

На правах рукописи



СОБОЛЕВА ВЕРОНИКА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**Взаимодействие поля релятивистских электронов с
метаматериалами в миллиметровом диапазоне длин волн**

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный **Науменко Геннадий Андреевич,**

руководитель: доктор физико-математических наук

Официальные **Дабагов Султан Барасбиевич,**

оппоненты: доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Сусяев Валентин Иванович,

кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доцент кафедры радиоэлектроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Защита состоится “20” декабря 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2 а.

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

Автореферат разослан “27” октября 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.269.05, к.ф.-м.н., доцент



А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Область исследований, связанная с созданием и изучением свойств метаматериалов интенсивно развивается на протяжении последних 15 лет. Интерес, проявляемый к метаматериалам, обусловлен уникальными физическими свойствами данных сред и предоставляемыми возможностями по реализации ряда перспективных приложений. Ярким примером могут служить возможность преодоления дифракционного предела [1-4] и метапокрытия, делающие физические объекты невидимыми в определенном частотном диапазоне [5,6]. Помимо этого, несомненный интерес представляет собой генерация электромагнитного излучения в метаматериалах при взаимодействии с полем заряженной частицы. В литературе широко представлены результаты теоретического исследования излучения, возникающего в метаматериалах двух видов: метаматериалов с отрицательным показателем преломления (МОПП) [7,8] и проволочных метаматериалах [9-11]. При этом следует отметить, малочисленность экспериментальных работ. Так обратному излучению Вавилова – Черенкова (ОИВЧ), которое генерируется в метаматериалах с отрицательным показателем преломления, посвящены экспериментальные работы [12,13]. Однако в обеих работах выполнена лишь симуляция ОИВЧ, поскольку заряженная частица в данных экспериментах моделировалась либо с помощью периодически расположенных диполей, либо ультракоротким лазерным импульсом, движущимся внутри нелинейного материала вблизи мишени из МОПП. Экспериментальные работы, посвященные излучению заряженной частицы в проволочных метаматериалах, которое называют излучением Вавилова – Черенкова (ИВЧ), отсутствуют. При этом экспериментальное исследование излучения, генерируемого в обоих видах метаматериалов при взаимодействии с полем заряженной частицы, представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и практической, поскольку излучение, как в проволочных метаматериалах, так

и в МОПП является довольно перспективным для создания новых методов невозмущающей диагностики пучков заряженных частиц.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование спектрально-угловых характеристик излучения, возникающего при пролете пучка релятивистских электронов вблизи мишени из метаматериала.

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

1. Выбор параметров элементарной ячейки и геометрии мишеней для проводимых исследований.
2. Экспериментальное исследование когерентного излучения в метаматериалах с отрицательным коэффициентом преломления и в фотонных кристаллах.
3. Экспериментальное исследование когерентного излучения в метаматериалах на основе периодических проволочных структур.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное подтверждение генерации обратного излучения Вавилова – Черенкова в метаматериалах с отрицательным коэффициентом преломления при взаимодействии с полем релятивистских электронов.
2. Показана резкая асимметрия угловых характеристик излучения в зависимости от ориентации одномерной проволочной структуры.
3. Результаты исследований спектрально-угловых характеристик когерентного излучения, генерируемого полем релятивистских электронных сгустков в проволочном метаматериале.

Научная новизна работы.

Впервые зарегистрировано обратное излучения Вавилова – Черенкова, генерируемое в результате взаимодействия метаматериала с отрицательным коэффициентом преломления с полем релятивистских электронных сгустков.

Впервые измерены спектрально-угловые характеристики излучения от плоских и объемных периодических проволочных структур.

Показана резкая асимметрия угловых характеристик обратного переходного излучения от плоской проволочной структуры в зависимости от ее ориентации.

Практическая значимость работы.

Результаты настоящей работы имеют практическое значение для сознания новых методов диагностики пучков заряженных частиц, а также представляют ценность для развития теории процессов излучения в метаматериалах, ввиду малочисленности имеющихся экспериментальных работ.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. XIX международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, Россия, 2013);
2. международной конференции «Days on Diffraction» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2014)
3. VI международной конференции «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» (г. Капри, Италия, 2014);
4. IV международном семинаре «Advanced Generation of THz and Compton X-Ray Beams Using Compact Electron Accelerator» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2014)
5. XI международной конференции «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2015)

Публикации:

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, из них 3 рекомендованных ВАК [a-g].

Личный вклад автора.

Вклад автора в представленном диссертационном исследовании состоит в следующем: выбор параметров элементарной ячейки,

формирующей исследуемую мишень с использованием современных программных средств; изготовление мишеней; участие в планировании и проведении экспериментов; обработка измеренных данных и формулировка основных выводов. Автор принимал активное участие в обсуждении полученных результатов и в представлении их на научных семинарах, конференциях и в публикациях.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 57 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 60 страниц. Работа содержит 41 рисунок и 2 таблицы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, проведен краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, обозначена цель работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки: ускорителя, детекторов электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, а также оборудования для спектральных измерений.

