

На правах рукописи



БЛЕКО ВИТОЛЬД ВЛАДИСЛАВОВИЧ

**Излучение Вавилова-Черенкова в
диэлектрических фиберах**

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: **Науменко Геннадий Андреевич**, доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты: **Канарейкин Алексей Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург.

Карловец Дмитрий Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовой теории интенсивных полей физического факультета, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

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

Защита состоится “20” декабря 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2 а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>.

Автореферат разослан “27” октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.05, к.ф.-м.н., доцент

 А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время ускорители заряженных частиц высоких энергий являются основным инструментом для исследования внутренней структуры объектов микромира. Энергия получаемых пучков в ускорителях неуклонно возрастает. Чем больше энергия частиц, тем меньше длина волны. А чем меньше длина волны, тем меньше размеры объектов, которые можно исследовать, но тем больше размеры ускорителей и тем они технически сложнее. Несмотря на то, что каждый из ускорителей предназначен на решение определенных, свойственных именно ему, задач, для успешной работы всех ускорительных комплексов необходимо осуществлять постоянный мониторинг состояния ускоряемого пучка (положение, эмиттанс и др.). Поскольку, в процессе формирования пучка он претерпевает изменения, влияющие на его форму или траекторию, то к качеству пучков, получаемых на современных ускорителях, предъявляют высокие требования. Эффективная и надежная эксплуатация ускорительных установок требует использование прецизионных и надежных систем диагностики пучка, будь то наладка и настройки ускорителя или установка необходимого экспериментаторам режима работы ускорителя. За долгие годы развития средств диагностики пучков заряженных частиц, были созданы различные методики измерения параметров пучка. При этом особый интерес представляют так называемые бесконтактные (невозмущающие) методы диагностики пучков, поскольку эти методы позволяют проводить необходимые измерения профиля пучка без заметного искажения его характеристик. Одним из таких перспективных методов является использование излучения Вавилова-Черенкова индуцированного в массиве волокон. Так, например, в работе [1], авторы предложили использовать массив из волокон для определения поперечного профиля пучка с разрешением порядка нескольких микрон. Следует заметить, что изменение угла изгиба волокна позволяет регулировать соотношение интенсивностей

излучений различного типа. В работе [2] авторы, путем размещения волокон с нулевым углом изгиба вдоль пучка заряженных частиц, наблюдали распространение «чистого» излучения Вавилова-Черенкова по оси волокна.

В действительности процесс распространения излучения вдоль волокна гораздо сложнее, поскольку оно может быть, как одно-модальным, так и мульти-модальным или запрещенным, в зависимости от соотношения между длиной волны рассматриваемого излучения и радиусом волокна.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик излучения Вавилова-Черенкова в миллиметровом диапазоне длин волн, сгенерированного при прохождении релятивистских электронов вблизи диэлектрических волокон.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Создание экспериментальной установки, которая позволяет измерять спектральные и ориентационные характеристики поляризованного излучения, индуцированного в диэлектрических волокнах электронными пучками с энергией 6.1 МэВ.
2. Провести экспериментальные исследования характеристик и механизмов генерации поляризованного излучения от диэлектрических мишеней различной конфигурации.
3. Экспериментально исследовать спектральные распределения и ориентационные зависимости поляризованного излучения, возникающего в диэлектрических волокнах, с целью его возможного применения в невозмущающей диагностике пучков.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты измерений спектрально-угловых и ориентационных зависимостей поляризованного излучения, которое возникает в диэлектрических мишенях различной конфигурации под действием релятивистских электронных пучков промежуточной энергии,

показывающие наряду с вкладом излучения Вавилова-Черенков, значительный вклад дифракционного излучения.

2. Результаты измерений спектральных и ориентационных зависимостей интенсивности поляризованного излучения, индуцированного в изогнутых и прямых фиберах, демонстрирующие соответствие измеренных потерь излучения от радиуса изгиба фибера теоретическим расчётам.
3. Впервые экспериментально показано, что на коротких фиберах генерируются и распространяются затухающие поверхностные волны.
4. Экспериментально показана возможность невозмущающего измерения пространственного положения релятивистских электронных пучков с использованием фиберов.
5. Методика по измерению спектральных характеристик поля электронных сгустков, в заданной точке поперечного сечения.

Научная новизна работы.

Впервые проведены измерения спектральных и ориентационных зависимостей поляризованного излучения, индуцированного в диэлектрических фиберах при прохождении сгруппированного сгустка электронов вблизи и сквозь фибер.

Впервые проведены экспериментальные исследования вклада дифракционного излучения и излучения Вавилова-Черенкова в общие радиационные характеристики поляризованного излучения, возникающего в диэлектрических фиберах.

Впервые экспериментально показано, что на поверхности короткого фибера генерируется и распространяются поверхностные волны.

Впервые исследована возможность использования фиберов в качестве спектрометрической аппаратуры.

Практическая значимость работы.

Результаты настоящей работы по исследованию поляризованного излучения, индуцированного в диэлектрических мишенях различной

конфигурации под действием электронных сгустков, могут быть использованы для создания новых и модернизации уже существующих диагностических станций характеристик пучков заряженных частиц. При этом характеристики пучка не испытывают заметных искажений, что позволяет использовать метод на основе излучения Вавилова-Черенкова в невозмущающей диагностике. Кроме того, выявленные особенности поляризованного излучения, сгенерированного в фиберах, во-первых, позволяют использовать фиберы в качестве монитора положения пучка. Во-вторых, измерять спектральные характеристики поля электронных сгустков в заданной точке поперечного сечения.

