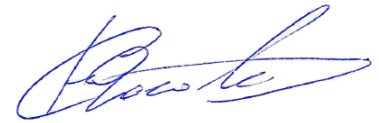


На правах рукописи



Гоголев Сергей Юрьевич

**КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
БАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В РАДИАТОРАХ
КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ**

Специальность 01.04.16 — Физика атомного ядра и
элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2020

Работа выполнена в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

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

Официальные оппоненты: **Козырев Андрей Владимирович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН, г. Томск), заведующий лабораторией теоретической физики


Кубанкин Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», заведующий международной научно-образовательной лабораторией радиационной физики

Защита состоится «15» декабря 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.05 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 2, стр. 11, ауд. 326.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53 и на сайте: <https://dis.tpu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.05, к.ф.-м.н.



М.В. Шевелёв

Общая характеристика работы

Актуальность темы. На сегодняшний день в мире работает большое число ускорителей заряженных частиц, имеющих широкое применение в различных областях науки и отраслях промышленности. Развитие новых ускорительных технологий, например, лазерно-плазменных ускорителей [1] позволяет получать и ускорять субпикосекундные электронные сгустки, для которых требуется создание новых диагностических методов. В ближайшей перспективе планируется создание электронных ускорителей фемтосекундной длительностью сгустка [2]. Подобные ускорители могут использоваться в качестве источников интенсивного когерентного излучения в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах длин волн.

Для этой цели предлагалось использовать механизм когерентного излучения Вавилова-Черенкова (КИВЧ) для генерации излучения в ТГц и суб-ТГц диапазонах [3]. Схемы подобных источников предполагают использование рабочего объёма радиатора, например, в виде призмы [4] для вывода излучения в вакуум. При создании таких источников излучения важно оценивать, геометрию и параметры мишени (линейные размеры, проводимость, форма и т.д.), для оптимизации характеристик излучения, выводимого из радиатора в вакуум.

На сегодняшний день отсутствуют относительно простые аналитические методы расчёта спектрально-угловых характеристик ИВЧ, которое генерируется в радиаторах произвольной формы.

Методы, развиваемые авторами статей [5, 6], пригодны, как правило, для осе-симметричных мишеней и умеренно релятивистских частиц. Кроме того, указанные методы применялись только для некогерентного ИВЧ, т.е. для излучения одиночного заряда.

Метод поляризационных токов, применяемый в диссертационной работе, основанный на макроскопических уравнениях Максвелла, является эффективным инструментом, позволяющим рассчитывать характеристики (поляризацию, интенсивность), например, некогерентного излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ), а также КИВЧ в зоне Фраунгофера (дальняя зона) в широком спектральном диапазоне (от рентгеновского [7] до миллиметрового [8] диапазона длин волн) в условиях реального эксперимента, т.е. с учётом характеристик диэлектрических мишеней (включая дисперсию среды) произвольной геометрической формы, условий пролёта сгустка любой конфигурации (с учётом его первоначальной расходимости) относительно мишени.

Целью данной работы является исследование спектрально-угловых характеристик ИВЧ/КИВЧ на основе модернизированного автором метода

поляризационных токов от однородных, немагнитных, прозрачных сред при рассмотрении следующих геометрий:

- Параллельный пролёт заряда вблизи диэлектрика с проницаемостью ε и длиной L ;
- Пролёт заряда через наклонную пластину и сопоставление результатов с известной моделью на основе метода изображений [9];
- Пролёт сгустка электронов имеющего первоначальную расходимость в плоскости перпендикулярной поверхности диэлектрика с проницаемостью $\varepsilon(\omega) < 2$;
- Пролёт мононаправленного сгустка электронов через осевой вакуумный канал в коническом диэлектрике;
- Пролёт параллельного электронного пучка, состоящего из ультракоротких асимметричных сгустков электронов с поперечными размерами, превышающими продольный ($\sigma_z \ll \sigma_{x,y}$), через пластину с конечными линейными размерами.

В соответствии с общей целью работы в диссертации рассматриваются следующие основные **задачи**:

1. Проведено обобщение метода поляризационных токов для разных типов пространственных геометрий для расчёта характеристик поляризационного излучения от параллельного и расходящегося пучка заряженных частиц.
2. Проведены расчёты и сравнение полученных результатов для распределений интенсивности ИВЧ при параллельном пролёте заряда вблизи бесконечного радиатора и ИВЧ при пролёте заряда через радиатор конечной толщины, имеющего поперечные входную и выходную грани.
3. Проведены теоретические исследования азимутального распределения ИВЧ, возникающего при наклонном пролёте заряда через радиатор с конечной толщиной и безграничными поперечными размерами. Полученные распределения сравниваются с известным результатом В.Е. Пафомова (метод изображений) [9]. Также проведены теоретические исследования когерентного поляризационного излучения (КИВЧ) при наклонном пролёте сгустка заряженных частиц вблизи диэлектрического экрана.
4. На примере конической мишени с внутренним вакуумным каналом проанализировать влияние частотной дисперсии на спектрально-угловые характеристики когерентного поляризационного излучения (КИВЧ) в тера-

герцовом диапазоне частот и оценена возможность использования подобного механизма для диагностики ультракоротких электронных сгустков.

5. Проведён анализ спектрально-угловых характеристик ИВЧ, возникающего при пролёте параллельного электронного пучка, состоящего из коротких сгустков с асимметричным зарядовым распределением, через радиатора конечной толщины, обладающий как конечными, так и бесконечными поперечными размерами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При пролёте релятивистского заряда в вакууме параллельно грани радиатора конечной толщины (так называемое дифракционное излучение Вавилова-Черенкова), азимутальное распределение является асимметричным. Интенсивность излучения от входной и выходной грани радиатора конечной толщины может превышать интенсивность излучения для пролёта заряда параллельно грани бесконечного радиатора на несколько порядков.
2. При наклонном пролёте заряда через радиатор с бесконечными поперечными размерами и при наклонном пролёте сгустка частиц в вакууме вблизи радиатора асимметричное распределение ИВЧ/КИВЧ обеспечивает вывод излучения в вакуум даже из «плотной» оптической среды.
3. Диэлектрическая мишень конической формы, материал которой обладает частотной дисперсией в субмиллиметровом диапазоне длин волн, через ось вакуумного канала которой проходит релятивистский мононаправленный электронный сгусток, может использоваться как инструмент невозмущающей диагностики для оценки длины субпикосекундного сгустка.
4. Асимметрия КИВЧ, генерируемого коротким аксиально асимметричным сгустком (повёрнутым относительно направления движения), позволяет проводить диагностику таких сгустков при соответствующем выборе диапазона длин волн.

