

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки технологии радиационной безопасности
 Отделение школы (НОЦ) отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Дифракционное излучение релятивистских электронов, пролетающих через щель между двумя решетками

УДК 539.121:539.124.18:621.384.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	К. А. Алишина		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	В.А. Трясучев	д.ф-м.н		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИШФВП	А.П. Потылицын	д.ф-м.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШБИП ОСГН	Е.В. Меньшикова	к.ф.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф-м.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШЯТ ОЯТЦ	Д.А. Веригин	к.ф-м.н		

Томск – 2019г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки технологии радиационной безопасности
Отделение школы (НОЦ) отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Д.А. Веригин
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Алишина Ксения Александровна

Тема работы:

Дифракционное излучение релятивистских электронов, пролетающих через щель между двумя решетками	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3581/с от 07.05.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	20.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Резонансное дифракционное излучение, оптическое дифракционное излучение, спектральное распределение, интенсивность излучения, монохроматичность, электронный пучок.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор по литературным источникам; Проводилось моделирование спектральных распределений оптического и резонансного дифракционного излучения с помощью математического пакета Wolfram Mathematica 11.1 при изменении параметров решеток. Выбор оптимальной геометрии, чтобы проверить возможность получения информации об угловой расходимости пучка из спектральных распределений для резонансного ДИ; социальная ответственность, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Дифракционное излучение	Ведущий научный сотрудник ИШФВП, д.ф-м.н. Потылицын Александр Петрович
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ШБИП ОСГН, к.ф.н. Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ к.ф-м.н. Гоголева Татьяна Сергеевна
Английская часть	Преподаватель ШБИП ОИЯ Шайкина Ольга Игоревна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Дифракционное излучение	
Дифракционное излучение от щели	
Резонансное дифракционное излучение от наклонной решетки	
Резонансное дифракционное излучение от набора решеток	
Социальная ответственность	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Diffraction radiation	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	07.05.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	В.А. Трясучев	д.ф-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	К.А. Алишина		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
Профессиональные компетенции	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
Общекультурные компетенции	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Уровень образования Магистратура

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

Период выполнения 2018/2019 учебные годы

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2019	1. Составление технического задания и выбор направления исследований	6
18.03.2019	2. Разработка общей методики проведения исследований	2
20.03.2018	3. Подбор и изучение материалов по теме	6
27.03.2019	4. Поиск статей в журналах по выбранной тематике	8
5.04.2019	5. Проведение расчетов	15
23.04.2019	6. Создание графических зависимостей	6
30.04.2019	7. Анализ и описание результатов	9
14.05.2019	8. Проверка полученных результатов	2
31.05.2019	9. Оформление выполненной работы	2
01.06.2019	10. Подготовка к защите диссертационной работы	6

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	В.А. Трясучев	д.ф.-м.н		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИШФВП	А.П. Потылицын	д.ф-м.н		

СОГЛАСОВАНО:**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШЯТ ОЯТЦ	Д.А. Веригин	к.ф-м.н		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Алишина Ксения Александровна

Школа		Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/Технологии радиационной безопасности

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	– требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	К.А. Алишина		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Алишина Ксения Александровна

Школа		Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/Технологии радиационной безопасности

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Затраты на специальное оборудование 10291 2. Затраты по основной заработной плате 39835.9 руб; 3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы 4780.31 руб; 4. Отчисления во внебюджетные фонды 12091 руб; 5. Накладные расходы 13384.9 руб; 6. Прочие прямые затраты 160.8 руб; Бюджет затрат НИИ 81792.7 руб;
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на промышленную электроэнергию 5,8 за 1 кВт·ч Коэффициент дополнительной заработной платы - 0.12; Районный коэффициент города Томска -1.3. Коэффициент накладных расходов -0.3.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Разработка устава научно-технического проекта	Иерархическая структура работ
3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Календарный план – график реализации проекта
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка конкурентоспособности технических решений Матрица SWOT График проведения и бюджет НИИ Диаграмма Ганта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НИИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НИИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ
7. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШБИП ОСГН	Е.В. Меньшикова	к.ф.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	К. А. Алишина		

Оглавление

Аннотация	14
Реферат	15
Введение.....	16
1 Дифракционное излучение.....	18
1.1 Понятие дифракционного излучения	18
1.2 Дифракционное излучение от стрипа	18
2 Поле ДИ от щели.....	22
3 Резонансное дифракционное излучение от наклонной решетки	27
3.1 Излучение Смита – Парселла.....	27
3.2 Эффект Смита – Парселла как резонансное дифракционное излучение	30
3.3 Моделирование угловых распределений РДИ от одиночной наклонной решетки	35
4 Резонансное дифракционное излучение от набора решеток	38
4.1 Моделирование спектральных распределений РДИ от одной и двух наклонных решеток	40
4.2 Случай, когда траектория электрона не совпадает с центром щели между двумя решетками (при постоянной ширине щели)	43
4.3 Эволюция спектра РДИ от изменения ширины щели для двух однородных решеток.....	46
4.4 Эволюция спектра РДИ от изменения ширины щели двух решеток с разными параметрами	49
4.5 Зависимость спектра РДИ от угла поворота мишени	54
Заключение	60
Список литературы	62
5 Социальная ответственность	64
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	65

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	66
5.2.1 Организационные мероприятия	66
5.2.2 Технические мероприятия.....	67
5.2.3 Условия безопасной работы.....	69
5.3 Электробезопасность	72
5.4 Пожарная и взрывная безопасность	76
Список используемых источников по разделу «социальная ответственность»	79
6. Предпроектный анализ	80
6.1 Потенциальные потребители результатов исследования	80
6.2 Анализ конкурентных технических решений	80
6.3 SWOT-анализ.....	82
7 Инициация проекта	84
7.1 Цели и результат проекта.....	84
7.2 Организационная структура проекта	85
ФИО, основное место работы, должность.....	85
7.3 Ограничения и допущения проекта	85
8 Планирование управления научно-техническим проектом.....	86
8.1. План проекта.....	86
8.2 Бюджет научного исследования	99
8.2.1 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	99
8.2.2 Основная заработная плата	99
8.2.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	101
8.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)...	101
8.2.5 Накладные расходы	102

8.2.6 Прочие прямые затраты.....	103
8.3 Формирование бюджета затрат научно -исследовательского проекта	103
8.4 Реестр рисков проекта	104
9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	104
Список использованной литературы по разделу «Финансовый менеджмент»	107
Приложение А	108

Аннотация

Дифракционное излучение благодаря своим свойствам находит применение в области диагностики параметров пучка на ускорителях заряженных частиц.

В современных ускорителях наблюдается тенденция к уменьшению поперечных размеров пучков, что приводит к увеличению плотности частиц в пучке и, в результате, повышение светимости в ускорителях.

Одним из новых методов измерения характеристик пучков заряженных частиц на ускорителях является использование резонансного дифракционного излучения (РДИ). Дифракционное излучение представляет собой рассеяние собственного поля равномерно движущегося заряда на атомах среды.

В данной работе исследовалась монохроматичность резонансного дифракционного излучения от заряда, пролетающего через щель между двумя решетками и показана принципиальная возможность диагностики электронных пучков с энергией выше 1 ГэВ [5] с использованием оптического и РДИ. Моделирование было проведено в пакете Wolfram Mathematica 11.1.

Рассмотренный механизм излучения не сопровождается непосредственным взаимодействием частиц пучка с твердотельной мишенью, что открывает перспективы невозмущающей диагностики пучков на современных ускорителях

Реферат

Выпускная квалификационная работа 110 с., 35 рис., 26 табл., 27 источников.

Ключевые слова: резонансное дифракционное излучение, излучение Смит – Парселла, оптическое дифракционное излучение, моделирование, Wolfram Mathematica 11.1

Объектом исследования является: Резонансное дифракционное излучение

Цель работы – Выбрать оптимальную геометрию, чтобы проверить возможность получения информации об угловой расходимости пучка из спектральных распределений для резонансного ДИ.

В процессе исследования проводилось моделирование некоторых характеристик оптического и резонансного дифракционного излучения с помощью математического пакета Wolfram Mathematica 11.1

Степень внедрения: В настоящее время предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

Область применения: Диагностика пучков заряженных частиц на ускорителях

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

Введение

Современные требования к параметрам ускоряемого пучка предполагают строительство нового поколения ускорителей заряженных частиц, имеющих субмиллиметровые размеры пучка, увеличенную стабильность и многократно улучшенную эффективность ускорения. Для подобных ускорителей необходимо разработать методы диагностики, позволяющие отслеживать параметры пучка. При этом точность существующих методов зачастую недостаточна либо цена их реализации для заданных параметров пучка слишком высока, что заставляет искать новые способы диагностики пучка.

Одним из известных методов диагностики электронного пучка с низким эмиттансом является использование оптического переходного излучения (ОПИ), которое генерируется путем пропускания электронного пучка через тонкую фольгу. Электронные пучки современных ускорителей с микронными поперечными размерами, взаимодействующими с мишенью, могут приводить к изменению оптических характеристик мишени и отрицательно влияют на точность измерений.

Поэтому важна разработка методов неразрушающей диагностики, основанных на излучении заряженных частиц во внешнем поле (синхротронное излучение, рассеяние лазерного излучения) или на процессы рассеяния кулоновского поля частиц пучка при его пролете вблизи оптической неоднородности (дифракционное излучение, излучение Смит-Парселла) [1,2].

В этом случае потери энергии электрона за счет излучения лишь незначительны, что позволяет рассматривать такие методы, как неразрушающие. Были измерены характеристики оптического дифракционного излучения (ОДИ) во время пролета электрона через щель в наклонной мишени, и показали возможность использования ОДИ для измерения поперечного размера пучка [5,11].

В настоящее время показано, что интенсивность дифракционного излучения релятивистских частиц в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне может быть сравнима с интенсивностью переходного излучения, которое широко используется в физике высоких энергий и ускорительной физике. В отличие от переходного, дифракционное излучение не сопровождается непосредственным взаимодействием частиц пучка с твердотельной мишенью, что открывает перспективы не возмущающей диагностики пучков на современных ускорителях.

1 Дифракционное излучение

1.1 Понятие дифракционного излучения

Дифракционное излучение возникает, когда заряженная частица движется прямолинейно и с постоянной скоростью в окрестности среды (мишени) с прицельным параметром (кратчайшее расстояние между траекторией частицы и кромкой мишени), h (рисунок 2):

$$h \leq \frac{\gamma \lambda}{2\pi} \quad (1.1.1)$$

где γ – Лоренц фактор заряженных частиц; λ – длина волны излучения.

Проходящая частица взаимодействует своим электрическим полем мишени, вызывая изменения токов во времени. Из-за этих токов возникает излучение. В очевидной аналогии с ПИ, для релятивистской частицы, ДИ имеет тенденцию распространяться в двух основных направлениях: вдоль траектории частицы (прямое дифракционное излучение) и в направлении зеркального отражения (обратное дифракционное излучение).

1.2 Дифракционное излучение от стрипа

Для расчета характеристик ДИ для наклонной решетки необходимо знать поле дифракционного излучения от заряженной частицы, движущейся вблизи одного наклонного стрипа. Точное решение уравнений Максвелла, описывающих излучение заряженной частицы, движущееся над наклонным полубесконечным идеально проводящим экраном, давно известно.

В работе [4] представлен метод, который позволяет получить выражение для напряженности дифракционного излучения для стрипа как разность между полями излучения двух полубесконечных плоскостей, одна из которых ограничена ребром 1, а другая – ребром 2 (см. рисунок 1).

Напряженности поля стрипа как разность между полями излучения двух полубесконечных плоскостей, одна из которых ограничена ребром 1, а другая - ребром 2

$$\vec{E}_{\text{стрип}} = \vec{E}_{\text{верх}} - \vec{E}_{\text{нижн}} \quad (1.2.1)$$

Для удобства выразим прицельный параметр через расстояние от центра стрипа до траектории частицы h и ширину стрипа a

Для края 1 следующим образом:

$$a_1 = h - \frac{a}{2} \cdot \sin \theta_0 \quad (1.2.2)$$

Для края 2:

$$a_2 = h + \frac{a}{2} \cdot \sin \theta_0 \quad (1.2.3)$$

Таким образом, учитывая фазовый сдвиг имеем:

$$\vec{E}_{\text{стрип}} = \vec{E}_{\text{ди}}(h - \frac{a}{2} \cdot \sin \theta_0) e^{i\varphi} - \vec{E}_{\text{ди}}(h + \frac{a}{2} \cdot \sin \theta_0) e^{-i\varphi} \quad (1.2.4)$$

В уравнении (1.2.4) поле ДИ для полубесконечного идеального экрана выражается через $\vec{E}_{\text{ди}}(a_i)$. Полный фазовый сдвиг (2ϕ) характеризует разность фаз между волнами, формируемыми вблизи краев 1 и 2, и может быть получен из простых геометрических соотношений как величина, пропорциональная разнице во времени между распространением волны от фронта 1 и края 2:

$$2\phi = \frac{2a\pi}{\lambda} (\cos(\theta_y - \theta_0) - \frac{\cos \theta_0}{\beta}) \quad (1.2.5)$$

где β – скорость частицы в единицах скорости света ($\beta = v/c$); λ – длина волны ДИ.

В статье [4] представлен подробный вывод формулы полной плотности интенсивности ДИ от стрипа.

Рассмотрим характеристики излучения в системе координат, где ось z направлена вдоль пучка, а ось x перпендикулярна краю стрипа. В данной работе используется система единиц $\hbar = c = m = 1$.

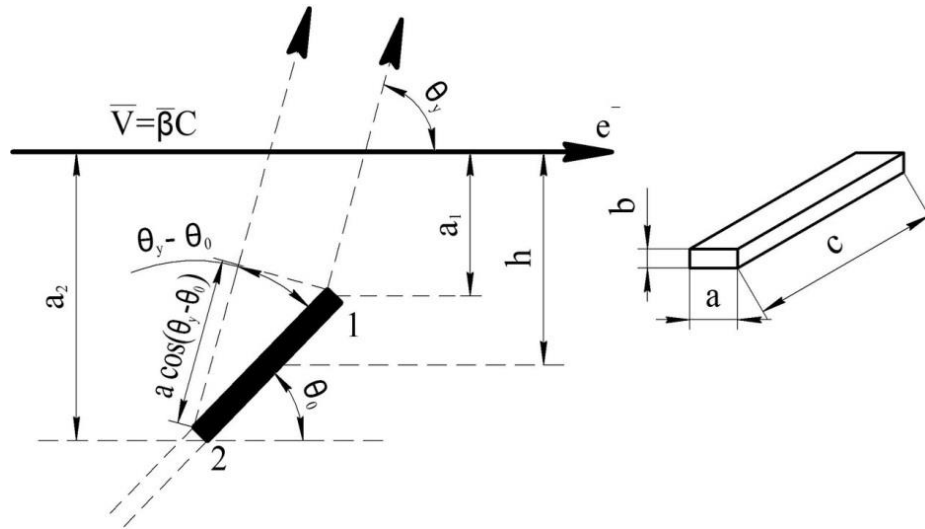


Рисунок 1 – Геометрия дифракционного излучения от стрипа; h - параметр удара, θ_y - угол наблюдения, θ_0 - угол наклона стрипа, a - ширина стрипа

Спектрально-угловая плотность ДИ для стрипа[4]:

$$\frac{d^2 W_{\text{стрип}}}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2 W_{\text{ДИ}}}{d\omega d\Omega} \cdot F_{\text{стрип}}, \quad (1.2.6)$$

где $\frac{d^2 W_{\text{ДИ}}}{d\omega d\Omega}$ – спектрально-угловая плотность для полубесконечной мишени;

$F_{\text{стрип}} = 4((\text{Sinh}\delta_0)^2 + (\text{Sin}\phi)^2)$ - характеризует интерференцию ДИ.

$$\frac{d^2 W_{\text{ДИ}}}{d\omega d\Omega} = \frac{\alpha}{4\pi^2} \text{Exp}\left[\frac{-\omega}{\omega c} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2}\right] \frac{\gamma^{-2} + 2\theta_x^2}{(\gamma^{-2} + \theta_x^2)(\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2)} ((\text{Sinh}\delta_0)^2 + (\text{Sin}\phi)^2) \quad (1.2.7)$$

α – постоянная тонкой структуры; $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ - энергия излучения $\omega c = \frac{\gamma}{2h}$ - характеристическая энергия ДИ; θ_0 - угол наклона мишени относительно траектории частиц, θ_x и θ_y - углы наблюдения, измеренные от направления зеркального отражения;

$$\delta_0 = \frac{a\pi \text{Sin}\theta_0}{\gamma\lambda} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2} \quad (1.2.8)$$

На рисунке 2 изображены угловые распределения дифракционного излучения от полубесконечной мишени и от стрипа. Вид угловых распределений имеют практически одинаковый характер, отличается лишь порядком интенсивности.

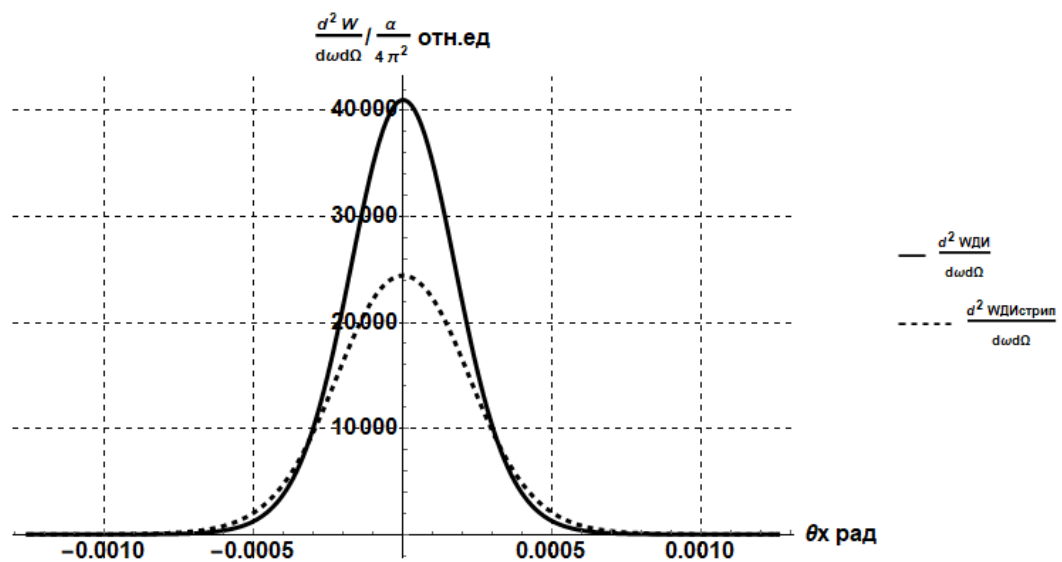


Рисунок 2 – Угловые распределения ДИ от стрипа и от полубесконечной мишени для: $\theta_0 = 90^\circ$, $\theta_y = 0^\circ$, $\gamma = 2500$, $a = 150$ мкм, $\lambda = 0.5$ мкм

2 Поле ДИ от щели

Рассмотрим задачу, когда пучок электронов пролетает между двумя полосами (см. рис. 3). В данном случае, если ширина полосы $a \gg \gamma\lambda$ задачу можно свести к ситуации, когда заряд пролетает через щель шириной $b = h_1 + h_2$. Предполагаем, что частица летит по центру щели.

Поле дифракционного излучения (ДИ) при пролете заряда через щель в наклонном идеально проводящем экране можно рассматривать как суперпозицию полей ДИ от верхней и нижней полуплоскости.

Поле ДИ на верхней полуплоскости получается из поля для нижней после процедуры комплексного сопряжения с одновременным изменением знака при замене $h_2 \rightarrow h_1$.

