

На правах рукописи

Шевелев Михаил Викторович

Исследование свойств когерентного излучения
релятивистских электронов в макроскопических структурах
для создания средств диагностики пучков

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Науменко Геннадий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор
Эпп Владимир Яковлевич

доктор физико-математических наук
профессор
Шведунов Василий Иванович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится “21” февраля 2012 г. в __ час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2 а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2012 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 проблемы.

В последние несколько лет ведутся интенсивные работы по созданию современных ускорителей на встречных пучках (проекты ILC, CLIC) и рентгеновских лазеров на свободных электронах. Для получения необходимой яркости в точке столкновения эти проекты предполагают получение пучков с продольными размерами сгустков порядка 50-1000 фс. Измерение длины таких сгустков является актуальной и сложной задачей. При этом особый интерес представляют так называемые невозмущающие методы диагностики, т.е., методы, которые слабо изменяют характеристики анализируемого пучка. Излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ) является одним из перспективных направлений решения этой задачи.

В традиционном представлении эффект Вавилова-Черенкова состоит в том, что электрический заряд, движущийся в среде без частотной дисперсии с постоянной скоростью v , излучает электромагнитные волны с непрерывным спектром и со специфическим угловым распределением. При этом излучение имеет место только, если скорость заряда v превышает фазовую скорость света в рассматриваемой прозрачной среде. Упомянутая специфичность углового распределения заключается в следующем: волновой вектор излучаемых волн k образует со скоростью v угол θ , причем $\cos \theta = \frac{c}{n \cdot v}$, где n – показатель преломления среды. В оптическом диапазоне ИВЧ является предметом многих прикладных и экспериментальных работ. Однако экспериментальные исследования ИВЧ в миллиметровом диапазоне длин волн до последнего времени носили разрозненный характер. Наше внимание к миллиметровому ИВЧ было вызвано возможностью использования его в невозмущающей диагностике релятивистских пучков современных ускорителей. В миллиметровом диапазоне длин волн при

использовании коротких релятивистских электронных сгустков с Лоренц-фактором ~ 10 и выше, область взаимодействия ($\sim \gamma\lambda$, где λ – длина волны регистрируемого излучения) существенно увеличивается по сравнению с нерелятивистскими или умеренно релятивистскими пучками, и реализуется случай, при котором ИВЧ может генерироваться без прямого взаимодействия заряженных частиц со средой. Поэтому исследование миллиметрового ИВЧ в плане возможности использования его в диагностике пучков релятивистских частиц является весьма привлекательным, поскольку в этом случае диагностика, основанная на ИВЧ, является практически невозмущающей. Переход из миллиметровой области в ТГц область частот возможен масштабированием установок, что делает миллиметровый диапазон удобным для проведения предварительных экспериментов перед внедрением в ТГц диапазоне.

С другой стороны в последнее десятилетие проводятся интенсивные фундаментальные исследования в области генерации и применения излучения в ТГц диапазоне. Это излучение обладает рядом уникальных особенностей для применения в спектрометрии и диагностике различных сред, в биологических исследованиях (вследствие неионизирующего характера излучения), для разработки систем связи нового поколения и систем безопасности, для радиокосмических исследований. При продольных размерах электронного сгустка меньших, чем длина волны излучения реализуется когерентный механизм, при котором мощность излучения пропорциональна квадрату числа электронов в сгустке. Учитывая, что в современных линейных ускорителях населенность сгустка составляет $\sim 10^{10}$ электронов при длине сгустка $\sim 0,1$ мм, когерентный механизм позволяет получать ТГц излучение относительно высокой мощности при малых размерах ускорителя. В качестве механизма генерации может быть выбрано ИВЧ.

Цель работы.

Экспериментальное исследование характеристик когерентного излучения Вавилова-Черенкова, как частного случая поляризационного излучения, возникающего при пролете сгруппированного пучка релятивистских электронов вблизи диэлектрической мишени, и создание метода невозмущающей диагностики пучков заряженных частиц на основе когерентного излучения Вавилова-Черенкова.

Научная новизна работы.

Впервые проведены экспериментальные исследования миллиметрового когерентного излучения Вавилова-Черенкова в дальней волновой зоне, генерируемого умеренно релятивистским электронным сгруппированным пучком при пролёте вблизи призматической диэлектрической мишени.

Впервые экспериментально обнаружен эффект одновременной генерации излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения в призматической диэлектрической мишени при прохождении электронов вблизи мишени.

Впервые предложена методика невозмущающего измерения продольного размера сгустков релятивистских электронов, основанная на использовании миллиметрового когерентного излучения Вавилова-Черенкова.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований миллиметрового когерентного излучения Вавилова-Черенкова в дальней волновой зоне,

при пролёте сгруппированного пучка электронов рядом с призматической диэлектрической мишенью.

2. Экспериментальное обнаружение эффекта одновременной генерации излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения в диэлектрической мишени при прохождении электронов вблизи мишени.
3. Методика невозмущающего измерения продольного размера электронных сгустков с использованием когерентного излучения Вавилова-Черенков.
4. Результаты исследования спектральной дисперсии диэлектрических материалов: тефлона и парафина.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в проведении теоретического анализа характеристик исследуемого излучения, непосредственном участии в постановке задач экспериментов, подготовке экспериментов, проведении измерений, обработке полученных данных и формулировке основных выводов. Результаты, опубликованные в работах [a-g] и представленные в докладах на конференциях получены при основном участии автора.