Научная новизна представленных в диссертации результатов:

1. Впервые проведено сравнение азимутальных распределений оптического ИВЧ для двух геометрий радиатора: бесконечного радиатора вдоль движения заряда и радиатора с конечной толщиной имеющего поперечные входные и выходные грани и показано, что наличие неоднородностей (входной и выходной грани) приводит к значительному увеличению интенсивности ИВЧ.

2. Впервые получено выражение интенсивности для расчёта азимутального распределения ИВЧ/КИВЧ для наклонного пролёта заряда через диэлектрический радиатор конечной толщины и сгустка заряженных частиц вблизи краёв диэлектрической пластины.
3. Впервые получена выражение для когерентного форм-фактора при наклонном пролёте сгустка, имеющего первоначальную расходимость вблизи радиатора.
4. Впервые получена модель для расчёта спектрально-угловых характеристик КИВЧ, генерируемого сгустком заряженных частиц в конической мишени с вакуумным каналом, обладающая частотной дисперсией в терагерцовом диапазоне длин волн, которая может служить «естественным» спектрометром в диагностике длины сгустка заряженных частиц.
5. Впервые получена модель для расчёта спектрально-угловых характеристик поляризованного излучения (ПИ, ИВЧ), генерируемого мононаправленным сгустком с асимметричным зарядовым распределением в диэлектрической мишени конечных размеров.

Научная и практическая значимость представленных результатов в диссертационной работе: в рамках выполненной диссертационной работы метод поляризационных токов был обобщен на случай когерентного поляризованного излучения сгустка релятивистских заряженных частиц от радиаторов различных геометрических размеров и формы, начиная с прямоугольного параллелепипеда и рассматривая мишень более сложной формы — коническая мишень с вакуумным каналом, материал которой обладает дисперсионными свойствами в субмиллиметровом (терагерцовом) диапазоне. Подобный конический радиатор является «естественным» спектрометром, позволяющий по измеренному угловому распределению КИВЧ определять длину субпикосекундного сгустка электронов. Для создания источника на основе механизма КИВЧ в субмиллиметровом диапазоне длин волн с регулируемые спектрально-угловыми характеристиками развитый подход позволяет проводить выбор параметров радиатора для электронных сгустков включая асимметричное зарядовое распределением и имеющего первоначальную расходимость.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сведением их большей части аналитическими формулами, совпадающими с известными результатами в предельных случаях, а также качественное согласие большинства представленных выводов с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

- VII, VIII Международная конференция «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» («Channeling»), Сирмионе, Италия– 2016 год, Ишия, Италия– 2018 год;
- XII, XIII Международный симпозиум «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» («RREPS»), Гамбург, Германия– 2017 год, Белгород, Российская Федерация– 2019 год;
- XLVII, XLVIII Международная «Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами», Москва, Российская Федерация– 2017 год, Москва, Российская Федерация– 2018 год;

Диссертационная работа была выполнена при финансовой поддержке гранта № FSWW-2020-0008 программы «Наука» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и проекта ВИУ-ИШФВП-185/2020 задача 2.3.

Личный вклад. Совместно с профессором А.П. Потылицыным было определено направление исследований характеристик КИВЧ в миллиметровом и субмиллиметровом (терагерцовом) спектральных диапазонах, в радиаторах с различными геометрическими размерами. Автор диссертации принимал активное участие в создании моделей, разработке алгоритмов для решения поставленных физических задач, аналитических расчётах, проведении моделирования характеристик КИВЧ для конкретных геометрий радиатора, в анализе полученных результатов и представлении их в виде докладов и публикаций.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, из которых 5 статьи индексируются в международных журналах, входящих в базы данных «Web of Science» и «Scopus», рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 100 страницы, включая 44 рисунков, 1 таблицу и список литературы, содержащий 160 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор

научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации посвящена систематическому изложению метода поляризационных токов для немагнитных, однородных и изотропных сред, в частности, обладающих частотной дисперсией. В разделе 1.1 кратко представлено решение системы «вакуумных» уравнений Максвелла. С учётом граничных условий, точным решением будет являться Фурье-образ в координатном и частотном представлении магнитного поля поляризационного излучения в среде, которое будет определяться областью, занимаемой поляризационным током, индуцированным Фурье-компонентой внешнего электрического поля заряженной частицы и в зоне Фраунгофера (волновая зона) будет иметь вид [10]

$$\mathbf{H}^{pol} \approx \mathbf{H}^R(r, \omega) = \frac{i e^i \sqrt{\varepsilon(\omega)} \omega r / c}{c r} \left[\mathbf{k} \times \int_{V_T} \mathbf{j}_0^{pol}(\mathbf{r}', \omega) e^{-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}')} d^3 \mathbf{r}' \right],$$

где c — скорость света в вакууме, V_T — объём радиатора или область занимаемая поляризационным током $\mathbf{j}_0^{pol}(\mathbf{r}', \omega) = \sigma(\omega) E^0(\mathbf{r}', \omega)$, наведённого Фурье-компонентой внешнего кулоновского поля заряженной частицы $E^0(\mathbf{r}', \omega)$, $\sigma(\omega) = (\varepsilon(\omega) - 1)\omega/4\pi i$ — проводимость среды радиатора, $\varepsilon(\omega)$ — диэлектрическая проницаемость среды, ω — частот электромагнитного излучения, \mathbf{r}' — радиус-вектор определяющий координаты радиатора, $\mathbf{r} = r\mathbf{e}$ — радиус-вектор определяющий координаты наблюдателя, $\mathbf{e} = \{\sin \Theta \sin \phi; \sin \Theta \cos \phi; \cos \Theta\}$ — единичный вектор, направленный в точку наблюдения, Θ — полярный угол в среде, ϕ — азимутальный угол, $\mathbf{k} = \sqrt{\varepsilon(\omega)}\mathbf{e}\omega/c$ — волновой вектор поляризационного излучения в среде.

Таким образом, задача нахождения Фурье-компоненты магнитного поля поляризационного излучения $\mathbf{H}^R(r, \omega)$ и расчёта характеристик поляризационного излучения в зависимости от того, какие линейные размеры имеет радиатор будет сводится к определению соответствующей Фурье-компоненты собственного электрического поля заряженной частицы.