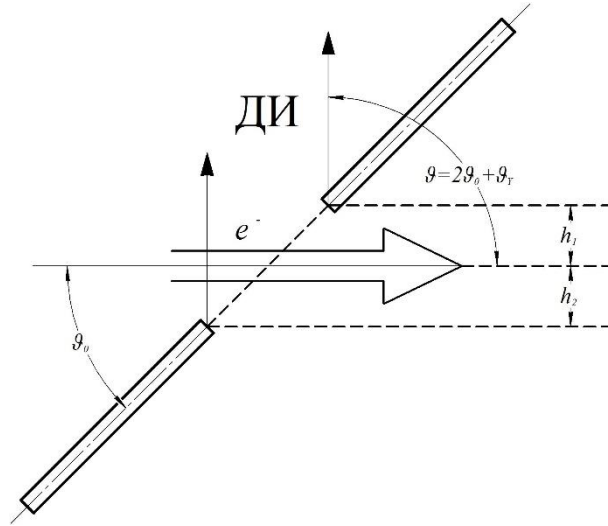


Рисунок 3 – Геометрия ДИ от щели. b – ширина щели, a – ширина полосы, θ_0 – угол поворота полос

Процедура получения выражений для полей ДИ (2.1) и (2.2) в ультррелятивистском приближении ($\gamma \gg 1$) представлена в работах [2,5]:

$$E_1 = \frac{ie}{4\pi^2} \cdot \frac{\theta x}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2}} \cdot \left(\frac{\text{Exp}\left[-\frac{2\pi h_1}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y)\right]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y} + \frac{\text{Exp}\left[-\frac{2\pi h_2}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y)\right]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y} \right) \quad (2.1)$$

$$E_2 = \frac{e}{4\pi^2} \cdot \left(-\frac{\text{Exp}\left[-\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot (\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y)\right]}{\sqrt{(\gamma^{-2} + \theta x^2)} - i\theta y} + \frac{\text{Exp}\left[-\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda}\right) \cdot (\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y)\right]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y} \right); \quad (2.2)$$

Здесь λ – длина волны дифракционного излучения (ДИ);

При устремлении ширины щели $b \rightarrow 0$, выражения (2.1) и (2.2) переходят в выражения для полей переходного излучения на бесконечные границы выражения (2.3) и (2.4):

$$E_{1\text{ПИ}} = \frac{ie}{2\pi^2} \frac{\theta_x}{\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (2.3)$$

$$E_{2\text{ПИ}} = \frac{ie}{2\pi^2} \frac{\theta_y}{\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (2.4)$$

Далее находим спектрально-угловую плотность ДИ, поочередно вычисляя (2.5) для (2.1) и (2.2):

$$\frac{dW_{slit}}{d\omega d\Omega} = |E_1|^2 + |E_2|^2 \quad (2.5)$$

Для стрипов конечной ширины поля E_i записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dW_a}{d\omega d\Omega} = & \frac{\alpha}{4\pi^2} \gamma^2 \frac{\text{Exp}\left[-\frac{\omega}{\omega_c} \cdot \sqrt{1 + \gamma^2 \theta x^2}\right]}{(1 + \gamma^2 \theta x^2) \cdot (1 + \gamma^2 \theta x^2 + \gamma^2 \theta y^2)} \cdot ((1 + 2\gamma^2 \theta x^2) \cdot \\ & (\text{Exp}\left[2l \frac{\omega}{\omega_c} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta x^2}\right] + \text{Exp}\left[-2l \frac{\omega}{\omega_c} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta x^2}\right]) - \frac{2}{(1 + \gamma^2 \theta x^2 + \gamma^2 \theta y^2)} \cdot ((1 + \\ & \gamma^2 \theta x^2 - \gamma^2 \theta y^2) \cdot \text{Cos}\left[\frac{\omega}{\omega_c} \gamma \theta y\right] - 2\gamma \theta y \sqrt{1 + \gamma^2 \theta x^2} \cdot \text{Sin}\left[\frac{\omega}{\omega_c} \gamma \theta y\right])) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Где $\omega_c = \frac{\gamma c}{h_1 + h_2}$ – характерная частота ДИ от щели; $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ – частота излучения ДИ; $l = \frac{h_1 - \frac{a}{2} \text{Sin}[\theta_0]}{a \cdot \text{Sin}[\theta_0]}$ – относительное смещение частицы относительно центра щели и ширины щели;

Используя выражения для плотности интенсивности ДИ (2.6), были получены спектральные и угловые распределения (рис 4 - 6).

На рисунке 4 представлено спектральное распределение ДИ от щели при различной ширине стрипа $a = 100, 200, 1000$ мкм, при этом параметры $\gamma = 100$, $\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6}$. В распределении ДИ существует нулевой минимум при $\theta_x = \theta_y = 0$, когда

частица движется через центр щели при ($l = 0$). При ненулевом смещении ($l \neq 0$) минимум будет сглажен[5].

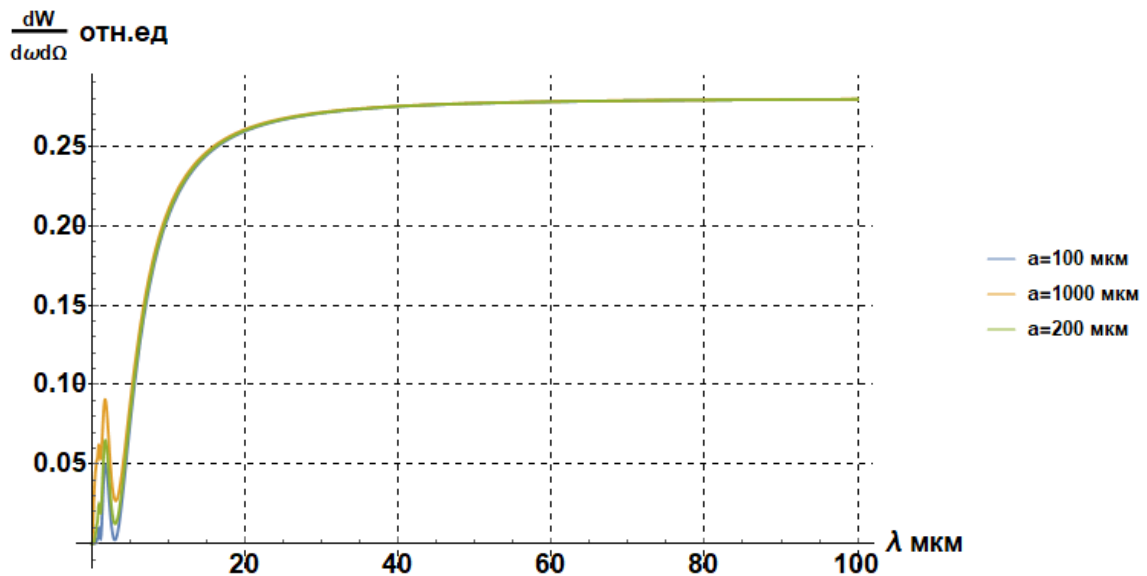


Рисунок 4 – Зависимость спектрального распределения ДИ от щели от ширины стрипа

На рис. 5 представлены угловые распределения ДИ при ширине стрипа 2 мм и ширины бесконечного размера.

При пролете заряженной частицы через щель между двумя стрипами, в отличие, когда частица пролетает на некотором расстоянии от мишени бесконечного размера спектрально - угловая плотность ДИ, описываемая выражением(2.4) зависит от ширины стрипа a . Что видно из рисунков (5) и (6):

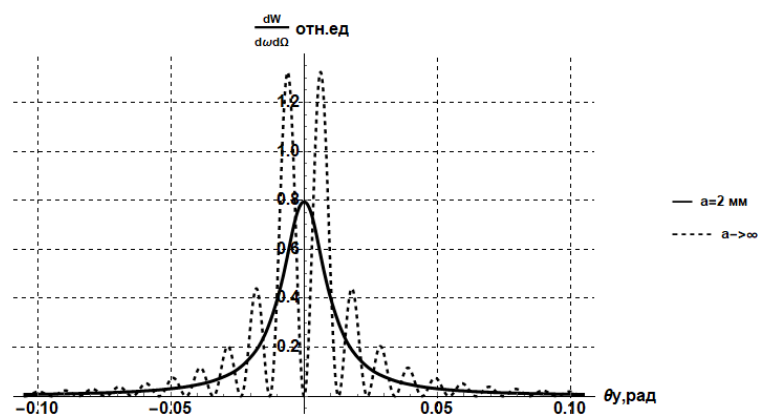
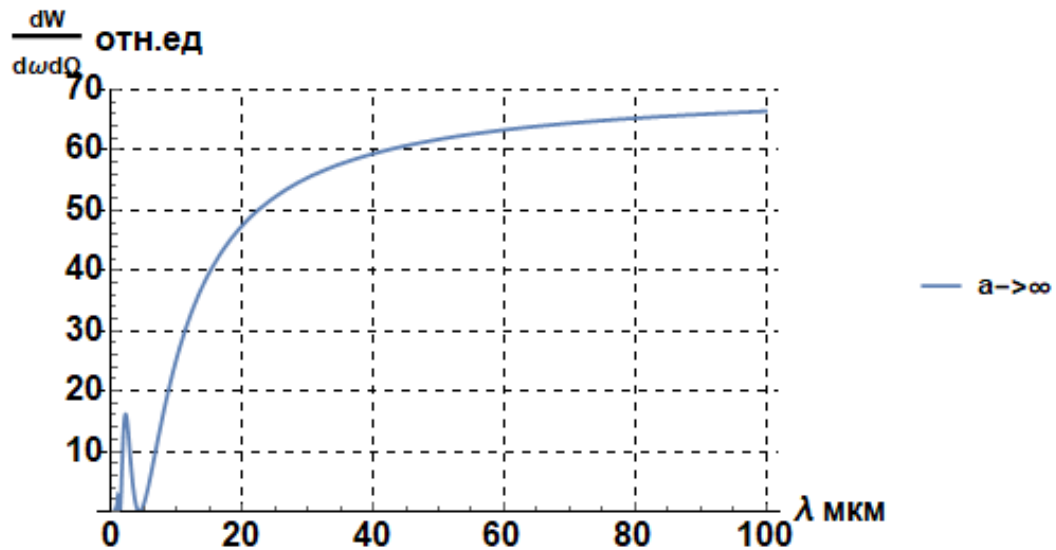
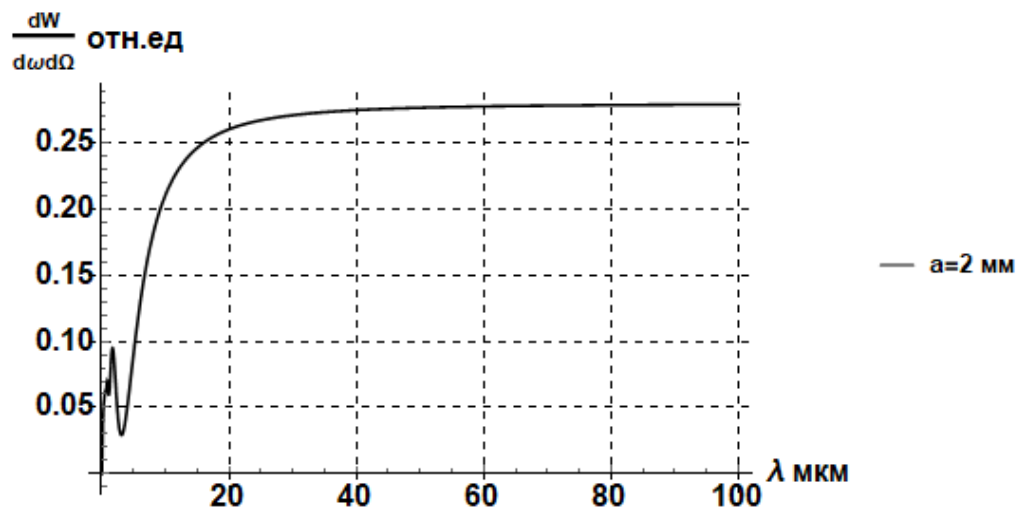


Рисунок 5 – Угловое распределение ДИ при ширине стрипа $a=2$ мм и $a \rightarrow \infty$

На рис. 6 представлены спектральные распределения ДИ при ширине стрипа 2 мм и мишенью бесконечного размера. Интенсивность ДИ при пролете частицы рядом с мишенью $a \rightarrow \infty$ будет в несколько раз выше, чем при пролете через щель между двумя стрипами.



а)



б)

Рисунок 6 – Спектральное распределение ДИ при ширине стрипа: а) $a \rightarrow \infty$, б) $a = 2$ мм

Как видно из рисунка 6 спектр дифракционного излучения является непрерывным, в отличие от спектра резонансного дифракционного излучения,

где появляется зависимость от длины волны (см. раздел 3). В спектре ДИ образуется провал видно из рис.4 и 6, после которого с увеличением длины волны интенсивность возрастает до значения 20 мкм и после этого остается неизменной. Поэтому оценить угловую расходимость пучка электронов из спектральных ДИ не представляется возможным, в отличие от спектральных распределений РДИ

3 Резонансное дифракционное излучение от наклонной решетки

3.1 Излучение Смита – Парселла

Заряд,двигающийся в вакууме с постоянной скоростью вблизи идеально проводящей, периодически деформированной мишени (решетки, рис.1), индуцирует на её поверхности изменяющийся во времени заряд и ток, что и является причиной возникновения дифракционного излучения [2].

Рассматривая заряд, движущийся по прямолинейной траектории со скоростью βc , и его изображение, которое движется по периодической траектории с периодом d (рис. 7) как электрический диполь с собственной частотой $\Omega = 2\pi\beta c/d$, можно получить выражение для частоты излучения $\omega(\theta)$ под фиксированным углом θ исходя из формулы Допплера. На возможность существования подобного эффекта обратил внимание И.М. Франк, который дал формулу для частоты (в отсутствие преломления) [2]:

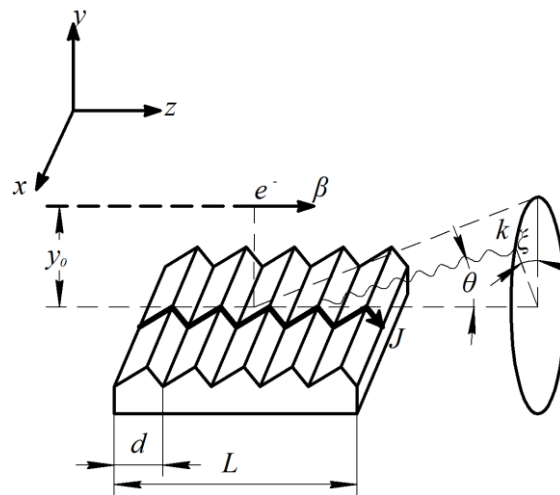


Рисунок 7 –Геометрия генерации излучения Смита-Перселла

$$\omega(\theta) = \frac{\Omega}{1 - \beta \cos \theta} = \frac{2\pi\beta c}{d(1 - \beta \cos \theta)} \quad (3.1.1)$$

При переходе к длине волны,

$$\lambda = d \left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \right) \quad (3.1.2)$$

С. Смит и Э. Парселл получили формулу для длины волны линии в спектре излучения, исходя из наглядных фазовых соотношений (рис. 8).

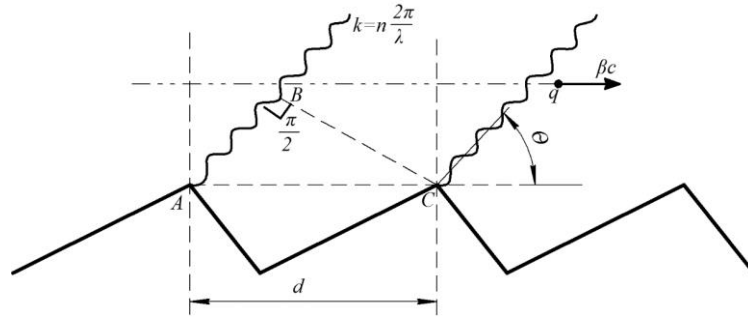


Рисунок 8 – Иллюстрация вывода соотношения Смита-Парселла

$$k = n \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.1.3)$$

Электромагнитное излучение возбуждается полем пролетающей частицы в каждом элементе решетки. Для простоты рассмотрим плоские волны, испущенные под углом θ из двух последующих гребней решетки, инициированные одной и той же заряженной частицей, пролетающей параллельно решетке со скоростью βc . Эти волны будут иметь одинаковую фазу (т. е. интерферировать конструктивно), если время, за которое плоская волна, испущенная из точки А (см. рис. 8) достигает точки В ($t_1 = \frac{d \cos \theta}{c}$), будет связано со временем, необходимым частице для прохождения расстояния d и возбуждения плоской волны в точке С ($t_2 = \frac{d}{\beta c}$), следующим образом:

$$c(t_1 - t_2) = n\lambda, n = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.1.4)$$

где λ – длина волны. Другими словами, сдвиг фаз волн с частотой ω , испущенных из точек А и С, должен удовлетворять соотношению

$$\Delta\varphi = k\Delta z - \omega\Delta t = 2\pi n, n = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$k = 2\pi/\lambda$ – модуль волнового вектора, $\omega = 2\pi c/\lambda$. Отсюда вытекает так называемое «дисперсионное» соотношение:

$$\lambda_n = \frac{d}{n} \left(\cos \theta - \frac{1}{\beta} \right) \quad (3.1.5)$$

где n – порядок дифракции.

Последнее соотношение для $n = -1$ (“фундаментальной” гармоники) С. Смит и Э. Парселл записали в виде формулы:

$$\lambda = d(\cos\theta - \frac{1}{\beta}) \quad (3.1.6)$$

Формула (3.1.6) для длины волны фундаментальной гармоники дает значение $\lambda=0.566$ мкм для $\beta=0.782$ ($E=309$ кэВ), что хорошо согласуется с экспериментом. При увеличении энергии электронов до $E=340$ кэВ в эксперименте наблюдался сдвиг линии излучения в область меньших длин волн. С точностью до ошибок измерений данные эксперимента[7] хорошо описывались формулой (3.1.6). После этого первого наблюдения монохроматического излучения, возникающего при прямолинейном и равномерном движении заряда в вакууме вблизи периодической мишени (периодической решетки), это явление стали называть эффектом Смита – Парселла.

В одном из экспериментов [8] детально исследовали излучения Смита - Парселла в оптическом диапазоне, генерируемое электронным пучком с энергией $E < 60$ кэВ и токов $I < 10$ мА. Диаметр пучка не превышал 200 мкм, излучение детектировалось под углом $\theta = 80^\circ$ фотоумножителем. Спектр излучения исследовался с помощью монохроматора с разрешением (FWHM, полная ширина на полувысоте) $\Delta\lambda = 20$ нм. На рис. (9) приведены измеренные спектры СПИ для оптической решетки с треугольным профилем и периодом $d = 0.556$ мкм. Как следует из приведенных результатов, экспериментально наблюдались излучения до $n = -5$.