Исследования проводились на выведенном электронном пучке микротрона Физико-технического института Томского политехнического университета, основные параметры пучка которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры выведенного пучка микротрона

Энергия ускоренных электронов	6.2 МэВ
Размер пучка на выходе из микротрона	4.5×2.5 мм
Расходимость по горизонтали	15×10^{-3} рад
Расходимость по вертикали	5×10^{-3} рад

Для измерения характеристик электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн использовалось два детектора: ДП21М и ДПММ-01. Рабочий диапазон детектора ДП21М от 3 до 30 мм, а ДПММ-01 от 3 до 50 мм. В основе данных детекторов лежит широкополосная антенна с встроенным в центр антенны СВЧ диодом.

Измерение спектральных характеристик регистрируемого излучения осуществлялось с помощью интерферометра с делением фронта на основе двух зеркал, принцип действия которого описан в работе [14].

Во второй главе приведены результаты испытания исследуемых мишеней на источнике миллиметрового излучения, а также результаты экспериментов на выведенном пучке микротрона ФТИ.

В разделе 2.1 описаны свойства метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления. Далее, в разделе 2.2, описан метод экстракции материальных параметров метаматериала из коэффициентов отражения и прохождения, а в разделе 2.3 приведен алгоритм выбора параметров элементарной ячейки формирующей исследуемую мишень.

Для проводимых исследований было изготовлено две мишени, каждая из которых представляет собой треугольную призму, в основании которой лежит прямоугольный треугольник. Обе мишени представляют собой совокупность параллельно расположенных на расстоянии l пластин, на которые нанесен массив элементарных ячеек (см. рисунок 1).

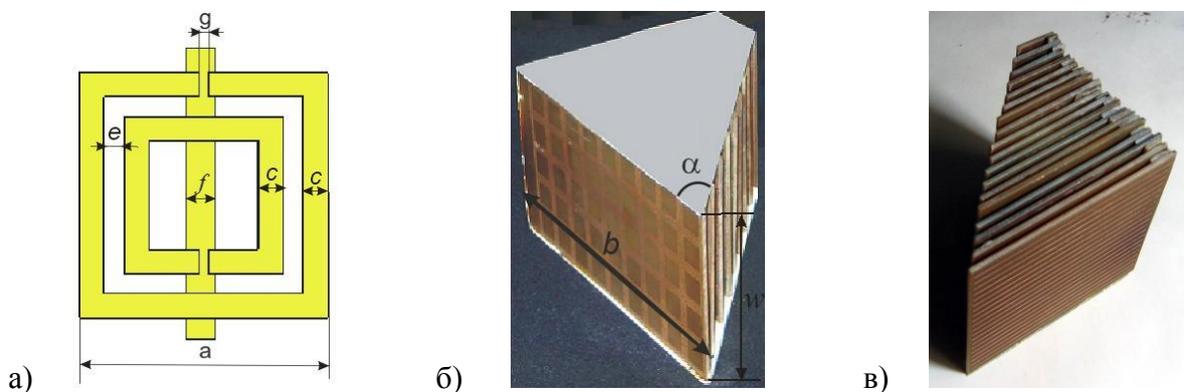


Рисунок 1 – Внешний вид: а) – элементарной ячейки; б) – мишени RhC-12;
в) – мишени LHM-3

Параметры используемых мишеней и их элементарных ячеек приведены в таблице 2. Для удобства в изложении материала мишень с размером элементарной ячейки $a = 11.6$ мм обозначили PhC-12, а с размером $a = 2.5$ мм – LHM-3.

Таблица 2 – Параметры мишеней и элементарной ячейки

Мишень (см. рисунок 1)	Параметры элементарной ячейки					Параметры мишени			
	a , мм	c , мм	e , мм	f , мм	g , мм	w , мм	b , мм	α	l , мм
PhC-12	11.6	0.7	0.3	0.5	0.5	62	108	42°	9
LHM-3	2.5	0.35	0.1	0.3	0.3	40	60	45°	1.5

Дисперсионные кривые (см. рисунок 2), полученные для элементарной ячейки мишени LHM-3, используя метод экстракции материальных параметров, описанный в разделе 2.2, показывают, что минимальное значение коэффициента преломления (максимальное отрицательное значение) соответствует частоте 8.1 ГГц или длине волны 37 мм.

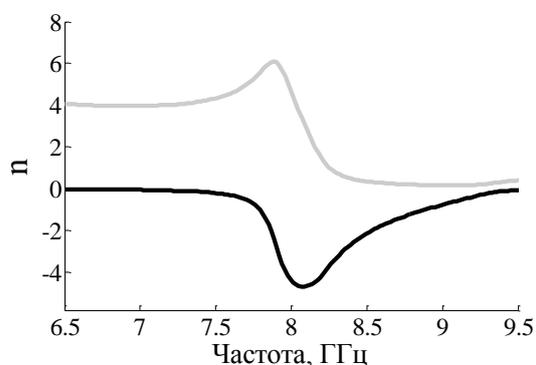


Рисунок 2 – Действительная (черная линия) и мнимая (серая линия) части коэффициента преломления для элементарной ячейки мишени LHM-3

В разделе 2.4 приведены результаты испытания мишеней на источнике миллиметрового излучения. В качестве источника излучения использовался излучатель на основе диода Ганна, который имеет в спектре две изолированные линии с регулируемой интенсивностью. Параболическое зеркало, в фокусе которого расположен источник излучения (см. рисунок 3), формировало квазипараллельный пучок излучения и направляло его на мишень. Для измерения характеристик излучения в экспериментах с мишенью PhC-12 использовался детектор ДП21М, при этом измерялась

горизонтальная компонента поляризации излучения, а с мишенью ЛНМ-3 – детектор ДПММ-01, а измерялась вертикальная компонента поляризации.

