

На правах рукописи



ВЕРИГИН ДАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**НАБЛЮДЕНИЕ СТИМУЛИРОВАННОГО
КОГЕРЕНТНОГО ДИФРАКЦИОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО
ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальность 01.04.20 — Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2017

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики Физико-технического института 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: **Рыжов Виктор Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокоточной электроники Сибирского отделения РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики

Кубанкин Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
профессор кафедры теоретической и математической физики

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

Защита состоится «28» декабря 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 2а, ауд. 326.

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 года.

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

А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Современные исследования в области биологии, кристаллографии и других областей физики проводятся на пучках терагерцового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов. Предъявляемые требования к характеристикам таких источников очень высоки. Создание лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), позволяющих получать монохроматические пучки излучения с регулируемой длиной волны и с высокой интенсивностью, предоставило новый инструментальный исследователям. Однако, ЛСЭ, как и синхротронные источники третьего поколения, являются громоздкими установками со сложной и дорогой инфраструктурой. Поэтому создание источников с близкими к ЛСЭ параметрами, меньших размеров и стоимости является актуальной задачей. Для удовлетворения потребности промышленности и науки в источниках излучения, аналогичных ЛСЭ, в различных современных исследованиях были предложены и апробированы альтернативные механизмы получения широкополосных пучков электромагнитного излучения на пучках линейных электронных ускорителей с энергией менее 100 МэВ, например, через механизмы синхротронного и переходного излучений. Главной идеей источников на основе переходного излучения является генерация излучения короткими (< 1 пс) электронными сгустками линейных ускорителей. В этом случае в диапазоне длин волн < 300 мкм ускоренные электроны излучают когерентно, а интенсивность излучения электронов становится пропорциональна квадрату числа электронов в сгустке (N^2). Для получения монохроматического излучения необходимо использовать дисперсионные элементы (например, решетки).

Еще одним способом достичь интенсивности излучения, близкой к интенсивности ЛСЭ, является использование стимулированного излучения в схеме так называемого «pre-bunched FEL». В этой схеме генерация излучения последовательностью сгустков может осуществляться таким образом, чтобы происходило стимулирование генерируемого излучения каждого последующего сгустка накопленным излучением в резонаторе.

В ряде работ была исследована стимуляция на основе синхротронного излучения и переходного излучения. Однако, для достижения требуемых интенсивностей излучения необходимо преодолеть ряд трудностей таких как:

1. генерация побочного тормозного излучения в рентгеновском диапазоне (повышает требования к радиационной защите);
2. невозможность использования пучков умеренно релятивистских электронов из-за процессов многократного рассеяния в зеркалах резонатора, ухудшающего параметры результирующего излучения;

3. невозможность использования электронных пучков высокой интенсивности, (оптические характеристики зеркал резонатора, в которых генерируется переходное излучение могут деградировать, что, соответственно, ухудшает добротность резонаторов и эффективность генерации стимулированного излучения).

Возможным решением указанных проблем может стать использование дифракционного излучения, которое генерируется при прохождении заряженных частиц в вакууме вблизи края проводящей мишени. В этом случае сгусток заряженных частиц взаимодействует с мишенью только своим электромагнитным полем

Таким образом, исследование стимулирования когерентного дифракционного излучения в открытом резонаторе последовательностью электронных сгустков для создания схемы «pre-bunched FEL» является важным и актуальным.

Целью данной работы является изучение процесса стимулирования когерентного дифракционного излучения в открытом резонаторе последовательностью электронных сгустков для создания схемы «pre-bunched FEL».

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

1. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик когерентного дифракционного излучения, генерируемого последовательностью электронных сгустков.
2. Изучение свойств резонатора для нахождения его оптимальных параметров для генерации стимулированного когерентного дифракционного излучения.
3. Наблюдение стимулированного когерентного дифракционного излучения и исследование процесса накопления стимулированного когерентного дифракционного излучения в полуконфокальном резонаторе, образованном зеркалами резонатора, которые одновременно являются мишенями для генерации дифракционного излучения.
4. Моделирование характеристик открытого резонатора на основе метода поляризационных токов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная установка для наблюдения и изучения свойств стимулированного дифракционного излучения, генерируемого в открытом полуконфокальном резонаторе при прохождении через него электронного пучка с энергией 43 МэВ, состоящего из последовательности сгустков, следующих с периодичностью 2,8 нс.

2. Результаты измерения угловых характеристик когерентного дифракционного излучения, генерируемого таким пучком, и сравнение полученных результатов с теоретической моделью.
3. Экспериментальное наблюдение эффекта стимуляции когерентного дифракционного излучения, генерируемого электронными сгустками с энергией 43 МэВ, с периодом 2,8 нс в полуконфокальном резонаторе при детектировании зависимости интенсивности накопленного в резонаторе излучения от числа прошедших через резонатор электронных сгустков.
4. Аналитические выражения и код расчета характеристик открытого резонатора при моделировании процесса накопления излучения, генерируемого пучком с указанными характеристиками, позволившие провести сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.
5. Обоснование схемы конфокального резонатора с увеличенным коэффициентом добротности и способ получения полупрозрачных зеркал в исследуемой области длин волн для увеличения эффективности стимуляции.

Научная новизна представленных в диссертации результатов:

1. Создана установка для генерации и исследования характеристик стимулированного когерентного дифракционного излучения, генерируемого пучком электронов, проходящим через отверстия в зеркалах открытого резонатора, позволяющая исследовать различные схемы резонаторов с различными типами зеркал, настраивать положение зеркал по отношению к трассе прохождения пучка электронов и детектировать излучение от каждого сгустка с периодом 2,8 нс.
2. Впервые экспериментально наблюдался эффект стимулирования когерентного дифракционного излучения, генерируемого электронными сгустками в мишенях-зеркала открытого полуконфокального резонатора.
3. Разработан программный код для расчета характеристик открытого резонатора путем моделирования распределения интенсивности дифракционного излучения на зеркалах резонатора на основе модели поляризационных токов, позволяющий исследовать процессы накопления излучения в резонаторе и процессы геометрических и дифракционных потерь.
4. Предложена и обоснована схема конфокального резонатора, позволяющая существенно повысить эффективность стимуляции дифракционного излучения.

