

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор  
Наumenko Г.А.

Томск-2016

## Оглавление

|                                                                                                                                                   | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Введение.....                                                                                                                                     | 4    |
| ГЛАВА 1 Описание экспериментальной установки .....                                                                                                | 11   |
| 1.1 Ускоритель.....                                                                                                                               | 11   |
| 1.2 Детекторы электромагнитного излучения миллиметрового диапазона....                                                                            | 14   |
| 1.3 Оборудование для спектральных измерений .....                                                                                                 | 17   |
| 1.4 Система сбора и обработки информации .....                                                                                                    | 19   |
| ГЛАВА 2 Спектрально-угловые характеристики излучения в метаматериалах с отрицательным показателем преломления.....                                | 21   |
| 2.1 Свойства метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления .....                                                                       | 22   |
| 2.2 Экстракция материальных параметров из коэффициентов отражения и пропускания .....                                                             | 23   |
| 2.3 Выбор элементарной ячейки метаматериала для проведения экспериментов на выведенном пучке микротрона в миллиметровом диапазоне длин волн ..... | 24   |
| 2.4 Испытание мишеней на пучке реальных фотонов .....                                                                                             | 29   |
| 2.5 Спектрально-угловые характеристики излучения релятивистских электронов в метаматериалах .....                                                 | 35   |
| 2.6 Обсуждение результатов главы.....                                                                                                             | 41   |
| ГЛАВА 3 Когерентное излучение сгустков релятивистских электронов в присутствии периодических проволоочных структур .....                          | 43   |
| 3.1 Свойства проволоочного метаматериала.....                                                                                                     | 43   |
| 3.2 Когерентное излучение релятивистских электронов от плоской проволоочной структуры.....                                                        | 44   |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 Излучение пучка релятивистских электронов, движущегося вблизи плоской проволочной структуры ..... | 45 |
| 3.2.2 Излучение пучка релятивистских электронов, пролетающих сквозь плоскую проволочную структуру ..... | 47 |
| 3.3 Излучение Вавилова – Черенкова от объемной проволочной структуры                                    | 49 |
| 3.4 Обсуждение результатов главы .....                                                                  | 52 |
| Заключение .....                                                                                        | 54 |
| Список литературы .....                                                                                 | 55 |

## Введение

Исследования, связанные с созданием и изучением свойств метаматериалов, получили бурное развитие в конце XX – начале XXI века. Метаматериалами называют искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами сложно достижимыми технологически, либо не встречающимися в природе. Огромный интерес, проявляемый к данной области до настоящего момента времени, обусловлен уникальными физическими свойствами рассматриваемых материалов, которые предоставляют возможности для реализации ряда перспективных приложений.

Важным условием, определяющим принадлежность структуры к метаматериалам, является условие  $d \ll \lambda$  (где  $d$  – характерные размеры и расстояния между элементами структуры,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения), т.е. длина волны падающего на структуру излучения должна быть много больше характерных размеров элементов структуры. Структуры, для которых данное условие не выполняется, являются фотонными кристаллами и их свойства определяются брэгговской дифракцией.

Важное место среди различных видов метаматериалов занимают метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления или так называемые left-handed metamaterials (LHM) – «левосторонние» или «левые» среды, – поскольку история развития метаматериалов начинается именно с интереса к неординарным физическим свойствам данных структур. Также в зарубежных источниках применительно к данным средам используется понятие дважды отрицательная среда (double-negative medium), что подразумевает под собой тот факт, что в таких средах диэлектрическая и магнитная проницаемости одновременно принимают отрицательное значение, что и обеспечивает материалу отрицательное значение коэффициента преломления. Наименование «левосторонние» среды обусловлено тем, что в метаматериалах с отрицательным коэффициентом преломления, в отличие от обычных сред, волновой вектор

составляет с векторами электрического и магнитного полей левую тройку векторов.