Детектор, используемый для регистрации излучения, размещается на штанге в фокусе параболического отражателя (см. рисунок 3). Ось вращения штанги проходит через середину излучающей грани мишени. Данная конструкция позволяет измерять угловые характеристики излучения без искажения, обусловленного конечными размерами области излучения [15].

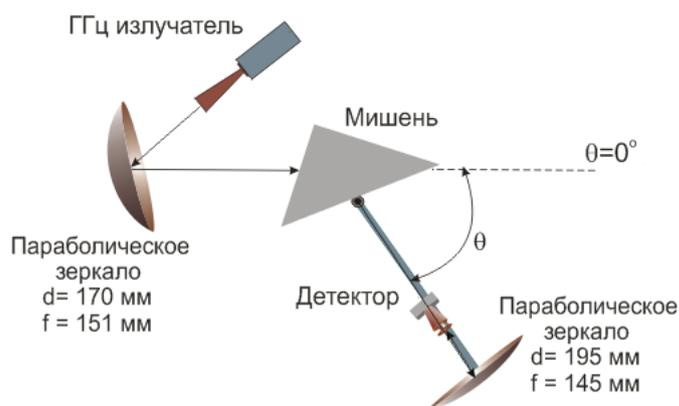


Рисунок 3 – Схема измерения углового распределения излучения, проходящего через мишень

Из результатов, полученных при испытании мишени PhC-12 на источнике электромагнитного излучения (см. рисунок 4), видно, что излучение, проходящее через мишень, имеет различный спектральный состав в зависимости от ориентации мишени по отношению к падающему пучку, т.е. мишень PhC-12 работает как своеобразный фильтр. Мишень PhC-12 в рассматриваемом диапазоне длин волн проявляет свойства фотонного кристалла. Это объясняется тем, что размер элементарной ячейки данной мишени сопоставим с длинами волн рабочего диапазона.

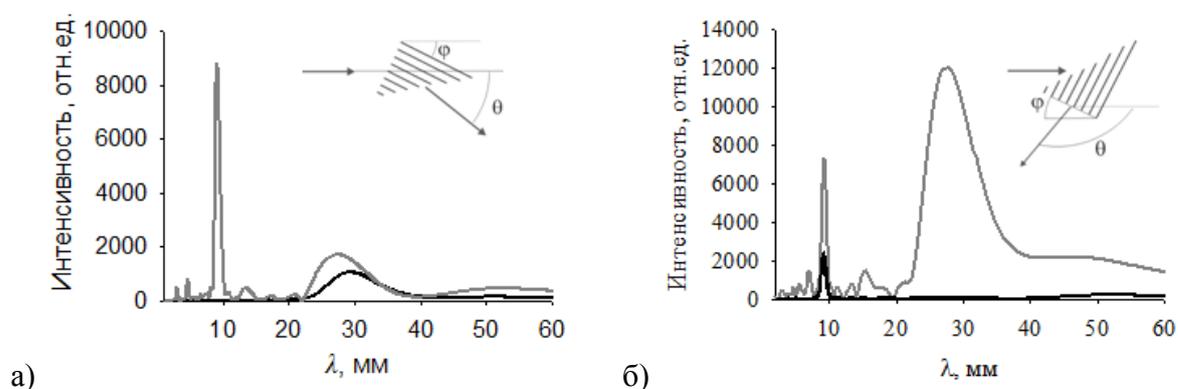


Рисунок 4 – Спектры излучения, проходящего через мишень (черная линия) и падающего на нее (серая линия)

Измеренное угловое распределение излучения, проходящего через мишень LHM-3, в геометрии эксперимента, представленной на рисунке 5, показывает что, излучение от мишени распространяется в двух направлениях (см. рисунок 6а).



Рисунок 5 – Схема измерения углового распределения излучения, проходящего через мишень LHM-3

Для идентификации регистрируемого излучения, на грань «с» был установлен отражающий экран. Полученная зависимость (см. рисунок 6б) показывает, что излучение с пиком под углом $\theta = 66^\circ$ является излучением, отраженным от грани «с». Следовательно, излучение с пиком под углом $\theta = 90^\circ$ является результатом прохождения излучения через мишень.