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется несколькими аспектами. Созданная экспериментальная станция позволила получить экспериментальные данные, подтверждающие возможность стимулирования когерентного дифракционного излучения. Полученные данные позволяют рассматривать возможность создания так называемого «prebunched FEL» (ЛСЭ на основе заранее модулированного пучка электронов) без прохождения пучка пучка через вещество зеркала (поскольку используется процесс дифракционного излучения) и, соответственно, без ухудшения его параметров. Предложенная схема получения стимулированного когерентного дифракционного излучения планируется к использованию на пучке рекуператора в лаборатории High Energy Accelerators research organization (КЕК, Япония) для генерации излучения в ТГц диапазоне [1]. Полученные аналитические выражения и программный код позволяют проводить быструю (метод мод Гаусса-Лагерра) или точную (обобщенный метод поверхностных токов) оценку дифракционных и геометрических потерь и добротности открытого резонатора путем расчета распределения интенсивности излучения на поверхности зеркал резонатора.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается, прежде всего, использованием моделей, справедливость которых подтверждена в ряде экспериментальных работ и согласием представленных результатов экспериментальных исследований с теоретическими оценками. В некоторых случаях различия между экспериментом и теорией были в пределах применяемых допущений и не несли искажения физического смысла полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на семинарах Инновационной международной научно-образовательной лаборатории «Фотон» кафедры прикладной физики ТПУ (2009 – 2016 года), семинарах LUCX-группы японской Национальной лаборатории физики высоких энергий (High Energy Accelerator Research Organization, КЕК, Tsukuba, Japan, 2009 – 2016 год), а также докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

- VIII, IX, XI International Symposium of «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» («RREPS»), Zvenigorod, Russian Federation – 2009 год, Egham, UK – 2011 год и Saint Petersburg, Russian Federation – 2015 год;
- XLI Международная конференция по «Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами» («ФВЗЧК»), Москва, Россия – 2011 год;
- 1st и 2nd «International Particle Accelerator Conference» («IPAC»), Kyoto, Japan – 2010 год и San Sebastian, Spain – 2011 год;

- 7th «International Forum On Strategic Technology» («IFOST»), Tomsk, Russian Federation, 2012 год;
- I, III, V, VII Mini-workshop for Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams «AGTaX» using compact electron accelerator, Tsukuba, Japan – 2013 год, Saint Petersburg, Russian Federation – 2014 год, Moscow, Russian Federation – 2015, 2016 года.

Личный вклад. Автор принимал активное участие во всех этапах работы – сборка и настройка экспериментальной станции на ускорителе LUCX в Японии, тестирование и подготовка программного обеспечения для сбора и обработки экспериментальных данных, постановка задач и планирование экспериментальных сеансов, участие в экспериментальных сеансах и обработка экспериментальных данных, проведение аналитических расчётов и компьютерного моделирования, анализ полученных результатов и их представление научной общественности в виде докладов и публикаций.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 93 страницы, включая 76 рисунков, 9 таблиц и список литературы, содержащий 58 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор экспериментальных исследований по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы и описывается структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена теоретическим основам генерации дифракционного излучения (ДИ), когерентного излучения и эффекту стимуляции. В разделе 1.1 приводятся основные аналитические выражения для расчета интенсивности и спектрально-угловых характеристик ДИ в приближении одиночного точечного заряда. В сложной геометрии для расчета излучения, генерируемого одиночной заряженной частицей в мишенях произвольной формы и при произвольном угле пролета, использовался обобщенный метод поверхностных токов [2, 3]. Метод позволяет рассчитывать характеристики ДИ, генерируемого в наклоненном, по отношению к пучку фокусирующем зеркале с центральным отверстием. В разделе приводятся результаты расчета спектрально-угловых характеристик ДИ по обобщенному методу по-

верхностных токов и сравнение характеристик дифракционного излучения, генерируемого плоской и фокусирующей мишенью.

В разделе 1.2 приводятся методы расчета спектрально-угловых характеристик с учетом размеров реальных пучков электронов в ускорителях, то есть в условиях когерентного излучения электронов. Интенсивность излучения при выполнении условия когерентности будет пропорционально квадрату числа электронов в сгустке N^2 . Приведены результаты сравнения когерентного и некогерентного спектра дифракционного излучения электронов.

В разделе 1.3 приводится описание эффекта стимулированного излучения, которое возникает в момент взаимодействия электромагнитного поля электронного сгустка с материалом мишени и в области взаимодействия приложено внешнее электромагнитное поле [5]. В случае выполнения условий конструктивной интерференции, то есть когда напряженность излучаемой волны совпадает с внешним полем, внешнее поле приводит к усилению излучения электронами при взаимодействии с мишенью. Суммарные потери на излучение зависят от напряженности внешнего электромагнитного поля. Таким образом, по аналогии с лазерами, внешнее электромагнитное поле «накачивает» генерируемое электронным сгустком поле излучения. В разделе приведена иллюстрация стимулирования излучения последовательности электронных сгустков с помощью схемы «накопительного кольца». Получены аналитические выражения, связывающие интенсивность излучения и количество электронных сгустков, участвовавших в генерации дифракционного излучения.

В разделе 1.4 делается краткое заключение по главе 1.

Вторая глава диссертации посвящена линейному ускорителю электронов LUCX, экспериментальной станции для установки резонатора, детектирующей системе, системе получения и обработки данных.

В разделе 2.1 описывается ускоритель электронов LUCX (Laser undulator compact X-ray project) комплекса ATF (Accelerator Test Facility) организации High energy accelerators research organization (КЕК, Япония). Приводится описание всех основных систем ускорительного комплекса, использующихся для генерации и управления пучком электронов, и детекторов основных параметров пучка электронов. На ускорителе LUCX используются 3 датчика тока пучка электронов, 6 датчиков положения пучка и 5 датчиков профиля пучка. Ускоритель LUCX генерирует последовательности электронных сгустков с энергией до 44 МэВ, число которых может быть от 4 до 100, с расстоянием между ними 2,8 нс (840 мм). Размер сгустка 200 мкм на 60 мкм, заряд сгустка 0,5 нКл.