Для обобщения метода поляризационных токов для сред, обладающих частотной дисперсией, в разделах 1.2.(1-3) представлены соответствующие Фурье-компоненты электрического поля мононаправленного ансамбля и ансамбля заряженных частиц, имеющего первоначальную расходимость, рассмотрены вариации для трёх пространственных геометрий радиатора: 1) с безграничными размерами в поперечных направлениях и конечный размер в направлении оси z' ; 2) с безграничным размером в одном из поперечном направлении и конечные размеры, например, вдоль осей y', z' ; 3) с полно-

стью конечные размеры в направлении всех трёх осей декартовой системы координат x', y', z'

Используя связь между электрическим и магнитным полями поляризованного излучения в разделе 1.3 представлено выражение для спектрально-угловой плотности энергии поляризованного излучения, позволяющее рассчитывать излучение вышедшее через выходную грань радиатора в вакуум, и которое не учитывает переотражения электромагнитных волн внутри радиатора и преломление поляризованного излучения на торцевых гранях радиатора, перпендикулярных выходной грани.

Представлены основные ограничения рассматриваемого метода. Метод поляризационных токов должен удовлетворять пределам применимости макроскопического подхода классической электродинамики. Кроме того, для корректного использования метода необходимо, чтобы мишень обладала резкими границами раздела двух сред. Использование соответствующих коэффициентов преломления Френеля для одной бесконечной границы раздела сред накладывает ограничения на соотношения между поперечными и продольными размерами радиатора.

В завершающем разделе 1.4 обсуждаются полученные результаты.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию азимутального распределения оптического излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) и радиационных потерь на оптическое ИВЧ на единицу длины траектории для случая, когда заряд в вакууме движется параллельно бесконечной и плоской поверхности диэлектрика и когда заряд взаимодействует с неоднородностью в виде передней входной грани радиатора конечной толщины (см. рисунок 1).

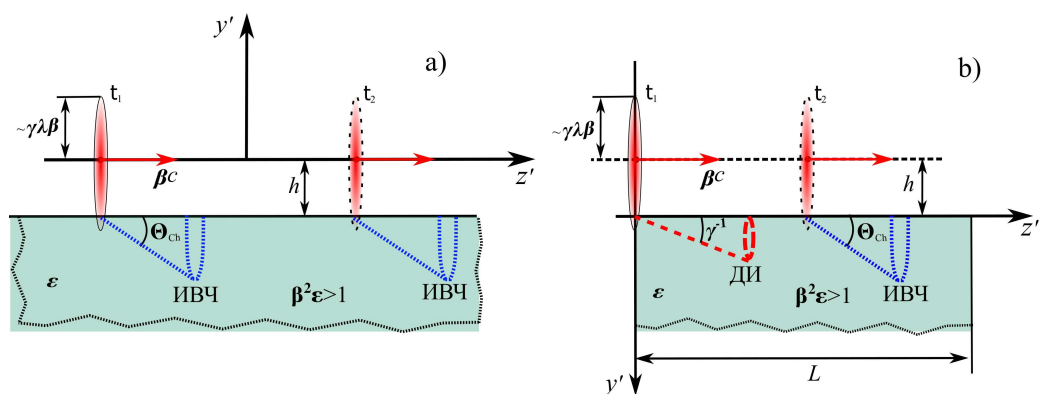


Рис. 1 – Схема генерации ИВЧ для заряда, пролетающего параллельно над плоским радиатором в случае: а) — радиатора бесконечной толщины, б) — радиатора конечной толщины L .

В разделе 2.1 использовалось выражение, полученное в работе [11], для распределения спектрально-угловой плотности энергии излуче-

ния Вавилова-Черенкова на единицу длины траектории для фиксированного полярного угла излучения $\Theta_{\text{Ch}} = \arccos(1/\beta n)$ для модели, когда заряд в вакууме движется параллельно бесконечной и плоской поверхности диэлектрика:

$$\frac{dW}{dzd\omega d\phi} = -\frac{2\alpha\hbar\omega(\varepsilon\beta^2 - 1)}{\pi\beta^2c(\varepsilon - 1)} \frac{((\varepsilon + 1)(\varepsilon\beta^2 - 1)\sin^2\phi + \varepsilon\gamma^{-2})\cos^2\phi}{((\varepsilon + 1)(\varepsilon\beta^2 - 1)\cos^2\phi - \varepsilon^2\beta^2)} \times \exp\left(-2\omega h\sqrt{1 + \gamma^2(\varepsilon\beta^2 - 1)\sin^2\phi/\beta c\gamma}\right),$$

где h — расстояние между траекторией заряда и поверхностью радиатора (импакт-параметр), $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры, \hbar — постоянная Планка, $\beta = v/c = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$ — относительная скорость заряда в единицах скорости света, γ — Лоренц-фактор частицы.

Результаты расчётов показывают, что с увеличением оптической плотности среды азимутальное распределение ИВЧ по азимуту сужается и растёт по величине. С уменьшением импакт-параметра при фиксированном значении Лоренц-фактора угловое распределение уширяется. С ростом Лоренц-фактора при фиксированном значении импакт-параметра интенсивность излучения в плоскости ($\phi = 0^\circ$), перпендикулярной к границе раздела, стремится к нулю.

В разделе 2.2, на основе метода поляризационных токов, получено выражение для спектрально-угловой плотности энергии поляризационного излучения в веществе

$$\frac{d^2W_e}{d\hbar\omega d\Omega} = \frac{cr^2}{|\sqrt{\varepsilon}|^2} |\mathbf{H}^R(r, \omega)|^2 = \frac{\alpha\beta^2\gamma^2}{16\pi^2} \left| \frac{(\varepsilon - 1)}{\sqrt{1 + \varepsilon(\beta\gamma \sin\Theta \sin\phi)^2}} \right|^2 \times \left| \frac{\exp\left(iL\frac{\omega}{\beta c}(1 - \beta\sqrt{\varepsilon}\cos\Theta)\right) - 1}{1 - \beta\sqrt{\varepsilon}\cos\Theta} \right|^2 \frac{\exp\left(-\frac{2\omega h}{\beta c\gamma}\sqrt{1 + \varepsilon(\beta\gamma \sin\Theta \sin\phi)^2}\right)}{1 + \beta^2\gamma^2\varepsilon\sin^2\Theta} \times \left(1 + \sin^2\Theta(\gamma^2\varepsilon\beta^2\cos^2\Theta\sin^2\phi + \beta^2(\gamma^2\varepsilon\sin^2\phi - 1) - 2\sqrt{\varepsilon}\beta\cos\Theta\sin^2\phi + \sin^2\phi) \right).$$

Нарушение аксиальной симметрии для геометрий (см. рисунок 1a,b), ведёт к азимутальной асимметрии ИВЧ. Радиационные потери энергии для радиатора конечной толщины для импакт-параметра превышающего половину максимальной длины волны рассматриваемого оптического диапазона (0.4 – 0.6 мкм) превышают подобные потери энергии на несколько порядков для радиатора бесконечной толщины.