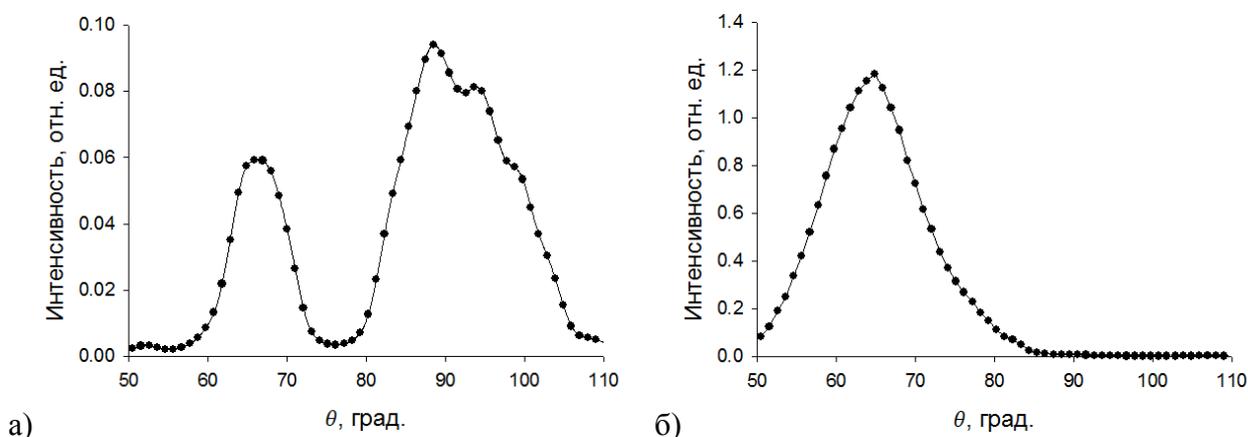


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения θ при $\varphi = -12^\circ$:

а) – по схеме на рисунке 5; б) – на грань «с» установлен отражающий экран

Спектр излучения (см. рисунок 7), проходящего через мишень, имеет две изолированные линии $\lambda_1 = 15$ мм и $\lambda_2 = 29$ мм. Последняя из них является более интенсивной.

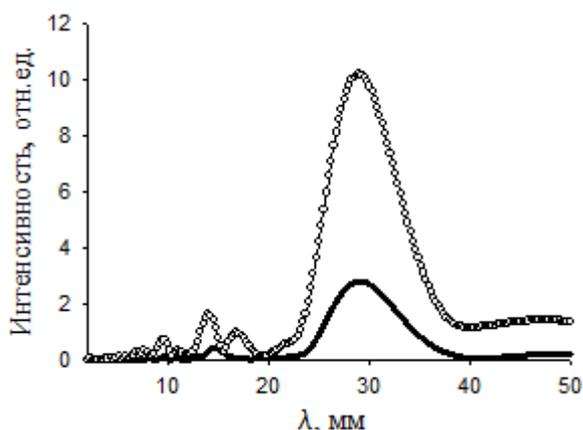


Рисунок 7 – Спектр излучателя (точки) и излучения, проходящего через мишень LHM-3 (линия)

В разделе 2.5 приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия поля релятивистских электронных сгустков с используемыми мишенями. Особый интерес представляют результаты, полученные с мишенью LHM-3, поскольку данная мишень была изготовлена для экспериментального наблюдения ОИВЧ. Схема проведенного эксперимента представлена на рисунке 8. В условиях данного эксперимента поворот мишени по часовой стрелке считается положительным, а против – отрицательным.

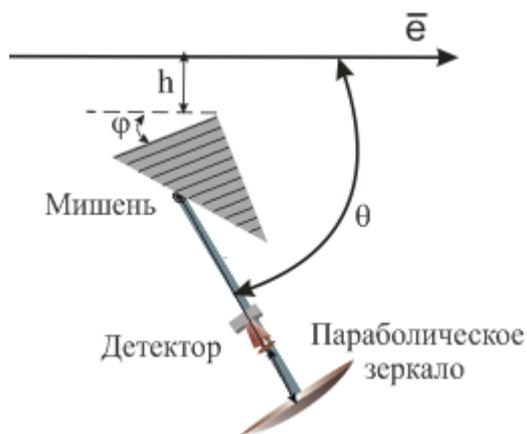


Рисунок 8 – Схема измерения углового распределения излучения от мишени LHM-3

Ориентация мишени была выбрана, исходя из результатов испытания мишени на источнике электромагнитного излучения, показавших возможность наблюдения обратного излучения Вавилова – Черенкова. Как известно ОИВЧ, в отличие от случая излучения Вавилова – Черенкова в обычных средах, генерируется под тупым углом к направлению движения заряженной частицы, поэтому мишень целесообразно располагать по схеме, представленной на рисунке 8, для удобства вывода излучения из объема мишени.

Как можно видеть из полученных угловых характеристик (см. рисунок 9) излучение, генерируемое в объеме мишени ЛНМ-3, выходит из мишени в обратную полусферу. Наблюдаемый эффект обусловлен наличием на стеклотекстолитовой подложке нанесенных резонансных структур, что было показано с помощью фоновой мишени, которая представляет собой призму аналогичных размеров без резонансных структур на подложке.