В разделе 2.2 приводится описание экспериментальной установки и ее основных компонентов. Для проведения исследований была выбрана схема с двумя зеркалами с центральными отверстиями, в которых генерируется КДИ, расположенными на оси пучка ускорителя на расстоянии 420 мм друг

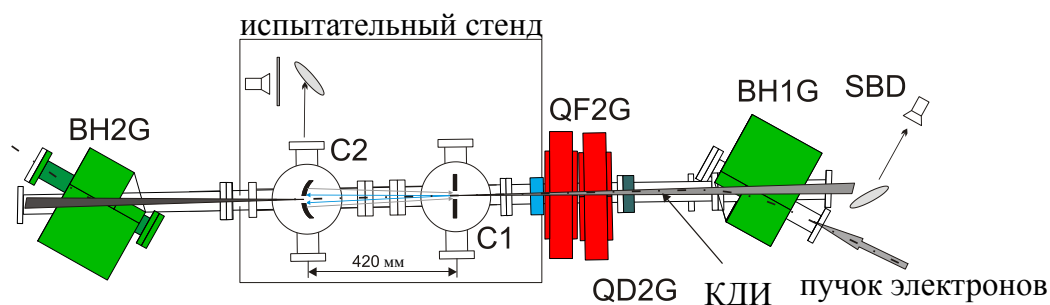


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки на пучке электронов ускорителя LUCX

от друга (половина расстояния между сгустками). В этом случае излучение, испущенное при взаимодействии первого сгустка с первым зеркалом, дойдет до второго зеркала практически одновременно с первым сгустком. На втором зеркале первый сгусток генерирует стимулированное КДИ (СКДИ) «вперед» и «назад» в присутствии КДИ, испущенного от первого зеркала. СКДИ «назад» от взаимодействия первого сгустка со вторым зеркалом дойдет до первого зеркала одновременно с приходом второго сгустка. Второй сгусток генерирует СКДИ «вперед» и «назад» в присутствии СКДИ первого сгустка. Цикл повторяется, СКДИ накапливается в резонаторе. Накопленное излучение будет уходить из резонатора через отверстия в зеркалах-мишенях и может быть зарегистрировано детектором как в направлении вперед по пучку, так и назад. В эксперименте детектор установили в задней полусфере пучка для снижения фоновой нагрузки.

Детектор излучения был выбран исходя из рассчитанных спектров КДИ, генерируемых последовательностью электронных сгустков на ускорителе LUCX, и требования регистрировать излучение от каждого отдельного сгустка. Таким условиям удовлетворял детектор на основе диода Шоттки с полосой пропускания 60 – 90 ГГц.

Для каждого зеркала была подготовлена вакуумная камера с 6 перпендикулярными выводами (см. рисунок 1). Камеры были установлены на оптическом столе. Два вывода (вперед и назад по пучку) использовались для подсоединения к системе транспортировки пучка, один вывод (вверх по пучку) для установки системы позиционирования, два вывода (вправо по пучку) использовались для вывода излучения и испытаний материалов и детектора на оптическом столе, два вывода (влево по пучку) использовались для диагностики пучка. Вывод вниз по пучку не использовался. Для установки зеркал внутри вакуумной камеры была разработана специальная держатель для зеркал диаметром 100 мм и регулировкой угла наклона зеркал в небольших пределах.

Полуконфокальный резонатор был сформирован двумя зеркалами из кварцевого стекла с нанесенным на него слоем алюминия, либо из алюминия, диаметром 100 мм. Одно зеркало было плоским, другое – фокусирующим с радиусом кривизны 840 мм. Отверстия в зеркалах были диаметром 5 мм,

однако в плоском зеркале было вытравлено алюминиевое напыление в центре диаметром 15 мм с целью увеличить потери в резонаторе и регистрировать детектором большой поток излучения.

Для перемещения зеркал была разработана особая система позиционирования. Были моторизованы три оси движения для каждого зеркала в соответствии с осями пучка ускорителя и одна ось вращения для каждого зеркала. Для перемещения зеркал были выбраны линейные координатные платформы Kohzu YA16A-R1, которые приводились в движение шаговыми двигателями. Шаг мотора мог составить от 0,72 градуса до 0,00288 градуса. Для калибровки, проверки разрешения и люфта нашей системы позиционирования мы использовали Keyence LK-G500, высоко-чувствительный лазерный дальномер, с абсолютным разрешением 2 мкм и линейностью $\pm 0,05\%$.

Система сбора и обработки данных была построена на базе осциллографа Tektronix 684C (полоса пропускания 1 ГГц, частота дискретизации 5 ГГц). Система управления экспериментом по обнаружению СКДИ была реализована на программном обеспечении NI Labview с синхронизацией с базой данных ускорителя LUCX. Кроме сигнала с детектора ДИ, регистрировался сигнал с токового датчика.

Для настройки положения мишеней относительно электронного пучка нами был использован детектор гамма-излучения. Если сгусток электронов проходит через отверстие, не задевая мишень, то тормозное излучение будет отсутствовать, и сигнал с детектора будет соответствовать уровню фонового сигнала. В качестве детектора гамма-излучения в эксперименте использовался ФЭУ Hamamatsu 1611, конвертером гамма квантов в световые фотоны был выбран аэрогель.

В разделе 2.3 приводятся выводы по главе и возможности по проведению экспериментальных исследований.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям, в которых приводятся результаты по обнаружению стимулированного когерентного дифракционного излучения.

Раздел 3.1 посвящен настройке зеркал на пучке электронов по сигналу с датчика гамма-излучения. Для этого зеркала с помощью системы перемещения двигались по одной из координатных осей (оси x и y, в плоскости перпендикулярной оси прохождения пучка z). Когда пучок электронов проходит через отверстие в зеркале, не касаясь его, то гамма-излучение отсутствует и сигнал с детектора минимальный. На рисунке 2 приведены примеры зависимости сигнала гамма-детектора от положения зеркал. В дальнейшем, оба зеркала выставлялись в положение минимума сигнала гамма-излучения.

В разделе 3.2 анализируются сигналы от детектора излучения и токового датчика ускорителя LUCX, которые доказывают, что детекторы могут регистрировать каждый отдельный сгусток и генерируемое этим сгустком излучение в мишени-зеркале резонатора (см. рисунок 3).

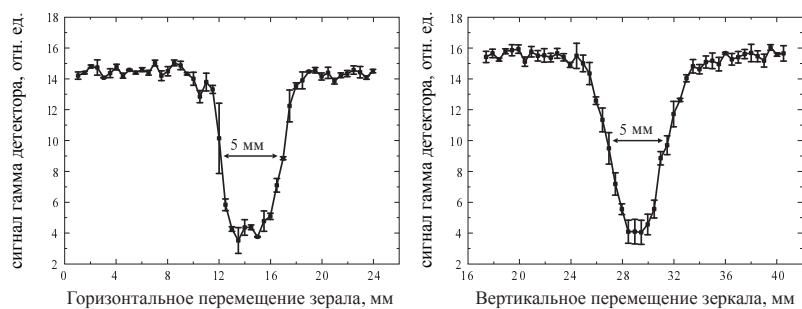


Рис. 2 – Зависимость интенсивности сигнала детектора гамма-излучения при перемещении зеркала с отверстием диаметром 5 мм (оси перемещения перпендикулярны оси пучка и пересекают ось)

В разделе 3.3 исследуются угловые характеристики излучения, генерируемого электронным пучком в мишени. Зависимость интенсивности сигнала детектора от угла вращения зеркала регистрировалась в геометрии «назад» от различных углов поворота мишени. Для получения угловых зависимостей сигналы детектора для каждого сброса пучка на мишень (см. рисунок 3) выделялся один из пиков генерируемого излучения, площадь под которым (пропорциональная числу генерируемых фотонов ДИ) нормировалась на площадь под соответствующим пиком токовой зависимости (пропорциональную числу электронов в сгустке), и это значение ставилось в соответствии с углом поворота зеркала. На рисунке 4 приведены угловые зависимости, подтверждающие, что излучение, генерируемое пучком в зеркалах резонатора соответствует ДИ по распределению интенсивности излучения. Подтверждением того, что генерируется именно ДИ, а не переходное излучение является факт прохождения пучка через центр отверстия в зеркале резонатора.