Апробация работы

Основные результаты обсуждались и докладывались на

- XII и XI международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (МГУ, г. Москва, Россия, 2009, 2010);
- III Российской научно-практической конференции с международным участием «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения» (НИИ ЯФ г. Томск, Россия, 2009);

- III и IX международном симпозиуме «Излучение релятивистских электронов в периодических структурах» (МИФИ, г. Звенигород, Россия, 2009, Royal Holloway University of London, г. Игхем, Великобритания, 2011);
- XV и XVII международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, Россия, 2009, 2011);
- IV международной конференции «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» (г. Феррара, Италия, 2010);
- семинарах ФТИ ТПУ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 66 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 87 страниц. Работа содержит 3 таблицы и 54 рисунка.

Содержание работы

Во Введении кратко описано состояние современных исследований в данной области науки, обосновывается актуальность работы, ставится цель и описывается структура общего содержания работы.

Первая глава посвящена теоретическим основам генерации ИВЧ, как частного случая поляризационного излучения. В приближениях, соответствующих условиям экспериментов получены простые аналитические выражения для сравнения с экспериментальными результатами. Согласно этим расчетам при пролете умеренно релятивистского электрона вблизи диэлектрической мишени будет генерироваться излучение (см. рис.1.), которое по своим основным свойствам будет соответствовать ИВЧ в

традиционном представлении (при пролете электрона в диэлектрической среде). Интенсивность излучения в максимуме углового распределения при изменении прицельного параметра h (расстояния между мишенью и траекторией электрона) убывает экспоненциально.

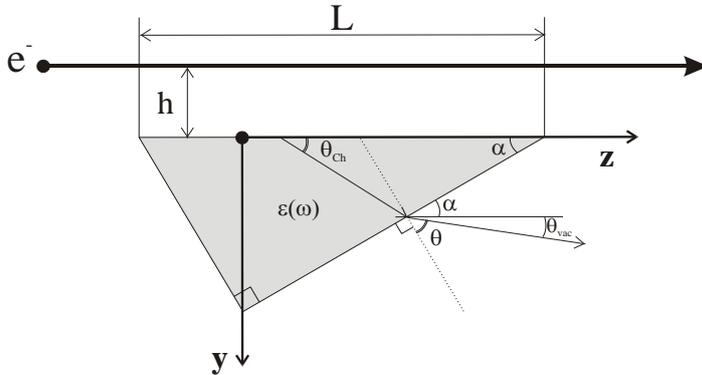


Рис.1. Схема генерации ИВЧ.

В разделе 1.1 ИВЧ рассматривается в приближении генерации излучения отдельными релятивистскими заряженными частицами. На практике в виду периодичности и цикличности процесса ускорения частиц до релятивистских энергий, они обычно сгруппированы в сгустки с размерами, зависящими от технической базы ускорителя. Учет коллективных эффектов может внести существенное отличие в спектрально-угловые свойства излучения. Как известно, интенсивность излучения зависит квадратично от величины q заряда релятивистской частицы $W \sim q^2$. Интенсивность N отдельных электронов складывается так, что $W \sim Ne^2$, где e – заряд электрона. Рассмотрим теперь излучение сгустка очень малого размера (в пределе бесконечно малого), состоящего из N электронов и суммарным зарядом $Ne = q$. Излучение заряда будет $W \sim q^2 = N^2e^2$. Отсюда следует, что интенсивность излучения такого сгустка в N раз больше суммарной интенсивности излучения N отдельных электронов. Учитывая, что в пучках современных ускорителей $N \approx 10^8 \div 10^{11}$ частиц, этот эффект (эффект когерентности) имеет очень большое значение. Часто интенсивность когерентного излучения удаётся представить как $W_{tot} = W_s(1 + N_e f^2(\sigma, \lambda))N_e$, где W_s – интенсивность излучения от одного электрона, N_e – число электронов в сгустке, σ – набор параметров, определяющих геометрию электронного

сгустка, λ – длина волны излучения, f – функция перехода от некогерентного к когерентному характеру излучения и называемая, обычно, структурный форм-фактор сгустка. В связи с этим в *разделе 1.2* проведён теоретический анализ когерентного ИВЧ, показывающий, что интенсивность излучения в геометрии, когда сгусток электронов движется вблизи диэлектрической мишени, определяется в основном продольным форм-фактором сгустка, т.е. интенсивность излучения зависит только от продольного размера сгустков.

При исследовании ИВЧ необходимо знать точное значение коэффициента преломления, используемых диэлектрических мишеней. В справочной литературе хорошо представлен субмиллиметровый диапазон (приведены зависимости значения коэффициента преломления от длины волны излучения). Для миллиметрового диапазона обычно приводят значения показателя преломления для одной длины волны, причем данные из разных источников, могут существенно отличаться друг от друга.

Поэтому во **второй главе** описан простой метод измерения спектральной дисперсии диэлектрических веществ в миллиметровом диапазоне длин волн. В *разделе 2.1* приведены описание метода, основанного на процессе распространения излучения на границе двух сред с различными диэлектрическими свойствами, и схемы экспериментальной установки для измерения коэффициента преломления диэлектрических мишеней. Схема проведенного эксперимента представлена на рисунке 2. Источник излучения расположен в фокусе параболического зеркала №1 для формирования параллельного пучка излучения, которое направляется на дифракционную решётку (монокроматор) для выделения спектральной линии с заданной длиной волны. Для обеспечения необходимого спектрального разрешения фотонного пучка излучение от дифракционной решетки пропускается через коллиматор, который состоит из двух параболических зеркал (№2 и №3) и экрана с отверстием в центре. Экран, расположенный в фокусе параболических зеркал, выполнен из поглощающего материала и имеет

размеры 210×210 мм, диаметр отверстия в центре экрана равен 25 мм. В результате на призму падает параллельный пучок монохроматического излучения, которое, проходя через призму, регистрируется детектором, расположенным в фокусе параболического зеркала №4. Для увеличения углового разрешения входная апертура детектора была уменьшена с помощью запредельного волновода с диаметром отверстия 15 мм. Все параболические зеркала выполнены из меди. Размеры и фокусные расстояния параболических зеркал приведены на рисунке 2.