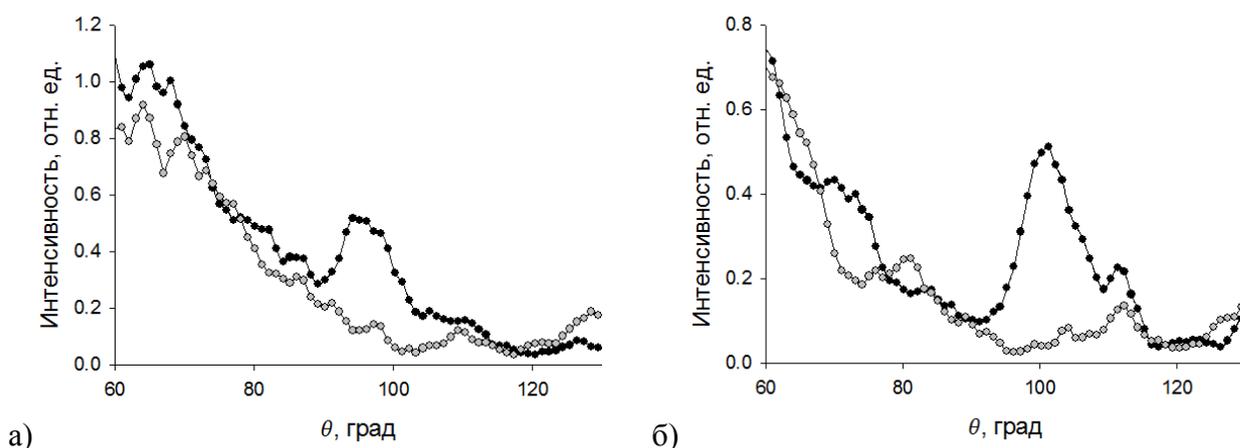


Рисунок 9 – Экспериментально измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения θ для мишени ЛНМ-3 (черная линия) и фоновой мишени (серая линия):

а) – $\varphi = -10^\circ$; б) – $\varphi = -20^\circ$

Излучение, генерируемое в объеме мишени ЛНМ-3 и наблюдаемое в обратной полусфере, можно интерпретировать как обратное излучение Вавилова – Черенкова. Используя полученные данные и приближение скалярного коэффициента преломления, была проведена оценка значения показателя преломления. Согласно проведенной оценке, углу поворота мишени $\varphi = -10^\circ$ соответствует коэффициент преломления $n = -2.5$, а углу поворота мишени $\varphi = -20^\circ$ – коэффициент преломления $n = -2.9$. Различие в величинах коэффициента преломления для различных углов поворота мишени является логичным, поскольку мишень ЛНМ-3 представляет собой анизотропную структуру.

В разделе 2.6 представлено обсуждение результатов главы.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия поля релятивистских электронных сгустков с плоскими и объемными периодическими проволочными структурами. Внешний вид исследуемых мишеней представлен на рисунке 10.

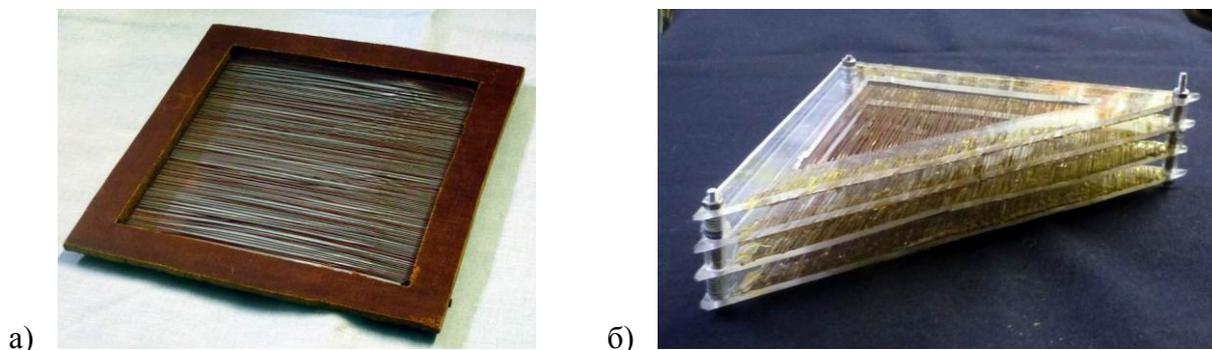


Рисунок 10 – Внешний вид: а) – плоской проволочной мишени; б) – проволочной призмы

Плоская проволочная мишень представляет собой однослойную структуру, состоящую из периодически расположенных медных проволочек. Размер мишени 200×200 мм. Объемная проволочная мишень имеет вид прямой треугольной призмы, состоящей из четырех слоев плоских проволочных структур, расстояние между которыми составляет величину 10 мм. Диаметр проволочек – 0.5 мм, период проволочек в горизонтальной плоскости – 1 мм (дисперсия периода проволочек – 15%). Длина обоих катетов основания призмы составляет 170 мм.

В разделе 3.1 описаны свойства проволочных метаматериалов, которые представляют собой массив тонких металлических проволочек расположенных параллельно.

В разделе 3.2 приведены результаты исследования для плоской проволочной мишени в двух геометриях эксперимента. Первая геометрия эксперимента и полученные для нее результаты описаны в разделе 3.2.1. В данной геометрии эксперимента (см. рисунок 11) плоская проволочная мишень располагалась над траекторией движения электронного пучка на расстоянии 15 мм. Угол поворота мишени $\alpha = 0^\circ$ соответствовал перпендикулярной ориентации проволочек мишени относительно пучка электронов. В эксперименте измерялась горизонтальная компонента

поляризации. Поворот мишени против часовой стрелки считался положительным.