Личный вклад автора.

Вклад автора в экспериментальных исследованиях заключался в постановке задач, подготовке экспериментов, проведении измерений и обработке полученных данных с последующей формулировкой основных выводов. Автор принимал активное участие в обсуждении полученных результатов, в представлении их на научных семинарах и подготовке публикаций.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. XIX международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, Россия, 2013);
2. 5th «International Particle Accelerator Conference» (Дрезден, Германия, 2014);
3. VI международная конференция «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» (г. Капри, Италия, 2014);
4. IV международный семинар «Advanced Generation of THz and Compton X-Ray Beams Using Compact Electron Accelerator» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2014);

5. XI International Symposium of «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2015).

Публикации:

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, рекомендованных ВАК [a-h].

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 68 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 82 страницы. Работа содержит 48 рисунков и 1 таблицу.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, проведен краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, приведена цель работы, обозначены решаемые задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации посвящена описанию ускорителя и используемой аппаратуры, которая необходима для проведения экспериментов на пучке релятивистских электронов в миллиметровом диапазоне длин волн. Исследования проводилась на выведенном пучке микротрона ФТИ ТПУ с энергией электронов $E = 6.1$ МэВ. Основные параметры пучка микротрона приведены в таблице 1. Параметры пучка микротрона позволяют использовать когерентные свойства излучения в миллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda > 9$ мм) для исследования характеристик и механизмов генерации поляризационного излучения от диэлектрических мишеней различной конфигурации.

Таблица 1. Параметры выведенного пучка микротрона.

Энергия ускоренных электронов	6.1	МэВ
Размер пучка на выходе из микротрона	4.5×2.5	мм

Расходимость по горизонтали	15×10^{-3}	рад
Расходимость по вертикали	5×10^{-3}	рад

Интерес к исследованиям в миллиметровом диапазоне длин волн связан с тем, что в интересующем диапазоне пространственные характеристики поля электронов становятся макроскопическими и доступными для исследования имеющимся оборудованием.

Для регистрации генерируемого поляризованного излучения от мишеней различной геометрии, был использован детектор DP-21М, работающий при комнатной температуре. Эффективность детектора в области длин волн $\lambda = (8-30)$ мм составляет 0.3 В/Вт.

В ходе экспериментов по исследованию ориентационных и спектрально-угловых характеристик излучения релятивистских электронов от различных диэлектрических мишеней применялся метод с использованием параболического телескопа, описанный в работе [3].

Для тестирования аппаратуры и отладки методики проведения экспериментов был собран тестовый стенд (см. рисунок 1). В качестве источника излучения использовался генератор миллиметрового излучения на основе диода Ганна. Длительность импульса излучения 5 мксек, частота следования импульсов излучения 100 Гц. На собранном стенде тестировались поглощающие экраны S-I и S-II, мишени и т.д.

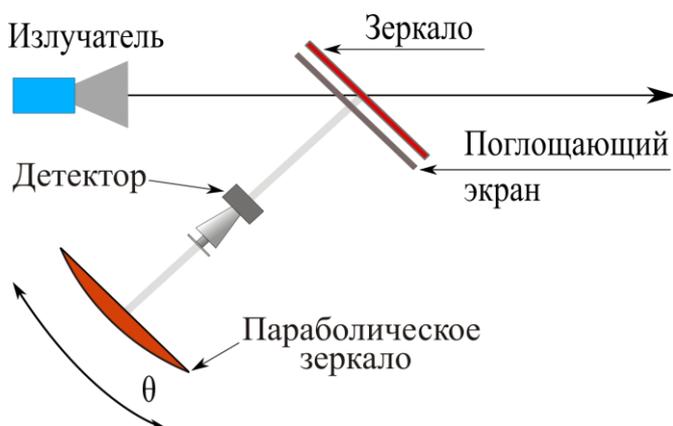


Рисунок 1 – Схема тестирования поглощающих экранов на источнике излучения, выполненного на основе диода Гана.

В целом выработанные рекомендации в ходе выполнения работ на тестовом стенде позволили в дальнейшем избежать ряда критических ошибок при работе на выведенном пучке релятивистских электронов. Кроме

того, полученные результаты в ходе стендовых измерений подтвердили работоспособность выбранной схемы проведения экспериментов.

В завершающей части главы (*раздел 1.2*) обсуждаются полученные результаты.

Вторая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию изучения Вавилова-Черенкова, возникающему при прохождении релятивистских электронных сгустков вблизи диэлектрических мишеней в миллиметровом диапазоне длин волн. В *разделе 2.1* приведены результаты экспериментального измерения характеристик излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения, возникающего при пролёте релятивистских электронов вблизи плоской диэлектрической мишени (см. рисунок 2). В рассматриваемом случае, при прохождении заряженной частицы, возле мишени конечных размеров, кулоновское поле частицы поляризует мишень, индуцируя в среде (мишени) поляризационный ток, который и является источником излучения [4, 5].

Схема проведенного эксперимента представлена на рисунке 2. Сгусток релятивистских электронов распространяется вблизи края мишени на расстоянии $h = 20$ мм. Измерение зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения θ проводились с шагом 1° .