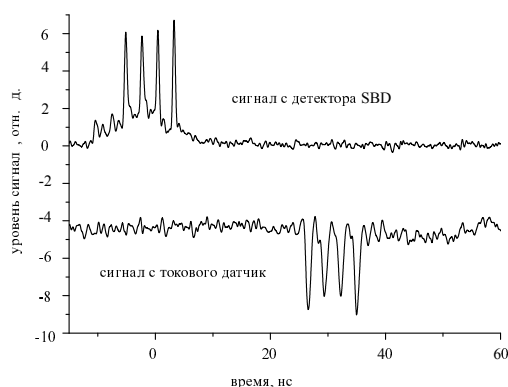


Рис. 3 – Сигналы с детектора ДИ и токового датчика

В разделе 3.4 приводится проверка условия когерентности. Нами были получены зависимости интенсивности сигнала детектора КДИ от сигнала токового датчика. Типичная токовая зависимость представлена на рисунке 5. При аппроксимации полученных зависимостей были рассчитаны коэффициенты степенной функции вида $y = a + b \cdot x^c$. Полученные значения параметра c для разных экспериментальных сеансов находились в интервале от

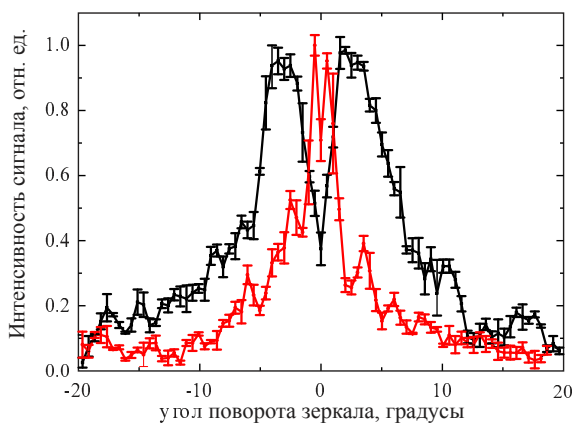


Рис. 4 – Угловые зависимости, полученные при вращении зеркал резонатора вокруг своей оси. Черная линия – фокусирующее зеркало, красная (серая) – плоское зеркало

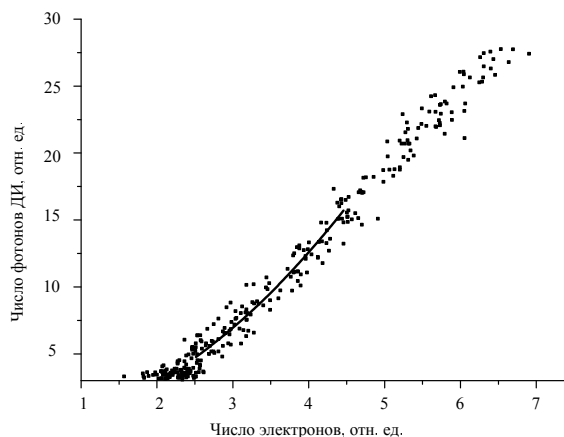


Рис. 5 – Пример токовой зависимости сигнала детектора при генерации ДИ. Аппроксимация проведена степенной функцией с показателем степени $1,98 \pm 0,38$

1,5 до 2, что подтверждало генерацию когерентного дифракционного излучения частью электронов в сгустке. Отклонение полученных зависимостей от квадратичной функции объясняется тем, что область спектральной чувствительности детектора перекрывается с некогерентной частью спектра ДИ.

В разделе 3.5 описывается настройка резонатора на накопление КДИ и СКДИ. Для этого выставляли два зеркала на пучок одновременно и, изменяя расстояние между зеркалами и положения зеркал, измеряли сигнал детектора. В «настроенном» резонаторе накапливается КДИ, генерируемое каждым проходящим через резонатор сгустком электронов, и теряется часть накопленного излучения в результате рассеяния на зеркалах и отверстиях в них. После того как все сгустки пучка электронов проходят через резонатор, накопленное излучение через отверстия и края зеркал покидает резонатор. В этом случае с каждым периодом в резонаторе наблюдаются пики в сигнале детектора. В не «настроенном» резонаторе не будет происходить накопления излучения, и в сигнале детектора будут присутствовать только пики излучения, генерируемые непосредственно электронными сгустками. На рисунке 6 приведен пример сигнала детектора при нахождении резонатора в «настроенном» и не «настроенном» режиме.

В разделе 3.6 приводятся результаты изучения режима накопления излучения в резонаторе при изменении его размеров. Добившись работы резонатора в «настроенном» режиме необходимо было выбрать «оптимальный» режим, в котором бы соблюдалось условие для появления эффекта стимуляции. Для этого были получены сигналы детектора при изменении длины резонатора (координата z , вдоль траектории электрона). Далее эти сигналы обрабатывались следующим образом: выбирался один из пиков в сигнале детектора, по времени регистрируемый после прохождения пучка, и площадь

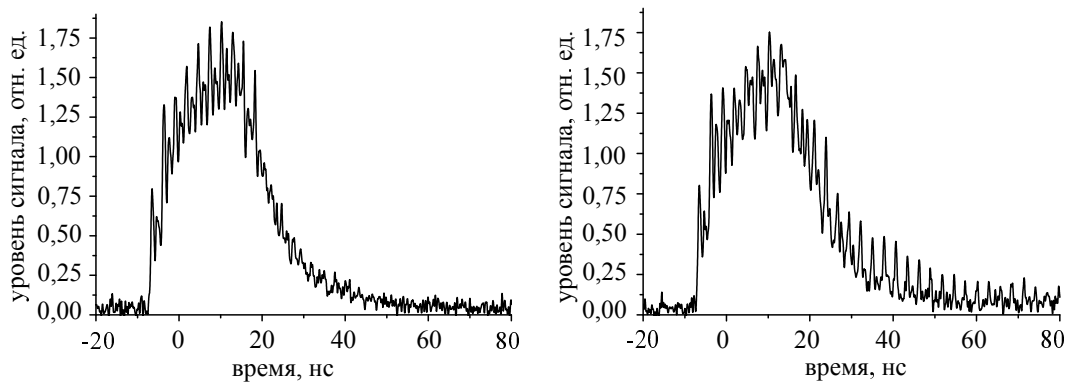


Рис. 6 – Пример сигналов детектора для резонатора, в котором нет накопления излучения (слева), и резонатора, настроенного на накопление излучения (справа)