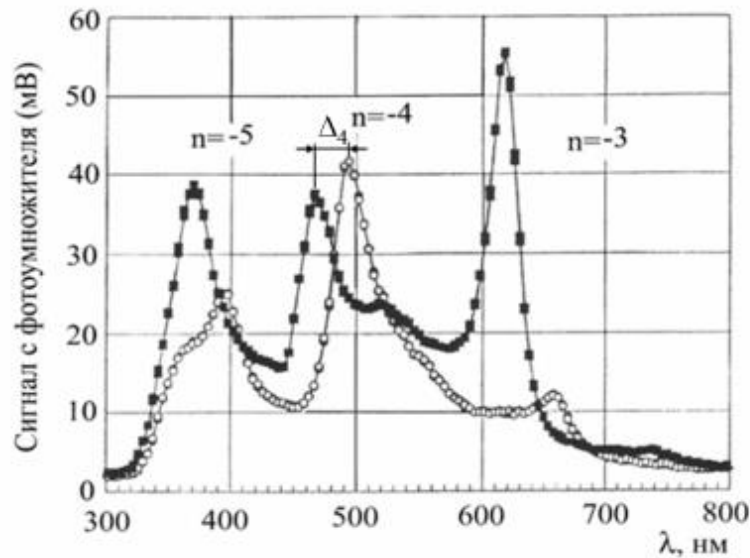


Рисунок 9 – Спектры излучения Смита – Парселла, генерируемые пучком электронов с энергией 20 кэВ (светлые кружки) и 22.5 кэВ (прямоугольники)[2]

3.2 Эффект Смита – Парселла как резонансное дифракционное излучение

Рассмотрим решетку, состоящую из N полос шириной a и периода d , наклоненных под углом θ_0 к импульсу электрона (рис 10).

Прицельный параметр – расстояние между первым центром стрипа и траекторией электронов обозначим как h . Поле излучения, образованное вблизи стрипа 1 решетки, совпадает с (1.4):

$$E_1 = E_{\text{стрип}}(h) \quad (3.2.1)$$

$$E_2 = E_{\text{стрип}}(h) \cdot e^{(-\alpha_0 - i\varphi_0)} \quad (3.2.2)$$

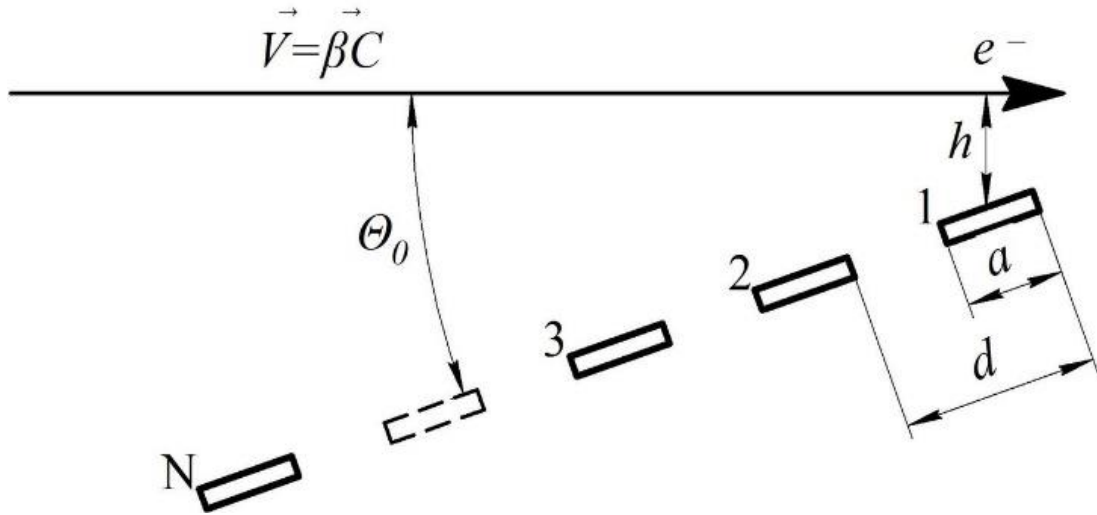


Рисунок 10 – Геометрия дифракционного излучения от наклонной решетки; h – прицельный параметр, a - ширина стрипа, d - период решетки, θ_0 - угол наклона решетки

Спектрально-угловая плотность резонансного дифракционного излучения для всей решетки:

$$\frac{d^2 W_{\text{РДИ}}}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2 W_{\text{стрип}}}{d\omega d\Omega} \cdot F_N = \frac{d^2 W_{\text{ДИ}}}{d\omega d\Omega} \cdot F_{\text{стрип}} \cdot F_N \quad (3.2.3)$$

$$F_N = \text{Exp}(-(N-1) \cdot \alpha_0) \cdot \left(\frac{\sin(\frac{N \cdot \phi_0}{2})^2 + \sinh(\frac{N \cdot \alpha_0}{2})^2}{\sin(\frac{\phi_0}{2})^2 + \sinh(\frac{\alpha_0}{2})^2} \right) \quad (3.2.4)$$

α_0 и ϕ_0 могут быть определены как:

$$\alpha_0 = \frac{a\pi \sin \theta_0}{\gamma \lambda_k} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2} \quad (3.2.5)$$

$$\phi_0 = \frac{2a\pi d}{\lambda_k} (\cos(\theta_y - \theta_0) - \frac{\cos \theta_0}{\beta}) \quad (3.2.6)$$

Следует заметить, что выражение (3.2.4) совпадает с аналогичным выражением для резонансного переходного излучения из N слоев с учетом поглощения излучения в каждом слое.

Сначала рассмотрим частный случай, соответствующий геометрии Смита-Перселла при $\theta_0 = 0$. Коэффициент затухания α_0 , определяемый формулой (3.2.5) равен нулю, так что выражение (3.2.4) может быть переписан в форме:

$$F_N = \frac{\sin(\frac{N \cdot \phi_0}{2})^2}{\sin(\frac{\phi_0}{2})^2} \quad (3.2.7)$$

Когда $N \rightarrow \infty$, то выражение (3.2.7) превращается обычной δ -функцией.

$$F_N = 2\pi N \delta(\phi_0 - 2\pi k) \quad (3.2.8)$$

где k – порядок дифракции.

Наличие δ - функции свидетельствует о существовании монохроматических максимумов в спектре РДИ. Однако использование δ – функции для реальных решеток, где число элементов ограничено, не всегда оправдано. Поэтому в моделировании будем использовать точную формулу (3.2.7). В работе [4] показано спектральное распределение РДИ для геометрии Смита-Парселла. Расчет проводился для $a = d/2$, когда интенсивность достигает своего максимального значения.

Положение пика в спектре определяется фазовым соотношением (условием резонанса):

$$\phi_0 = 2\pi k, (\cos \phi_0 = 1) \quad (3.2.9)$$

Откуда следует формула Смита - Парселла:

$$\lambda_k = \frac{d (\cos \theta_y^{-1}/\beta)}{k} \quad (3.2.10)$$

Связь между длиной волны λ и энергией E :

$$E = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda_k} = \frac{2\pi\hbar c k}{d(\cos \theta_y^{-1}/\beta)} \quad (3.2.11)$$

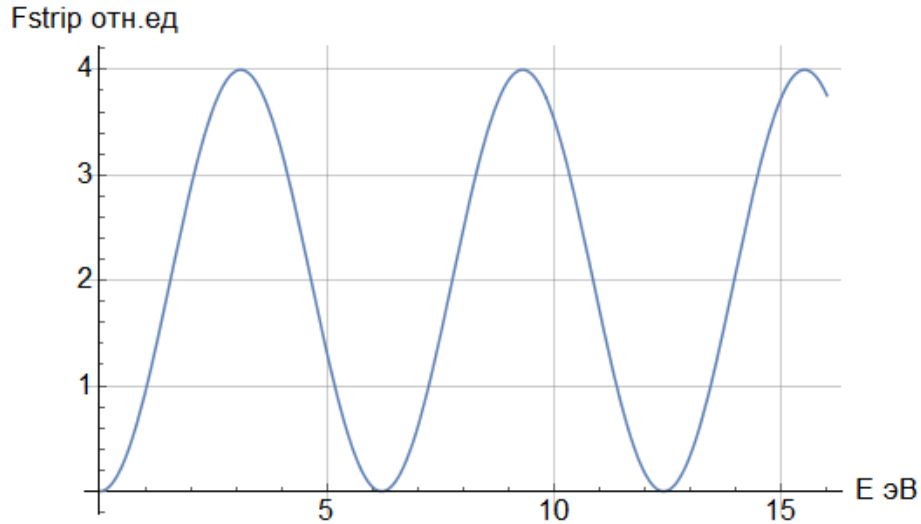


Рисунок 11 – Зависимость $F_{\text{стрип}}$ от энергии E .

В статье [4] была получена максимальная зависимость выхода ДИ от отношения a/d для четырех порядков излучения, из которого было видно, что четные порядки отсутствуют. Это объясняется влиянием $F_{\text{стрип}}$, равным нулю при:

$$\phi = \pi m \quad (3.2.12)$$

где m – целое число;

Подставляя (3.2.10) в уравнении (3.2.5), мы можем написать уравнение (3.2.9) в следующем виде:

$$k = \frac{d}{a} m = 2m \quad (3.2.13)$$

Таким образом ($a = d/2$) четные дифракционные порядки запрещены. Для иллюстрации на рис. 6 показана зависимость $F_{\text{стрип}}$ от энергии фотона.

Положения квазимонохроматических максимумов в спектре РДИ определяются условием резонанса (3.2.9), где ϕ_0 - фаза берется согласно (3.2.6), проиллюстрируем этот факт следующим образом.

Перепишем уравнение (3.2.4) в виде:

$$F_N = \frac{1 - 2 \cdot e^{-(N-1)\alpha_0} \cos((N-1)\phi_0) + e^{-2(N-1)\alpha_0}}{1 - 2 \cdot e^{-\alpha_0} \cos \phi_0 + e^{-2\alpha_0}} \quad (3.2.14)$$

В предельном случае, когда $N \rightarrow \infty$ уравнение (3.2.14) записывается как:

$$F_{\infty} = \frac{1}{1 - 2 \cdot e^{(-\alpha_0)} \cos \phi_0 + e^{(-2\alpha_0)}} \quad (3.2.15)$$

Полученное выражение достигает своего максимального значения при выполнении следующих условий (3.2.9) и имеет вид:

$$F_{\infty} = \frac{1}{(1 - e^{\alpha_0})^2} \quad (3.2.16)$$

При малых значениях $\alpha_0 \ll 1$, которые соответствуют малым углам наклона решетки $\theta_0 \ll 1$ из (4.2.16) получаем:

$$F_{\infty} \cong \frac{1}{\alpha_0^2} \quad (3.2.17)$$

Таким образом, выраженные квазимонохроматические максимумы в спектре ДИ могут наблюдаться при углах падения скоса пучка частиц по отношению к решетке. Для угла $\theta_0 \neq 0$ вместо условий Смита-Перселла имеем следующее соотношение между квазимонохроматическим максимальным положением, периодом d , углом наклона решетки θ_0 и углом наблюдения θ_y :

$$\lambda_k = \frac{d (\cos(\theta_y - \theta_0) - \cos \theta_0 / \beta)}{k} \quad (3.2.18)$$

где k – целое число, определяющее порядок дифракции, β – скорость частицы в единицах скорости света;

Воспользуемся подстановкой:

$$\theta_y = \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (3.2.19)$$

И получим, что

$$\lambda_k = \frac{d (\cos \theta \cdot \cos \theta_0 + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta_0 - \cos \theta_0 / \beta)}{k} \quad (3.2.20)$$

Монохроматичность этого типа РДИ, определяется числом периодов структуры, которые возбуждаются кулоновским полем пролетающего заряда [5]:

$$\Delta \lambda_k / \lambda_k \approx \frac{1}{k N_0} \quad (3.2.21)$$

Компоненты полей ДИ для общего случая от полубесконечной мишени, запишем с учетом λ_k :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_k} h \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos \psi)^2} \quad (3.2.22)$$

$$M = \frac{e}{4\pi^2} \frac{\omega}{\sqrt{\omega \sin[\psi]}} \frac{\beta \sqrt{\sin[\psi] - \frac{\cos[\theta_0]}{\beta} - i \frac{\cos[\theta_0]}{\beta \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos[\psi])^2}}}}{\sqrt{\omega} (\cos[\theta_0] \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos[\psi])^2} + i \sin[\theta_0])} \text{Exp}[-k] \quad (3.2.23)$$

Где $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda k}$, $\omega c = \frac{\gamma c}{2h}$, h – прицельный параметр, c – скорость света;

Компоненты полей дифракционного излучения получаются:

$$E_{\text{ДИ}x} = M \frac{\sqrt{1 + \cos\varphi} (\cos\psi) (\cos\theta_0 + i\beta \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos\psi)^2}})}{\cos\theta_0 - \beta \sin\psi \cos\varphi + i \sin\theta_0 \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos\psi)^2}} \quad (3.2.24)$$

$$E_{\text{ДИ}y} = M \frac{\sin\varphi}{\sqrt{1 + \cos\varphi}} \frac{(\cos\theta_0 + \beta \sin\psi + i \sin\theta_0 \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos\psi)^2})}{(\cos\theta_0 - \beta \sin\psi \cos\varphi + i \sin\theta_0 \sqrt{\gamma^{-2} + \beta^2 (\cos\psi)^2})} \quad (3.2.25)$$

Подставим выражения (3.2.24) и (3.2.25) для компонент полей ДИ в выражение (3.2.26) для полной плотности интенсивности:

$$\vec{E}_{\text{ДИ}}(a_i) = \sqrt{|E_{\text{ДИ}x}|^2 + |E_{\text{ДИ}y}|^2} \quad (3.2.26)$$

3.3 Моделирование угловых распределений РДИ от одиночной наклонной решетки

В работе [6] были рассмотрены характеристики резонансного дифракционного излучения (РДИ), генерируемого ультрарелятивистскими частицами, проходящими на расстоянии h от наклонной решетки.

Далее проведем, используя формулы (3.2.22 - 3.2.26), моделирование энергетических спектров РДИ от наклонной решетки при изменении угла поворота мишени, угла обзора и число периодов.

На рисунке 12 представлена зависимость спектрального распределения РДИ от числа периодов решетки. С увеличением числа стрипов в решетке, величина интенсивности РДИ соответственно увеличивается и сужается по оси энергий.

При этом параметры моделирования были взяты из работы [4]: ширина стрипа $a = 200$ мкм, период решетки $d = 400$ мкм, число периодов $N = 10, 20$.

Лоренц – фактор $\gamma = 1000$, угол поворота решетки 3.56° , прицельный параметр $h = 100$ мкм.

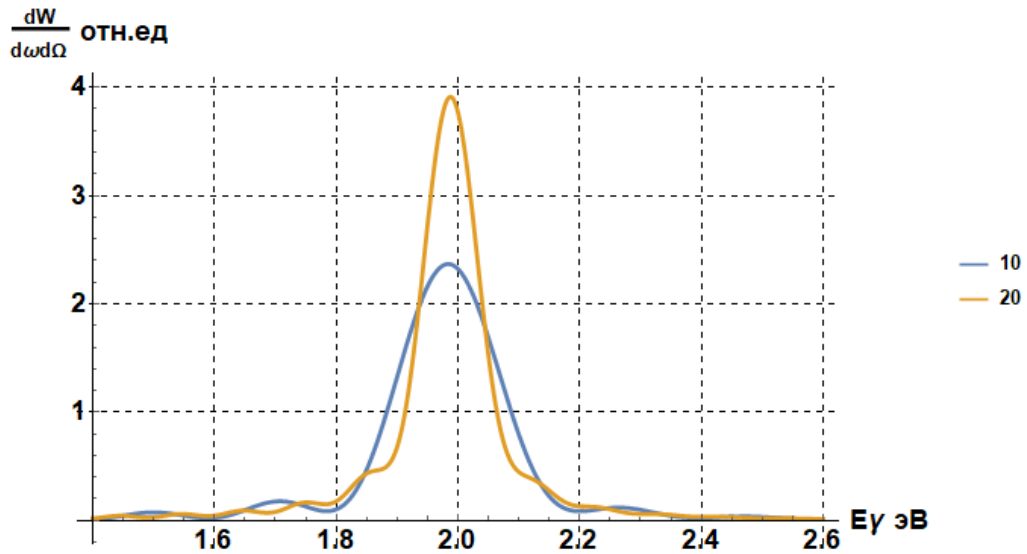


Рисунок 12 – Спектральное распределение РДИ при различном числе стрипов $N = 10, 20$, $\theta_x = 0$, $d = 400$ мкм, $h = 100$ мкм, $a = 200$ мкм, $\gamma = 1000$

На рисунке 13 представлена зависимость спектрального распределения РДИ при различных углах поворота решетки $\theta_0 = 4.5, 10, 15, 20.5^\circ$. Спектр распределяется в диапазоне энергий фотонов порядка (0.5 - 3.0 эВ). Также получена зависимость спектрального распределения РДИ от угла обзора $\theta_y = 2, 4, 6^\circ$, которая представлена на рис.14. Число периодов $N = 10$ и угол поворота $\theta_0 = 3.5^\circ$. Спектр распределяется в диапазоне энергий порядка (1 - 5 эВ)

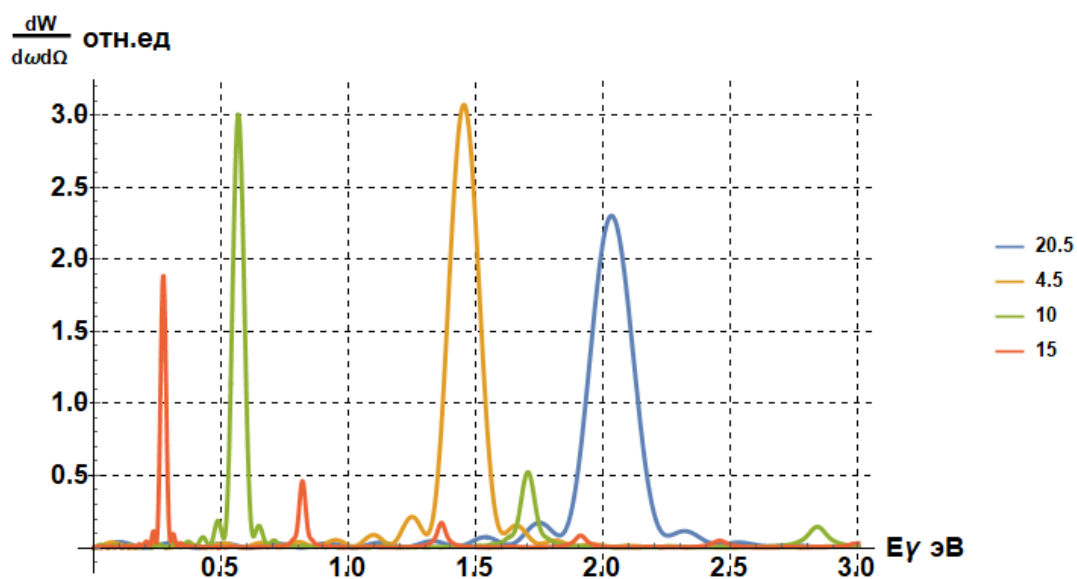


Рисунок 13 – Спектральное распределение РДИ при различных углах поворота мишени $\theta_0 = 4.5, 10, 15, 20.5^\circ$, $\theta_y = 2^\circ$, $N = 10$, $\theta_x = 0^\circ$, $d = 400$ мкм, $h = 100$ мкм, $a = 200$ мкм, $\gamma = 1000$

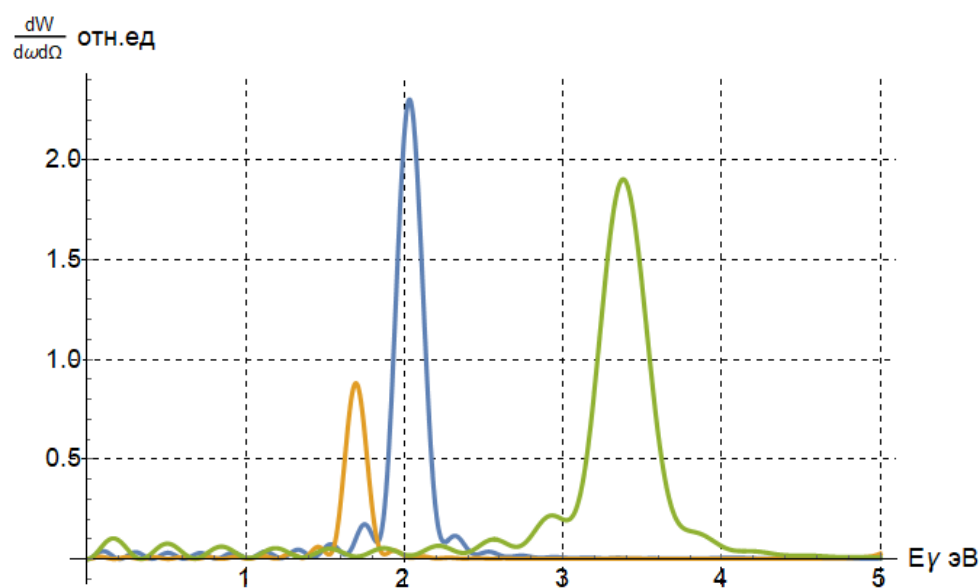


Рисунок 14 – Спектральное распределение РДИ при изменении угла обзора наблюдения $\theta_y = 2, 4, 6^\circ$; $\theta_0 = 3.5^\circ$, $N = 10$, $\theta_x = 0^\circ$, $d = 400$ мкм, $h = 100$ мкм, $a = 200$ мкм, $\gamma = 1000$

4 Резонансное дифракционное излучение от набора решеток

Рассмотрим случай, когда электрон пролетает по центру решетки и по центру щели ($h_1 = h_2 = (d - a)/2$), где h_1 и h_2 – соответственно расстояние от края стрипа до центра щели между решетками 1 и 2. На рисунке 15 представлена геометрия резонансного дифракционного излучения для наклонной решетки (набор стрипов $N_1 = N_2$) с периодом d и шириной стрипа a .