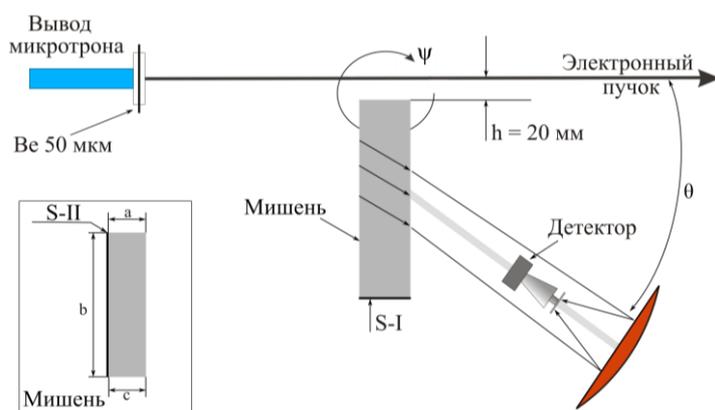


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: S-I и S-II – поглощающие экраны. Параметры мишени: $b = 260$ мм, $a = c = 40$ мм, коэффициент преломления тефлона $n = 1.41$.

На рисунке 3 приведены полученные зависимости интенсивности поляризационного излучения от угла наблюдения θ для различных положений мишени ψ . Как следует из рисунка 3а интенсивность излучения Вавилова-Черенкова в максимуме углового распределения ($\theta_{Ch} = 60^\circ$)

подавлена и основной вклад в общие радиационные характеристики поляризационного излучения вносит дифракционное излучение (кривая с закрашенными точками). Наблюдаемый эффект подавления черенковского излучения связан, во-первых, с наличием деструктивной интерференцией между излучением Вавилова-Черенкова и дифракционным излучением. Во-вторых, с тем, что в ходе эксперимента регистрируется обратное переходное излучение от параболического зеркала, которое использовалось в эксперименте для подавления эффекта «ближней» зоны. Данное предположение подтверждается путём установки поглощающего экрана S-II на грань a (кривая с полыми точками).

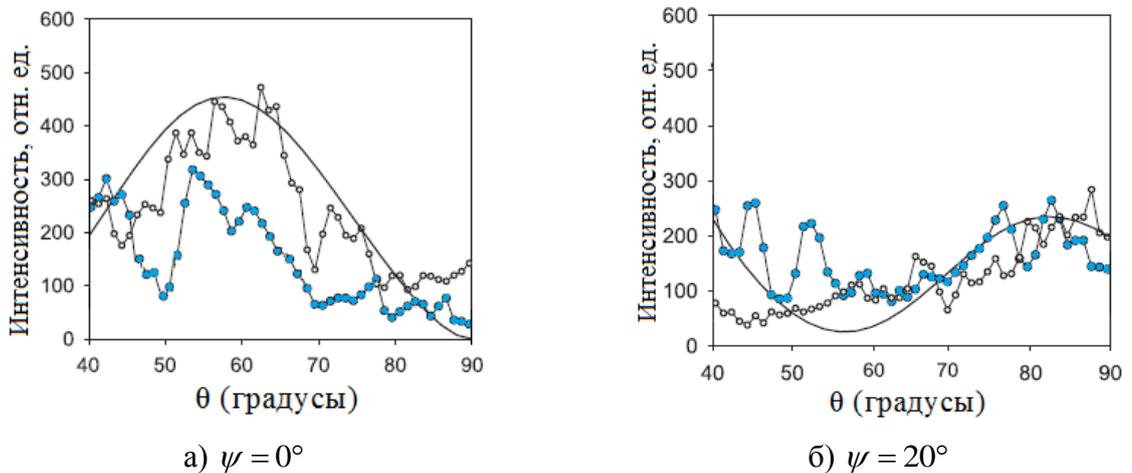


Рисунок 3 – Угловые распределения поляризационного излучения, измеренного от плоской тефлоновой мишени, для различных углов поворота мишени ψ : (а) – угол поворота мишени $\psi = 0^\circ$, (б) – угол поворота мишени $\psi = 20^\circ$. Теория – сплошные линии, эксперимент без экрана S-II – закрашенные точки, эксперимент с экраном S-II – полые точки, Параметры расчета: $\gamma = 12$ мм, $\varepsilon = \sqrt{1.41}$, $\lambda = 11$ мм.

Увеличение угла поворота мишени ψ относительно первоначального положения на 20° приводит к нарушению условия деструктивной интерференции между дифракционным и черенковским излучениями, в результате чего наблюдается качественное согласование экспериментальных результатов с теоретическим расчётом (см рисунок 3б). Заметим, что максимум интенсивности излучения Вавилова-Черенкова при этом смещается на 20° ($\theta_{Ch} = 80^\circ$) (см. рисунок 3б, кривая с полыми точками).

Раздел 2.2 посвящён эксперименту по измерению спектрально-угловых характеристик излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при пролёте релятивистских электронов вблизи диэлектрической мишени призматической формы (см. рисунок 4). Здесь и далее по тексту мишень представляет собой призму, сделанную из тефлона марки PTFE ($n=1.41$), с геометрическими размерами 175x175x74 мм. Переход от используемой ранее в экспериментах плоской мишени к мишени, выполненной в форме призмы, в нашем случае связан с простотой вывода излучения из объёма мишени. Проведённый эксперимент показал, что, во-первых, ввиду наличия спектральной дисперсии материала мишени, в экспериментах по измерению углового распределения поляризационного излучения, наблюдаться незначительное уширения пиков в угловом распределении поляризационного излучения. Во-вторых, то, что в выбранной геометрии эксперимента значительный вклад в исследуемое поляризационное излучение может вносить дифракционное излучение.