Первыми работами, которые можно отнести к истокам развития данной области, являются работы, связанные с развитием теории обратных волн, одним из ключевых понятий которой явилась отрицательная групповая скорость волны [1-3]. Г. Лэмб в своей работе [1] рассмотрел обратные волны в механике, А. Шустер обобщил данную теорию на оптические явления [2] и впервые показал, что обратные электромагнитные волны возможны при отрицательной групповой скорости. Также он рассмотрел отрицательное преломление, которое возникает на границе двух сред, в случае если в одной из них распространяется прямая волна, а в другой – обратная. Поскольку на момент выхода в свет данных работ не были известны среды, в которых можно было бы реализовать обнаруженные эффекты, интерес исследователей к тематике угас до появления СВЧ приборов, использующих обратные волны: длинные линии, лампы обратной волны.

Наиболее развитая теория веществ с одновременно отрицательными диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$  была представлена в работе В.Г. Веселаго [4]. Следует отметить, что первым, кто указал на возможность  $\epsilon$  и  $\mu$  одновременно принимать отрицательные значения, был Д.В. Сивухин [5]. Он совершенно справедливо указал на то, что в средах с отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$  фазовая и групповая скорости направлены в противоположные стороны. В работе же [4] впервые появляется понятие «отрицательный коэффициент преломления», которое соответствует случаю одновременной отрицательности  $\epsilon$  и  $\mu$ . В ней объединены имеющиеся на тот момент результаты других работ и строго прослеживается логическая цепочка «отрицательные  $\epsilon$  и  $\mu \rightarrow$  отрицательный коэффициент преломления  $n \rightarrow$  антипараллельность фазовой и групповой скорости  $\rightarrow$  реализация закона Снеллиуса (а также других явлений оптики и электродинамики) в случае  $n < 0$ » [6].

Несмотря на тот факт, что работа [4] датирована 1967 г. первый метаматериал с отрицательным коэффициентом преломления был создан в 2001 г.

[7], после того как в работе [8] было указано на структуры, которые могли бы обеспечить материалу отрицательный коэффициент преломления (точнее  $\epsilon$  и  $\mu$  по отдельности). Выход в свет работ [7,8] обратил интерес исследователей на данную тематику. Вслед за работой [7] последовал целый ряд работ подтверждающих экспериментально отрицательный коэффициент преломления [9-11].

Первый метаматериал состоял из двух видов конструктивных элементов, расположенных в строгом геометрическом порядке: разомкнутых кольцевых резонаторов (split-ring resonator – SRR) и стержней. Стержни служили в качестве антенн, взаимодействующих с электрической компонентой поля, а кольцевые резонаторы – антенн, реагирующих на магнитную составляющую. Проводники обеспечивали отрицательную  $\epsilon$ , а кольцевые резонаторы – отрицательную  $\mu$ . Однако это не являлось единственным вариантом конструкции метаматериала. Вместо кольцевых резонаторов для получения отрицательной  $\mu$  использовались и другие структуры: вложенные металлические цилиндры, рулонные структуры типа «рулет»,  $\Omega$ -подобные и прямоугольные рамки [11,12]. В настоящее время, если говорить не только о левых средах, а о метаматериалах в общем случае, они имеют всевозможные формы и конструкции.

Число идей по использованию метаматериалов в прикладных целях постоянно возрастает. На данный момент наиболее перспективными являются преодоление дифракционного предела [13-16] и создание метапокрытий, делающих объекты невидимыми в широком частотном диапазоне [17,18]. Также следует отметить, что несомненный интерес представляют собой процессы излучения заряженных частиц при наличии «левой» среды, в частности, обратное излучение Вавилова – Черенкова (ОИВЧ), поскольку являются довольно перспективными как для детектирования заряженных частиц, так и для диагностики пучков заряженных частиц. Впрочем, интересен и случай взаимодействия заряженной частицы с другим видом метаматериалов – так называемой проволочной средой или проволочным метаматериалом. Данный вид

метаматериала представляет собой композитный материал, составленный из прямых отрезков проводников. Согласно теоретическим предсказаниям [19] интенсивность излучения, генерируемого в такой среде, может быть на порядок выше, чем в средах, встречающихся в природе.