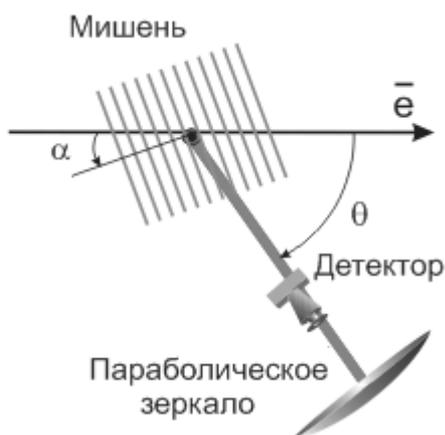


Рисунок 11 – Схема измерения углового распределения излучения от плоской проволочной мишени, расположенной над электронным пучком, для различных углов поворота мишени α

Из измеренных зависимостей (см. рисунок 12) видно, что излучение наблюдается под малыми углами относительно направления движения электронов. Интенсивность излучения возрастает с увеличением угла поворота мишени, а максимум интенсивности излучения смещается в область меньших углов.

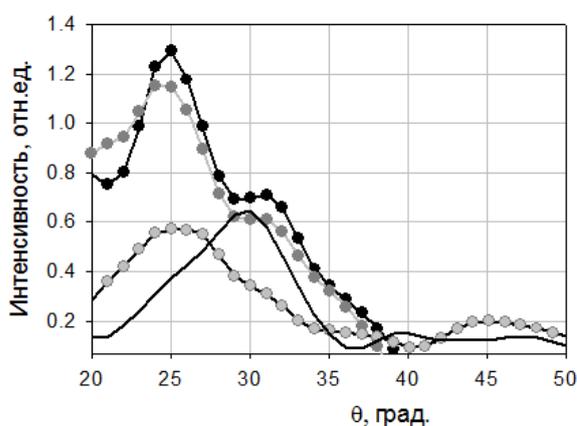


Рисунок 12 – Угловые распределения излучения от плоской проволочной структуры для различных углов поворота мишени α

В разделе 3.1.2 представлены результаты эксперимента в геометрии обратного переходного излучения (ОПИ), в которой мишень располагалась в вертикальной плоскости (см. рисунок 13) под углом 45° к направлению движения электронов. Измерения проводились для двух ориентаций проволочек относительно пучка: вертикальной и горизонтальной. При этом измерялась горизонтальная компонента излучения. Кроме того, для сравнения ОПИ от плоской проволочной структуры с традиционным ОПИ, было измерено угловое распределение излучения от медного экрана в описанной геометрии эксперимента.

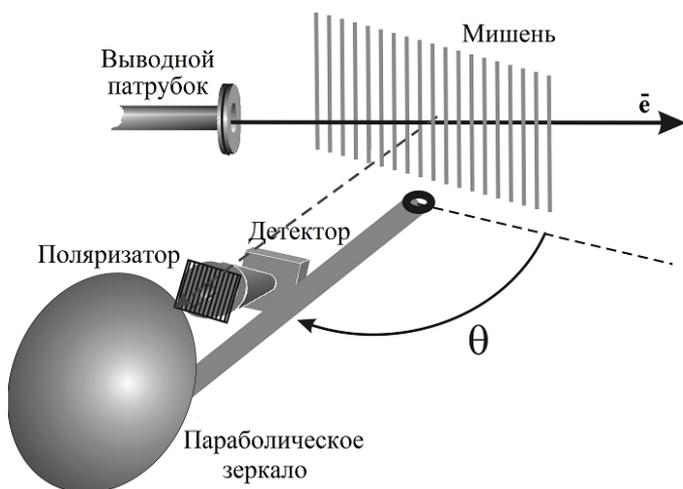


Рисунок 13 – Схема эксперимента в геометрии обратного переходного излучения

Угловое распределение излучения от плоской проволочной мишени (см. рисунок 14) в случае, когда проволочки ориентированы горизонтально, имеет такую же форму, как и традиционное ОПИ и сравнимо с ним по интенсивности. В случае, когда проволочки расположены вертикально, излучение практически отсутствует.

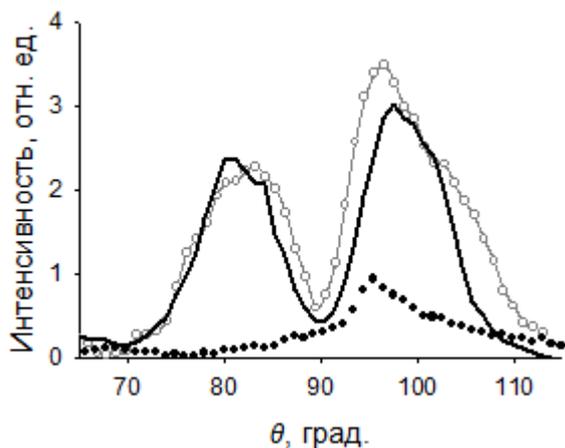


Рисунок 14 – Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения θ в геометрии ОПИ для медного экрана (линия), плоской проволочной мишени с вертикальной (точки) и горизонтальной ориентацией проволочек (пустые точки)

Присутствующая в структуре плоской проволочной мишени асимметрия, которая определяется ориентацией проволочек по отношению к поляризации электромагнитного поля релятивистских электронов, является причиной асимметрии во взаимодействии между полем электронов и структурой метаматериала.