В завершающем разделе 2.3 приведены основные выводы по главе.

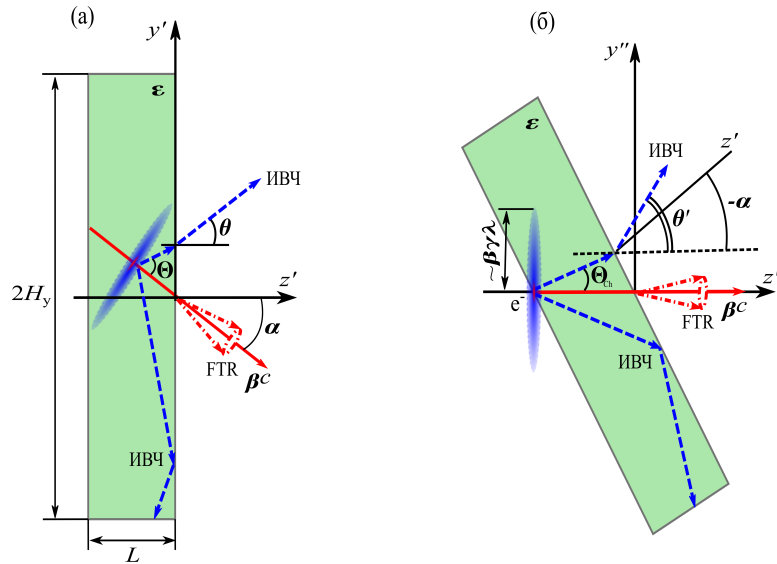


Рис. 2 – Угловые переменные, используемые для описания излучения Вавилова-Черенкова и переходного излучения «вперёд».

Третья глава диссертации посвящена исследованию азимутального распределения излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы через радиатор с конечной толщиной и безграничными поперечными размерами и проводится сравнение полученных выражений с известным результатом В.Е.Пафомова (метод изображений) [9]. В этой же главе приводятся характеристики когерентного ИВЧ при наклонном пролёте сгустка с нормальным распределением заряженных частиц вблизи диэлектрической пластины.

В частности, в разделе 3.1 исследуется традиционный механизм ИВЧ, когда заряженная частица при наклонном пролёте пересекает радиатор конечной толщины (см. рисунок 2).

По методу поляризационных токов получено выражение для спектрально-угловой плотности энергии поляризационного излучения в случае произвольного пролёта заряда (за исключением скользящего пролёта для углов $\sim \pi/2 - \gamma^{-1}$). Направление распространения черенковского излучения в вакууме будет определяться из условия обращения в нуль полюса:

$$\left| 1 - \left(\beta_x \sin \theta \sin \phi + \beta_y \sin \theta \cos \phi + \beta_z \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \right) \right| \rightarrow 0.$$

которое в случае нормального пролёта частицы ($\beta_x = \beta_y = 0$) переходит в известное условие Вавилова-Черенкова, записанное в вакуумных переменных. Кроме того в случае $\beta_x = 0$, разработанная модель согласуется с таковой, полученной в рамках метода изображений В.Е. Пафомова [9].

В разделе 3.2 получены основные выражения для спектрально-угловой плотности энергии когерентного поляризационного излучения в вакууме (из-

лучение распространяется в полупространство $z' > 0$) вышедшего из передней «выходной» грани пластины, возникающего при наклонном пролёте сгустка заряженных частиц с нормальным распределением вблизи диэлектрической пластины (см. рисунок 3).

$$\frac{d^2W_b}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2W_{\text{incoh}}}{d\omega d\Omega} + \frac{d^2W_{\text{coh}}}{d\omega d\Omega} = N \int_{-3\alpha_{div}}^{3\alpha_{div}} \frac{d^2W(\alpha_b)}{d\omega d\Omega} F_{\text{incoh}}(\alpha_b, \psi) s_{div}(\alpha_b, \psi) d\alpha_b +$$

$$N(N-1) \int_{-3\alpha_{div}}^{3\alpha_{div}} \frac{d^2W(\alpha_b)}{d\omega d\Omega} F_{\text{coh}}(\alpha_b, \psi) s_{div}(\alpha_b, \psi) d\alpha_b,$$

где $F_{\text{incoh}}(\alpha_b, \psi)$ — некогерентный и $F_{\text{coh}}(\alpha_b, \psi)$ — когерентный форм-факторы, $s_{div}(\alpha_b, \psi)$ — плотность распределения импульса зарядов по углам α_b относительно оси сгустка, $d^2W(\alpha_b)/d\omega d\Omega$ — спектрально-угловая плотность энергии поляризационного излучения для одной заряженной частицы с усреднённым углом пролёта α_b относительно оси сгустка. Представлены основные ограничения разработанной модели, которые определяются размерами мишени и условием отсутствия пересечения траекторий частиц сгустка с мишенью. Расчёты КИВЧ проводились по данной формуле без учёта первого слагаемого, описывающего некогерентную часть ИВЧ для параметров мишени, геометрии и характеристик пучка электронов, при которых проводился эксперимент [12].

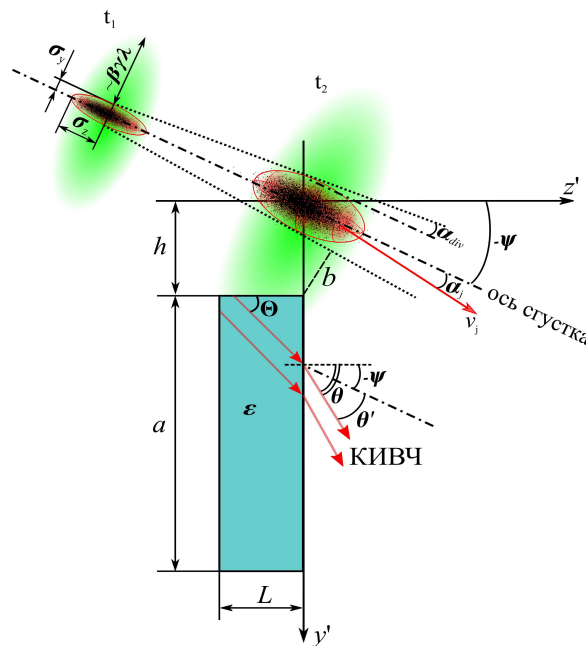


Рис. 3 – Схема генерации КИВЧ при пролёте сгустка заряженных частиц, имеющего нормальное распределение с первоначальной расходимостью вблизи диэлектрического экрана с размерами $\infty \times a \times L$.