Как для «левой» среды [20,21], так и для проволочного метаматериала [19,22,23] имеется ряд теоретических работ, в которых рассматриваются излучательные процессы в заданной среде, однако при этом наблюдается дефицит в экспериментальных работах. Экспериментальной работой, подтверждающей ОИВЧ в средах с отрицательным коэффициентом преломления, является работа [24], в которой заряженные частицы моделировались рядом диполей, расположенных периодически в направлении предполагаемого движения заряженной частицы. В действительности в данной работе выполнена лишь симуляция ОИВЧ. Также следует отметить, работу М.И. Бакунова [25], в которой предложена схема для экспериментального подтверждения ОИВЧ с использованием ультракоротких лазерных импульсов и представлена теория, описывающая генерацию излучения в использованных для этого структурах и позволяющая рассчитать ряд важных характеристик генерируемого излучения.

### **Цели и задачи диссертационной работы:**

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

Для достижения поставленной цели были решены 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.

### **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.

### **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.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

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)
6. семинарах лаборатории «Фотон» ФТИ ТПУ

#### **Личный вклад автора.**

Вклад автора в представленном диссертационном исследовании состоит в следующем: выбор параметров элементарной ячейки (формирующей исследуемую метамишень); 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 и конференциях.

#### **Структура диссертации.**

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

В первой главе описываются экспериментальная установка на базе микротрона ФТИ ТПУ, методика проведения измерений и используемые для измерений устройства.

Во второй главе описывается метод экстракции материальных параметров, используемый при выборе параметров элементарной ячейки метаматериала с отрицательным коэффициентом преломления, который предназначен для наблюдения обратного излучения Вавилова – Черенкова. Приводятся результаты

испытаний исследуемых мишеней на источнике миллиметрового излучения. В завершении второй главы представлены результаты экспериментального исследования когерентного излучения, генерируемого в метаматериалах с отрицательным коэффициентом преломления.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия поля релятивистских электронных пучков с плоской периодической проволоочной структурой и объемной мишенью, представляющей собой проволоочный метаматериал.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

## ГЛАВА 1 Описание экспериментальной установки

### 1.1 Ускоритель

Эксперименты по исследованию взаимодействия поля релятивистских электронов с метаматериалами проводились на выведенном электронном пучке микротрона Физико-технического института Томского политехнического университета.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.1. Вакуумная камера микротрона – латунная. Для откачки используется диффузионный насос. Рабочее давление в камере порядка  $(2-3) \cdot 10^{-6}$  торр. Магнит микротрона двухстоечный. Диаметр полюсов магнита 60 см. Азимутальная неоднородность магнитного поля на медианной плоскости в области диаметром 45 см не превышает 0.1%. Расстояние между полюсами магнита составляет  $120 \pm 0.1$  мм. Напряженность магнитного поля в зазоре магнита создается двумя катушками, расположенными на полюсах, и составляет 1070 Э. Питание катушек магнита осуществляется стабилизированным источником тока, стабильность которого не хуже 0.5%.

Ускорение электронов осуществляется цилиндрическим резонатором из бескислородной меди, в котором возбуждаются колебания типа  $E_{010}$ . Для возбуждения резонатора используется импульсный магнетронный генератор десятисантиметрового диапазона, который соединен с резонатором с помощью вакуумного волноводного тракта, состоящего из прямоугольного волновода с поперечным сечением  $72 \times 44$  мм и ферритового вентиля. Ферритовый вентиль используется для согласования магнетрона и резонатора, а также позволяет изменением тока в обмотках вентиля регулировать фазу высокочастотной волны. Добротность ненагруженного резонатора составляет 8000-9000 [26].

Источник электронов (катод) расположен непосредственно в резонаторе микротрона. В качестве эмиттера используется гексаборид лантана ( $LaB_6$ ) в форме цилиндрического штабика с диаметром 2.5 мм и длиной 6.5 мм.

