (Цукуба, Япония) ($\gamma = (90, 150)$, $N_e = 1,87 \cdot 10^{10}$, $n_b = 100$, $f = 1$ Гц, $\sigma_z = 0,3$ мм). Показано, что средняя за секунду мощность в диапазоне $\lambda \leq 1$ мм в аперттуру $d\Omega = d\theta_x d\theta_y = 50 \times 50$ мрад² составляет 88 мВт ($\gamma = 90$). Соответствующая величина за время макроимпульса, которое составляет 280 нс (100 сгустков, расстояние между сгустками 2,8 нс), соответственно равна 315 кВт.

В *разделе 3.3* проведён расчёт характеристик мягкого рентгеновского излучения, генерируемого при рассеянии когерентного дифракционного излучения от сгустка на последующем сгустке. Показано, что например, для $\gamma = 150$ число фотонов в диапазоне энергий $\hbar\omega_{ph} = 170,1 \pm 0,9$ равно $N_{ph} = 97,3$ фотонов/сгусток, что является неплохим показателем. Кроме того показано, что выход рентгеновского излучения пропорционален кубу числа электронов в сгустке.

В Заключение излагаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Впервые экспериментально обнаружена фокусировка оптических (некогерентных) переходного и дифракционного излучений, генерируемых ультррелятивистским электронным пучком в сферической мишени, расположенной в предволновой зоне, т.е. увеличение интенсивности излучений от сферической мишени, по сравнению с характеристиками излучения от плоской мишени в соответствующих условиях (в 1,3 раза для переходного и 2,5 раза для дифракционного излучений). Показано, что из-за наклона сферической мишени относительно траектории движения электрона возникает астигматизм, т.е. две поляризационные компоненты фокусируются на разных расстояниях.
2. Впервые экспериментально показана фокусировка когерентного переходного излучения и излучения Смита–Парселла, генерируемых умеренно релятивистским электронным пучком в параболических мишенях, расположенных в существенно предволновой зоне, т.е. увеличение мощности излучений от параболических мишеней, по сравнению с характеристиками излучения от плоских мишеней в соответствующих условиях (в 4 раза для переходного, 3 раза для излучения Смита–Парселла).
3. Предложена оригинальная схема источника мягкого рентгеновского и субмиллиметрового излучения на основе Томсоновского рассеяния когерентного дифракционного излучения, генерируемого электронным пучком в открытом резонаторе, состоящем из двух полупараболических мишеней, на последующих электронных сгустках.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

- a. Focusing of optical transition and diffraction radiation by a spherical target / L.G. Sukhikh, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, A.S. Aryshev, J. Urakawa, P.V. Karataev, S.T. Boogert // Proceedings of DIPAC 2007. – Venice (Mestre), Italy: 2007.– <http://felino.elettra.trieste.it/papers/ WEPB13.pdf>.
- b. Observation of focusing effect in optical transition and diffraction radiation generated from a spherical target/ L. G. Sukhikh, A. S. Aryshev, P.V. Karataev, G. A. Naumenko, A. P. Potylitsyn, N. Terunuma,² and J. Urakawa // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. - 2009. - Т. 12. - 071001
- с. Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах / Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын,

- Г.А. Саруев, Л.Г. Сухих, В.А. Ча // Письма в ЖЭТФ.— 2006.— Т. 84, № 3.— 136–140 с.
- d. Focusing of transition radiation from a paraboloidal target / G.A. Naumenko, V.A. Cha, B.N. Kalinin, Yu.A. Popov, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, L.G. Sukhikh // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2008. – Vol. 266. – Pp. 3733–3737.
- e. Angular distribution of coherent transition radiation from 6 MeV electron beam / V. A. Cha, B. N. Kalinin, E. A. Monastirev, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, L.G. Sukhikh // Proceedings of International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena II.— Vol. 6634.— SPIE, 2007.— Pp. 663416–663420. <http://link.aip.org/link/?PSI/6634/663416/>.
- f. Generation of soft X-ray radiation using Thomson scattering of coherent diffraction radiation by a short electron bunch / A.P. Potylitsyn, A.S. Kostousov, L.G. Sukhikh, A.S. Aryshev, J. Urakawa, S.T. Boogert, P.V. Karataev // Proceedings of RuPAC 2006. – Novosibirsk, Russia: 2006. – <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r06/PAPERS/MONO07.PDF>.

Список литературы

- [1] М.И. Рязанов, И.С. Тилинин. Переходное излучение ультрарелятивистской частицы от искривленной поверхности раздела сред // ЖЭТФ.— 1976.— Т. 71, № 6(12). — 2078–2084 с.
- [2] P. Karataev. Pre-wave zone effect in transition and diffraction radiation: Problems and solutions // *Physics Letters A*. — 2005. — Vol. 345. — 428 pp.
- [3] R. O. Rezaev, A. P. Potylitsyn. Focusing of transition radiation and diffraction radiation from concave targets // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. — 2006. — Vol. 252. — 44–49 pp.
- [4] Д.В. Карловец, А.П. Потылицын. Излучение Смита-Парселла в “предволновой” зоне // Письма в ЖЭТФ.— 2006.— Т. 84, № 9.— С. 579–583.
- [5] Д.В. Карловец, А.П. Потылицын. К теории дифракционного излучения // ЖЭТФ.— 2008.— Т. 134, № 5.— С. 887–901.
- [6] Observation of Incoherent Diffraction Radiation from a Single-Edge Target in the Visible-Light Region / T. Muto, S. Araki, R. Hamatsu et al. // *Physical Review Letters*. — 2003. — Vol. 90, no. 10. — 104801 pp.