На сегодняшний день отсутствует аналитическая модель, позволяющая рассчитывать КИВЧ без учёта когерентного дифракционного излучения (КДИ) в геометрии, представленной на рисунке 3. Качественно, в первом приближении, исключая полюс дифракционного излучения, в разделе 3.2 проведена теоретическая оценка углового распределения КИВЧ в отсутствие КДИ. Максимумы КИВЧ в угловом распределении (см. рисунок 4), рассчитанное по модели для ориентаций мишени соответствующих эксперименту [12], удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

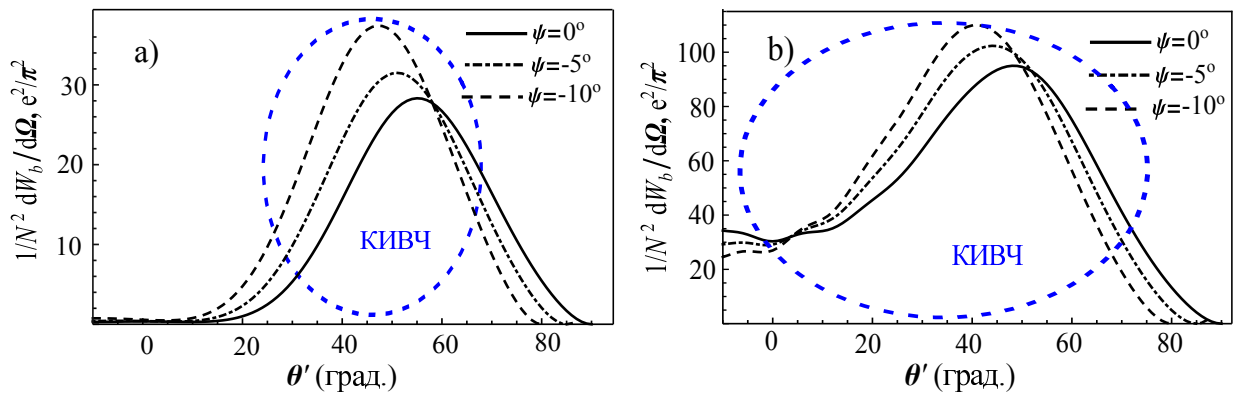


Рис. 4 – Угловое распределение КИВЧ (без учёта влияния КДИ) для различных углов пролёта сгустка $\psi = 0^\circ; -5^\circ; -10^\circ$ относительно диэлектрической пластины с размерами $\infty \times 100 \times 40$ мм. Параметры моделирования: $n = 1.32$, $\gamma = 12$, $L = 40$ мм, $a = 100$ мм, $h \approx 20$ мм, $\phi = 0^\circ$, $\sigma_x = 2$ мм, $\sigma_y = 4$ мм, $\sigma_z = 2$ мм, интегрирование проводилось по длинам волн а) $\lambda = 12 \div 15$ мм; б) $\lambda = 12 \div 30$ мм.

В разделе 3.3 проводится обсуждение полученных результатов.

В **четвертой главе** диссертации проведено исследование спектрально-угловых характеристик КИВЧ в субмиллиметровом диапазоне на примере конической мишени с внутренним вакуумным каналом.

Для этих целей в разделе 4.1 на основе метода поляризационных токов, рассмотрена задача равномерного и прямолинейного пролёта одиночного, моноэнергетического и мононаправленного сгустка вдоль оси вакуумного канала конической мишени имеющей толщину L , внешний радиус b и внутренний радиус a (см. рисунок 5), материал которой обладает частотной дисперсией в субмиллиметровом диапазоне

В разделе 4.2 получены выражения для магнитного поля поляризационного излучения в среде $H_b^{R(m)}(\mathbf{r}, \omega, \mathbf{r}_j)$ для мононаправленного ансамбля заряженных частиц. Величина длины L и внешнего радиуса b мишени подбирались такими, чтобы угол θ_{ch} между нормалью к конической поверхности мишени и траекторией движения сгустка и угол ИВЧ Θ_{Ch} в среде были сопоставимы. Для материала конической мишени с дисперсией в интересующем

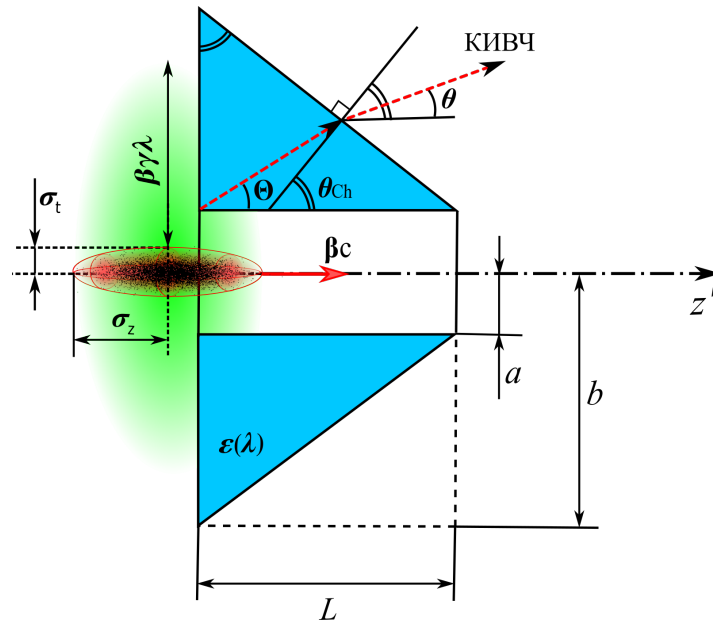


Рис. 5 – Геометрия конической мишени и схема регистрации когерентного излучения Вавилова-Черенкова для определения длины сгустка

диапазоне длин волн в первом приближении допускается, что интенсивность излучения Вавилова-Черенкова в вакууме испускаются в узком угловом интервале $\theta_{Ch} \pm \delta\theta$, $\delta\theta \ll \theta_{Ch}$, а угол вылета фотонов ИВЧ в вакуум относительно нормали к конической поверхности находится из закона Снеллиуса. В этом случае интенсивность поляризационного излучения определяется без учёта коэффициентов преломления Френеля. Представлены основные ограничения разработанной модели, которые определяются соотношением между поперечными размерами ансамбля заряженных частиц сгустка и вакуумным каналом мишени.