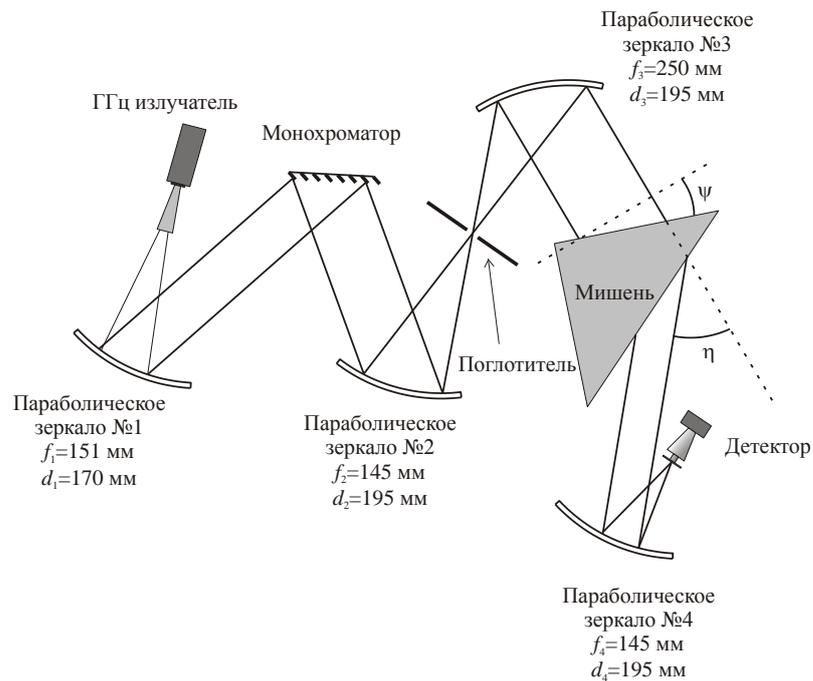


Рис.2. Схема экспериментальной установки для измерения коэффициента преломления диэлектрических мишеней.

В разделе 2.2 приведены полученные экспериментальные результаты для диэлектрических мишеней, выполненных из тефлона и парафина, и проведено их сравнение с результатами измерений других авторов. Полученные значения коэффициентов преломления позволили выбрать подходящую геометрию мишеней и схему экспериментов по исследованию характеристик ИВЧ.

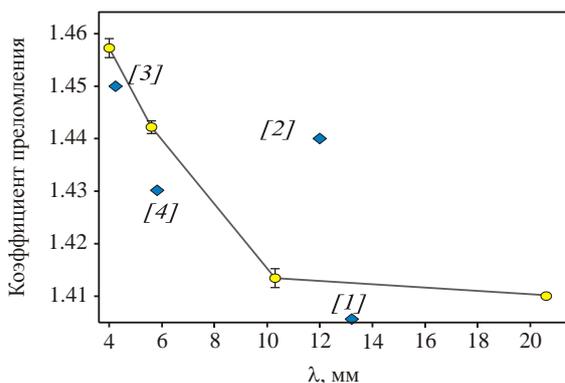


Рис.3. Измеренная зависимость коэффициента преломления тефлона от длины волны излучения. Круглые точки – экспериментальные данные; квадратные точки – экспериментальные данные, полученные другими авторами; в квадратных скобках указана ссылка на работу.

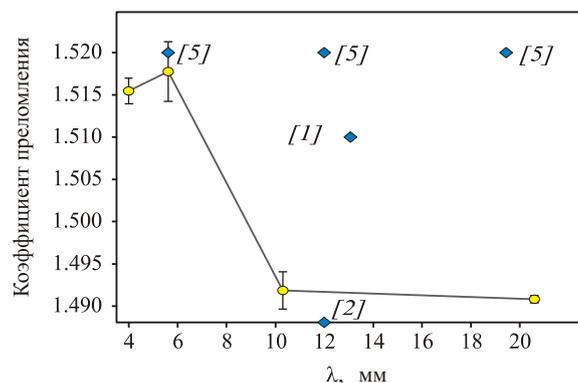


Рис.4. Измеренная зависимость коэффициента преломления парафина от длины волны излучения. Круглые точки – экспериментальные данные; квадратные точки – экспериментальные данные, полученные другими авторами; в квадратных скобках указана ссылка на работу.

Третья глава посвящена исследованию миллиметрового когерентного ИВЧ, генерируемого сгруппированным пучком умеренно релятивистских электронов, пролетающих вблизи призматической диэлектрической мишени. *Раздел 3.1* посвящен описанию экспериментальной установки на выведенном пучке микротрона ФТИ ТПУ. Схема эксперимента приведена на рисунке 5.

Электроны ускоряются в микротроне до энергии $E_e = 6,1$ МэВ. Макроимпульс электронов, состоящий из $n \approx 10^4$ сгустков, продолжительностью $\tau = 4$ мкс с частотой $f = 6$ Гц выводится через бериллиевое окно толщиной 50 мкм и пролетает вблизи находящейся в воздухе мишени. Ток пучка измеряется цилиндром Фарадея. Максимальная населенность электронного сгустка $N_e \approx 10^8$ электронов. Поперечные размеры электронного сгустка на выходе из тракта 4×4 мм², характерная длина сгустка в Гауссовом приближении $\sigma_z = 2,4$ мм (среднеквадратичное отклонение). Для исключения влияния эффекта предволновой зоны измерение углового распределения излучения проводилось с помощью параболического телескопа по методике, описанной в работе [6]. Детектор

установлен в фокусе параболического отражателя, размещённого на штанге, которая вращается вокруг оси, проходящей через середину передней стороны мишени (см. рис.5.). В этом случае угловые характеристики измеренного излучения не отличаются от характеристик излучения в дальней зоне. Для подавления фона ВЧ системы ускорителя на входе детектора был установлен заградительный волновод, пропускающий излучение с длиной волны $\lambda < 34$ мм.