В разделе 3.3 приведены результаты экспериментального исследования спектрально-угловых характеристик излучения Вавилова – Черенкова от объемной проволочной мишени (см. рисунок 10б) и выполнено сравнение с характеристиками ИВЧ от диэлектрической (тефлоновой) мишени близких размеров. Высота призмы – 74 мм, длина обоих катетов – 175 мм. Для того

чтобы показать, что наблюдаемое в эксперименте излучение не является излучением от конструкции каркаса мишени, была изготовлена мишень для измерения фона, представляющая собой каркас проволочной мишени.

Измерение угловых характеристик для тефлоновой призмы и проволочной мишени, проводилось в одинаковых экспериментальных условиях (см. рисунок 15). Расстояние от выводного патрубка до мишени составляло 300 мм, а прицельный параметр $h = 10$ мм.

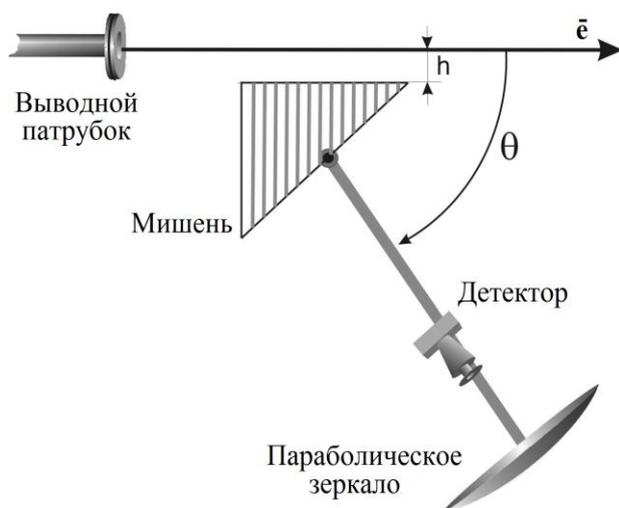


Рисунок 15 – Схема измерения углового распределения излучения от проволочной призмы

Сравнение измеренных зависимостей (см. рисунок 16) показало, что интенсивность излучения, генерируемого в проволочной призме, меньше интенсивности излучения от тефлоновой призмы. Однако полученный результат указывает на возможность увеличения интенсивности черенковского излучения в проволочном метаматериале за счет увеличения плотности наполнения структуры в вертикальной плоскости.

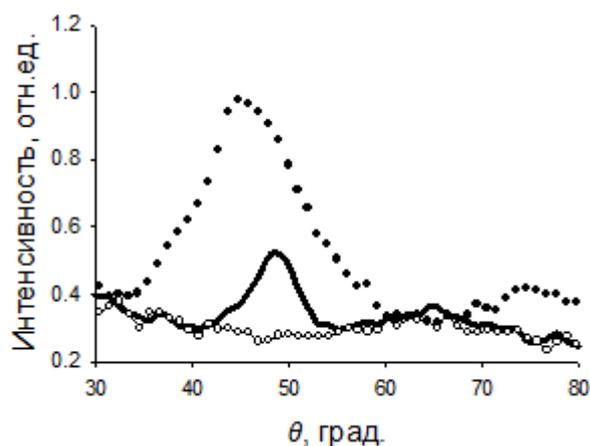


Рисунок 16 – Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения θ для проволочной призмы (линия), тефлоновой мишени (точки) и каркаса проволочной призмы (пустые точки)

Излучение, наблюдаемое от проволочной и тефлоновой призм имеют схожий спектральный состав (см. рисунок 17).

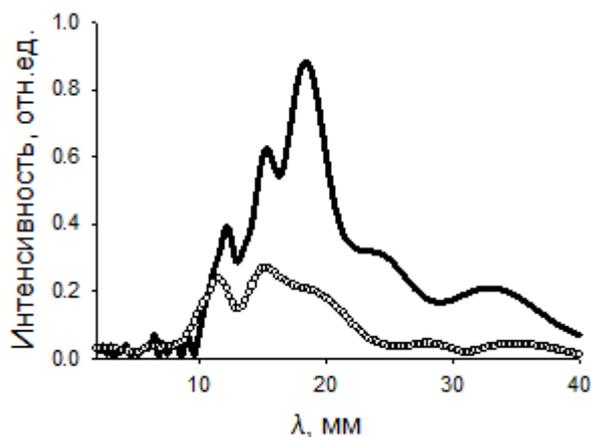


Рисунок 17 – Спектры излучения от проволочной мишени (пустые точки) и тефлоновой призмы (линия)