В этом случае, когда выполняется условие резонанса, появятся узкие спектральные линии в спектре, а длины волн будут определяться не только углом наблюдения, но и углом наклона решетки.

Этот факт можно использовать для измерения угловой расходимости начального пучка.

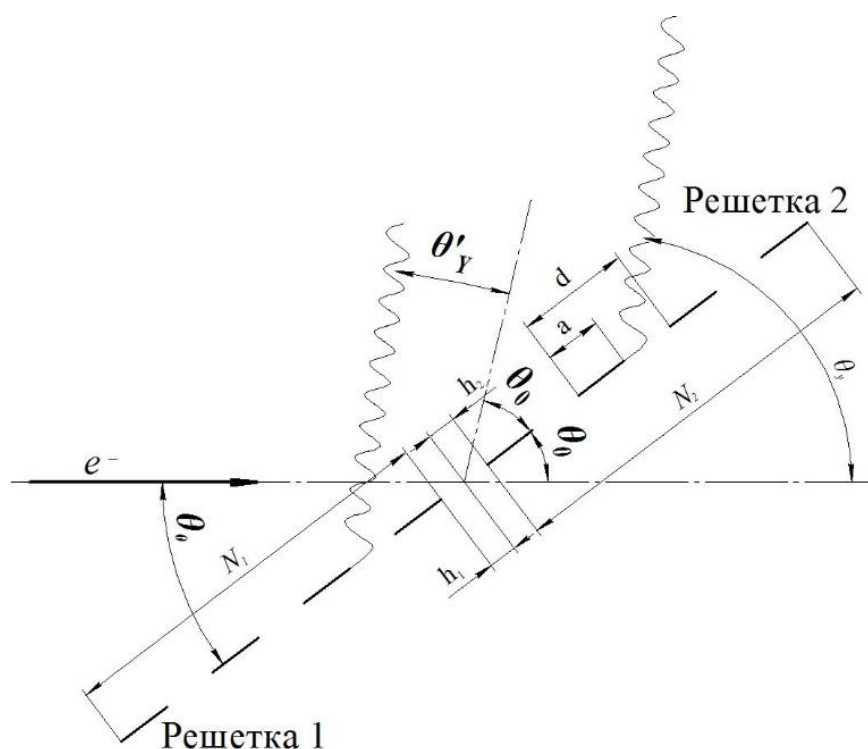


Рисунок 15 – Геометрия РДИ от набора стрипов, $h_1 + h_2$ – ширина щели, a – ширина стрипа, d – период решетки, θ_0 – угол поворота, θ_u – угол наблюдения.

Чтобы получить выражения для спектрально-углового распределения РДИ от двух решеток, разделенных вакуумным промежутком, рассмотрим следующие выражения:

Выражения для компонент полей дифракционного излучения:

$$E_{\text{ДИ}x} = i \exp\left[\frac{-2\pi h}{\gamma\lambda} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2}\right] \frac{\theta_x}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta_x^2}} \frac{1}{(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta_x^2} + i\theta_y')} \quad (4.1)$$

$$E_{\text{ДИ}y} = -\exp\left[\frac{-2\pi h}{\gamma\lambda} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2}\right] \frac{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta_x^2}}{(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta_x^2} + i\theta_y')} \quad (4.2)$$

Где угол $\theta_y' = \theta_y - 2\theta_0$ отсчитывается от угла зеркального отражения;

Выражения (4.3) и (4.4) характеризуют напряженность электрического поля дифракционного излучения от заряженной частицы, проходящей вблизи верхнего и нижнего стрипов компоненты поля для РДИ от решетки:

$$E_{0x} = E_{\text{ДИ}x} \cdot F \cdot F_N \quad (4.3)$$

$$E_{0y} = E_{\text{ДИ}y} \cdot F \cdot F_N \quad (4.4)$$

$$F = 1 - \exp[-\alpha_1 - i\phi_1] \quad (4.5)$$

$$F_N = \frac{1 - \exp[-N\alpha_0 - i\phi_0]}{1 - \exp[-\alpha_0 - i\phi_0]} \quad (4.6)$$

Где выражение (4.5) учитывает интерференцию ДИ от разных краев одиночного стрипа, выражение (4.6) – фактор, который учитывает интерференцию от разных N идентичных элементов решетки:

Где α_1 - коэффициент ослабления, ϕ_1 - сдвиг фаз между волнами, производимыми частицей из двух ребер одного стрипа.

Выражения для α_1 и ϕ_1 определяются как:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi a \sin\theta_0}{\gamma\lambda_k} \sqrt{1 + (\gamma\theta_x)^2} \quad (4.7)$$

$$\phi_1 = \frac{2\pi a}{\gamma\lambda_k} (\cos\theta_0/\beta - \cos(\theta_y - \theta_0)) \quad (4.8)$$

Выражения для α_0 и ϕ_0 определяются как:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi d \sin\theta_0}{\gamma\lambda_k} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2} \quad (4.9)$$

$$\phi_0 = \frac{2\pi d}{\lambda_k} (\cos\theta_0/\beta - \cos(\theta_y - \theta_0)) \quad (4.10)$$

Выражения (4.11) и (4.12) для РДИ от частицы, движущейся через щель шириной $(h_1 + h_2)$ между двумя идентичными решетками с периодом d , выполненными из идеально проводящих стрипов с шириной a разнесенными вакуумными щелями, может быть представлено в следующем виде:

$$E_{totx} = E_{0x} \exp\left[\frac{2\pi h_1}{\gamma \lambda_k} (\cos \theta_0 / \beta - \cos(\theta_y - \theta_0))\right] - E_{0x}^* \exp\left[\frac{2\pi h_2}{\gamma \lambda_k} (\cos \theta_0 / \beta - \cos(\theta_y - \theta_0))\right] \quad (4.11)$$

$$E_{toty} = E_{0y} \exp\left[\frac{2\pi h_1}{\gamma \lambda_k} (\cos \theta_0 / \beta - \cos(\theta_y - \theta_0))\right] - E_{0y}^* \exp\left[\frac{2\pi h_2}{\gamma \lambda_k} (\cos \theta_0 / \beta - \cos(\theta_y - \theta_0))\right] \quad (4.12)$$

Где E_{0x}^* и E_{0y}^* - комплексно - сопряженное

Далее находим спектрально-угловую плотность РДИ от двух решеток, подставляя выражения (4.12) и (4.11) в формулу (5.13):

$$\frac{dW_{РДИ}}{d\omega d\Omega} = |E_{totx}|^2 + |E_{toty}|^2 \quad (4.13)$$

4.1 Моделирование спектральных распределений РДИ от одной и двух наклонных решеток

Используя выражения (4.11), (4.12) и (4.13) спектральные распределения РДИ для двух решеток в диапазоне частот (0 - 400) ГГц. Значение Лоренц-фактора примем 20 исходя из [2]. Параметры решеток: число слоев в двух решётках $N_1 = N_2 = 8$, ширина стрипа $a = 1$ мм, и период решетки $d = 4$ мм, угол поворота $\theta_0 = 17.5^\circ$. Углы наблюдения: $\theta_x = 0.2^\circ$, $\theta_y = 90^\circ$. Расстояния от края стрипа до центра щели между решетками 1 и 2 (рис. 15): $h_1 = h_2 = 1.5$ мм.

Для моделирования спектральных распределений РДИ от одной наклонной решетки используем аналогичные значения параметров для моделирования.

В пакете Wolfram Mathematica 11.1 были получены спектральные распределения напряжённостей поля РДИ для двух решеток, разделенных вакуумным промежутком (E_{totx} , E_{toty}) и сопоставлялись со спектрами,

полученными для одиночной наклонной решетки (E_{0x} , E_{0y}). Рисунки 16 и 17 показывают какой вклад в распределение РДИ вносят обе проекции напряжённости поля в полную интенсивность.

На рисунке 18 Сравниваются спектральные распределения плотности интенсивности РДИ от двух решеток и одиночной наклонной решетки.

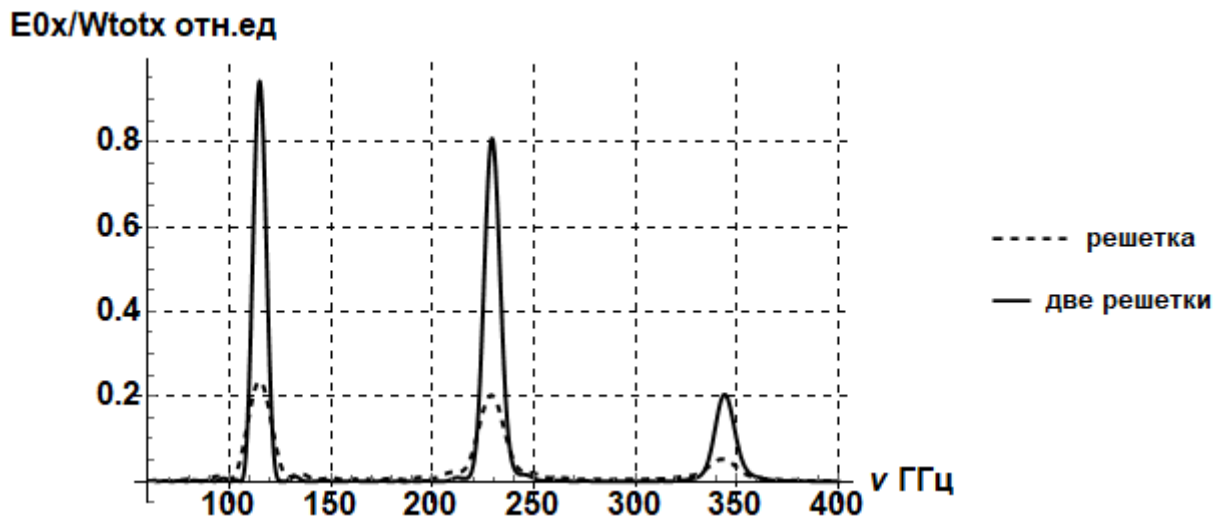


Рисунок 16 – Спектральное распределение компонент поля РДИ E_{0x}/W_{totx} для параметров $N1 = N2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 1$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.5$ мм

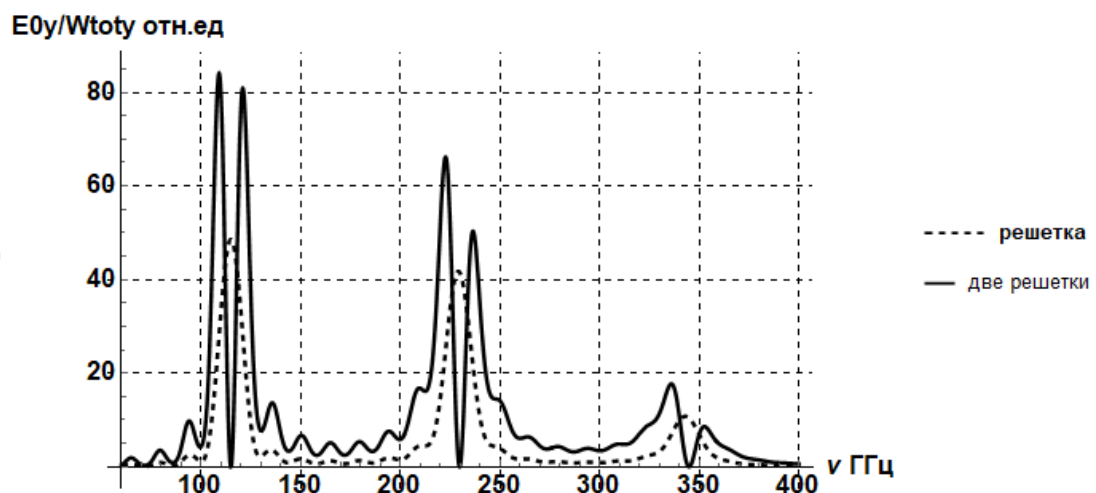


Рисунок 17 – Спектральное распределение РДИ E_{0y}/W_{toty} для параметров $N1 = N2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 1$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.5$ мм

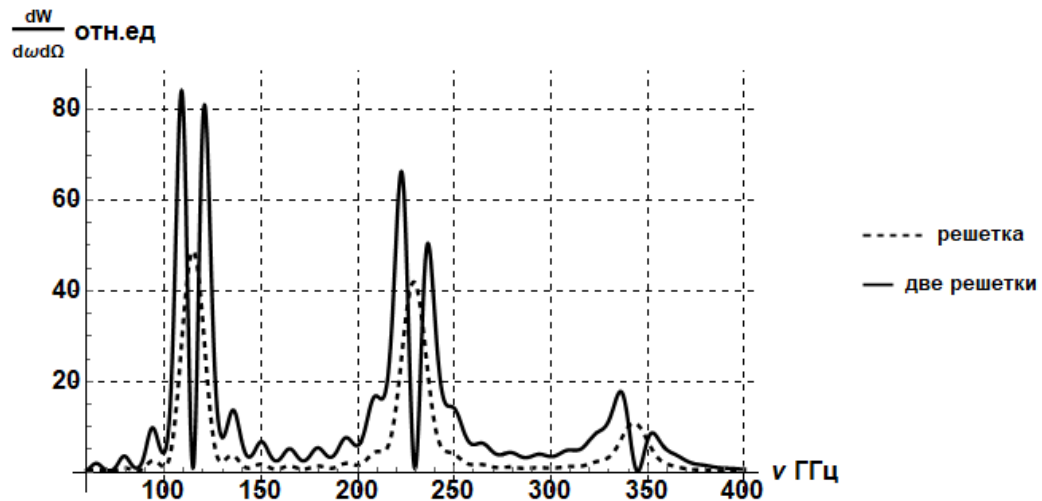


Рисунок 18 – Спектральное распределение РДИ для параметров $N1 = N2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 1$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.5$ мм

Спектральные распределения, представленные на рисунках (16 - 18) имеют три явно выраженных максимума, что определяется соотношением периода решетки d к ширине стрипа a , представленных в работе [4] для одиночной решетки. Интенсивность излучения РДИ от двух решеток будет выше (пунктирная линия, рис. 17, 18), чем от одной решетки (непрерывная линия, рис. 17, 18), за счет большего числа стрипов.

При моделировании спектра РДИ от двух решеток, образуется расщепление максимумов пиков, чего не происходит при расчете спектра от одной решетки. Стоит заметить, что расщепленные пики имеют некоторую асимметрию в максимуме интенсивности, однако это пропадает при увеличении γ – фактора.

Также распределение спектра от двух решеток достаточно хорошо повторяет вид распределения спектра от одной решетки, за исключением, того что образуется расщепления пиков и спектр уширяется.

Таблица 1 – Сравнение полуширины на полувысоте для спектра РДИ

номер пика/диапазон частот	Одиночная наклонная решетка	Набор из двух решеток	FWHM2/FWHM1
	FWHM2, ГГц	FWHM1, ГГц	
1, (100-140 ГГц)	13.3	19.2	0.69
2, (200-250 ГГц)	14.8	22.2	0.67
3, (300-390 ГГц)	17.8	56.4	0.32

В таблице 1 приведена сравнительная оценка полуширины на полувысоте пиков в диапазоне (100 - 390 ГГц) для одиночной наклонной решетки и мишени, состоящей из двух решеток.

4.2 Случай, когда траектория электрона не совпадает с центром щели между двумя решетками (при постоянной ширине щели)

На рисунке 19 представлен вид спектрального распределения РДИ.

Значения параметры моделирования аналогичны тем, которые были использованы в главе (4.1), кроме ширины стрипа $a = 2$ мм и размеров h_1 и h_2 , которые изменяются в диапазоне (0.1- 0.9 мм).

На рисунках (20 и 21) представлено изменение расстояния между центральными осями пиков распределения интенсивности РДИ при различных значения h_1 и h_2 при том, что ширина щели остается неизменной.