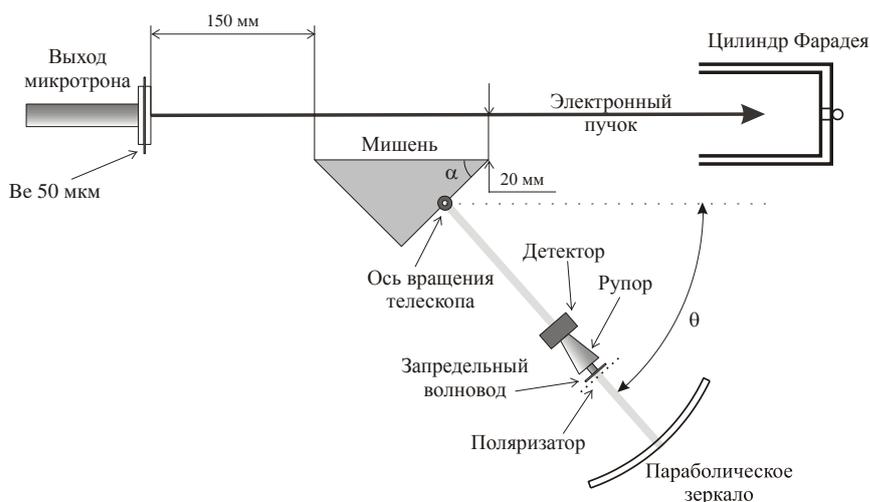


Рис.5. Схема экспериментов по исследованию когерентного ИВЧ.

В качестве детектора использовался детектор DP-21M1 на основе широкополосной микрополосковой антенны с низкобарьерным детекторным СВЧ диодом. Детектор позволяет регистрировать излучение в области длин волн от 3 до 20 мм. Средняя чувствительность в области длин волн от 11 до 17 мм составляет 0,3 В/Вт. В данном диапазоне длин волн излучение сгустка электронов является когерентным.

В ходе экспериментов по исследованию когерентного ИВЧ использовались две мишени, выполненные из тефлона и парафина. Обе мишени имели форму прямой призмы, в основании которой лежит прямоугольный треугольник. Размеры и геометрия мишеней представлены в таблице 1.

Таблица 1. Размеры и геометрия мишеней.

Материал	Высота	Длина	Угол α (см. рис.5.)
тефлон	74 мм	248 мм	45°
парафин	80 мм	254 мм	40°

В разделах 3.2 и 3.3 приведены основные результаты экспериментов и проведено сравнение с теоретическими расчётами. В результате проведения основного эксперимента были получены угловые распределения горизонтальной компоненты поляризации ИВЧ для различных материалов мишени.

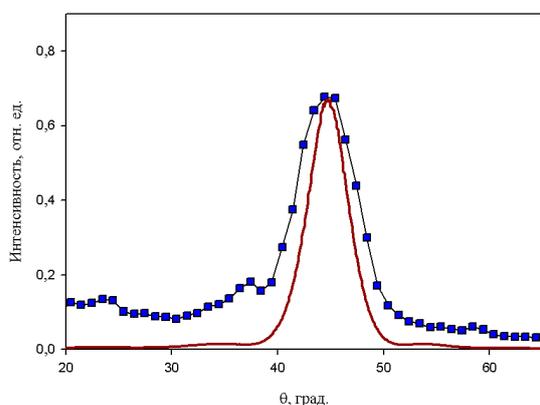


Рис.6. Угловое распределение излучения, генерируемое тефлоновой мишенью, $\alpha = 45^\circ$ (см. рис.5.). Точки – экспериментальные данные; линия – теоретический расчёт.

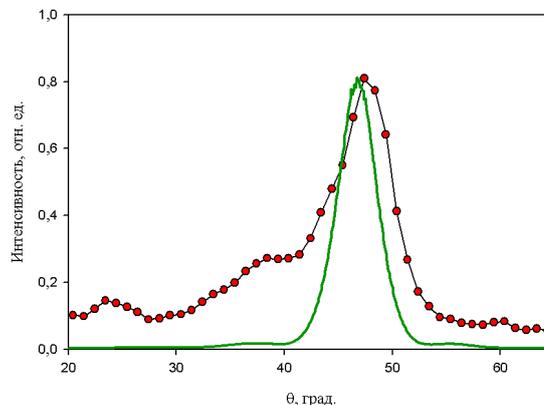


Рис.7. Угловое распределение излучения, генерируемое парафиновой мишенью, $\alpha = 40^\circ$ (см. рис.5.). Точки – экспериментальные данные; линия – теоретический расчёт.

Положение пика и горизонтальная поляризация хорошо подтверждают теоретические предсказания. Экспериментально измеренное распределение шире теоретического, что может быть вызвано влиянием неучтённых при расчетах параметров, таких как расходимость электронного пучка в воздухе и угловое разрешение параболического телескопа. Излучение в области малых углов объясняется вкладом отраженного поля излучения от внутренних граней мишени.

Для подтверждения когерентного характера излучения было произведено измерение зависимости интенсивности излучения от величины среднего тока в макро-импульсе, измеряемого цилиндром Фарадея (см. рис. 8.). Экспериментальная зависимость была аппроксимирована функцией вида $y = A + B \cdot J^C$, где J – ток пучка. В результате была получена квадратичная зависимость, что подтверждает когерентную природу излучения.