под пиком соотносилась с расстоянием между зеркалами (позициями зеркал). Пример полученной зависимости приведен на рисунке 7. В дальнейших экспериментах по обнаружению процесса стимуляции КДИ мы проводили исследования для расстояния между зеркалами L_{opt} (симметричный максимум на рисунке 7)

В разделе 3.7 даются подтверждения обнаружения процесса стимуляции КДИ в резонаторе. После настройки резонатора на «оптимальный» режим, резонатор был установлен в положения максимального накопления излучения и была зарегистрирована зависимость интенсивности накопленного в резонаторе КДИ от числа сгустков электронов прошедших через него. Интенсивность накопленного КДИ определялась одним из пиков в сигнале детектора после прохождения всех сгустков пучка электронов. Ожидаемая зависимость интенсивности стимулированного ДИ от числа электронных сгустков без учета потерь излучения в резонаторе должна быть квадратичной. В реальном случае часть излучения на каждом обороте покидает резонатор, поэтому степенная зависимость интенсивности стимулированного КДИ от числа электронных сгустков ожидалась с показателем степени меньше 2. На рисунке 8 приведена зависимость сигнала детектора от числа сгустков и полученных после обработки данных эксперимента. Параметры аппроксимация полученных зависимостей позволяют утверждать, что в настроенном на «оптимальный» режим резонаторе наблюдалась стимуляция КДИ.

В разделе 3.8 дан метод оценки добротности резонатора по экспериментальным данным. Так как после прохождения всех сгустков в пучке через резонатор прекращается генерация нового излучения, то, по аналогии с другими видами резонаторов, изменение интенсивности сигнала детектора после прохождения всех сгустков в пучке должна спадать экспоненциально. В этом случае аппроксимацией экспериментальных данных находилась постоянная «высвечивания» резонатора (α) и высчитывалась добротность резонатора В эксперименте, результат которого приведены на рисунке 9, коэффициент доб-

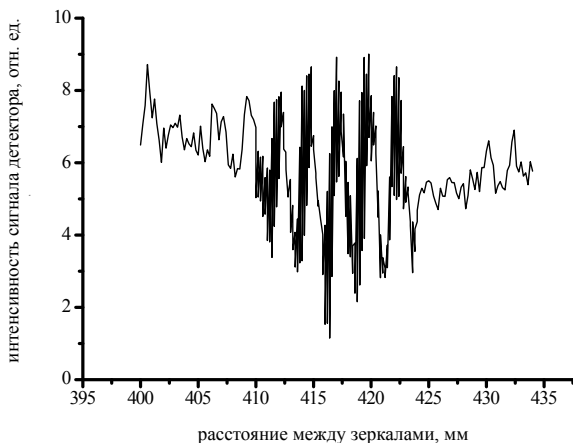


Рис. 7 – Пример настройки расстояния между зеркалами для соблюдения условий генерации стимулированного ДИ

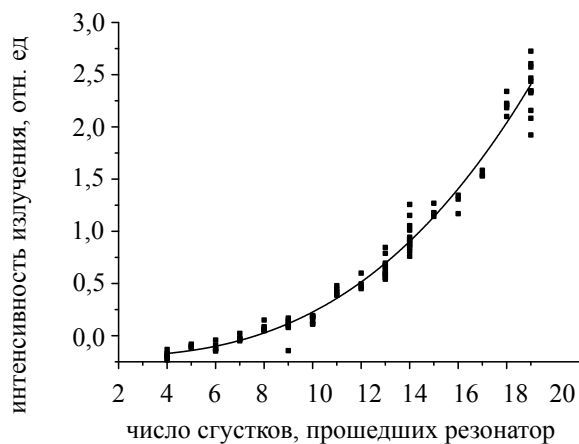


Рис. 8 – Пример оценки зависимости интенсивности сигнала из резонатора от числа прошедших электронных сгустков. Аппроксимация проведена степенной функцией с показателем степени $2,81 \pm 0,11$

ротности равен примерно 29,8. В работе [4] приведен коэффициент добротности резонатора равный 72.

В разделе 3.9 проведены исследования коэффициента пропускания и поглощения материалов зеркал для оценки вклада этих процессов в суммарные потери резонатора. Для исследования коэффициента пропускания использовалось когерентное переходное излучение назад, генерируемое при направлении пучка электронов на поверхность одной из мишеней. Излучение направлялось из камеры (угол установки мишени 45 градусов), отражалось зеркалом и регистрировалось детектором. С помощью манипулятора тестовый объект помещался под пучок переходного излучения. В результате детектор мог регистрировать прямое излучение и излучение, прошедшее через тестовый объект. В качестве тестового объекта выступали плоская мишень диаметром 100 мм с 15 мм отверстием в напыленном алюминии и 5 мм отверстием в кварцевом стекле, набор кремниевых пластин и зеркало диаметром 50 мм. Результаты измерений представлены на рисунке 10.

В разделе 3.10 приводятся выводы по главе.

В четвертой главе диссертации проведено моделирование характеристик различных резонаторов для определения типа и оптимальных параметров резонатора. Здесь же предлагаются схемы резонатора с улучшенными характеристиками для генерации и накопления стимулированного когерентного дифракционного излучения в терагерцовом и субтерагерцовом диапазонах.