В разделе 3.4 приведено обсуждение результатов главы.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. Впервые измерены характеристики когерентного излучения, возникающего при пролете пучка релятивистских электронов вблизи метаматериала с отрицательным показателем преломления. Излучение, наблюдаемое в обратной полусфере, интерпретировалось как обратное излучение Вавилова – Черенкова.
2. Впервые измерены спектрально-угловые характеристики когерентного излучения Вавилова – Черенкова в проволочном метаматериале. Показано, что интенсивность генерируемого в проволочной призме излучения меньше интенсивности излучения от диэлектрической мишени. Полученный результат указывает на потенциальную возможность увеличения интенсивности черенковского излучения в проволочном метаматериале за счет увеличения плотности наполнения структуры в вертикальной плоскости по сравнению с интенсивностью ИВЧ в обычных средах.
3. Впервые измерены характеристики когерентного излучения от плоской проволочной структуры при пролете пучка релятивистских электронов вблизи структуры и через нее. Показана резкая асимметрия угловых характеристик обратного переходного излучения от плоской

проволочной структуры относительно ориентации проволочной структуры к электронному пучку.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

- a. Соболева, В.В. Исследование спектральных, ориентационных и угловых характеристик излучения при взаимодействии поля релятивистских электронов с метаматериалами в миллиметровом диапазоне длин волн / В.В. Соболева, М.В. Шевелев, В.В. Блеко // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, №. 11/2. – С. 141–145.
- b. Соболева, В.В. Излучение Вавилова – Черенкова в метаматериалах / В.В. Соболева, В.В. Блеко, Г.А. Науменко // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, №. 11/2. – С. 200–204.
- c. Naumenko, G.A. Vavilov-Cherenkov radiation in meta-materials in millimeter wavelength region / G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, M.V. Shevelev et al. // Days on Diffraction: Proceedings of International Conference. – Saint Petersburg, Russia, 2013. – Pp. 105–109.
- d. Науменко, Г.А. Когерентное излучение релятивистских электронов в анизотропных периодических проволочных структурах / Г.А. Науменко, В.В. Соболева, В.В. Блеко, А.О. Шумейко // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, №. 11/2. – С. 66–68.
- e. Naumenko, G.A. Coherent transition radiation from wire metamaterials / G.A. Naumenko, V.V. Bleko, V.V. Soboleva, A.O. Shumeiko // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1084. – Pp. 213–216.
- f. Soboleva, V.V. Radiation of relativistic electrons in a periodic wire structure / V.V. Soboleva, G.A. Naumenko, V.V. Bleko // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2015. – Vol. 355. – Pp. 132–134.
- g. Soboleva, V.V. Coherent radiation of relativistic electrons in wire metamaterial / V.V. Soboleva, G.A. Naumenko, V.V. Bleko // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 732. – P. 012007.

Список литературы:

1. Pendry, J. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85, no. 18. – Pp. 3966–3969.

2. Zhang, S. Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network / S. Zhang, L. Yin, N. Fang // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 102. – P. 194301.
3. Grbic, A. Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens / A. Grbic, G.V. Eleftheriades // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – P.117403.
4. Lee, H. Realization of optical superlens imaging below the diffraction limit / H. Lee, Y. Xiong, N. Fang et al. // *New J. Phys.* – 2005. – Vol. 7. – P. 255.
5. Pendry, J.B. Controlling electromagnetic fields / J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith // *Science.* – 2006. – Vol. 312. – Pp. 1780–1782.
6. Kildishev, A.V. Transformation optics and metamaterials / A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Phys. Usp.* – 2011. – Vol. 54. – Pp. 53–63.
7. Galyamin, S. Reversed Cherenkov-Transition Radiation by a Charge Crossing a Left-Handed Medium Boundary / S. Galyamin, A. Tyukhtin, A. Kanareykin, P. Schoessow // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 103. – P. 190802.
8. Galyamin, S. Electromagnetic Field of a Moving Charge in the Presence of a Left-Handed Medium / S. Galyamin, A. Tyukhtin // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 81. – P. 235134.
9. Fernandes, D.E. Cherenkov emission in a nanowire material / D.E. Fernandes, S.I. Maslovski, M.G. Silverina // *Phys. Rev. B.* – 2012. – Vol. 85. – P. 155107.
10. Vorobev, V.V. Nondivergent Cherenkov radiation in a wire metamaterial / V.V. Vorobev, A.V. Tyukhtin // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 108. – P. 184801.
11. Tyukhtin, A.V. Radiation of charges moving along the boundary of a wire metamaterial / A.V. Tyukhtin, V.V. Vorobev // *Phys. Rev. E.* – 2014. – Vol. 89, no. 1. – P. 013202.

12. Xi, S. Experimental Verification of Reversed Cherenkov Radiation in Left-Handed Metamaterial / S. Xi, H. Chen, T. Jiang // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 103. – P. 190801.
13. Bakunov, M.I. Reversed Cherenkov emission of terahertz waves from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core and left-handed cladding / M.I. Bakunov, R.V. Mikhaylovskiy, S.B. Bodrov, B.S. Luk'yanchuk // *Optics Express.* – 2010. – Vol. 18. – Pp. 1684–1694.
14. Shevelev, M. Sub-millimeter bunch length non-invasive diagnostic based on the diffraction and Cherenkov radiation / M. Shevelev, H. Deng, A. Potylitsyn et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2012. – Vol. 357. – P. 012023.
15. Калинин, Б.Н. Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах / Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын и др. // *Письма в ЖЭТФ.* – 2006. – Т. 84, № 3. – С. 136–140.