Поэтому в разделе 2.2.1 для исследования характеристик «чистого» черенковского излучения был оценён вклад, вносимый дифракционным излучением в общие радиационные характеристики поляризационного излучения. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

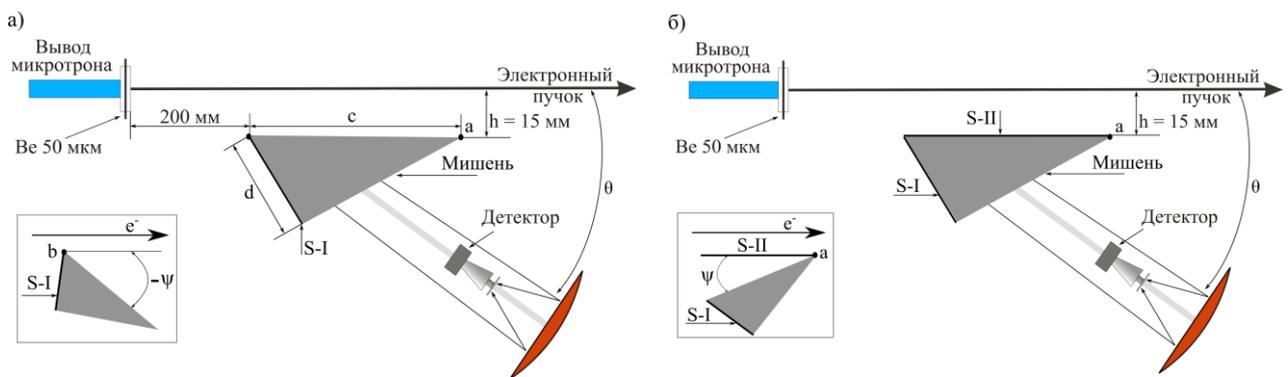


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки по измерению углового распределения интенсивности поляризационного излучения при различных углах поворота призмы: (а) – призма вращается вокруг точки a и b , (б) – призма вращается только вокруг точки a .

Экспериментально полученные ориентационные зависимости интенсивности поляризационного излучения от угла наблюдения θ для различных углов поворота мишени ψ , приведены на рисунке 5. Как видно из

рисунка 5, когда ось вращения мишени находится в точке *a* (см. врезку на рисунке 4б) и поглощающий экран S-II не зафиксирован на грани мишени *c* (т.е. не поворачивается вместе с мишенью в отличие от экрана S-I) то в ходе эксперимента регистрируется только дифракционное излучение (кривая обозначенная треугольниками).

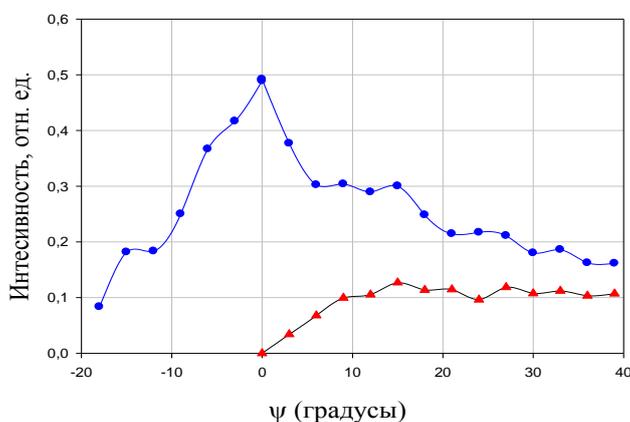


Рисунок 5 – Зависимости интенсивности черенковского и дифракционного излучения от угла поворота мишени ψ . Величина ошибок измерения на рисунке не превышает размера точек, отражающих экспериментальные данные.

При угле поворота мишени $\psi = 0^\circ$ интенсивность дифракционного излучения равна нулю, так как все грани мишени, где происходит генерация поляризованного излучения, закрыты поглощающими экранами и измеряется фон ускорительной системы (см. врезку на рисунке 4б). В области положительных углов поворота мишени ($\psi > 0^\circ$) интенсивность дифракционного излучения возрастает, что объясняется увеличением области взаимодействия кулоновского поля сгустка релятивистских электронов с постепенно открывающейся гранью *c*.

В измерениях, проведенных без поглощающего экрана S-II (см. врезку к рисунку 4а), когда угол поворота мишени $\psi = 0^\circ$, что соответствует параллельному пролёту пучка электронов вдоль грани *c*, основной вклад в общие радиационные характеристики поляризованного излучения вносит излучение Вавилова-Черенкова (кривая обозначена кружками). Интенсивность дифракционного излучения по сравнению с излучением Вавилова-Черенкова подавлена наличием поглощающего экрана S-II на грани *d*, ближайшей к патрубку. Однако, по мере увеличения угла поворота мишени ($\psi > 0^\circ$) (ось вращения мишени находится в точке *a*) интенсивность излучения Вавилова-Черенкова в максимуме углового распределения

начинает уменьшаться. Эффект подавления дифракционного излучения уже не так существенен, поскольку в ходе эксперимента изменяется эффективный прицельный параметр.

В области отрицательных углов поворота мишени ($\psi < 0^\circ$), когда ось вращения мишени находится в точке b (см. врезку к рисунку 4а), наблюдается подобная картина с подавлением черенковского излучения в ходе увеличения эффективного прицельного параметра.

Далее в *разделе 2.2.2* приведено сравнение теоретически рассчитанных спектров излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения, индуцированных в диэлектрической мишени призматической формы, равномерно движущейся заряженной частицей. Спектральная плотность исследуемых излучений по форме подобна, с той лишь разницей, что интенсивности излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения разнятся для разных углов поворота мишени.

В завершающей части главы (*раздел 2.3*) обсуждаются полученные результаты.