Рисунок 19 – Спектральное распределение РДИ для параметров $N_1 = N_2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.0$ мм

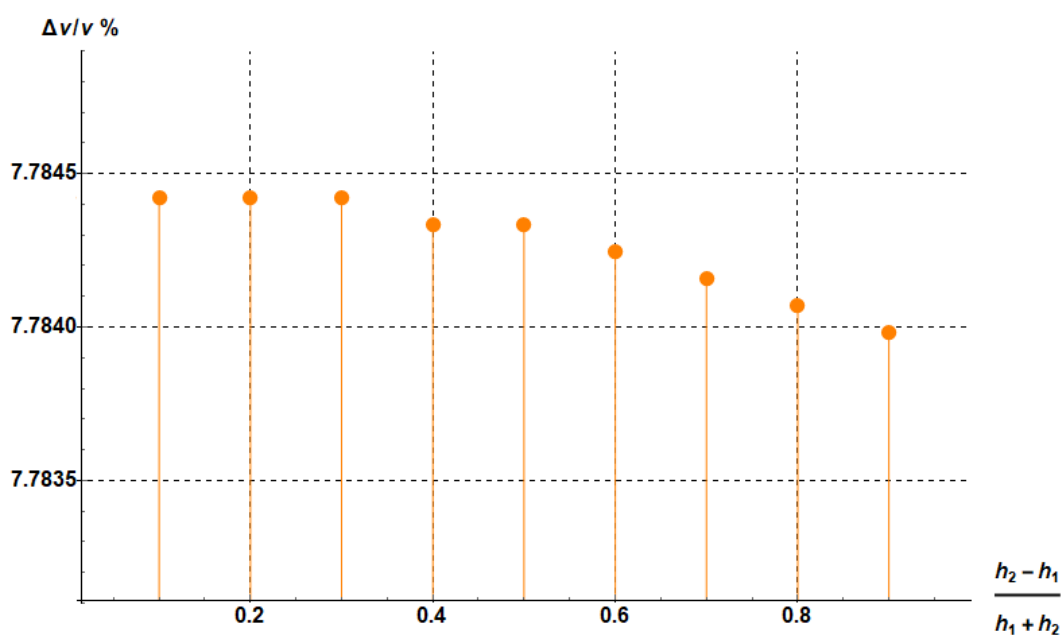


Рисунок 20 – Изменение расстояния между центральными осями пиков распределения интенсивности РДИ при различных значения h_1 в диапазоне (100 - 130 ГГц) для параметров $N_1 = N_2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

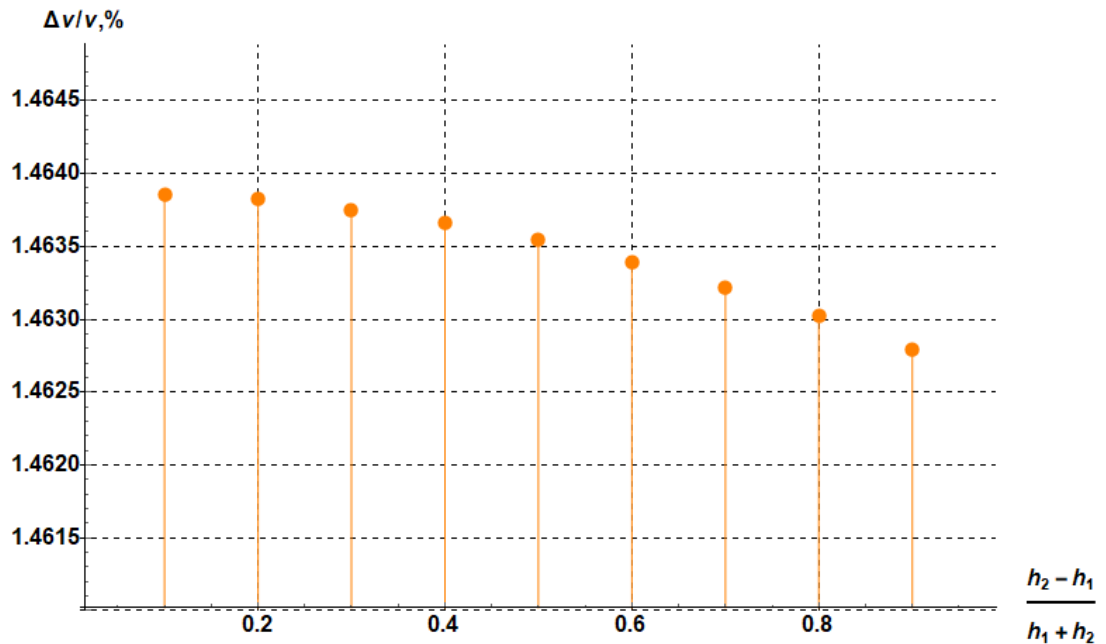


Рисунок 21 – Изменение расстояния между центральными осями пиков распределения интенсивности РДИ при различных значения h_1 в диапазоне (330 - 380 ГГц) для параметров $N_1 = N_2 = 8, \gamma = 20, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

Как видно из полученных зависимостей (рис. 20 и 21) с возрастанием h_2 расстояние между пиками уменьшается. Для пика в диапазоне частот (100 – 130 ГГц) величина монохроматичности составляет около 7.8 % и уменьшается на величину $4.4 \cdot 10^{-6}$ при изменении положения пучка, а именно величины $(h_2 - h_1) / (h_1 + h_2)$ в диапазоне от (0.1 - 0.9 мм), относительно центральной оси. Величина монохроматичности изменяется на 10^{-4} и составляет примерно 1.46 % для пика второго пика в диапазоне частот (330 - 380 ГГц). Таким образом, можно заметить, что при изменении координаты пролета пучка, изменении величины монохроматичности незначительное, что упрощает диагностику пучка.

При этом в работе [2] величина монохроматичности для одиночной наклонной решетки с числом периодов $N = 10$ для первого порядка дифракции 9 %.

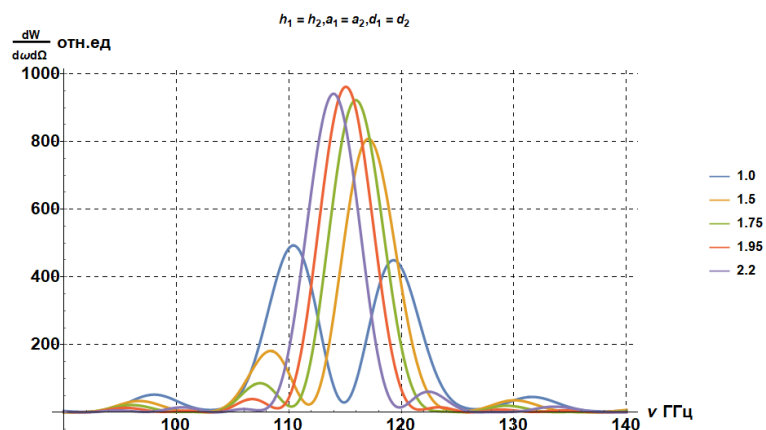
4.3 Эволюция спектра РДИ от изменения ширины щели для двух однородных решеток

Рассмотрим эволюцию спектра РДИ, при увеличении расстояний h_1 и h_2 в диапазоне величин (1.0 - 4.0 мм, с шагом 0.5 мм) при этом ширина щели ($h_1 + h_2$), будет также изменяться.

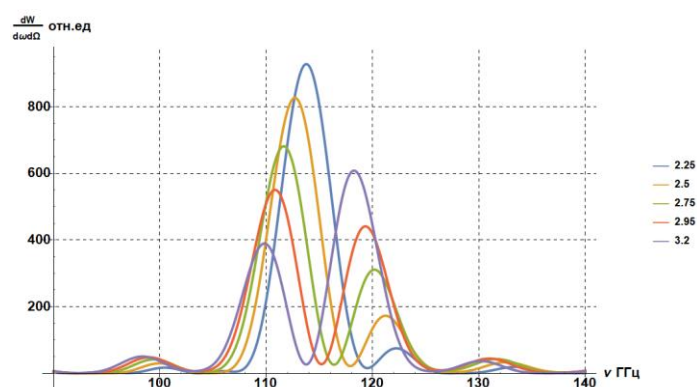
При моделировании изменения спектра РДИ от увеличения h_1 и h_2 в полном диапазоне частот (100 - 380 ГГц), кривые слишком сливаются. Поэтому моделирование проводилось для каждого пика отдельно.

Рисунок 22 показывает изменение спектра РДИ в диапазоне частот (100 – 140 ГГц). При моделировании спектра РДИ расщепление линии отсутствует при $h_1 = h_2 = 2.0, 1.95, 3.95, 4.0$ мм. В остальных случаях наблюдается полное или частичное расщепление пика. (рис. 22). Таким образом можно заметить, что расщепление пиков в спектре пропадает при ширине щели равной величине периода решетки d и кратное этому значению, и начинает проявляться при увеличении ширины щели на $1/4d$.

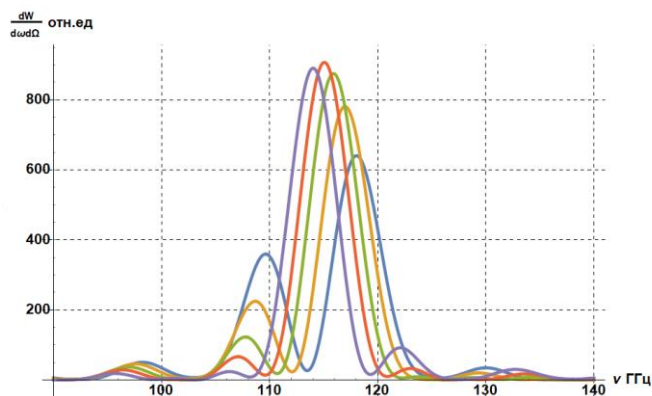
Максимумы спектров наиболее четко выражены и достигают максимального значения при значениях $h_1 = h_2$ кратных 2 мм. С увеличением величины h_1 и h_2 значение максимума интенсивности уменьшается. В промежуточных значениях h_1 и h_2 , несоответствующих явно выраженному максимуму пик спектра раздваивается – уменьшается величина максимума с одновременным сдвигом в сторону более низких частот. При этом новый максимум появляется в области с более высокой частотой и с ростом максимального значения сдвигается в сторону более низкой частоты. Это объясняет механизм образования спектра с двумя близко расположенными максимумами для некоторых значений h_1 и h_2 .



а)



б)

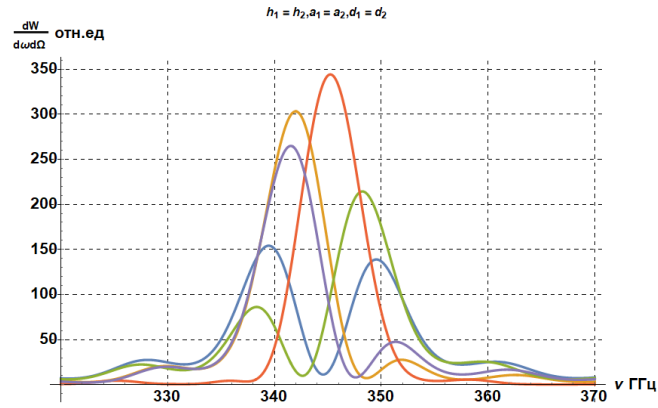


в)

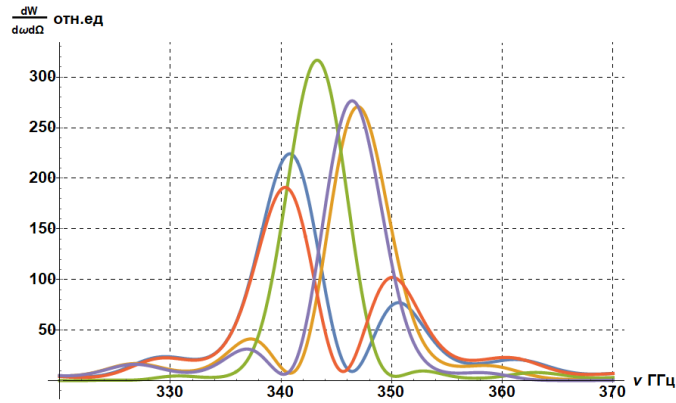
Рисунок 22 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (100 – 140 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

Рисунок 23 показывает изменение спектра РДИ в диапазоне частот (330 – 380 ГГц). Рисунок 23 показывает изменение спектра РДИ в диапазоне частот (330 – 370 ГГц). В этом случае увеличивается частота изменения максимумов спектра.

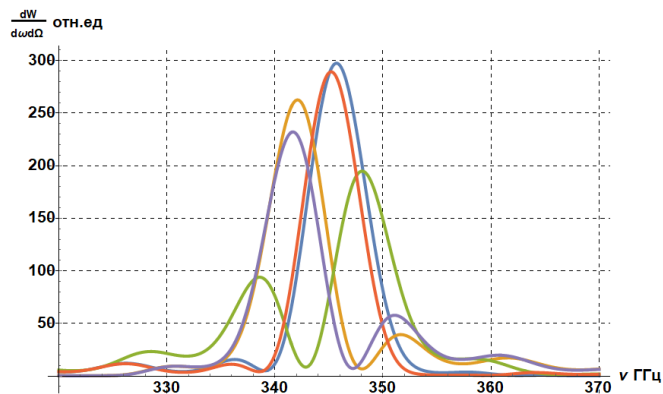
Изменяя размеры щели h_1 и h_2 расщепление спектра РДИ в диапазоне частот (320 – 380 ГГц) отсутствует только в при $h_1=h_2=1.95, 2.75, 3.95$.



а)



б)



в)

Рисунок 23 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (330 – 370 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

На рисунке 24 представлен вид трехмерной визуализации эволюции двух отдельных пиков спектрального распределения РДИ в диапазонах частот, а) (100 – 140 ГГц), б) (330 – 380 ГГц).

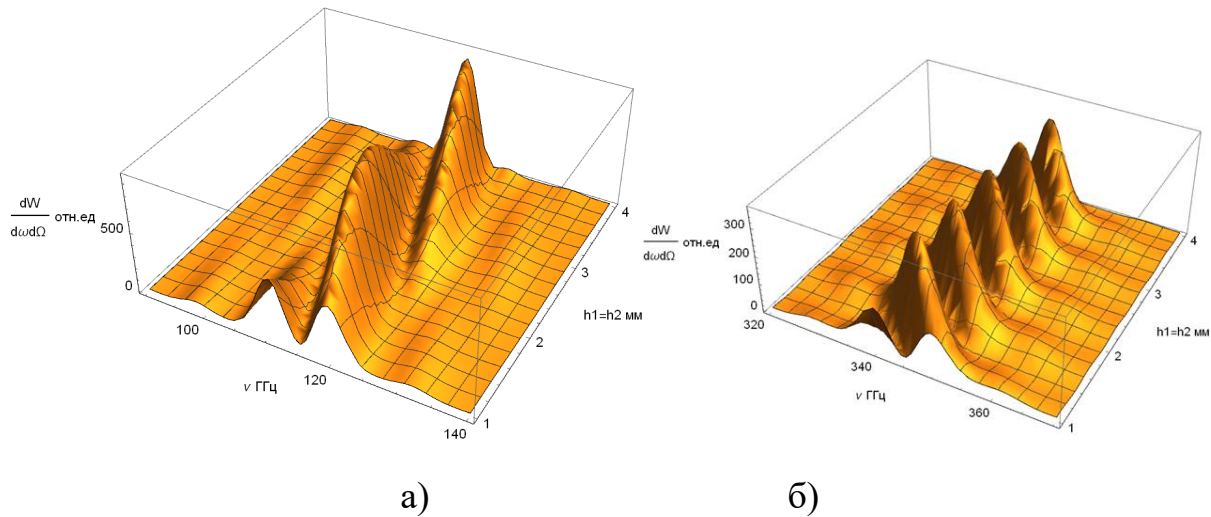


Рисунок 24 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (100 – 380 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

4.4 Эволюция спектра РДИ от изменения ширины щели двух решеток с разными параметрами

На рисунке 25 представлено спектральное распределение РДИ, когда электрон пролетает через щель между двумя неоднородными решетками ($a_1 \neq a_2, d_1 \neq d_2$). Параметры решетки 1: $a_1=2$ мм, $d_1=4$ мм, $N_1=10$; Параметры решетки 2: $a_2=3$ мм, $d_2=6$ мм, $N_2=10$;

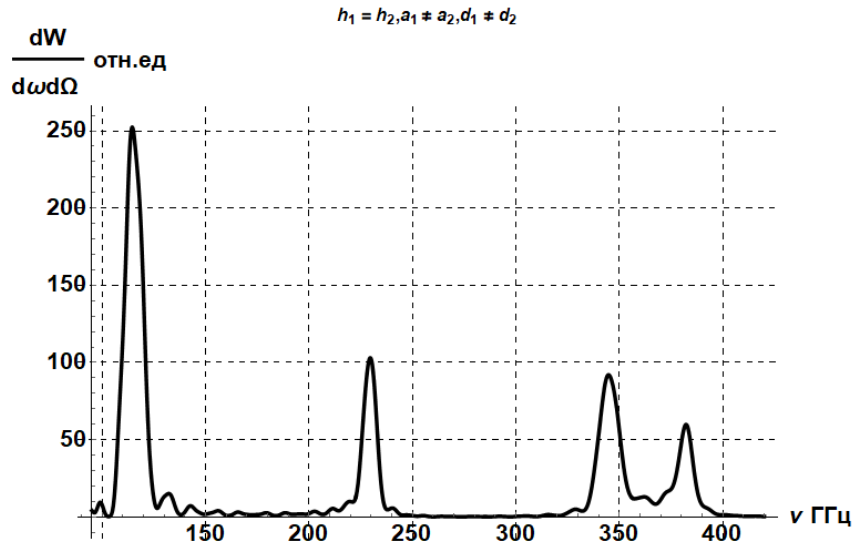


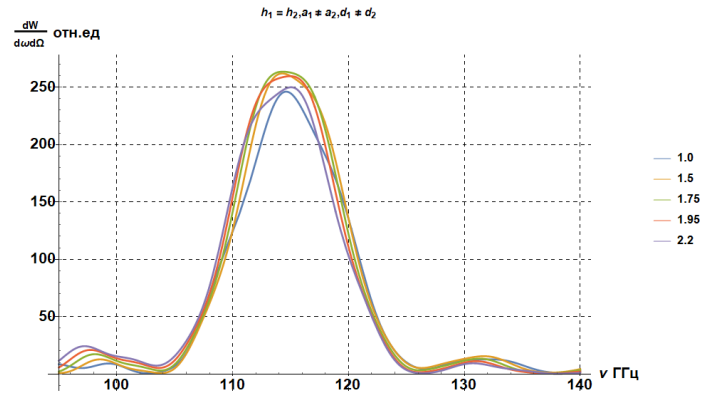
Рисунок 25 – Спектральное распределение РДИ от двух неоднородных решеток при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d_1 = 4$ мм, $a_1 = 2$ мм, $d_2 = 6$ мм, $a_2 = 3$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

Это связано с тем что интерференция, образующая от разных решеток, будет друг друга гасит и картина.

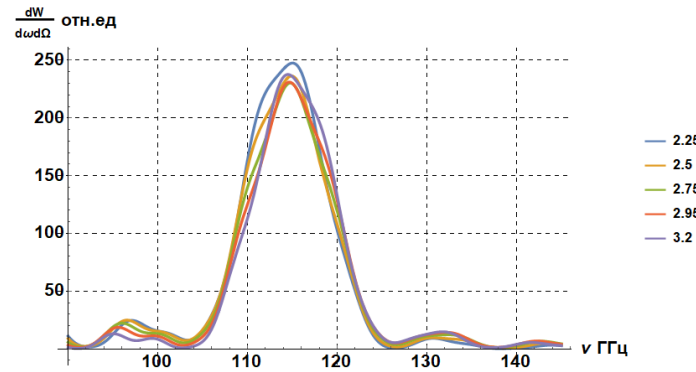
Рассмотрим эволюцию спектра РДИ, при увеличении расстояний h_1 и h_2 в диапазоне величин (1.0 - 4.0 мм, с шагом 0.5 мм) при этом ширина щели ($h_1 + h_2$), будет также изменяться.

При моделировании изменения спектра РДИ от увеличения h_1 и h_2 в полном диапазоне частот (110 - 420 ГГц), кривые слишком сливаются при рассмотрении спектра на всем диапазоне. Поэтому моделирование проводилось разбиением на отдельные интервалы в которых распределяются пики.

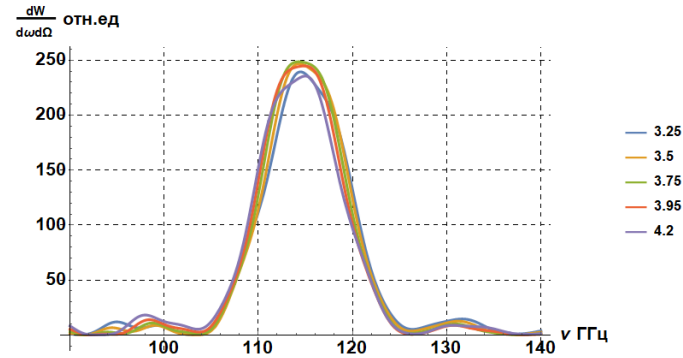
На рисунке 26 представлена эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (110 – 120 ГГц). При увеличении ширины щели, расщепления пика не наблюдается. Из графика видно, что с увеличением размеров h_1 и h_2 происходит незначительное увеличение интенсивности на данном интервале частот, а также форма пика имеет некоторую асимметрию.