На примере сгустка заряженных частиц с нормальным распределением в продольном направлении показано, что мишень с дисперсионными свойствами в субмиллиметровом диапазоне может служить энергодисперсионным элементом, с помощью которой можно измерять угловое распределение КИВЧ, тем самым, определяя длину субпикосекундного сгустка заряженных частиц (см. рисунок 6).

В заключительном разделе 4.3 представлено обсуждение основных результатов главы.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию спектрально-угловых характеристик КИВЧ, которое генерируется коротким электронным сгустком (у которого поперечные размеры превышают продольный $\sigma_{x,y} \gg \sigma_z$), пролетающим через мишень с диэлектрической проницаемостью $|\epsilon| < 2$. Рассмотрено влияния на угловое распределение ИВЧ/КИВЧ таких факторов,

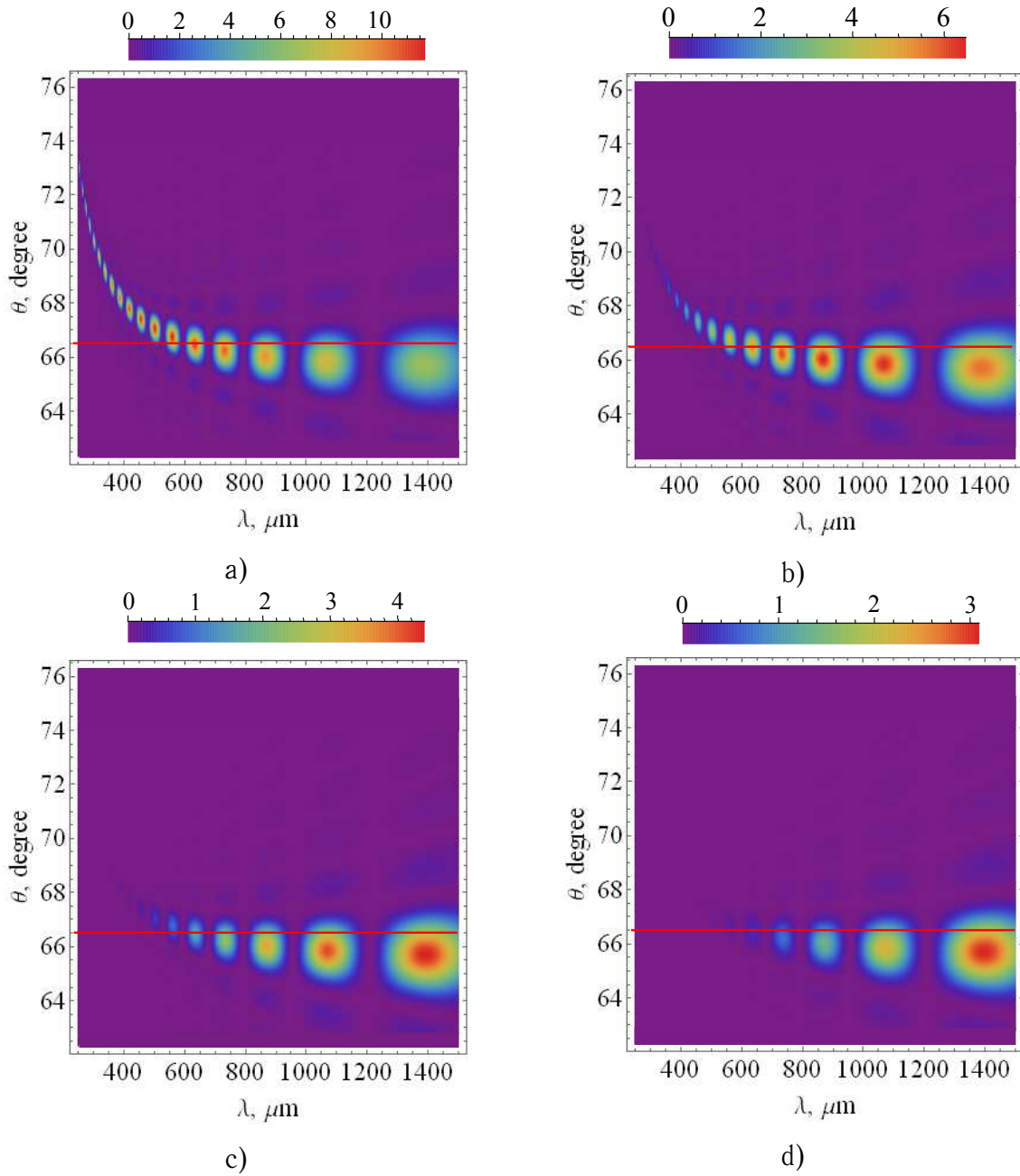


Рис. 6 – Спектрально-угловая плотность распределения когерентного излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в конической мишени из CsI коротким электронным пучком с продольными размерами а) $\sigma_z = 50$ мкм, б) $\sigma_z = 100$ мкм, в) $\sigma_z = 150$ мкм, д) $\sigma_z = 200$ мкм. Параметры моделирования: $\gamma = 100$, $a = 1$ мм, $b = 18.4$ мм, $L = 40$ мм.

как поперечные размеры мишени и асимметрия зарядового распределения в пучке.

В разделе 5.1 получено выражение, позволяющее рассчитывать спектрально-угловое распределение энергии поляризованного излучения для радиатора с конечными поперечными и продольными размерами. В случае, когда радиус затухания кулоновского поля $\beta\gamma\lambda$ заряженной частицы меньше поперечного размера мишени ($\beta\gamma\lambda < H_{x,y}$), результаты численного

моделирования практически совпадают с результатами, полученными по модели В.Е. Пафомова для мишени с безграничными поперечными размерами ($H_{x,y} \rightarrow \infty$). В этой геометрии распределение интенсивности ИВЧ является азимутально-симметричным (см. рисунок 7). Нарушение азимутальной симметрии происходит в том случае, когда один из поперечных размеров радиатора меньше $H_{x,y} < \beta\gamma\lambda$.