Третья глава посвящена исследованию характеристик поляризационного излучения, возникающего в диэлектрических фиберах. В частности, в *разделе 3.1* приведены результаты сравнений теоретически рассчитанной и экспериментально полученной зависимости интенсивности поляризационного излучения, распространяющегося по фибру от относительной кривизны фибера, (см. рисунок 6). Для проведения расчёта использовалась модель, основанная на расчёте коэффициента затухания [6].

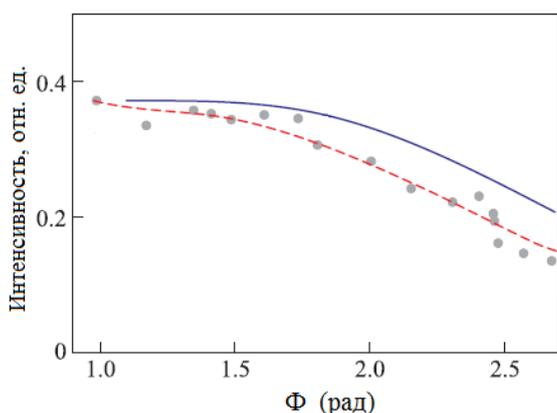


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности поляризационного излучения от угла изгиба фибера. Точки – результаты эксперимента, сплошная линия – расчёт, штриховая линия – сглаженные экспериментальные данные.

Фибер выполнен из органического полимера с диаметром 11 мм, длиной 600 мм и с показателем преломления $n=1.5$.

Как следует из рисунка 6, приведенная теоретическая зависимость качественно соответствует экспериментальной, потери интенсивности поляризационного излучения при изгибании фибера составили 50% и напрямую зависят от величины изгиба фибера.

В *разделе 3.1.1* приведены результаты эксперимента по измерению спектра излучения на выходе из изогнутого фибера на пучке реальных фотонов, (см. рисунок 7). Фибер выполнен из органического полимера с диаметром 11 мм, длиной 600 мм, угол изгиба составил 0.98 рад, показатель преломления $n=1.5$.

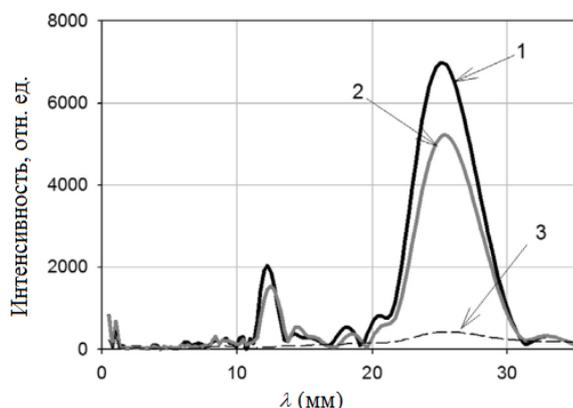


Рисунок 7 – Спектры излучения, измеренные на выходе из диэлектрического изогнутого фибера: 1 – входной торец фибера открыт, 2 – входной торец фибера закрыт экраном, 3 – измерение без фибера (фон).

Из анализа представленных на рисунке 6 зависимостей следует, что максимум интенсивности излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 20 - 40$ мм определяется основной модой излучения HE_{11} , распространяющейся внутри фибера. Сравнение полученных зависимостей также указывает на то, что наблюдаемые максимумы регистрируемого излучения слабо зависят от того установлен или удален экран с торца фибера. Подобный эффект можно ожидать если на поверхности фибера генерируются затухающие поверхностные волны (evanescent surface wave), наличие которых рассмотрено в теоретической работе [7]. Поэтому в *разделе 3.1.2* для подтверждения наличия затухающих поверхностных волн, распространяющихся вдоль поверхности фибера, была измерена зависимость

интенсивности излучения от расстояния h до поверхности на середине длины фибера. Схема эксперимента приведена на рисунке 8. Детектор электромагнитного излучения DP-21M, в геометрии указанной на рисунке 8 установлен на середине длины фибера $L/2$ и имеет поступательную степень свободы. В эксперименте использовался такой же полимерный фибер, как и описанный ранее, в *разделе 3.1*.

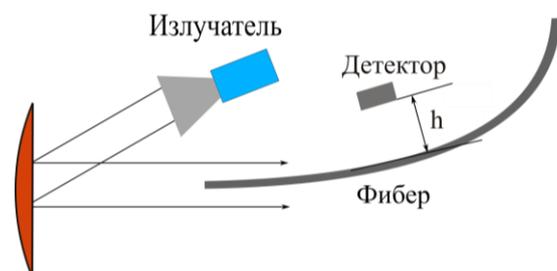


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки по измерению интенсивности затухающих поверхностных волн, распространяющихся по фиберу в зависимости от расстояния h .

Путём перемещения детектора производится регистрация зависимости интенсивности излучения от расстояния h до поверхности фибера, показанной на рисунке 9.

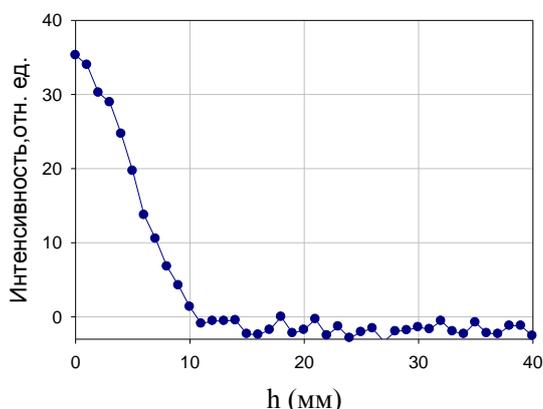


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности излучения от расстояния h до поверхности фибера.