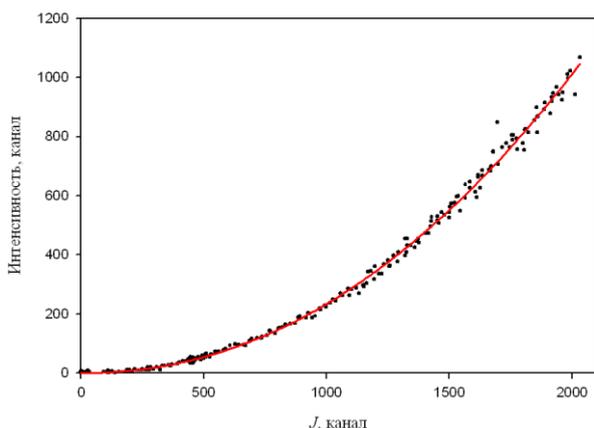


Рис.8. Интенсивность излучения как функция среднего тока электронного пучка J в импульсе. Точки – экспериментальные данные; линия – аппроксимация $y = A + B \cdot J^C$, где $A = 17,52 \pm 1,22$, $B = 10^{-4} \pm 1,44 \cdot 10^{-5}$, $C = 2,08 \pm 0,01$.

На рисунке 9 представлен спектр регистрируемого излучения в максимуме углового распределения. Для спектральных измерений использовались волновые фильтры, основанные на методике предложенной в [7].

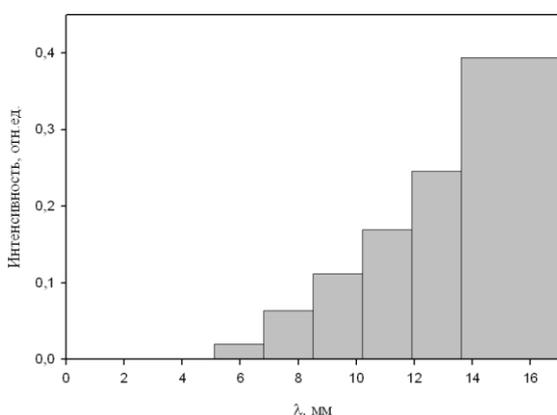


Рис.9. Экспериментально измеренный спектр в максимуме углового распределения.

На рисунке 10 приведена полученная зависимость выхода когерентного ИВЧ от прицельного параметра при параллельном пролете сгустка электронов вблизи мишени, где значение $h = 0$ соответствует центру электронного пучка.

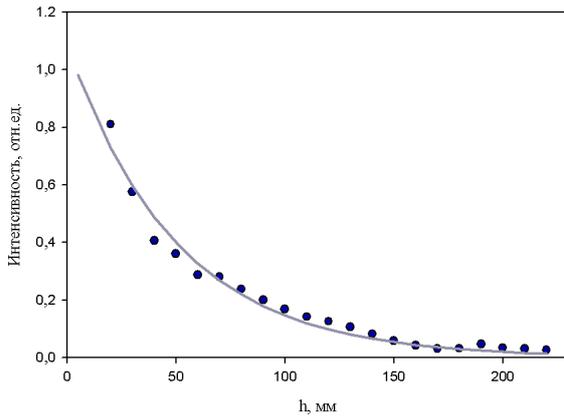


Рис.10. Зависимость интенсивности излучения в максимуме углового распределения. Точки – экспериментальные данные; линия – теоретический расчет.

По аналогии с переходным излучением, при взаимодействии поля электрона с диэлектрической мишени следует ожидать, что будет возникать и дифракционное излучение, распространяющееся внутри мишени в направлении движения электрона. Возможность генерации ИВЧ и дифракционного излучения (ДИ) при пролете электрона вблизи мишени, обладающей произвольной проводимостью и спектральной дисперсией, была теоретически рассмотрена в работе [8]. В *разделе 3.4* представлены экспериментальные результаты регистрации ИВЧ и ДИ в миллиметровом диапазоне, которые одновременно генерируются в мишени с конечной диэлектрической проницаемостью. Схема эксперимента представлена на рисунке 11. В эксперименте использовалась мишень, выполненная из тефлона.

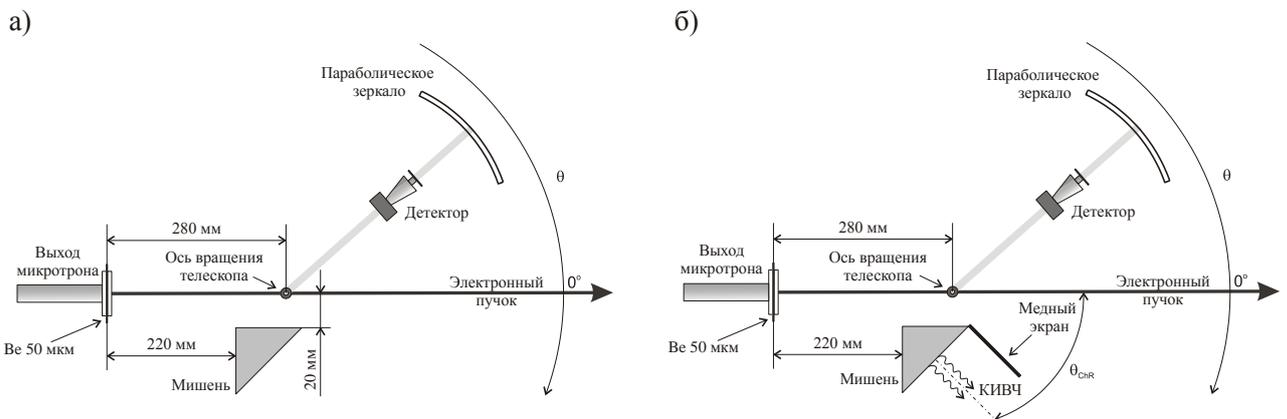


Рис.11. Схема экспериментальной установки. а) – измерение углового распределения ДИ вперед и ИВЧ. б) – измерение углового распределения ИВЧ в случае, когда излучение от выходной поверхности мишени перекрыто медным экраном.