Используемый эмиттер обеспечивает высокую и стабильную эмиссию электронов при наличии сильного переменного поля [27]. Подогрев эмиттера осуществляется пучком электронов от вольфрамовой спирали, которая расположена на расстоянии 20 мм от катода. Прикладываемая разность потенциалов между спиралью и катодом порядка 600 В. При мощности подогрева катода 25–30 Вт ток эмиссии катода в импульсе составляет 1–1.5 А.

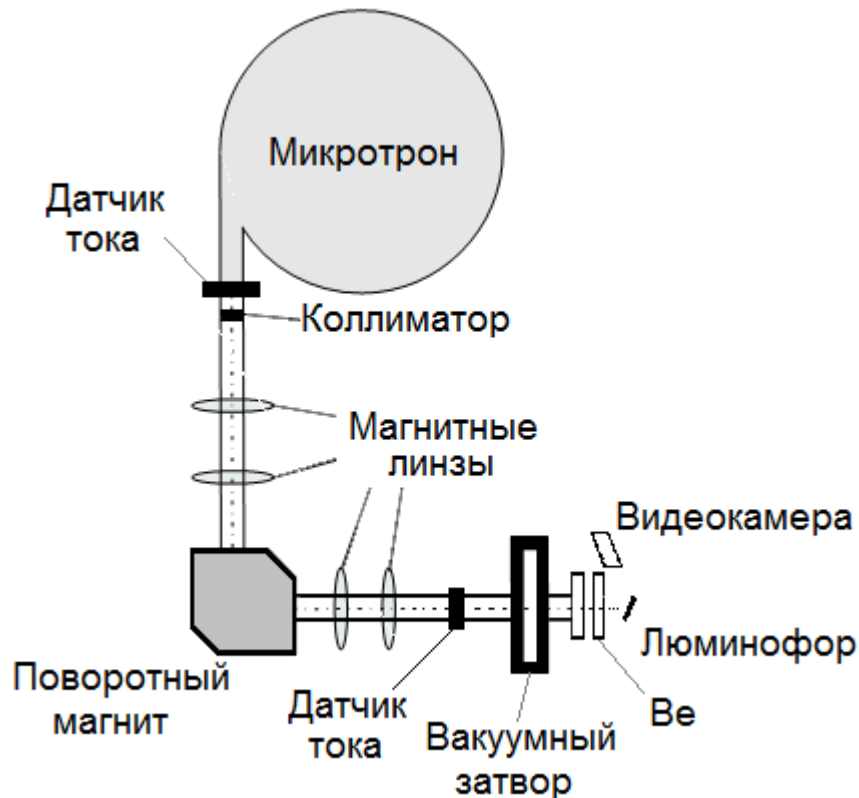


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки

С последней орбиты электроны выводятся магнитным конусным шунтом и направляются в тракт транспортировки электронного пучка. На выходе из микротрона (в начале тракта транспортировки электронного пучка) установлен пермалловый датчик тока, с помощью которого осуществляется контроль и настройка тока, и диафрагма с изменяемым сечением. Диафрагма позволяет уменьшать размеры пучка на выходе из микротрона, а также уменьшать ток пучка, когда это невозможно сделать другими средствами настройки работы микротрона.

Тракт транспортировки электронного пучка состоит из вакуумопровода, двух пар квадрупольных линз и поворотного магнита (см. рисунок 1.1). Длина тракта транспортировки составляет 3.6 м. Поворотный магнит установлен снаружи вакуумопровода и расположен между дуплетами квадрупольных линз. Полюса магнита секторного типа, входная и выходная границы полюсов перпендикулярны осевой траектории электронов. Зазор между полюсами магнита составляет 60 мм, угол поворота электронного пучка при прохождении через магнит  $50^\circ$ , напряженность поля в зазоре – 1.4 Тл. Стабилизация питания магнитной оптики тракта по току не хуже 0.1%.