Из рисунка 9 видно, что при размещении детектора вблизи фибера регистрируются затухающие поверхностные волны, которые распространяются вдоль границы раздела двух сред и выходят за её пределы на расстояние меньше половины длины волны ($\lambda/2$). На расстоянии больше чем $\lambda/2$ наблюдаемые волны не были зарегистрированы, следовательно, вся мощность излучения в затухающих поверхностных волнах вблизи границы раздела фибер/вакуум. Наличие затухающих поверхностных волн в спектре поляризационного излучения от прямого и изогнутого фибера, а также

распространение основной моды излучения HE_{11} , представлено в *разделе 3.1.3*.

Результаты экспериментов по измерению угловых характеристик дифракционного излучения и излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при пролёте релятивистских электронов вблизи диэлектрического фибера, представлены в *разделе 3.2*. Согласно проведённым экспериментам, в зависимости от геометрии расположения фибера относительно траектории распространения сгустка электронов, возникающие поляризационное излучение может генерироваться через различные механизмы. Если электронный сгусток и фибер лежат в одной плоскости, то при угле поворота фибера θ относительно траектории пучка $\leq 45^\circ$ преобладающим механизмом генерации поляризационного излучения внутри фибера будет дифракционное излучение. Изменение угла поворота фибера в область больших углов поворота фибера ($\theta > 50^\circ$) приводит к подавлению дифракционного излучения и уже излучение Вавилова-Черенкова даёт основной вклад в регистрируемое излучение. Черенковский механизм генерации излучения внутри фибера является преобладающим, когда конец фибера отнесен от электронного сгустка на расстояние $h > \gamma\beta\lambda$.

В *разделе 3.3* приведены результаты эксперимента по использованию фиберов для невозмущающей диагностики пучков. В частности, идея состоит в том, чтобы использовать фибры в качестве монитора положения пучка. Конструктивно датчик представляет собой два изолированных фибера (таких же, как и в *разделе 3.1*) расположенных на одинаковом расстоянии от пучка. Пучок распространяется вдоль оси фибера на расстоянии δ от центра фибера и поляризует область в пространстве вокруг себя, размер которой составляет величину порядка $\propto \gamma\beta\lambda$. Если пучок смещается, то электромагнитное поле пучка соответственно смещается (относительно фиберов) на величину δ . Общая схема стенда с использованием датчика положения пучка представлена на рисунке 10.

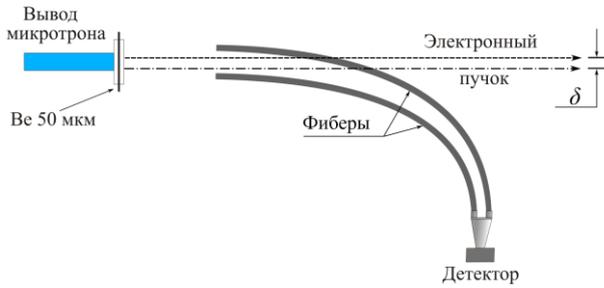


Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки для измерения пространственного положения релятивистского электронного пучка.

Поскольку в ходе эксперимента пучок стабилен и не претерпевает смещения по оси δ , то для моделирования подобной ситуации необходимо смещать сам датчик. Подобное искусственное смещение на заранее заданную позицию позволяет оценить точность проводимых измерений.

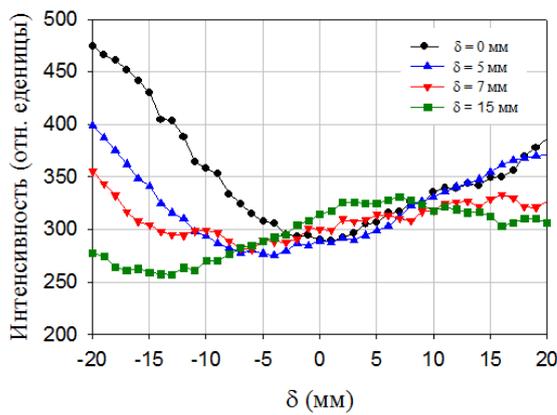


Рисунок 11 – Положение сигнала в зависимости от смещения δ датчика положения пучка: ● – $\delta = 0$ мм, ▲ – $\delta = 5$ мм, ▼ – $\delta = 7$ мм, ■ – $\delta = 15$ мм.

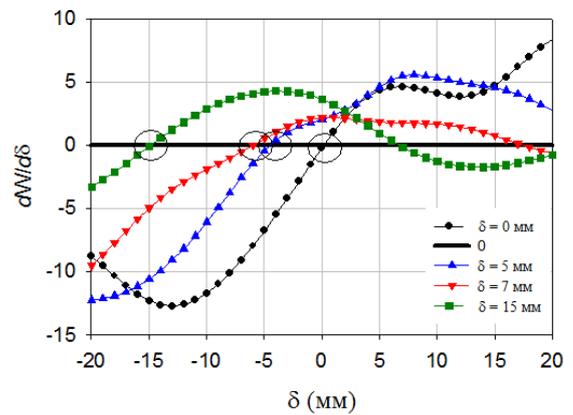


Рисунок 12 – Положение сигнала в зависимости от смещения δ датчика положения пучка: ● – $\delta = 0$ мм, ▲ – $\delta = 5$ мм, ▼ – $\delta = 7$ мм, ■ – $\delta = 15$ мм.