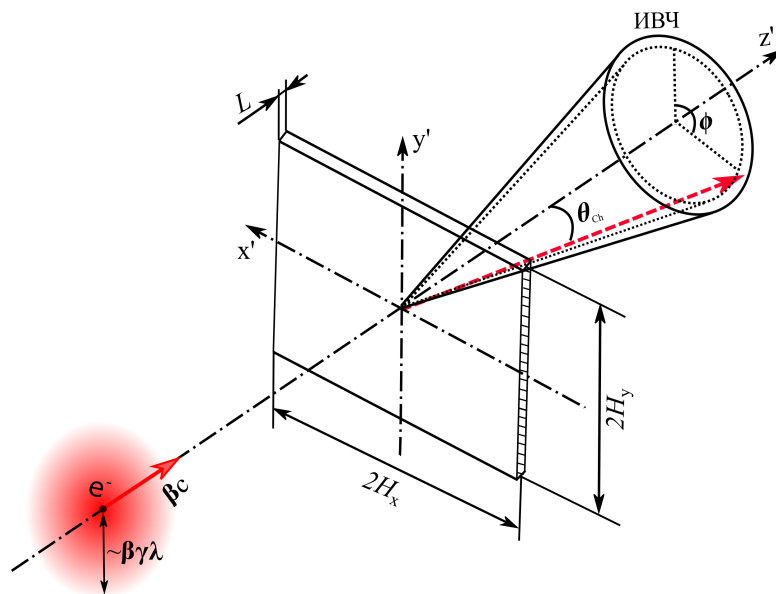


Рис. 7 – Схема генерации ИВЧ для мишени с размерами $2H_x \times 2H_y \times L$ от электрона. L — толщина мишени, $2H_{x,y}$ — поперечный размер мишени.

В разделе 5.2 также получено выражение для радиатора конечных размеров, позволяющее рассчитывать интенсивность поляризационного излучения для ансамбля заряженных частиц. Показано, что соотношение между поперечными размерами сгустка заряженных частиц с нормальным распределением влияет на азимутальную симметрию КИВЧ даже для радиатора с бесконечными поперечными размерами.

Раздел 5.3 посвящен исследованию углового распределения КИВЧ для сгустка заряженных частиц с асимметричным распределением заряда (наклонный дискообразный сгусток, для которого $\sigma_{x,y} \gg \sigma_z$). На рисунке 8 показано, что в этом случае выход КИВЧ в вакуум, является азимутально асимметричным. Максимальная интенсивность КИВЧ наблюдается в том случае, когда ось сгустка наклонена по отношению к скорости движения самого сгустка под углом, равным углу ИВЧ в среде ($\psi = \Theta_{ch}$), что качественно согласуется с результатом эксперимента [13].

В заключительном разделе 5.4 проводится обсуждение полученных результатов.

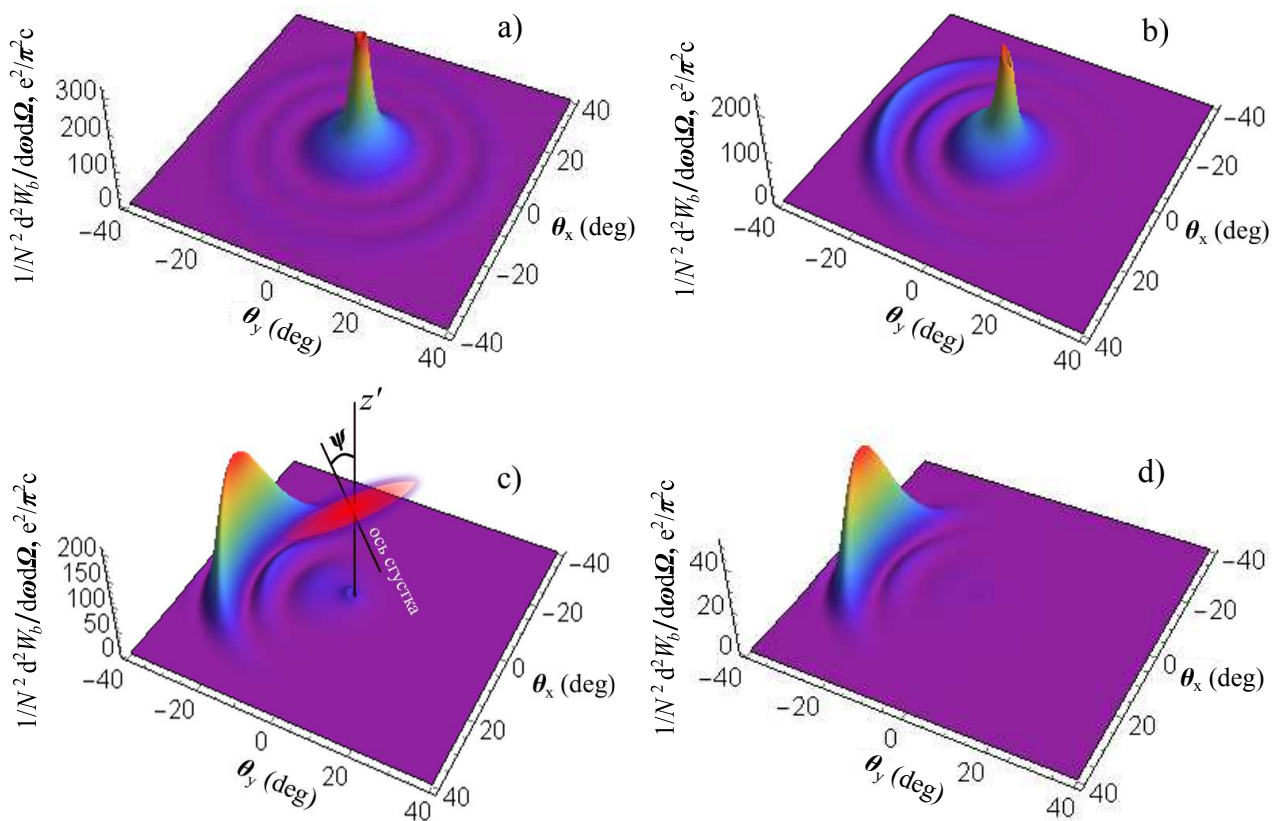


Рис. 8 – Угловое распределение КИВЧ от радиатора с размерами $2H_x \times 2H_y \times L$ для разных углов поворота сгустка. Параметры моделирования: $\varepsilon = 1.3$, $\gamma = 50$, $H = 35$ мм, $L = 10$ мм, $\lambda = 0.5$ мм, $\sigma_x = \sigma_y = 300$ мкм, $\sigma_z = 80$ мкм: а) $\psi = 0^\circ$, б) $\psi = 10^\circ$, в) $\psi = \Theta_{ch} = 28.7^\circ$, д) $\psi = 45^\circ$.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. В рамках выполнения диссертационной работы метод поляризационных токов был обобщен на случай излучения от ансамбля заряженных частиц с первоначальной расходимостью, что позволяет решать широкий круг задач по генерации излучения пучками заряженных частиц. Полученные результаты могут также быть использованы для диагностики субпикосекундных электронных пучков.
2. Показано, что при пролёте ультрарелятивистской заряженной частицы ($\gamma \sim 10^3$) вблизи бесконечного радиатора вдоль траектории движения заряда и вблизи радиатора конечной толщины ИВЧ имеет асимметричное азимутальное распределение, при этом радиационные потери энергии в оптическом диапазоне через механизм дифракционного излучения