Тракт транспортировки электронного пучка заканчивается выходным фланцем с бериллиевой фольгой, толщина которой 50 мкм. Перед выходным фланцем установлен вакуумный затвор, который позволяет отсекаать тракт транспортировки пучка и микротрон при замене бериллиевого окна.

Для контроля размеров и положения пучка на выходе из тракта транспортировки используется люминесцентный экран, который выводится на пучок с помощью управляемого из пультовой шагового двигателя. Размеры электронного пучка и его положение наблюдаются с помощью видеокамеры в реальном времени, что позволяет легко настраивать требуемые размеры пучка.

Параметры пучка, получаемого на микротроне, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры пучка микротрона

|                                           |         |
|-------------------------------------------|---------|
| Энергия ускоренных электронов             | 6.2 МэВ |
| Длительность макроимпульса                | 4 мкс   |
| Длительность микроимпульса                | 20 пкс  |
| Частота следования макроимпульсов         | 1–10 Гц |
| Амплитуда тока в макроимпульсе            | 40 мА   |
| Амплитуда тока в микроимпульсе            | 0.6 А   |
| Число электронов в микроимпульсе          | $10^8$  |
| Количество микроимпульсов в макроимпульсе | $10^4$  |

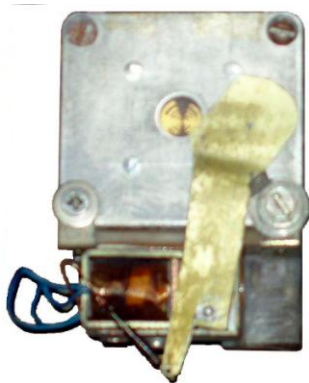
|                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Средний ток микротрона (при 10 Гц) | 2.4 мкА ( $1.5 \times 10^{13}$ эл./с) |
| Немоноэнергетичность пучка         | $\pm 0.5\%$                           |
| Размер выведенного пучка           | 4×2.5 мм                              |
| Расходимость по горизонтали        | $15 \times 10^{-3}$ рад               |
| Расходимость по вертикали          | $5 \times 10^{-3}$ рад                |

В целом описанная экспериментальная установка позволяет проводить широкий спектр экспериментов по изучению свойств излучений и материалов на пучке электронов с энергией 6.2 МэВ.

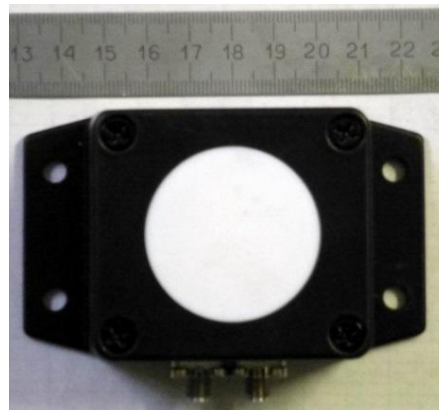
## 1.2 Детекторы электромагнитного излучения миллиметрового диапазона

В проведенных экспериментах использовалось два детектора ДП21М и ДПММ-01. Оба детектора произведены НИИ Полупроводниковых приборов г. Томска.

Детектор ДП21М (см. рисунок 1.2а) предназначен для регистрации электромагнитного излучения в области длин волн от 3 до 30 мм [28]. В основе детектора лежит широкополосная микрополосковая антенна с установленным на ней низкobarьерным (0.2–0.3 эВ) детекторным СВЧ диодом. Средняя чувствительность в области длин волн от 11–17 мм составляет 0.3 В/Вт, в области длин волн 3.8–5.6 мм она несколько выше и составляет 0.6 В/Вт.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Внешний вид детекторов: а) – ДП21М; б) – ДПММ-01

Детектор ДПММ-01 (см. рисунок 1.2б) обладает более широким спектральным диапазоном: от 3 до 50 мм. В основе данного детектора также лежит широкополосная антенна с встроенным в центр антенны высокочастотным диодом. Чувствительность детектора в области длин волн от 3 до 20 мм равна 0.3 В/Вт, а в области длин волн от 20 до 50 мм составляет 1 В/Вт.