На рисунке 11 представлены результаты эксперимента по моделированию работы датчика положения пучка для следующих параметров смещения сгустка $\delta = 0$ мм, 5 мм, 7 мм и 15 мм. Используемое оборудование обеспечивает минимальный задаваемый шаг смещения луча 0.5 мм. Для определения минимума интенсивности, зависимости на рисунке 11 были продифференцированы методом непараметрической статистики. Полученные первые производные представлены на рисунке 12.

Как видно из полученных зависимостей (см. рисунок 12), наблюдается прямая корреляция между смещением датчика положения пучка и наблюдаемым положением минимума интенсивности излучения.

Проведённые серии экспериментов с искусственным смещением оси пучка δ на 0 мм, 5 мм, 7 мм и 15 мм, показали воспроизводимость результатов. Предложенный метод, является невозмущающим способом диагностики и позволяет в процессе работы ускорителя в режиме реального времени контролировать положение пучка.

В *разделе 3.4* приведён результат эксперимента по измерению спектральных характеристик поля электронных сгустков в заданной точке поперечного сечения. Для этого был разработан и собран прецизионный измерительный стенд. Схема стенда приведена рисунке 13. Стенд установлен в экспериментальной зоне ускорителя и состоит из двух волокон, детектора электромагнитного излучения, средств перемещения по одной координате на основе шагового двигателя. Центры волокон разнесены на расстояние d (задается оператором), и центрированы относительно выведенного пучка.

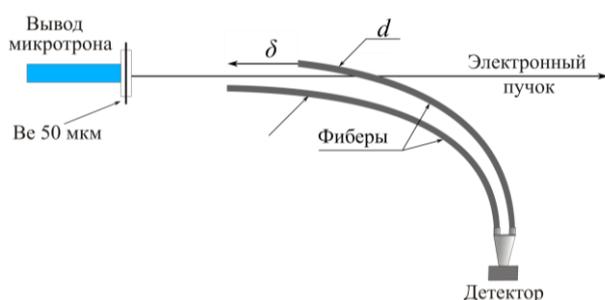


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки для определения спектра излучения в заданной точке.

Продольное перемещение волокна по координате δ вызывает сдвиг фаз, который зависит только от относительного положения волокон, что и приводит к регистрации интерференционной картины (см. рисунок 14а) из которой, используя обратное преобразование Фурье, восстанавливается спектр излучения [10] (см. рисунок 14б).

Используя данный подход можно проводить измерения спектральных характеристик поля электронных сгустков в заданной точке поперечного сечения. Для доказательства данного утверждения была измерена интерферограмма для других значений d ($d = 60$ мм), не выходящих за пределы области поперечного распределения поля электронов $d \leq \gamma\beta\lambda$.

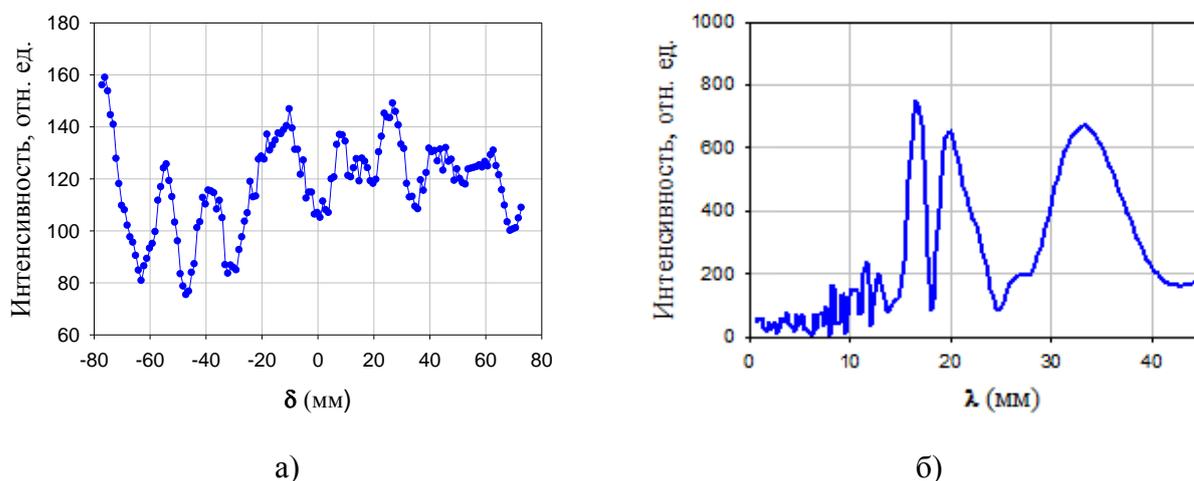


Рисунок 14 – Экспериментально измеренная интерферограмма (а) для $d = 20$ мм и восстановленный из интерферограммы спектр излучения – (б).

Предложение использовать диэлектрические фиберы для измерения спектральных характеристик поля электронных сгустков в любой точке поперечного сечения позволяет получить интерферограмму и на её основе построить спектр. Естественным ограничением данного подхода является то, что предложенный метод можно использовать только в той спектральной области, в которой в фибере выполняется многомодовый режим.

В завершающей части главы (*раздел 3.4*) обсуждаются полученные результаты.