- Вавилова-Черенкова для радиатора конечной толщины превышают потери энергии для радиатора бесконечной толщины на несколько порядков.
3. Выполнен расчёт углового распределения ИВЧ/КИВЧ при наклонном пролёте заряда через радиатор с бесконечными поперечными размерами и наклонном пролёте сгустка с нормальным распределением, имеющего первоначальную расходимость частиц вблизи пластины. Показано, что наклон мишени относительно траектории заряда или наклонный пролёт сгустка приводит к явному нарушению азимутальной симметрии углового распределения интенсивности ИВЧ/КИВЧ, что позволяет выводить излучение в вакуум.
 4. Проведен численный расчёт спектрально-угловых характеристик КИВЧ для релятивистского мононаправленного электронного сгустка, который проходит через ось вакуумного канала в диэлектрической мишени конической формы, материал которой обладает соответствующей частотной дисперсией в терагерцовом диапазоне длин волн. Подобная мишень может использоваться как инструмент невозмущающей диагностики для оценки длины сгустка. Мишени из такого материала можно рассматривать как «естественный» энергодисперсионный элемент и с их помощью можно измерять угловое распределение КИВЧ, тем самым определяя длину сгустка электронов.
 5. Показано, что поперечный размер мишени влияет на угловое распределение ИВЧ, и что в направлении, в котором размер радиатора меньше эффективного радиуса кулоновского поля заряженной частицы, происходит нарушение азимутальной симметрии ИВЧ. Показано, что азимутальная асимметрия ИВЧ/КИВЧ определяется асимметричным зарядовым распределением сгустка, что также может быть использовано для измерения характеристики пучков современных ускорителей.

Публикации автора по теме диссертации

- a. *Потылицын А. П., Гоголев С.Ю.* Когерентное излучение Вавилова – Черенкова от ультракороткого электронного пучка, проходящего через вакуумный канал в конической мишени // *Известия вузов. Физика.* – 2011. – Т. 54, № 11/2. – С. 279 – 286.
- b. *Потылицын А. П., Гоголев С.Ю.* Когерентное излучение Вавилова–Черенкова от ультракороткого электронного пучка, проходящего через вакуумный канал в конической мишени // *Вестник Науки Сибири, Физика. Математика.* – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 52 – 58.
- c. *Potylitsyn A.P., Gogolev S.Yu., Sukhikh L.G.* Angular distribution of coherent Cherenkov radiation from a bunch passing through a vacuum channel in the dielectric target // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2017. – V. 402. – Pp. 139 – 143.
- d. *Gogolev S.Yu., A.P.Potylitsyn* Azimuthal asymmetry of coherent Cherenkov radiation from a tilted bunch // *Physics Letters A.* – 2019. – V. 383, no. 9. – Pp. 888–893.
- e. *Potylitsyn A.P., Gogolev S.Yu.* Vavilov–Cherenkov Radiation in an Inclined Dielectric Plate and Violation of Azimuthal Symmetry // *Physics of Particles and Nuclei Letters* – 2019. – V. 16, no. 2. – Pp. 127 – 132.
- f. *Potylitsyn A.P., Gogolev S.Yu.* Radiation losses of the relativistic charge moving near a dielectric radiator // *Russian Physics Journal.* – 2020. – Vol. 62, no. 12. – Pp. 2187 – 2193.

Список литературы

1. *H. Legall, G. Blobel, H. Stiel et al.* Compact x-ray microscope for the water window based on a high brightness laser plasma source // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – Pp. 18362 – 18369.
2. *U.Dorda, R.Assmann, R.Brinkmann et al.* SINBAD — The accelerator R&D facility under construction at DESY // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.* – 2016. – Vol. 829. – Pp. 233 – 236.
3. *V. Bleko, P. Karataev, A. Konkov et al.* Coherent Cherenkov radiation as an intense THz source // *Journal of Physics: Conf. Series.* – 2016. – Vol. 732. – P. 012006.

4. *Toshiharu Takahashi, Yukio Shibata, Kimihiro Ishi et al.* Observation of coherent Čerenkov radiation from a solid dielectric with short bunches of electrons // *Phys. Rev. E.* – 2000. – Vol. 62. – Pp. 8606 – 8611.
5. *Tyukhtin A.V., Galyamin S.N., Vorobev V.V.* Peculiarities of Cherenkov radiation from a charge moving through a dielectric cone // *Phys. Rev. A.* – 2019. – Vol. 99. – P. 023810.
6. *Galyamin Sergey N., Vorobev Viktor V., Tyukhtin Andrey V.* Radiation of a Charge in Dielectric Concentrator for Cherenkov Radiation: Off-Axis Charge Motion // *Phys. Rev. Accel. Beams.* – 2019. – Vol. 22. – P. 083001.
7. *A.S. Konkov, P.V. Karataev, A.P. Potylitsyn, A.S. Gogolev* X-Ray Cherenkov Radiation as a Source for Transverse Size Diagnostics of Ultra-relativistic Electron Beams // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2014. – Vol. 517. – P. 012003.
8. *Bleko V.V., Konkov A.S., Soboleva V.V.* Coherent diffraction and Cherenkov radiation of relativistic electrons from a dielectric target in the millimeter wavelength range // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* – 2015. – Vol. 355. – Pp. 129 – 131.
9. *Пафомов, В.Е.* Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела // *Труды ФИАН.* – 1969. – Т. XLIV. – С. 28 – 167.
10. *Карловец Д.В., Потылицын А.П.* Дифракционное излучение от экрана конечной проводимости // *Письма в ЖЭТФ.* – 2009. – Т. 90, №. 5. – С. 368 – 373.
11. *Болотовский Б.М.* Теория эффекта Вавилова-Черенкова (III) // *Успехи физических наук.* – 1961. – Т. 75, №. 2. – С. 295 – 350.
12. *G. Naumenko, A. Potylitsyn, V. Bleko et al.* Cherenkov radiation from the target with predetermined dielectric properties, produced by a 3D-printer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* – 2017. – Vol. 402. – Pp. 194 – 197.
13. *K. Sakaue, R. Kuroda, Y. Taira et al.* Generation of a Coherent Cherenkov Radiation by using Electron Bunch Tilting // *Proceedings of IPAC2016.* – 2016. – Busan, Korea. – Pp. 1870 – 1872.