а)



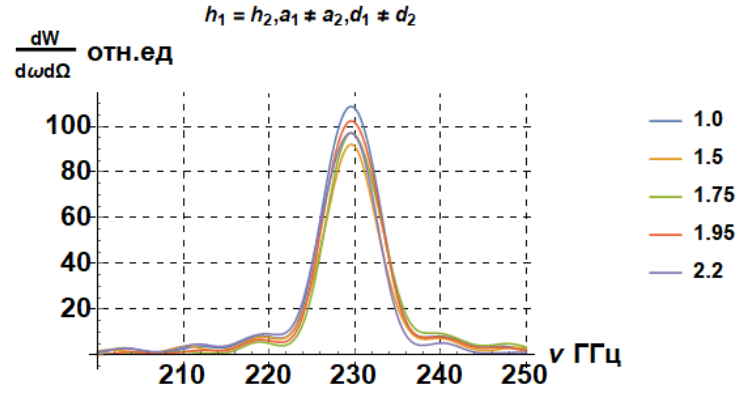
б)



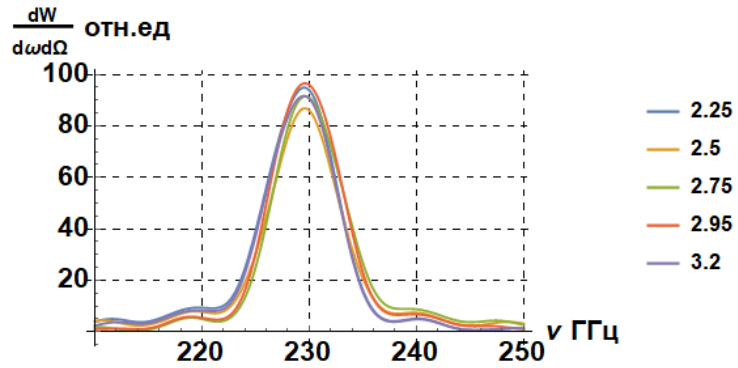
в)

Рисунок 26 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (110 – 120 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10$, $\gamma = 50$, $d_1 = 4$ мм, $a_1 = 2$ мм, $d_2 = 6$ мм, $a_2 = 3$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ$, $\theta_x = 0.2^\circ$, $\theta_y = 90^\circ$

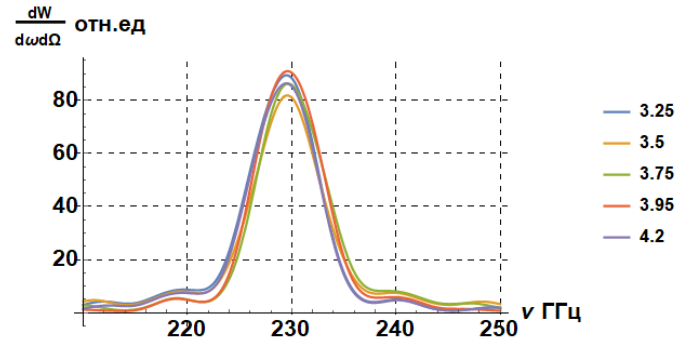
На рисунке 27 представлена эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (210 – 250 ГГц). При увеличении ширины щели, расщепления пика нет, а также наблюдается незначительное увеличение интенсивности на данном интервале.



а)



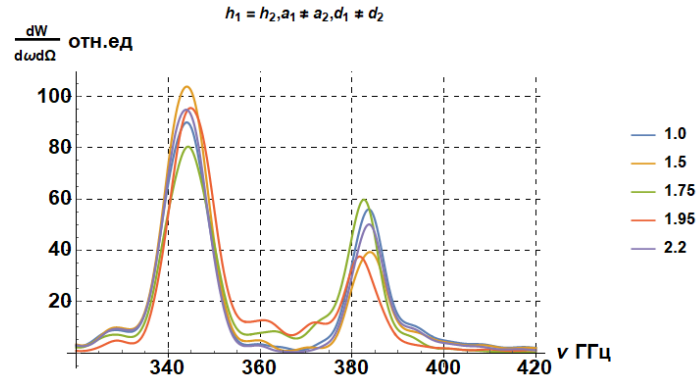
б)



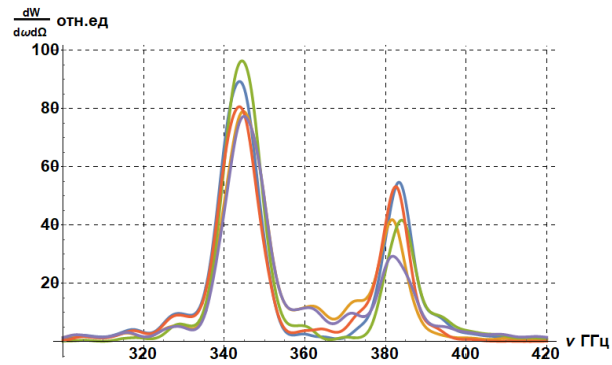
в)

Рисунок 27 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (210 – 250 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d_1 = 4$ мм, $a_1 = 2$ мм, $d_2 = 6$ мм, $a_2 = 3$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

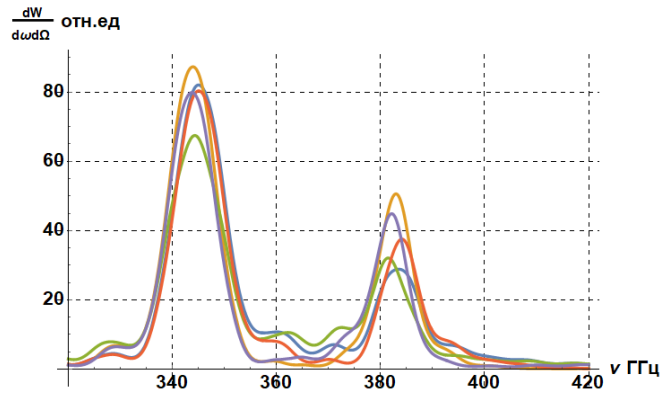
На рисунке 28 представлена эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот (320 – 420 ГГц) от двух решеток с разными значениями ширины стрипа и периода решетки.



а)



б)



в)

Рисунок 28 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пиков в диапазоне частот (330 – 420 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, dd_1 = 4$ мм, $a_1 = 2$ мм, $d_2 = 6$ мм, $a_2 = 3$ мм, $\theta_0 = 17.5^\circ, \theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ$

4.5 Зависимость спектра РДИ от угла поворота мишени

На рисунках 29а и 29б представлен сдвиг спектрального распределения РДИ от двух решеток в диапазоне частот (100 - 380 ГГц) от угла поворота мишени θ_0 . Для удобства разобьем спектр на интервале частот, в которых располагаются пики.

Угол поворота изменялся в интервале (15.5° - 19.5° с шагом 0.5°), параметры $h_1 = h_2 = 1.95$ мм. Размеры h_1 и h_2 , определяющие ширину щели были выбраны, исходя из отсутствия расщепления пиков в спектре РДИ при изменении ширины щели, что было рассмотрено в пункте 4.3. Расщепление пиков отсутствует в определенных значениях величин $h_1 = h_2 = 1.95, 2.75$ (в области 300 - 380 ГГц), 3.95 мм;

На рисунке 29а показано, что с увеличением угла поворота мишени, пик в диапазоне (100 - 140 ГГц) сдвигается в область более высоких частот с небольшим увеличением интенсивности.

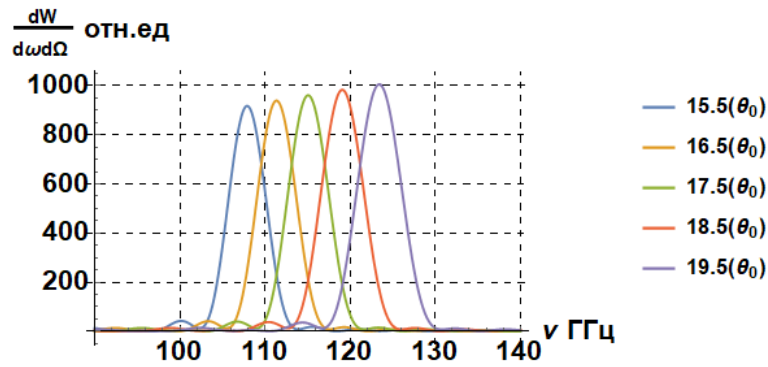
На рисунке 29б представлен спектр РДИ в диапазоне частот (300 - 380 ГГц), где также наблюдается сдвиг пика в область высоких частот с увеличением угла поворота мишени, однако с этим наблюдается снижения интенсивности в максимуме. В таблицах 2 и 3 представлена оценка сдвига максимумов для обоих пиков. Оценка была проведена относительно центрального пика для угла поворота в 17.5° , что соответствует максимум в (115.071 ГГц, 961.631 отн.ед). Таким образом крайние точки будут изменять на 6 %, а сдвиг пиков при различных углах θ_0 друг относительно друга около 3.2 %.

Таблица 2 – Сдвиг максимумов спектра РДИ в области (100 – 140 ГГц)
для $h_1 = h_2 = 1.95$ мм

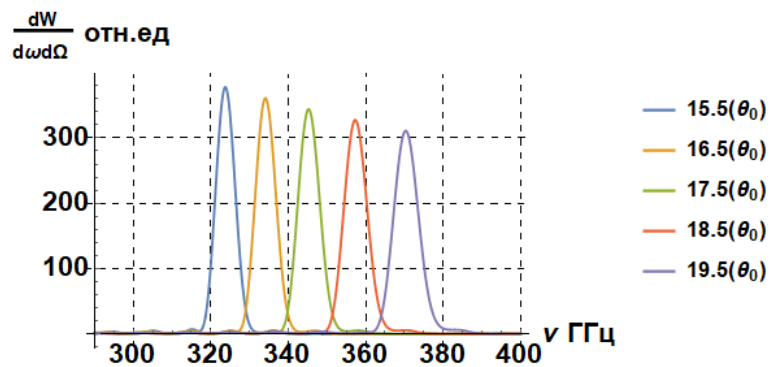
Интенсивность в максимуме, отн.ед	Частота, ГГц	Сдвиг в области частот, %	Угол поворота, град
918.201	107.903	6.2	15.5
939.747	111.355	3.2	16.5
961.631	115.071	3.1	17.5
983.775	119.082	3.4	18.5
1006.08	123.421	6.7	19.5

Таблица 3 – Сдвиг максимумов спектра РДИ в области (300 – 380 ГГц)
для $h_1 = h_2 = 1.95$ мм

Интенсивность, отн. ед	Частота, ГГц	Сдвиг в области частот, %	Угол поворота, град
377.668	323.716	6.2	15.5
360.805	334.081	3.2	16.5
344.048	345.241	3.1	17.5
327.428	357.285	3.4	18.5
310.977	370.318	6.7	19.5



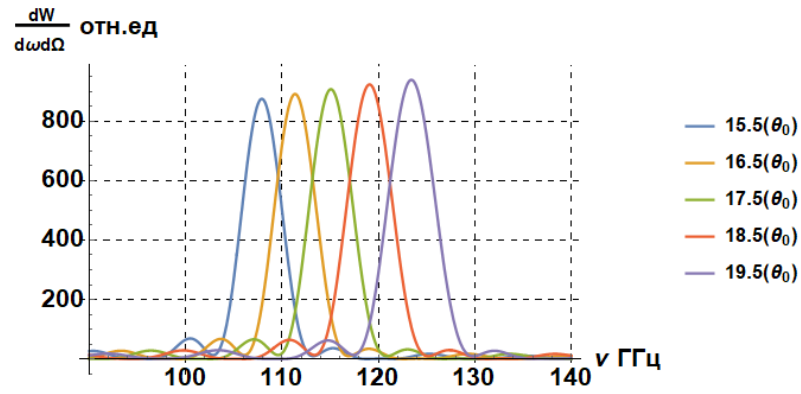
а)



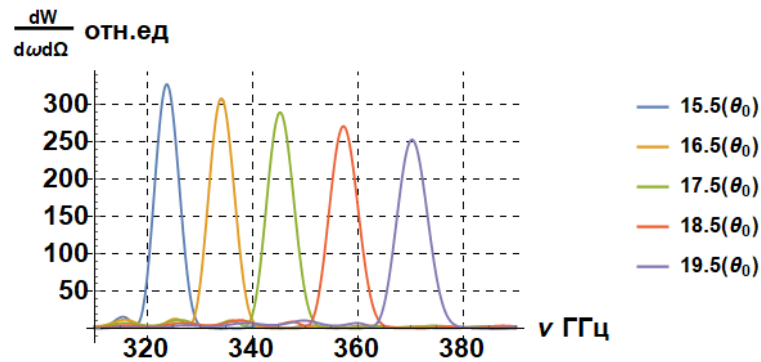
б)

Рисунок 29 – Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот а) (100 – 140 ГГц), б) (300 – 400 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.95$ мм

На рисунках 30а и 30б представлен сдвиг спектрального распределения РДИ в диапазоне частот (100 - 380 ГГц) от угла поворота мишени θ_0 при расстояниях от центра щели до краев стрипов $h_1 = h_2 = 3.95$ мм. С увеличением угла поворота решетки, наблюдается сдвиг пиков в область больших частот с увеличением интенсивности пика в диапазоне (100 -140 ГГц) и уменьшением интенсивности пика в диапазоне (300 - 380 ГГц). Сдвиг пиков относительно друг друга происходит на 3.2 %.



а)



б)

Рисунок 30. Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот а) (100 – 140 ГГц), б) (300 – 380 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 10, \gamma = 50, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 3.95$ мм

Далее рассмотрим зависимость спектра РДИ от угла поворота мишени при $\gamma = 500$ и числе периодов $N_1 = N_2 = 25$, угол поворота мишени θ_0 изменяется с шагом $1/\gamma$. При увеличении энергии электрона и числа периодов интенсивность излучения РДИ будет стремительно возрастать, что видно из рис. 31, при этом пики будут более узкими по сравнению с результатами, полученными для параметров при $\gamma = 50$ и $N_1 = N_2 = 10$ (рис.29,30).

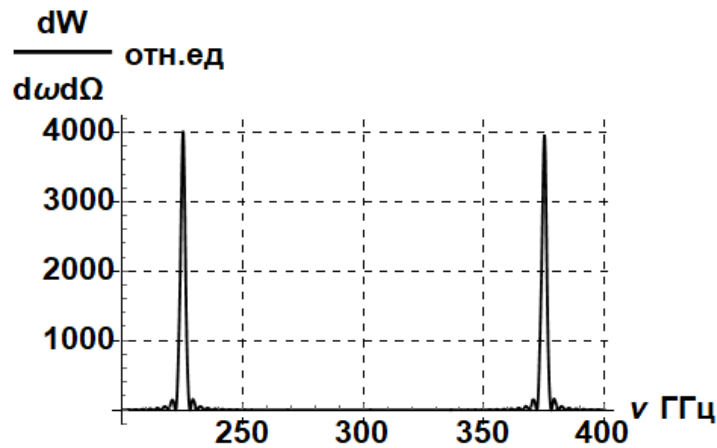
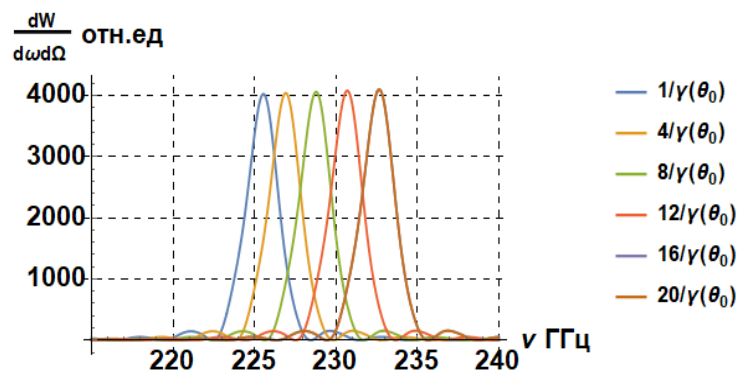
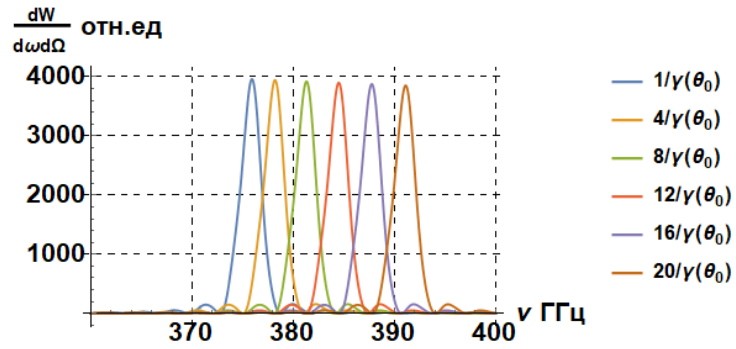


Рисунок 32. Спектрального распределения РДИ при параметрах $N_1 = N_2 = 25, \gamma = 500, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.95$ мм

На рисунке 32 показано, что увеличении угла поворота мишени, спектр будет также сдвигаться в область более высоких частот. Это хорошо согласуется с предыдущими результатами, полученными в этом разделе. И показывает, что разработанный код является универсальным для различных энергий электронов, характеристик мишени таких как ширина стрипа a , числа периодов (N_1, N_2) и период решетки d и делает более возможным диагностику угловой расходимости пучка. Однако стоит отметить, что формулу для оценки угловой расходимости пучка для исследуемой геометрии еще предстоит получить.



а)



б)

Рисунок 32. Эволюция спектрального распределения РДИ для пика в диапазоне частот а) (220 – 240 ГГц), а) (370 – 400 ГГц) при параметрах $N_1 = N_2 = 25, \gamma = 500, d = 4$ мм, $a = 2$ мм, $\theta_x = 0.2^\circ, \theta_y = 90^\circ, h_1 = h_2 = 1.95$ мм

Заключение

В данной работе исследовалась монохроматичность резонансного дифракционного излучения (РДИ) от заряда, пролетающего через щель между двумя решетками и показана принципиальная возможность измерения расходимости релятивистских электронных пучков при использовании РДИ. Также целью работы было выбрать оптимальную геометрию решетки для получения квазимонохроматического излучения без расщепления линии РДИ.

В процессе исследования проводилось моделирование спектральных и угловых распределений резонансного дифракционного излучения с помощью пакета Wolfram Mathematica 11.1

В заключении опишем полученные результаты:

1. Получены спектральные распределения ДИ для стрипа шириной $a = 2$ мм и для стрипа бесконечной ширины $a \rightarrow \infty$. Было получено, что при пролете заряженной частицы через щель между двумя стрипами, в отличие, когда частица пролетает на некотором расстоянии от мишени бесконечного размера спектрально - угловая плотность ДИ, зависит от ширины стрипа.

2. Показано, что спектр дифракционного излучения является непрерывным, в отличие от спектра резонансного дифракционного излучения, где появляется зависимость от длины волны. В спектре ДИ идет резкое возрастание интенсивности до значения длины волны 20 мкм и после этого остается неизменной (раздел 2). Поэтому оценить угловую расходимость пучка из спектральных расщеплений ДИ не представляется возможным, в отличие от спектральных распределений РДИ

3. Разработан код, позволяющий получать спектральные распределения РДИ от двух решеток.

4. Получены спектральные распределения РДИ от одиночной наклонной решетки. В разделе 4.2 показано, что распределение спектра от двух решеток достаточно хорошо повторяет вид распределения спектра от одной

решетки, за исключением, того что образуется расщепления пиков и спектр уширяется.

5. Получены спектральные распределения для случая, когда траектория электрона не совпадает с центром щели между двумя решетками (при постоянной ширине щели). Получена оценка монохроматичности (раздел 4.2): для пика в диапазоне частот (100 – 130 ГГц) величина монохроматичности составляет около 7.8 % и уменьшается на величину $4.4 \cdot 10^{-6}$ при изменении координаты пролета пучка относительно центральной оси. Величина монохроматичности изменяется на 10^{-4} и составляет примерно 1.46% для пика второго пика в диапазоне частот (330 - 380 ГГц). Таким образом, показано, что спектр РДИ от двух решеток не зависит от координаты пролета, что существенно упрощает диагностику пучков по спектру излучения.