Топология антенн используемых детекторов приведена на рисунке 1.3. Микрополосковая антенна с расположенным в центре детекторным диодом помещена в дюралюминиевый корпус (см. рисунок 1.2). На внешней части корпуса расположен вывод питания и цифровой канал передачи данных.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Топология антенн детекторов: а) – ДП21М; б) – ДПММ-01

Используемые детекторы удобны в применении, поскольку, в отличие от болометров, они не требуют охлаждения рабочего объема до сверхнизких температур и обладают лучшей быстротой срабатывания. Также они обладают более широким спектральным диапазоном, нежели детекторы на основе диода Шоттки.

Достоверность получаемых экспериментальных данных определяется линейностью детектора и измерительного тракта. Проверка линейности измерительной системы является важной и ответственной частью при подготовке к измерениям. Линейность детектора ДП21М и измерительного преобразователя была проверена в работе [29]. Схема проведенного эксперимента представлена на рисунке 1.4.

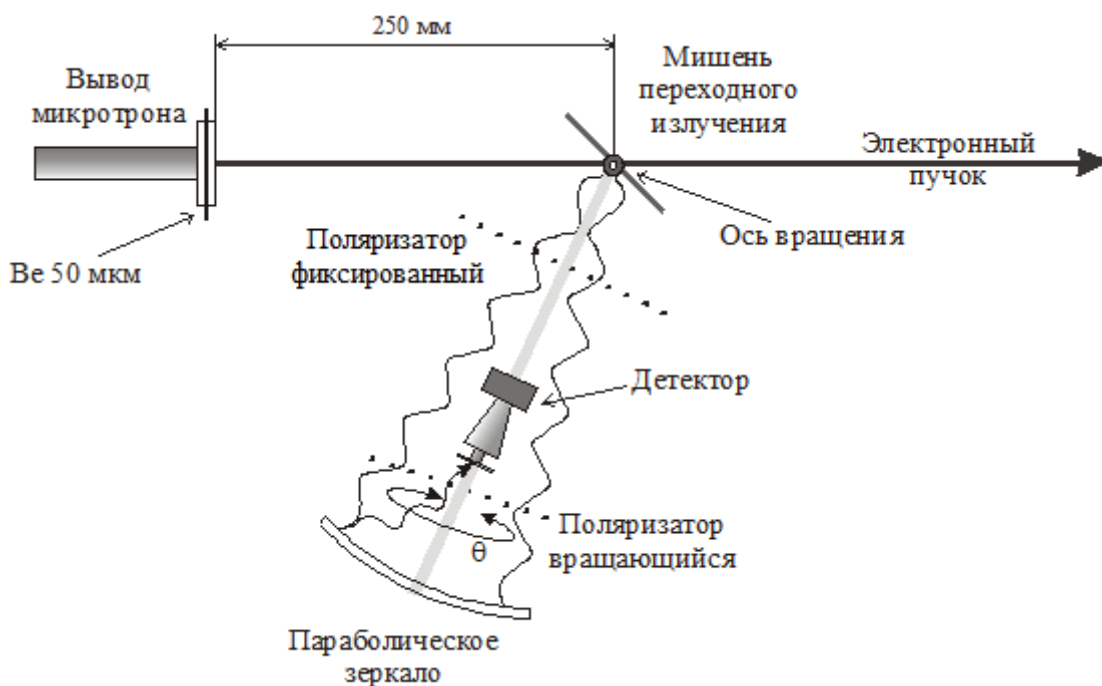


Рисунок 1.4 – Схема эксперимента по проверке линейности детектора ДП21М

Мишень переходного излучения устанавливалась на выведенном пучке электронов. В качестве мишени использовался прямоугольный медный экран. Фиксированный поляризатор использовался для выделения горизонтальной компоненты поля когерентного обратного переходного излучения (КОПИ), которая является наиболее интенсивной. Сначала было измерено угловое распределение горизонтальной компоненты поля КОПИ. Затем параболический телескоп был установлен в один из максимумов излучения и между параболическим зеркалом и детектором электромагнитного излучения ДП21М был установлен второй поляризатор. Второй поляризатор играл роль анализатора, поскольку его вращением осуществлялась регулировка интенсивности излучения падающего на детектор.