В разделе 4.1 приводятся общие аналитические выражения для расчета добротности резонаторов с использованием данных о потерях излучения

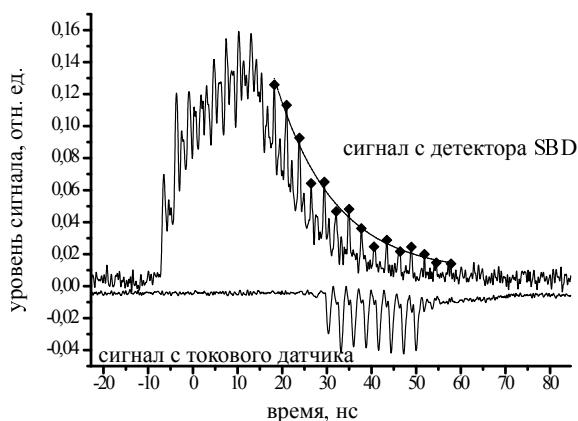


Рис. 9 – Оценка добротности резонатора экспоненциальной функцией с показателем экспоненты $\frac{1}{\alpha} = 1,33 \cdot 10^{-8} \pm 0,15 \cdot 10^{-8}$

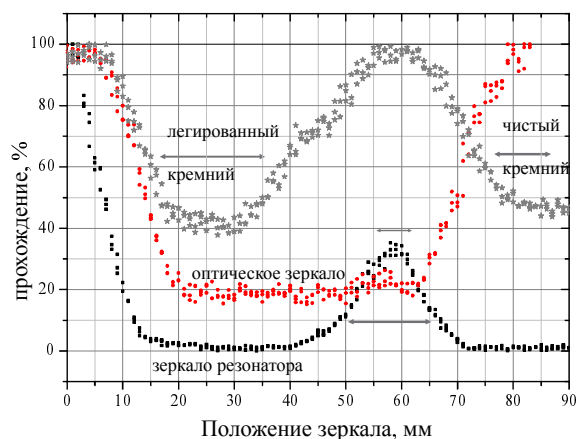


Рис. 10 – Коэффициент пропускания когерентного переходного излучения для различных тестовых объектов

в различных элементах резонатора. Аналитические выражения получены из работ сотрудников Новосибирского ЛСЭ [6, 7], где основными типами потерь являются дифракционные, геометрические, омические потери.

В разделе 4.2 даны расчеты коэффициентов пропускания и отражения зеркал резонатора, проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными о коэффициентах пропускания и поглощения материалов мишени. На основании расчетов был предложен вариант схемы резонатора с заданным коэффициентом пропускания зеркал: изготовление полупрозрачного зеркала заданной толщины с очень тонким слоем проводящего материала. Предложенная схема облегчает оценку мощности накопленного излучения в резонаторе. Как оказалось, для реализации полупрозрачного зеркала с проводящим слоем из алюминия, толщина подложки из кремния совпадает с толщиной коммерческих образцов, однако проводящий слой должен быть очень тонким и не может быть нанесен с помощью недорогих технологий (например, плазменное напыление).

Таблица 1 – Коэффициент пропускания для составной мишени

Проводящий слой (алюминий), нм	Подложка (кремний), мкм	Коэффициент пропускания, %
2	100	6,5
3	100	3,4
4	100	2,0

В разделе 4.3 приведены два подхода к расчету геометрических и дифракционных потерь на зеркалах резонатора. Из работы [8], было обнаружено, что дифракционные потери (c_d) на краях и на отверстии зеркал могут быть посчитаны из геометрических потерь (c_g):

$$c_d = 1 - (1 - c_g)^2 \quad (1)$$

В свою очередь геометрические потери можно найти с помощью распределения интенсивности накопленного излучения в плоскости поверхности мишеней. Для решения такой задачи, применительно к нашим зеркалам, были использованы два подхода в определении распределения интенсивности когерентного дифракционного излучения. В первом подходе распределения интенсивности на поверхности зеркал находились обобщенным методом поверхностных токов [3]. Для упрощения расчетов вводились следующие ограничения: приближение одного электрона, идеальная проводимость мишеней и прозрачность отверстий в мишенях.

В расчетах использовалась геометрия эксперимента СКДИ (рис. 11), где точечные электронные сгустки с энергией 43 МэВ с периодичностью 2,8 нс проходили через отверстия диаметром 5 мм в двух идеально проводящих мишенях диаметром 100 мм. Одна мишень выполнена плоской, вторая – фокусирующей с радиусом кривизны 840 мм.

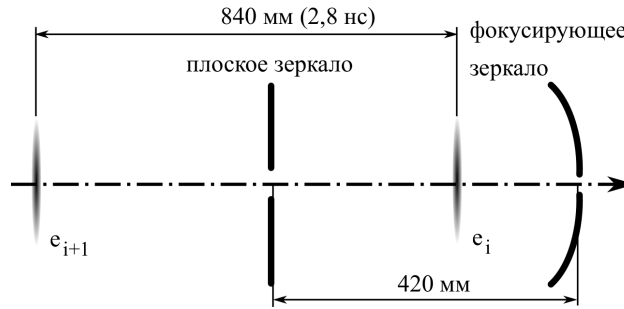


Рис. 11 – Схема моделирования резонатора эксперимента для обобщенного метода поверхностных токов и метода мод Гаусса-Лагерра

Первый сгусток, пролетая плоскую мишень, генерирует своим полем E_e дифракционное излучение вперед ($E_f^{(1)}$). При пролете резонатора электрон движется по оси резонатора совместно с сгенерированным полем. Поэтому взаимодействие поля электрона с фокусирующей мишенью происходит в присутствии внешнего поля. Дифракционное излучение назад от фокусирующей мишени запишется следующим выражением:

$$E_b^{(1)}(r_0, \omega) = -\frac{1}{2\pi} \int_{S_2} dS_2 \left[n_2, (E_e(r, \omega) + E_f^{(1)}(r, \omega)) \right] \times \nabla_0 G(r_0, r, \omega), \quad (2)$$

где n_2 – нормаль к поверхности вогнутой мишени, а интегрирование ведется по поверхности второй мишени dS_2 [9]. Затем электрон покидает резонатор. Дифракционное излучение назад от первого электрона достигнет плоского зеркала одновременно со вторым электроном. В этом случае поле электрона будет взаимодействовать с первой мишенью в присутствии внешнего поля. По аналогии с формулой (2) получаем:

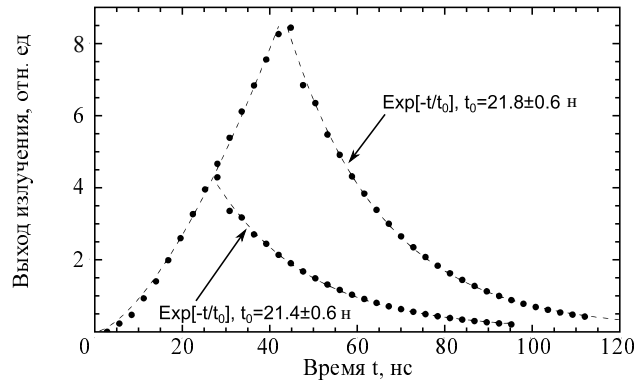


Рис. 12 – Накопление и затухание излучения в резонаторе, рассчитанных обобщенным методом поверхностных токов

$$E_f^{(2)}(r_0, \omega) = -\frac{1}{2\pi} \int_{S_1} dS_1 \left[n_1, (E_e(r, \omega) + E_b^{(1)}(r, \omega)) \right] \times \nabla_0 G(r_0, r, \omega), \quad (3)$$

В итоге задача по нахождению распределения интенсивности излучения на поверхности зеркал сводится к последовательному учету вклада каждого электрона в суммарное поле в резонаторе. После пролета электронов через резонатор происходит постепенный сброс накопленного излучения через механизм дифракционных и геометрических потерь. Данный процесс моделировался при принятии поля электрона равным 0.