На рисунке 12 черными кружками представлена измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения. Угол $\theta = 0^\circ$ соответствует направлению движения электронного пучка, пик под углом $\theta = 44,5^\circ$ соответствует пику ИВЧ.

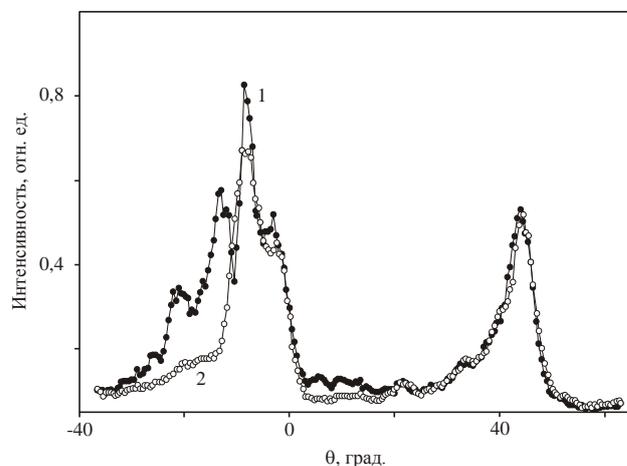


Рис.12. Измеренные зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения для разных геометрий эксперимента: 1 – по схеме (а) на рис.11.; 2 – по схеме (б) на рис.11.

Согласно [9] ИВЧ в верхнее полупространство (см. рис.11.) через горизонтальную поверхность призмы, параллельную траектории пучка, должно отсутствовать. Однако в эксперименте наблюдается выход когерентного излучения в верхнее полупространство (для отрицательных углов θ).

Для выяснения природы излучения в диапазоне углов θ от -25° до 0° непосредственно за тефлоновой мишенью был установлен экран, как это показано на рисунке 11б. Измеренное в этой геометрии угловое распределение интенсивности излучения показано на рисунке 12 полыми кружками. Из полученных результатов следует, что разность между этими распределениями представляет собой излучение, распространяющееся от задней грани тефлоновой мишени. Предположим, что это излучение является ДИ от передней грани мишени, распространяющееся в направлении движения электронов и преломлённое при выходе из мишени, а излучение в диапазоне углов θ от -10° до 0° есть излучение, обусловленное дифракцией поля электронов в материале мишени, а также обратным переходным излучением от зеркала телескопа.

Для подтверждения этого предположения были проведены аналогичные измерения на пучке от источника электромагнитного излучения с длиной волны 10,3 мм. На рисунке 13 показана схема эксперимента. Источник излучения расположен в фокусе параболического зеркала для формирования параллельного пучка излучения, которое направляется на мишень под прямым углом к передней грани мишени. Остальная часть схемы совпадает со схемой измерения на электронном пучке.

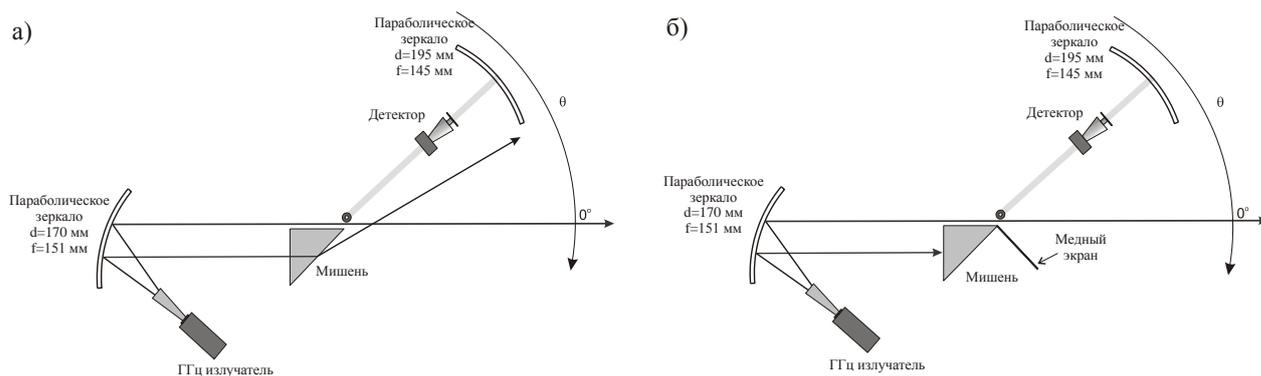


Рис.13. Экспериментальная установка. а) – измерение углового распределения излучения вперед. б) – измерение углового распределения излучения в случае, когда излучение от выходной поверхности мишени перекрыто медным экраном.

На рисунке 14 приведены угловые распределения интенсивности излучения при взаимодействии пучка с диэлектрической мишенью. Сравнивая угловые зависимости для разных схем эксперимента (см. рис. 13а и рис. 13б) можно определить пик, который соответствует излучению, прошедшему через призму и преломлённому на её задней грани. Экспериментальные кривые на реальных фотонах хорошо согласуются с измерениями, полученными в эксперименте на электронном пучке.