Получена эволюция спектрального распределения РДИ от изменения ширины щели для двух одинаковых решеток. При моделировании спектра РДИ расщепление линии отсутствует при $h_1 = h_2 = 2.0, 1.95, 3.95, 4.0$ мм. В остальных случаях наблюдается полное или частичное расщепление пика. (рис. 22). Таким образом можно отметить, что расщепление пиков в спектре исчезает при ширине щели равной величине периода решетки d и кратное этому значению, и начинает проявляться при увеличении ширины щели на $1/4d$.

6. Получена эволюция спектра РДИ от изменения ширины щели двух решеток с разными значениями периода d_1, d_2 и ширины стрипа a_1, a_2 ; (Показан возможность использования такого вида мишеней.)

7. Получена зависимость спектра РДИ от угла поворота мишени. С увеличением угла поворота спектр будет сдвигаться в область более высоких частот на 3.2 %, что позволяет использовать уширение спектральной линии для оценки расходимости пучка (раздел 4.5).

Список литературы

- 1 A.P. Potylitsyn “Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and differences” // Institute for Nuclear Physics, Tomsk Polytechnic University. - 1998.-P.169-179
- 2 ПोटЫЛИЦЫН А.П., РЯЗАНОВ М.И., СТРИХАНОВ М.И., ТИЩЕНКО А.А. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учебное пособие// - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 347с.
- 3 A.P. Potylitsyn “Resonant diffraction radiation and Smith-Purcell effect”// Institute for Nuclear Physics, Tomsk Polytechnic University – 1997.
- 4 A.P. Potylitsyn, P.V. Karataev, and G. A. Naumenko “Resonant diffraction radiation from an ultrarelativistic particle moving close to a tilted grating”// Institute for Nuclear Physics, Tomsk Polytechnic University – 1999.
- 5 J. Urakawa , H. Hayano, K. Kubo and other «Feasibility of optical diffraction radiation for a non-invasive low-emittance beam diagnostics» // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 472 (2001) 309 – 317
- 6 A P Potylitsyn, A.R Mkrtchyan, V R Kocharyan, A.I Novokshonov «Feasibility of resonant diffraction radiation from inclined gratings for a nondestructive beam diagnostics».
- 7 S.J. Smith, H.M. Purcell «Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating» // Phys. Rev. -1953. – V.92. – P.1069 – 1070.
- 8 H. Izhizuka, Y. Kawamura, K. Yokoo et al. «Smith – Purcell radiation experiment using a field – emission array cathode measurements radiation»// Nucl. Instrum. And Methods A. – 2001.-V.475. – P.593 - 598.
- 9 Pavel Karataev, Sakae Araki, Ryosuke Hamatsu, Hitoshi Hayano, Toshiya Muto, Gennady Naumenko, Alexander Potylitsyn, Nobuhiro Terunuma, and Junji Urakawa “ First State Experiment on Optical Diffraction Radiation at KEK –ATF: Theoretical Approach” // KEK: High Energy Accelerator Research Organization - 2003. – V.201. –P.140-153.

10 Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). -М.:Наука,1984.-360 с.

11 Pavel Karataev, Sakae Araki, Ryosuke Hamatsu, Hitoshi Hayano, Toshiya Muto, Gennady Naumenko, Alexander Potylitsyn, Nobuhiro Terunuma, and Junji Urakawa “Beam-Size Measurement with Optical Diffraction Radiation at KEK Accelerator Test Facility”// KEK: High Energy Accelerator Research Organization - 2004

5 Социальная ответственность

Охрана труда — это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [1] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Таблица 4 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с компьютером	Электромагнитное излучение Шум Вибрация	-	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» (с изменениями на 21.06.2016)
	-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	-	Пожарная опасность	Правила противопожарного режима в Российской Федерации.

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Работа выполнялась с использованием современной вычислительной техники, что позволило достичь высокой эффективности процесса и уменьшения временных затрат на его проведение.

На инженера, который работает на компьютере, воздействуют следующие факторы:

физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения; психофизиологические.

психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

5.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

5.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 33.

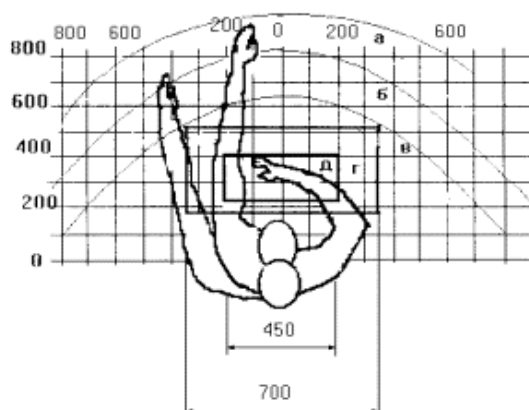


Рисунок 33 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;

— должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Организация рабочего места показана на рисунке 34.

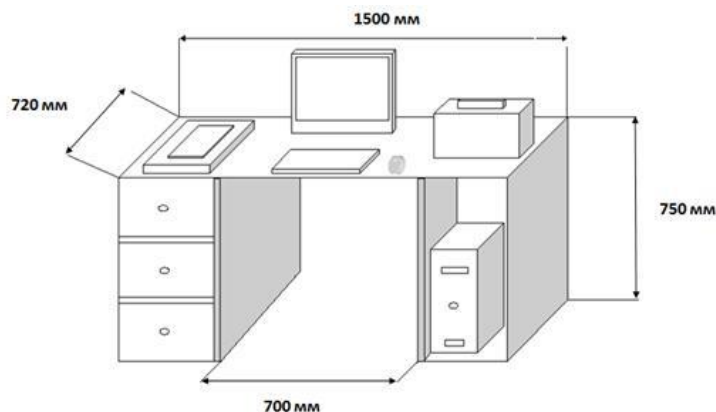


Рисунок 34 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30° . Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение

на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

5.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда, – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	40	0,1

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°C в теплое время года и 22-24 °C в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °C. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °C .

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м³ в него должно подаваться, не менее 30 м³/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м³ на одного человека допускается естественная циркуляция, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [11] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [3]

напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [2] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп. Согласно требованиям [10] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

5.3 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Влияние электрического тока на организм человека носит разносторонний характер, и может привести как к легкому, так и к тяжелому исходу.

Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое и биологическое действия:

- нагрев тканей вплоть до ожогов;
- разложение крови и плазмы – нарушение физико - химического состава;
- возбуждение тканей организма (судороги).

Действие тока может привести к электрической травме.

Таким образом, действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение – электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно - сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Степень опасности и исход поражения электрическим током зависят от ряда причин. Основными из них являются: величина тока, проходящего через организм; путь прохождения тока; продолжительность действия тока; частота тока и сопротивление человека в момент соприкосновения с токоведущими частями, которые, в свою очередь, зависят от состояния окружающей среды (температура, влажность воздуха и т.д.).

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма.

Биологическое действие проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма, в результате чего они могут погибнуть.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от:

1. параметров электрического тока, протекающего через тело человека (величины напряжения, частоты, рода тока приложенного к телу);
2. пути тока через тело человека (рука-рука, рука-нога, нога-нога, шея-ноги и др.);
3. продолжительность воздействия тока через тело человека;

4. условий внешней среды (влажности и температуры);
5. состояния организма человека (толщины и влажности кожного покрова, состояния здоровья и возраста).

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице 6.

Таблица 6 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Для контроля предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов измеряют напряжения и токи в местах, где может произойти замыкание электрической цепи через тело человека. [3]

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих

частей);

- применение средств защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

- изолирующие устройства и покрытия;

- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

- устройства дистанционного управления;

- предохранительные устройства и др.

Помещение, в котором проводится работа, относится к группе помещений без повышенной опасности: сухое (влажность воздуха не превышает 75%), не жаркое (температура не превышает 28°C), с токонепроводящими полами, без токопроводящей пыли и химически активной среды. Все провода, подводящие напряжение к электрооборудованию, электроизолированы и находятся в заземленной металлической оплетке. Рубильник распределительного щитка имеет пластмассовый кожух. Также имеются отключающие автоматы. Выполнен контур защитного заземления из стальной полосы сечением 30 мм² по периметру помещения. Все электрические приборы в лаборатории заземлены.

Для предотвращения появления статического электричества и защиты от его влияния в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Конструкция пола в помещении обеспечивает сток и отвод статического электричества. Покрытие пола выполнено из гладких, прочных, обладающих антистатическими свойствами материалов.

5.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [8], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- неисправность токоведущих частей установок;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности[8]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы.

Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями [8] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда,

повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Список используемых источников по разделу «социальная ответственность»

1. ГОСТ 12.0.002-2014. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
2. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 2017 г.
3. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)
4. ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
4. НПБ 105-03. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 1 авг. 2003 г.
5. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.
6. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. №181-ФЗ (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).
7. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
8. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

6. Предпроектный анализ

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования являются полученные данные об угловой расходимости электронного пучка

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: мониторинг, научно-исследовательская работа.

Таблица 7 - Карта сегментирования рынка услуг

		Организации	
		Медицинские учреждения	Исследовательские центры
Область применения	Облучение злокачественных опухолей		
	Научно-исследовательская работа		

Из карты сегментирования услуг видно, что целевым рынком данного исследования будут исследовательские центры.

6.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;

- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

- Бк1 – Диагностика пучка с применением цилиндра Фарадея;
- Бк2 – Диагностика пучка с использованием люминофорных экранов.

Оценка эффективности методов диагностики электронного пучка проводилась по двум группам критериев: технические и экономические.

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (макс 5)			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Информативность применяемой методики	0,20	5	5	3	1	1	0,6
2. Точность полученных данных об угловой расходимости пучка	0,25	3	4	2	0,75	1	0,5
3. Влияние на измеряемый объект	0,15	5	5	2	0,75	0,75	0,3
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,25	4	2	3	1	0,5	0,75
5. Возможность непрерывной обработки данных	0,15	3	3	5	0,45	0,45	0,75
Итого:	1	20	19	15	3,95	3,7	2,9

6.3 SWOT-анализ

Из SWOT-анализа видно, что для реализации данной работы необходимо получить дополнительное инвестирование (получение грантов, субсидий, премиальных и т.д.). SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 9.

Таблица 9 — SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1: Отсутствие влияния излучения на измеряемый объект С2: Низкая стоимость реализации С3: Удобство измерения спектральных и угловых характеристик пучка	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1: Необходимость разработки индивидуальной схемы подключения для каждой установки Сл2: Мало работ, посвящённых исследованию резонансного дифракционного излучения(РДИ) Сл3: Громоздкость конструкции детекторной установки
Возможности: В1: Расширение областей использования диагностики электронных пучков В2: Улучшение метода измерения для уменьшения влияния погрешности В3: Применение полученных знаний в смежных областях физики В4: Разработка метода неинвазивной диагностики электронного пучка В5: Написание статей о полученных результатах	"Сильные стороны и возможности": – Возможность создавать недорогие схемы для диагностики с улучшенными параметрами пучка – Сбор и анализ полученных данных позволит усовершенствовать алгоритмы обработки результатов – Получение пучков с улучшенными характеристиками на основе полученных угловых распределений	"Слабые стороны и возможности": Создание типового детектора для диагностики, рассчитанных на как можно широкий спектр оборудования Увеличить вычислительные мощности для обработки большего количества данных Увеличение исследований, направленных на разработку метода диагностики на основе РДИ

Угрозы: У1: Отсутствие финансирования со стороны государства и частных компаний У2: Отставание исследований в смежных областях У3: Недостаток специалистов с достаточной квалификацией при работе с методом У4: Узкий диапазон применения метода	"Сильные стороны и угрозы": – Публикация полученных данных в научном сообществе – Применить полученные данные на расширения исследований в данной области	"Слабые стороны и угрозы": – Получение грантов на исследования – Разработка универсальной схемы детектора для диагностики позволит расширить диапазон применения метода
---	---	---

7 Инициация проекта

7.1 Цели и результат проекта

Таблица 10 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Онкологические центры	Разработка метода неинвазивного метода диагностики угловой расходимости электронного пучка на основе резонансного дифракционного излучения
Научные ядерные центры	

Таблица 11 - Цели и результат проекта

Цели проекта:	На основе известной модели дифракционного излучения электронов, пролетающих вблизи идеально проводящего стрипа разработать алгоритм и написать код для расчета характеристик резонансного дифракционного излучения от решетки
Ожидаемые результаты проекта:	Получение угловых и спектральных распределений для резонансного дифракционного излучения, возникающего при пролете электрона через щель между двумя решетками
Критерии приемки результата проекта:	Возможность применения полученных формул для определения расходимости электронного пучка из спектральных измерений резонансного дифракционного. Рассмотренный механизм излучения не сопровождается непосредственным взаимодействием частиц пучка с твердотельной мишенью, что открывает перспективы невозмущающей диагностики пучков на современных ускорителях
Требования к результату проекта:	Требование:
	Спектральные распределения РДИ от набора наклонных решеток должны быть дискретными и получены в миллиметровом диапазоне длин волн
	Полученные спектральные распределения РДИ от набора наклонных решеток должны совпадать со спектральными распределениями от одной наклонной решетки за исключением, образующихся пиковых провалах, связанных с физикой излучения и геометрией процесса
	Должна быть представлена эволюция спектральных распределений при варьировании размеров щели
	Должна быть получена зависимость спектрального распределения от параметров решетки, таких как период и ширина.

7.2 Организационная структура проекта

Таблица 12 - Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	А. П. Потылицын, ИШФВП, ведущий научный сотрудник	Руководитель проекта	Координирует деятельность исполнителя проекта, ставит цели и задачи проекта	20
2	К.А. Алишина, ИШЯТ, студент	Исполнитель проекта	Выполняет задачи, которые ставит перед ним руководитель	276
ИТОГО:				296

7.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 13 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	81792.7 руб
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	11.03. 2019 - 17.05.2019
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	22.01.2019
3.2.2. Дата завершения проекта	17.05.2019
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Ограничения по времени работы магистранта

8 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

8.1. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представлен в виде таблицы (табл. 13).

Таблица 14 - Календарный план проекта

Название	Длительность, раб. Дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
Разработка технического задания ВКР	6	11.03.2019	17.03.2019	Руководитель
Выбор направления исследования	2	18.03.2019	19.03.2019	Руководитель
Изучение документации, поиск литературы	6	20.03.2019	26.03.2019	Магистрант
Поиск статей в журналах по выбранной тематике	8	27.03.2019	4.04.2019	Магистрант
Проведение расчетов	15	5.04.2019	22.04.2019	Магистрант
Создание графических зависимостей	6	23.04.2019	29.04.2019	Магистрант
Анализ и описание результатов	9	30.04.2019	13.05.2019	Магистрант
Проверка полученных результатов	2	14.05.2019	15.05.2019	Руководитель
Оформление пояснительной записки по ВКР	2	16.05.2019	17.05.2019	Магистрант
Итого:	56			

[illegible]

8.2 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице.

8.2.1 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Затраты на программное обеспечение. Стоимость годовой лицензии Wolfram Mathematica 11.1 составляет \$ 160,00. Курс доллара на момент покупки лицензии составляет 64,32 руб. Таким образом стоимость покупки лицензии в рублях составляет:

$$C = 160,00 \cdot 64,32 = 10291,2 \text{ руб.}$$

Стоимость ноутбука составляет: 40000,00 руб.

Амортизационные отчисления за период выполнения дипломной работы составили:

$$A = \frac{57 \cdot 40000,00}{1825} = 1249,32 \text{ руб.} \quad (8.2.1.1)$$

где 1825 – срок службы ноутбука, дней (5 лет).

Таблица 15 — Амортизационные отчисления

Наименование	Единица измерения	Количество, дней календарные	Цена за ед., руб.	Затраты на амортизацию, руб.
Вычислительная техника - ноутбук	1 шт.	57	40000,00	1249,32
Итого:				1249,32

8.2.2 Основная заработная плата

Основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (8.2.2.1)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (8.2.2.2)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (8.2.2.3)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5 -дневная неделя; при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 16)

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный оклад работника с учетом районного коэффициента для Томска $k_p = 1,3$, вычисляется:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot 1,3. \quad (8.2.2.4)$$

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 17.

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы студента.

Таблица 17 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Зтс, руб.	кр	Зм, руб./месяц	Здн, руб./день	Тр,раб. дн.	Зосн, руб.
Руководитель	47104	1,3	61235,2	2537,24	3	8457,45
Инженер	12664	1,3	16463,2	682,141	46	31 378,5
Итого Зосн						39835.9

8.2.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (8.2.3.1)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 18.

Таблица 18 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	кдоп	З _{осн}	З _{доп}
Руководитель	0,12	8457,45	1014,89
Студент	0,12	31 378,5	3765,42
Итого			4780,31

8.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (8.2.3.2)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

$$k_{внеб} = k_{пф} + k_c + k_{пн}, \quad (8.2.3.3)$$

где $k_{пф}$ - коэф. отчисления в пенсионный фонд; k_c - коэф. отчисления страховых взносов; $k_{пн}$ - коэф. отчисления в подоходный налог.

$$k_{внеб} = 0,271 \quad (8.2.3.4)$$

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot (8457.45 + 1014.89) = 2567.01 \text{ руб.} \quad (8.2.3.5)$$

Таблица 19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Наименование	
Основная заработная плата руководителя, руб.	8457.45
Дополнительная заработная плата руководителя, руб.	1014.89
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271
Сумма отчислений руководителя	2567.01
Сумма отчислений студента	9523.99
Итого:	12091

8.2.5 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (8.2.5.1)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Таблица 20 – Накладные расходы

Исполнитель	Руководитель	Магистрант
Основная заработная плата, руб.	8457.45	39835.9
Дополнительная заработная плата, руб.	1014.89	3765,42
Коэффициент накладных расходов	0,3	0,3
Сумма накладных расходов	2841.7	10543.2
Итого	13384.9	

8.2.6 Прочие прямые затраты

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. Затраты на электроэнергию на компьютер рассчитываются по формуле:

$$C = Ц_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5,8 \cdot 0,1 \cdot 46 \cdot 6 = 160,08 \text{ руб.}, \quad (8.2.6.2)$$

где $Ц_{\text{эл}}$ — тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);
 P — мощность оборудования, кВт (мощность ноутбука 0,1 кВт); $F_{\text{об}}$ — время использования оборудования, ч.

Таблица 21 – Отчисления на электроэнергию

Наименование	Единица измерения	Количество, дней	Цена за ед., руб.	Затраты на электроэнергию, (Зм), руб.
Электроэнергия	кВт·ч	46	5,80	160,08
Итого:				160,08

8.3 Формирование бюджета затрат научно -исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 22 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Затраты на специальное оборудование	10291
Затраты по основной заработной плате	39835.9
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4780.31
Отчисления во внебюджетные фонды	12091
Накладные расходы	13384.9
Прочие прямые затраты	160.8
Бюджет затрат НТИ	81792.7

8.4 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 23.

Таблица 23 - Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Отсутствие некоторых математических методов Wolfram Mathematica 11.1	Затруднение в применении упрощений расчетов и получении аналитических выражений	1	2	низкий	Написание кода, позволяющего получить необходимые выражения
2	Поломка ноутбука	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставление магистранту рабочего места с компьютером

9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 24 – Интегральный финансовый показатель

№	Исполнение	Стоимость разработки	Максимальная стоимость разработки	Интегральный финансовый показатель
1	РДИ	81792.7	112 571.3	0,726
2	Люминофорные экраны	112 571.3		1

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 25).

Таблица 25 – Оценка характеристик исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка	
		Исп.1	Исп.2
1. Информативность применяемой методики	0,20	5	4
2. Точность полученных данных об угловой расходимости пучка	0,20	4	5
3. Влияние на измеряемый объект	0,15	5	3
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,20	4	3
5. Возможность непрерывной обработки данных	0,25	3	2
ИТОГО	1,00	4,10	3,35

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл. 26) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Таблица 26 – Эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,726	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,10	3,35
3	Интегральный показатель эффективности	5,647	3,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,685	0,593

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Но т.к. задача имеет довольно строгие условия, решение имеет лишь один вариант.