Основной проблемой при данном подходе стало вычисление интегралов из-за добавления в итоговую формулу двойного интегрирования при каждом отражении излучения от зеркал, что сильно увеличивает время расчетов. Выходом из данной ситуации стало использование интерполяции распределения поля на поверхности мишени при каждом отражении излучения.

Расчеты методом обобщенных токов были проведены для последовательности из 9 и 15 электронов. Результаты накопления и затухания излучения в резонаторе приведены на рис. 12. Оценка добротности резонатора была проведена аппроксимацией спада выхода излучения, так же как и в эксперименте. Для длины волны излучения в 3,5 мм была получена величина добротности 48,7. Аппроксимация роста выхода излучения в резонаторе была проведена степенной функцией, показатель степени функции для длины волны излучения 3,5 мм был равен $1,84 \pm 0,02$. Отличие от квадратичной зависимости вызвано потерями излучения в резонаторе через механизм дифракционных и геометрических потерь.

Решение обобщенным методом поверхностных токов требует значительных вычислительных мощностей и длительное время на выполнение даже с принятыми упрощениями. Было найдено решение для более быстрого нахождения распределения интенсивности излучения. В резонаторах с радиальной симметрией возбуждаются моды Гаусса-Лагерра, которые описываются полиномами Лагерра [10]. Выполняя преобразования Френеля от мо-

ды Гаусса-Лагерра находилось распределение амплитуды моды излучения на расстоянии от перетяжки (талии пучка).

Геометрические потери на мишени происходят на отверстии в мишени и на ее краях. В этом случае коэффициент геометрических потерь запишется как отношение суммы интенсивности моды Гаусса-Лагерра на площади поверхности в отверстии и за пределами мишени к суммарной интенсивности по всей плоскости мишени.

Так как обычно моды высших порядков подавляются или гораздо меньше основной моды по интенсивности, было принято упрощение, что основной вклад в интенсивность вносит мода Ψ_{10} . В итоге был получен код для расчета геометрических потерь. Основным достоинством метода можно считать скорость выполнения кода по сравнению с моделированием по методу поверхностных токов. Результаты расчетов распределения интенсивности моды Ψ_{10} Гаусса-Лагерра в плоскости одного из зеркал приведены на рисунке 13 и таблице 2 для различных длин волн излучения, соответствующих диапазону чувствительности детектора на основе диода Шоттки. Сравнение двух методов расчета приведено на рисунке 14.

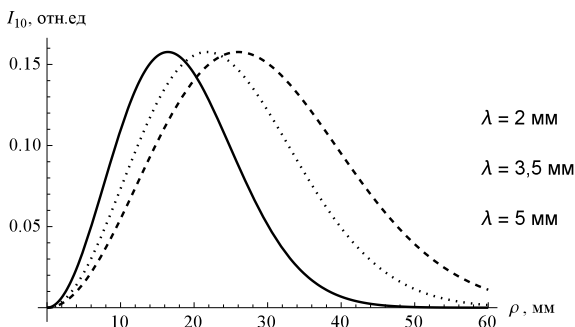


Рис. 13 – Распределение интенсивности моды Ψ_{10} Гаусса-Лагерра в плоскости фокусирующего зеркала с радиусом кривизны 840 мм для разных длин волн излучения, расстояние между зеркалами 420 мм

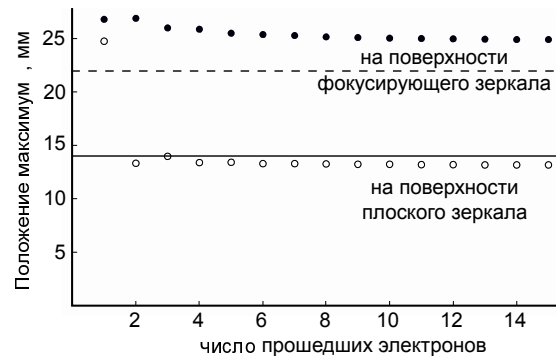


Рис. 14 – Положение максимума интенсивности излучения в плоскости зеркал резонатора для длины волны 3,5 мм по расчетам методом мод Гаусса-Лагерра (линии) и методом поверхностных токов (круги)

Результаты теоретических исследований показали, что геометрические и дифракционные потери растут с увеличением длины волны излучения за счет увеличения ширины распределения интенсивности моды больше размеров зеркала. Уменьшение ширины распределения интенсивности моды возможно только изменением геометрии резонатора. По результатам расчетов был предложен следующий вариант улучшения параметров резонатора для пучка электронов ускорителя LUCX:

1. Использовать конфокальную схему с двумя зеркалами с радиусом кривизны 420 мм

2. Снизить диаметр отверстия в зеркалах до 1 мм.

В этом случае потери значительно снижаются и, соответственно, добротность резонатора будет существенно лучше. Примеры расчета распределения интенсивности моды Ψ_{10} Гаусса-Лагерра для предложенной схемы приведены на рис. 15 и в таблице 2.

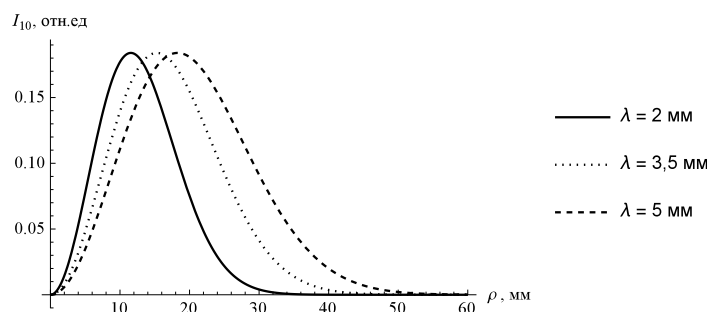


Рис. 15 – Распределение интенсивности моды Ψ_{10} Гаусса-Лагерра в плоскости фокусирующего зеркала с радиусом кривизны 420 мм для разных длин волн излучения, расстояние между зеркалами 420 мм, отверстия в зеркалах диаметром 1 мм

Сравнение положения максимума интенсивности распределения на зеркалах резонатора по схеме на рисунке 11 приведены на рисунке 14 для длины волны 3,5 мм.