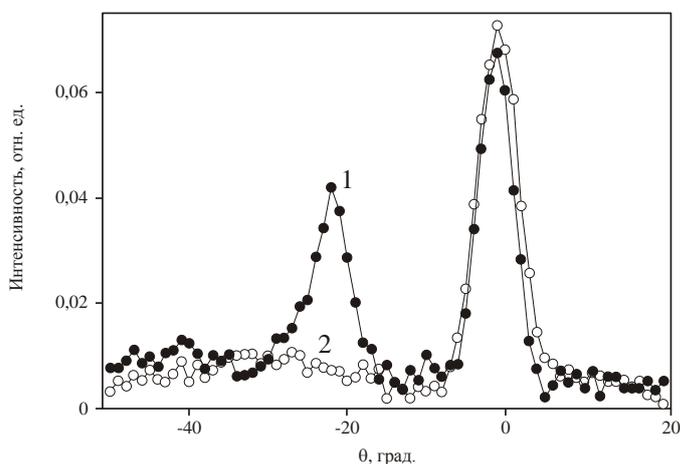


Рис.14. Измеренные зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения для разных геометрий эксперимента: 1 – по схеме (а) рис.13.; 2 – по схеме (б) рис.13.

Результаты этих измерений подтверждают предположение о том, что в результате взаимодействия электромагнитного поля частицы с диэлектрической мишенью кроме ИВЧ генерируется и ДИ от передней грани мишени.

В **четвёртой главе** представлены результаты исследований по развитию средств невозмущающей диагностики пучков с использованием когерентного ИВЧ. В *разделе 4.1* рассмотрена схема простой реализации невозмущающей диагностики на основе ИВЧ, в которой функции интерферометра для измерения длины электронных сгустков выполняет сама мишень Черенковского излучения.

На рисунке 15 показана схема ИВЧ составной мишенью. Напряженности поля ИВЧ релятивистских электронов для рассматриваемой схемы можно записать в виде $E = E_1 + E_2$, где E_1 – напряженность поля от сегмента №1; E_2 – от сегмента №2. Приведенное выражение записано для случая, когда оба сегмента излучают в фазе. Если один из сегментов, например сегмент №2, сдвинут в направлении z на расстояние δ , то необходимо учитывать фазовый множитель $\cos\left(2\pi \frac{\delta}{L} \left[\frac{1}{\beta} - \sin \alpha\right]\right)$, причем суммарная напряженность регистрируемого излучения и его дифференциальная интенсивность будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} E = E_1 + E_2 \cos\left(2\pi \frac{\delta}{L} \left[\frac{1}{\beta} - \sin \alpha\right]\right) \\ \frac{dW}{\hbar d\omega d\Omega} = \frac{cr^2}{\hbar} |E|^2 \end{array} \right.$$

Таким образом, изменение δ приведет к изменению фазового множителя и, как следствие, к сдвигу максимума в угловом распределении.

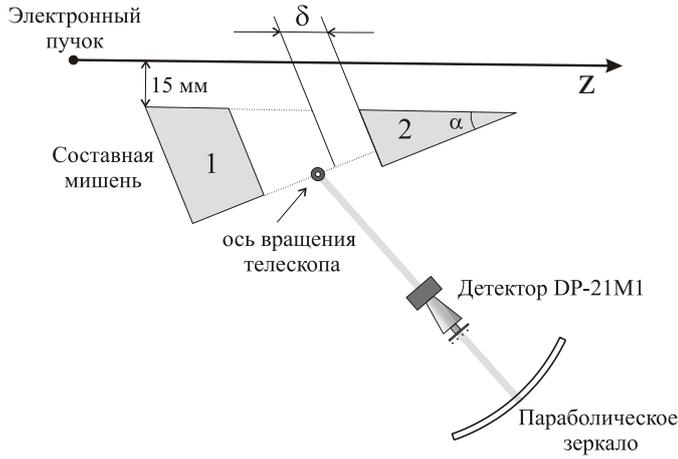


Рис.15. Схема измерения длины электронных сгустков

Интенсивность когерентного ИВЧ в рассматриваемой геометрии зависит только от продольного распределения электронов в сгустке и может быть записана как $\frac{dW_{coh}}{d\omega d\Omega} = N_e^2 \frac{dW_s}{d\omega d\Omega} |f_z(\omega \cdot \sigma_z)|^2$, где $\frac{dW_s}{d\omega d\Omega}$ – плотность интенсивности некогерентного ИВЧ, N_e^2 – число электронов в сгустке; $f_z(\omega \cdot \sigma_z)$ – геометрический продольный форм-фактор электронного сгустка; σ_z – параметр длины сгустка в распределении электронов.

В приближении Гауссова распределения электронов в сгустке форм-фактор для ИВЧ при пролете сгустка рядом с диэлектрической мишенью имеет вид: $f_z = e^{-\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{2c^2 \beta^2}}$.

Изменяя расстояние δ можно получить интерферограмму $P(z)$, отражающую спектральные свойства регистрируемого излучения, причем область $\delta=0$ определяется коротковолновой частью спектра, которая формируется когерентными свойствами излучения электронного сгустка и зависит от его продольного размера.

Простейшая модельная оценка, основанная на теории размерности и подобия [10], показывает, что для измерения длины электронного сгустка

можно использовать следующие критерии: $\tau = \frac{P(0) - P(\delta_1)}{-\frac{dP}{d\delta}(\delta_1)}$, $\rho = \frac{[\frac{dP}{d\delta}(\delta_2)]^2}{P(\delta_2) \frac{d^2 P}{d\delta^2}(\delta_2)}$,

где δ_1 – значение величины δ в минимуме первой производной $P(\delta)$; δ_2 – значение величины δ в максимуме второй производной $P(\delta)$. Тогда оценка длины электронного сгустка представляется в виде $\tilde{\sigma}_z = F(\tau, \rho)$.

Для экспериментальных условий функция $F(\tau, \rho)$ определялась численно и была аппроксимирована функцией вида $F(\tau, \rho) = a \cdot \tau \cdot \exp[-\frac{\rho}{b}]$. В результате получена зависимость $F(\tau, \rho) = 0,65 \cdot \tau \cdot \exp[-\frac{\rho}{0,78}]$.