Список использованной литературы по разделу «Финансовый менеджмент»

1. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
2. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
3. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
4. Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс] <http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa>
5. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК), 4-е издание, 2008 г.
6. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. Управление проектами: Учебное пособие. – М.: Омега-Л, 2004. – 664 с.
7. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
8. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электронный ресурс]. - Режим доступа - <http://www.cfin.ru/>

Приложение А
(справочное)

Diffraction radiation

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Алишина К.А		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Трясучев В.А	д.ф - м.н		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
преподаватель	Шайкина О.И			

1 Diffraction radiation from an ultrarelativistic particle for a tilted strip

To calculate the DR characteristics for an inclined grating, it is necessary to know the field of diffraction radiation from a charged particle moving near one inclined strip. The exact solution of Maxwell's equations describing the radiation of a charged particle moving over an inclined semi-infinite ideally conducting screen has long been known. Using the latter and the results obtained, we can obtain the expression for the intensity of the fractional radiation for a strip as the difference between the radiation fields of two semi-infinite planes, one of which is limited by edge 1 and the other by edge 2 (see Figure 1).

Strip field strengths as the difference between the radiation fields of two semi-infinite planes, one of which is limited by edge 1, and the other by edge 2.

$$\vec{E}_{strip} = \vec{E}_{up} - \vec{E}_{down} \quad (1.1)$$

For convenience, let us express the impact parameter h , the shortest distance between the trajectory of the particle and the flat face.

For edge 1 as follows:

$$a_1 = h - \frac{a}{2} \cdot \sin\theta_0 \quad (1.2)$$

For edge 2:

$$a_2 = h + \frac{a}{2} \cdot \sin\theta_0 \quad (1.3)$$

Here h is the spacing between the particle trajectory and the middle line of the strip, a is the strip width, and θ_0 is the strip tilt angle. Thus, taking into account the phase shift we have:

$$\vec{E}_{strip} = \vec{E}_{DR}(h - \frac{a}{2} \cdot \sin\theta_0)e^{i\varphi} - \vec{E}_{DR}(h + \frac{a}{2} \cdot \sin\theta_0)e^{-i\varphi} \quad (1.4)$$

In equation (1.4), the DR field for a semi-infinite perfect screen is expressed through $\vec{E}_{DR}(a_i)$. The total phase shift (2ϕ) characterizes the phase difference between the waves formed near edges 1 and 2; And it can be obtained from simple geometric relations as a quantity proportional to the difference in time between the propagation of a wave from front 1 and edge 2:

$$2\phi = \frac{2a\pi}{\lambda} (\cos(\theta_y - \theta_0) - \frac{\cos\theta_0}{\beta}) \quad (1.5)$$

Where β the article [4] presents a detailed derivation of the formula for the total density of DR intensity from a strip.

Consider the radiation characteristics in the coordinate system, where the z - axis is directed along the beam, and the x - axis is parallel to the y - axis and perpendicular to the edge of the strip. In this paper, we use the system of units $\hbar = c = m = 1$ is the particle velocity and λ is the DR wavelength.

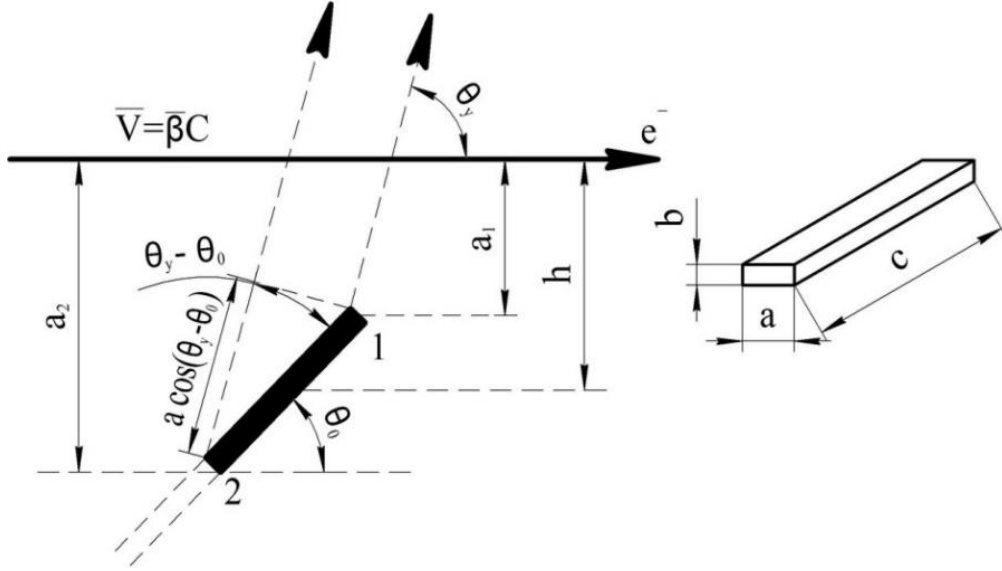


Figure 2 – Geometry of diffraction radiation from a single strip; h is the impact parameter, θ_y is the observation angle, θ_0 is the strip tilt angle, a is the strip width

Spectral - angular density of DR for strip [4]:

$$\frac{d^2 W_{strip}}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega} \cdot F_{strip} , \quad (1.6)$$

Where $\frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega}$ – spectral angular density for a semi-infinite target;

$F_{strip} = 4((\text{Sinh}\delta_0)^2 + (\text{Sin}\phi)^2)$ – characterizes the DR field interference from the two strip edges;

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega} \\ &= \frac{\alpha}{4\pi^2} \text{Exp}\left[\frac{-\omega}{\omega c} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta x^2}\right] \frac{\gamma^{-2} + 2\theta x^2}{(\gamma^{-2} + \theta x^2)(\gamma^{-2} + \theta x^2 + \theta y^2)} ((\text{Sinh}\delta_0)^2 + (\text{Sin}\phi)^2) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\text{Where } \delta_0 = \frac{a\pi \sin \theta_0}{\gamma \lambda} \sqrt{1 + \gamma^2 \theta_x^2} \quad (1.8)$$

It follows from Eq. (12) that for the mirror reflection angle ($\theta_y = 2\theta_0$) the angular distribution has another maximum which is much the same as Eq. 14 and can be identified as “backward diffraction radiation” ~ BDR in analogy with the process of transition radiation. The fact that the FDR and BDR intensities coincide in the whole frequency range results from using an ideally conducting screen approximation. However, it is obvious that the latter approximation is not valid for $\omega_c \geq \omega_p$, where ω_p is the plasmon energy of the screen material.

Figure 2 shows the angular distributions of diffraction radiation from a semi-infinite target and from a strip. The type of angular distributions have almost the same character, differs only in the intensity order.

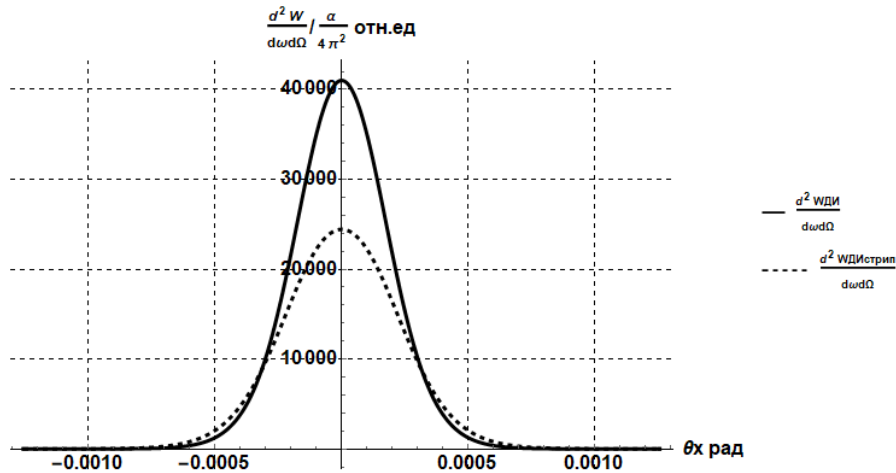


Figure 2 – Angular distribution and semi-infinite target for: $\theta_0 = 90^\circ$, $\theta_y = 0^\circ$, $\gamma = 2500$, $a = 150$ mkm

2 Field DR from slit

Consider the problem when the electron beam flies between two strips (see Fig. 3). In this case, if the width of the strip $a \gg \gamma \lambda$, the task can be reduced to a situation where the charge flies through a slit of width $b = h_1 + h_2$.

The DR field during the passage of charge through a slit in an inclined ideally conducting screen can be considered as a superposition of diffraction radiation fields (DR) from the upper and lower half - planes.

We assume that the particle flies in the center of the slit.

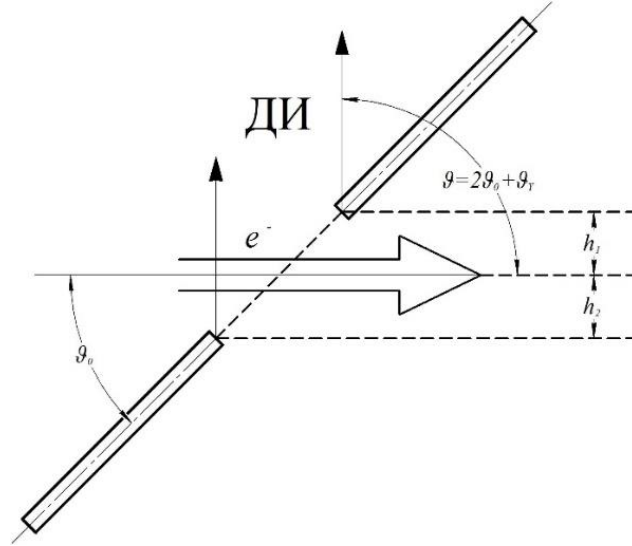


Figure 3. Geometry DR from the slit. b - slit width, a - strip width, θ_0 - strip rotation angle.

Let us take from [5] expressions for the fields DR (2.1) and (2.2) in the ultrarelativistic approximation ($\gamma \gg 1$)

$$E_1 = \frac{ie}{4\pi^2} \cdot \frac{\theta x}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2}} \cdot \left(\frac{\text{Exp}[-\frac{2\pi h_1}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y)]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y} + \frac{\text{Exp}[-\frac{2\pi h_2}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y)]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y} \right) \quad (2.1)$$

$$E_2 = \frac{e}{4\pi^2} \cdot \left(-\frac{\text{Exp}[-\frac{2\pi h_1}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y)]}{\sqrt{(\gamma^{-2} + \theta x^2)} - i\theta y} + \frac{\text{Exp}[-\frac{2\pi h_2}{\lambda}(\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} - i\theta y)]}{\sqrt{\gamma^{-2} + \theta x^2} + i\theta y} \right); \quad (2.2)$$

Where λ is the wavelength of DR, when the slit width tends to zero, expressions (2.1) and (2.2) go to expressions for transition radiation fields to infinite boundaries. In Eq. (2.1) and (2.2) h_1 , h_2 are the shortest distances between the particle trajectory and the slit edges.

Next, we find the spectral - angular density of DR, alternately calculating (2.3) for (2.1) and (2.2):

$$\frac{dW_{slit}}{d\omega d\Omega} = |E_1|^2 + |E_2|^2 \quad (2.3)$$

For strips of finite width, the fields E_i , are written as:

$$\frac{dW_a}{d\omega d\Omega} = \frac{\alpha}{4\pi^2} \gamma^2 \frac{\text{Exp}[-\frac{\omega}{\omega_c} \cdot \sqrt{1+\gamma^2\theta_x^2}]}{(1+\gamma^2\theta_x^2) \cdot (1+\gamma^2\theta_x^2+\gamma^2\theta_y^2)} \cdot ((1+2\gamma^2\theta_x^2) \cdot (\text{Exp}[2l \frac{\omega}{\omega_c} \sqrt{1+\gamma^2\theta_x^2}] + \text{Exp}[-2l \frac{\omega}{\omega_c} \sqrt{1+\gamma^2\theta_x^2}]) - \frac{2}{(1+\gamma^2\theta_x^2+\gamma^2\theta_y^2)} \cdot ((1+\gamma^2\theta_x^2 - \gamma^2\theta_y^2) \cdot \text{Cos}[\frac{\omega}{\omega_c} \gamma \theta_y] - 2\gamma\theta_y \sqrt{1+\gamma^2\theta_x^2} \cdot \text{Sin}[\frac{\omega}{\omega_c} \gamma \theta_y])) \quad (2.4)$$

Where $\omega_c = \frac{\gamma c}{h_1+h_2}$ – the characteristic energy of DR; $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ – DR radiation frequency; $l = \frac{h_1 - \frac{a}{2} \cdot \text{Sin}[\theta_0]}{a \cdot \text{Sin}[\theta_0]}$ – relative displacement of a particle relative to the center of the slit and the width of the slit.

Figure 4 shows the spectral distribution of DR from the slit at different slit widths $a = 100, 200, 1000$ microns, with the parameters $\gamma = 100$, $\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6}$. In the distribution of DR, there is a zero minimum at $\theta_x = \theta_y = 0$, when the particle moves through the center of the slit at ($l = 0$). At a nonzero offset ($l \neq 0$), the minimum will be smoothed [5]. The spectral distribution of DR is continuous and does not depend on the wavelength.

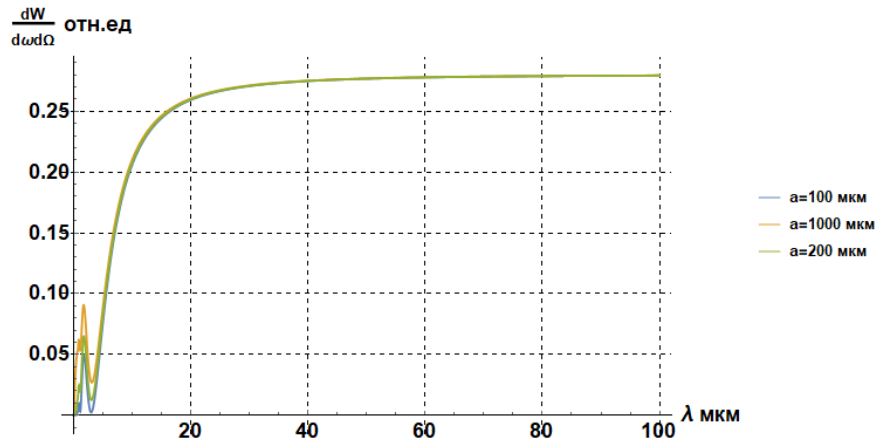


Figure 4. Dependence of the spectral distribution of DR on the slit width of the strip

Figure 5 shows the angular distributions of DR with a strip width of 2 mm and a width of infinite size. During the passage of a charged particle through a slit between two strips, in contrast, when a particle flies at a certain distance from the target of infinite size, the spectral - angular density of DR described by expression (2.4) depends on the width of the strip a . What can be seen from the figures (5) and (6):

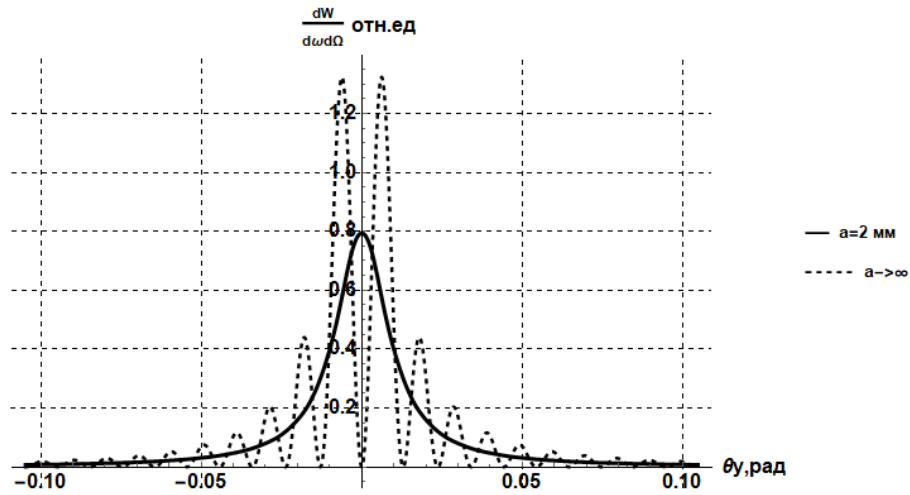
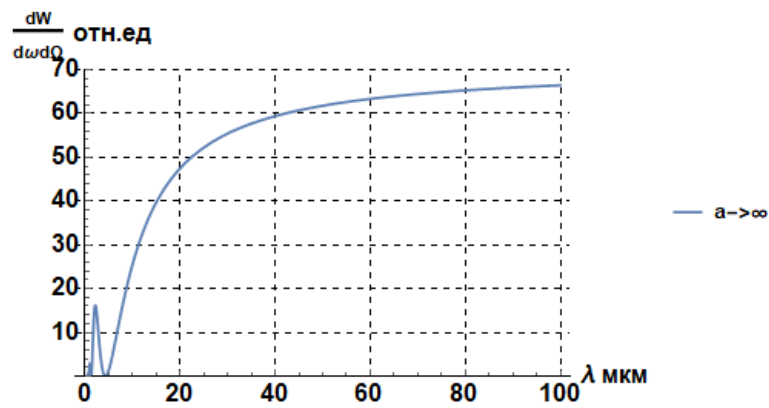
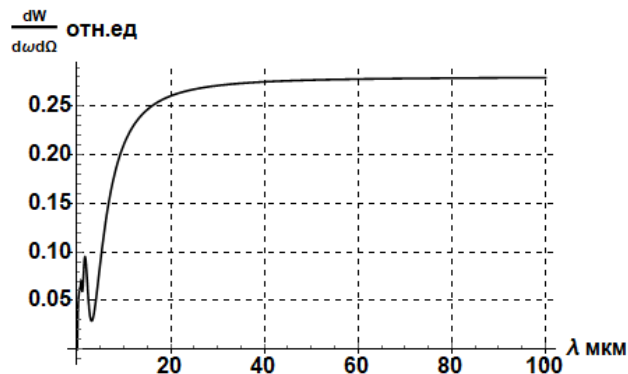


Figure 5. Angular distribution of DR with a strip width $a = 2$ mm and $a \rightarrow \infty$

Figure 6 shows the spectral distributions of DR with a strip width of 2 mm and a width of infinite size. The intensity of the DR during the passage of a particle near the target $a \rightarrow \infty$ will be several times higher than when it passes through the gap between two strips.



a)



b)

Figure 6. Spectral distribution of DR with a strip width: a) $a \rightarrow \infty$, b) $a = 2$ mm

Conclusion

Diffraction radiation occurs when a charged particle moves in a straight line and at a constant speed in the vicinity of the medium (target) with an impact parameter. The passing particle interacts with the electric field of the target, causing changes in the currents in time. Because of these currents, radiation occurs.

At present, it has been shown that the intensity of diffraction radiation of relativistic particles in the optical and ultraviolet range can be comparable with the intensity of transition radiation, which is widely used in high-energy physics and accelerator physics.

As can be seen from Figure 6, the spectrum of optical diffraction radiation is continuous, in contrast to the spectrum of resonant diffraction radiation, where the dependence on the wavelength appears. In the spectrum of the DR, a dip is seen on Figs. 4 and 6, after which with increasing wavelength, the intensity increases to $20\text{ }\mu\text{m}$ and then remains unchanged. Therefore, it is not possible to estimate the angular divergence of the electron beam from the spectral DR, in contrast to the spectral distributions of the RDR.