Таблица 2 – Оценка добротности резонатора для разных длин волн для геометрии показанной на рис. 11

Длина волны, мм	Добротность	
	полуконфокальный резонатор (диаметр отверстий 5 мм)	конфокальный резонатор (диаметр отверстий 1 мм)
2	793	552538
3,5	67	3913
5	20	222

В разделе 4.4 даны выводы по главе.

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

1. Создана уникальная экспериментальная установка по исследованию процесса генерации и накопления стимулированного когерентного дифракционного излучения на базе линейного ускорителя LUCX (КЕК-АТФ). Проведена настройка и наладка детектирующего оборудования, зеркал полуконфокального резонатора, разработаны программы для управления экспериментом, системы сбора данных и обработки результатов эксперимента.

2. Получены экспериментальные данные, подтверждающие генерацию когерентного дифракционного излучения плоским и фокусирующим зеркалами резонатора электронным пучком линейного ускорителя LUCX.
3. Получены экспериментальные данные о параметрах резонатора. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению коэффициентов пропускания и отражения материалов зеркал резонатора. По результатам исследования предложено улучшение схемы резонатора на основе частично прозрачных зеркал в области длин волн чувствительности детектора.
4. Впервые экспериментально подтверждено накопление и генерация стимулированного когерентного дифракционного излучения в настроенном полуконфокальном резонаторе при прохождении многосгусткового пучка линейного ускорителя через резонатор.
5. Использован программный код расчета характеристик методом поверхностных токов для моделирования прохождения последовательности точечных зарядов через резонатор. Получены распределения интенсивности стимулированного когерентного дифракционного излучения точечных зарядов на зеркалах резонатора и проведена оценка добротности резонатора. Подготовлен программный код на основе метода мод Гаусса-Лагерра и смоделировано распределение интенсивности излучения моды Ψ_{10} Гаусса-Лагерра на поверхности зеркал резонатора. Правильность выбора метода и параметров расчета была показана сравнением результатов моделирования с результатами моделирования той же задачи обобщенным методом поверхностных токов.
6. На основе проведенного моделирования предложено использовать конфокальный резонатор для увеличения выхода стимулированного КДИ.

Публикации автора по теме диссертации

- a. Sukhikh, L.G., Potylitsyn, A.P., Verigin, D.A. Simulation of coherent diffraction radiation generation by pico-second electron bunches in an open resonator (2016) Journal of Physics: Conference Series, 732 (1), 012019.
- b. Aryshev, A., Araki, S., Fukuda, M., Karataev, P., Konkov, A., Naumenko, G., Potylitsyn, A., Sakaue, K., Sukhikh, L., Terunuma, N., Verigin, D., Urakawa, J. Observation of the stimulated coherent diffraction radiation in an open resonator at LUCX facility (2014) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 763, pp. 424-432.

- c. Aryshev, A., Verigin, D., Araki, S., Fukuda, M., Karataev, P., Naumenko, G., Potylitsyn, A., Sakaue, K., Sukhikh, L., Terunuma, N., Urakawa, J. Cavity optimization for compact accelerator-based free-electron maser (2012) Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012, 6357788.
- d. Aryshev, A., Araki, S., Fukuda, M., Urakawa, J., Karataev, P., Naumenko, G., Potylitsyn, A., Sukhikh, L., Verigin, D., Sakaue, K. Q-factor of an open resonator for a compact soft x-ray source based on thomson scattering of stimulated coherent diffraction radiation (2011) IPAC 2011 - 2nd International Particle Accelerator Conference, pp. 3657-3659.
- e. Aryshev, A., Araki, A., Fukuda, M., Karataev, P., Naumenko, G., Potylitsyn, A., Sakaue, K., Sukhikh, L., Urakawa, J., Verigin, D. Development of microwave and soft X-ray sources based on coherent radiation and Thomson scattering (2010) Journal of Physics: Conference Series, 236, 012009.
- f. Aryshev, A., Araki, A., Fukuda, M., Urakawa, J., Karataev, P., Naumenko, G., Potylitsyn, A., Sukhikh, L., Verigin, D., Sakaue, K. A compact soft X-ray source based on thomson scattering of Coherent Diffraction Radiation (2010) IPAC 2010 - 1st International Particle Accelerator Conference, pp. 196-198.

Список литературы

1. Terahertz source utilizing resonant coherent diffraction radiation at KEK ERL test accelerator / Y. Honda, A. Aryshev, M. Shevelev, M. Shimada // Proceedings of FEL2015. – 2015.
2. Дифракционное излучение релятивистских частиц / А.П. Потылицын, М.И. Рязанов, М.Н. Стриханов, А.А. Тищенко. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2008.
3. Карловец Д.В., Потылицын А.П. Дифракционное излучение от экрана конечной проводимости // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90, № 5. – С. 368 – 373.
4. Observation of the stimulated coherent diffraction radiation in an open resonator at LUCX facility / A. Aryshev, S. Araki, M. Fukuda et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2014. Vol. 763. Pp. 424 – 432.
5. Observation of Stimulated Transition Radiation / Lihn, H.-c.; Kung, P.; Settakorn, C.; Wiedemann, H.; Bocek, D. Hernandez, M. // Physical Review Letters, American Physical Society (APS), 1996, 76, pp. 4163-4166
6. Optical resonator of powerful free-electron laser / Vitaly V. Kubarev, Boris Z. Persov, Nilolay A. Vinokurov, Aleksey V. Davidov // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2004. Vol. 528, no. 1-2. Pp. 199–202.
7. Kubarev V.V. Losses in optical resonator of Novosibirsk terahertz FEL: theory and experiment // Proceedings of FEL. BINP, 2007. Pp. 107–110.
8. Kubarev V V. Babinet principle and diffraction losses in laser resonators // Quantum Electronics. 2000. Vol. 30, no. 9. Pp. 824–826.
9. Focusing of transition radiation from a paraboloidal target / G.A. Naumenko, V.A. Cha, B.N. Kalinin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. sep. Vol. 266, no. 17. Pp. 3733–3737.
10. Elliptic Laguerre-Gaussian beams / Victor V. Kotlyar, Svetlana N. Khonina, Anton A. Almazov et al. // Journal of the Optical Society of America A. 2006. jan. Vol. 23, no. 1. P. 43.