На рисунке 16 приведена экспериментально измеренная интерферограмма, полученная при измерении зависимости интенсивности излучения в максимуме углового распределения от сдвига δ .

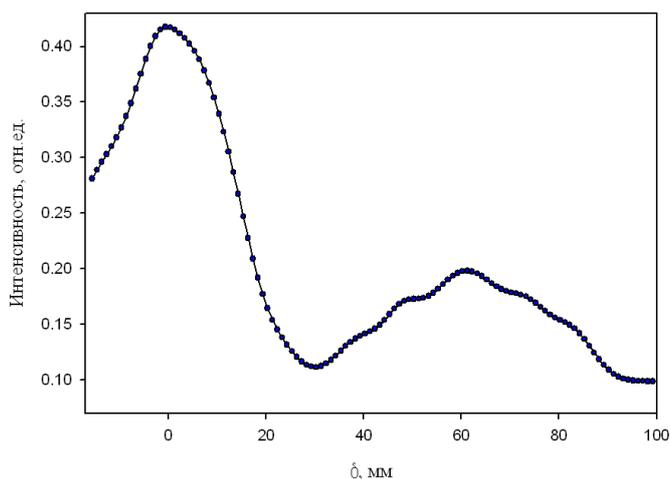


Рис.16. Экспериментально измеренная интерферограмма. Мишень выполнена из парафина, угол $\alpha = 45^\circ$ (см. рис.15.).

Оценка длины электронных сгустков по измеренной интерферограмме даёт $\sigma_z = 2,45 \pm 0,3$ мм. Для сравнения, длина электронного сгустка, измеренная на том же самом электронном пучке с использованием когерентных эффектов ДИ по методике, изложенной в [b], составляет $\sigma_z = 2,4 \pm 0,2$ мм.

В заключении излагаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Впервые измерены характеристики миллиметрового когерентного излучения Вавилова-Черенкова в дальней волновой зоне, при пролете сгруппированного пучка электронов рядом с диэлектрической мишенью. Показано, что экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с расчетом, выполненным методом поляризационных токов, что объясняется приближениями, сделанными при теоретическом расчёте.
2. Впервые экспериментально обнаружен эффект одновременной генерации излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения в диэлектрической мишени при прохождении сгруппированного пучка электронов вблизи мишени. Показано, что дифракционное излучение возникает на передней грани диэлектрической мишени, распространяется внутри мишени и преломляется на задней грани подобно пучку реальных фотонов.
3. Предложена и апробирована методика невозмущающего измерения продольного размера релятивистских электронных сгустков с использованием когерентного излучения Вавилова-Черенкова без применения внешней спектрометрической аппаратуры.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

- a. *М.В. Шевелев, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Л.Г. Сухих, Ю.А. Попов.* Исследование когерентного излучения Вавилова-Черенкова в миллиметровом диапазоне длин волн при пролете релятивистской частицы вблизи мишени // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 11/2. – 261-265с.
- b. *Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, М.В. Шевелев, Ю.А. Попов, Л.Г. Сухих.* Измерение длины электронных сгустков на основе когерентного

- дифракционного излучения // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 11/2. – 254-260с.
- с. *М.В. Шевелев, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Ю.А. Попов, Л.Г. Сухих.* Измерение спектральной дисперсии диэлектрических мишеней в миллиметровом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 10/2. – 173-177 с.
- d. *A.P. Potylitsyn, Yu. A. Popov, L.G. Sukhikh, G.A. Naumenko, M.V. Shevelev.* Investigation of coherent Cherenkov radiation generated by 6,1 MeV electron beam passing near dielectric target // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – Vol. 236. – 012025 pp.
- e. *М.В. Шевелёв, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Л.Г. Сухих, Ю.А. Попов.* Исследование когерентного излучения Вавилова-Черенкова в миллиметровом диапазоне длин волн, генерируемого в мишенях из тефлона и парафина // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – №4. – 1-5 с.
- f. *M.V. Shevelev, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, Yu.A. Popov, L.G. Sukhikh.* The coherent Vavilov-Cherenkov radiation for a bunch length diagnostic. // IL NUOVO CIMENTO. – 2011. – Vol. 34 C. – No. 4. – 297-304 pp.
- g. *Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, М.В. Шевелёв, Ю.А. Попов.* Обнаружение дифракционного излучения в диэлектрической мишени в условиях генерации излучения Вавилова-Черенкова // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т.94, №4. – 280 с.

Список литературы

1. *R. W Haas, P. W. Zimmerman* // IEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1976. – V. MTT-24. – 882 – 883 pp.
2. *A.R. Von Hippel.* Dielectric materials and applications. – New York, 1954.

3. *K.H. Breeden, A.P. Sheppard* // Radio Science. – 1968. – №2. – 205 pp.
4. *W. Culshaw and M.V. Anderson* // Proc. Inst. Elec. Eng. – 1962. – Part B, Suppl. 23, 109. – 820 – 826 pp.
5. *A.F. Harvey*. Microwave Engineering. – London: academic Press, 1963.
6. *Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын и др.* // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т.84, №3. – 136 с.
7. *K. Hanke, V. Schlott, K. Aulenbacher, et.al.* Beam Diagnostics Using Coherent Transition Radiation at CLIC Test Facility. CERN CLIC Note 298. – 1996.
8. *Д.В. Карловец* // ЖЭТФ. – 2011. – Т.140. – 36 с.
9. *Б.М. Болотовский* // УФН. – 1957. – Т.62, вып. 3. – 201 с.
10. *Л.И. Седов*. Методы подобия и размерности в механике. Москва, «Наука», 1977.