Основные результаты работы

1. Результаты измерений спектрально-угловых и ориентационных зависимостей поляризованного излучения, возникающего при прохождении релятивистских электронных сгустков вблизи различных диэлектрических мишеней, в миллиметровом диапазоне длин волн. Подтвердили, что изменение угла поворота плоской диэлектрической мишени относительно пучка релятивистских электронов приводит к эффекту смещения пиков наблюдаемого излучения Вавилова-Черенкова. Проведённые измерения ориентационных зависимостей поляризованного излучения от диэлектрической призмы с использованием поглощающих экранов S-I и S-II позволили,

- проанализировать вклад, вносимый дифракционным излучением в общие радиационные характеристики регистрируемого излучения.
2. Впервые проведены измерения зависимости интенсивности поляризационного излучения от изогнутого фибера для электронного пучка с энергией 6.1 МэВ. Результаты эксперимента качественно согласуются с результатами теоретических оценок по модели, базирующейся на расчёте коэффициента затухания.
 3. Измерения спектров поляризационного излучения, индуцированного в прямом и изогнутом фибере релятивистским электронным пучком. Позволили установить, что в случае экранировки входного торца фибера, основной захват излучения происходит на его боковой поверхности.
 4. Впервые зарегистрированы затухающие поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела двух сред (фибер/вакуум) и выходящие за её пределы на расстояние, меньшее половины длины волны падающего излучения ($\lambda / 2$).
 5. Впервые выполнены измерения ориентационных характеристик дифракционного излучения и излучения Вавилова-Черенкова возникающего при пролёте релятивистских электронов вблизи диэлектрического фибера. Проведённые эксперименты показали, что в зависимости от геометрии расположения фибера относительно траектории распространения сгустка электронов, возникающие поляризационное излучение может генерироваться через различные механизмы.
 6. Впервые продемонстрирована возможность невозмущающего измерения пространственного положения релятивистского электронного пучка с использованием диэлектрических волокон.
 7. С использованием построенного измерительного стенда, базирующегося на диэлектрических фиберах, впервые проведены

прямые измерения спектральных характеристик поля электронных сгустков с энергией 6.1 МэВ в заданной точке поперечного сечения.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

- a. Блеко, В.В. Исследование прохождения излучения через диэлектрическую среду в миллиметровом диапазоне длин волн вблизи угла полного внутреннего отражения / В.В. Блеко, В.В. Соболева, М.В. Шевелёв // Изв. ВУЗов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11/2. – С. 295–299.
- b. Bleko, V.V. Coherent diffraction and Cherenkov radiation of relativistic electrons from a dielectric target in the millimeter wavelength range / V.V. Bleko, A.S. Konkov, V.V. Soboleva // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2015. – Vol. 355. – Pp. 129–131.
- c. Блеко, В.В. Спектрально-угловые характеристики излучения Вавилова-Черенкова при пролёте релятивистских электронов вблизи мишени / В.В. Блеко, В.В. Соболева, М.В. Шевелёв // Изв. ВУЗов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 11/2. – С. 146–150.
- d. Блеко, В.В. Вклад дифракционного излучения при генерации излучения Вавилова-Черенкова релятивистскими электронами в диэлектрических мишенях / В.В. Блеко, В.В. Соболева // Изв. ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 11/2. – С. 210–214.
- e. Naumenko, G. Polarization Radiation in a Teflon Target / G. Naumenko, A. Potylitsyn, M. Shevelev, V. Bleko et al. // J. Phys. Conf. Ser. – 2014. – Vol. 517. – Pp. 012004.
- f. Науменко, Г.А. Когерентное излучение релятивистских электронов в диэлектрических фибрах в миллиметровом диапазоне длин волн / Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, В.В. Блеко, В.В. Соболева // Письма в ЖЭТФ. – Т. 100, вып. 12. – С. 881–884.
- g. Naumenko, G. Coherent radiation of relativistic electrons in dielectric fibers / G. Naumenko, A. Potylitsyn, M. Shevelev, V. Bleko et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2015. – Vol. 355. – Pp. 125–128.

- h. Naumenko, G. Coherent diffraction and Cherenkov radiation from short electron bunches in fibers / G. Naumenko, V. Bleko, A. Potylitsyn, V. Soboleva // 5th International Particle Accelerator Conference: Proceedings. – Dresden, Germany, 2014. – p. 3632–3634.

Список литературы

1. Wu, S. Transverse beam profile diagnostic using fiber optic array / S. Wu, G. Andonian, T. Campese et al. // Proceedings of PAC 2013. – Pasadena, CA USA, 2013. – Pp. 1205–1207.
2. Devlin, L.J. Update on beam loss monitoring at CTF3 for CLIC / L.J. Devlin, C.P. Welsh, E. Effinger et al. // Proceedings of IBIC 2013. – Oxford, UK, 2013. – WEPC43.
3. Калинин, Б.Н. Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах / Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84, № 3. – С. 136–140.
4. Карловец, Д.В. Дифракционное излучение от экрана конечной проводимости / Д.В. Карловец, А.П. Потылицын // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90, № 5. – С. 368–373.
5. Shevelev, M.V. Soft-x-ray Cherenkov radiation generated by a charged particle moving near a finite-size screen / M.V. Shevelev, A.S. Konkov, A.S. Aryshev // Phys. Rev. A. – 2015. – Vol. 92. – Pp. 053851.
6. Marcuse, D. Curvature loss formula for optical fibers // J. Opt. Soc. Amer. B. – 1976. – Vol. 66. – Pp. 216–220.
7. Artru, X. Light induced by charged particles in optical fibers / X. Artru, C. Ray // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2013. – Vol. 309. – Pp. 162–166.
10. Froehlich, L. Bunch length measurements using a Martin-Puplett interferometer at the VUV-FEL // DESY-THESIS 2005-011, FEL-THESIS 2005-02. – 2005. – 56 p.