В результате проведенных измерений была получена зависимость уровня сигнала с детектора ДП21М от угла поворота поляризатора  $\theta$ , которая должна описываться законом квадрата косинуса в случае линейности детектора:

$$\text{Интенсивность} \sim a + b \cdot \cos^2(\theta - c),$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры аппроксимации.

График функции сигнала с детектора, полученного в эксперименте, от угла поворота поляризатора  $\theta$  и его аппроксимация прямой с использованием указанной формулы приведены на рисунке 1.5.

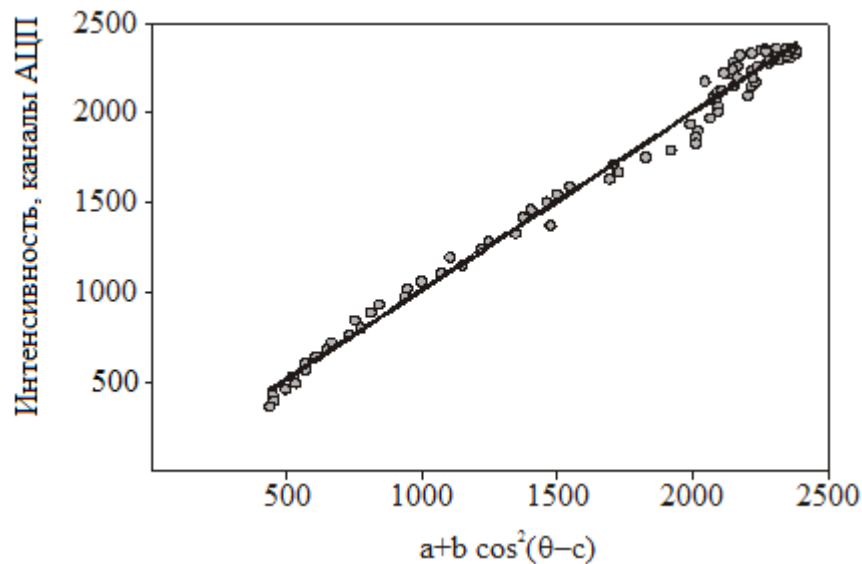


Рисунок 1.5 – Экспериментальная функция линейности детектора ДП21М: точки – экспериментальные данные; линия – аппроксимация. Параметры аппроксимации:

$$a = 57,8, \quad b = 2300, \quad c = 20.1^\circ$$

Из представленной зависимости следует, что детектор ДП21М и измерительный тракт обладают хорошей линейностью во всем диапазоне возможных интенсивностей излучения. Это позволяет использовать данный детектор в измерениях без опасения за достоверность получаемых результатов.

Линейность детектора ДПММ-01 проверялась аналогичным образом.

### 1.3 Оборудование для спектральных измерений

Поскольку метаматериалы обладают заданными свойствами в определенном частотном диапазоне, то спектральный состав излучения является важной характеристикой для метаматериалов. В связи с этим возникает необходимость измерения спектральных характеристик регистрируемого в экспериментах излучения.

Для измерения спектров в миллиметровом диапазоне длин волн используют различные спектрометры: интерферометры Майкельсона [30,31], интерферометры

Мартина – Паппетта [32] и полихроматоры [31,33]. Данные спектрометры достаточно громоздки и сложны в настройке.

В проведенных экспериментах измерение спектральных характеристик регистрируемого излучения осуществлялось с помощью интерферометра с делением фронта на основе двух зеркал, принцип действия которого был описан в работе [34]. Внешний вид используемого интерферометра представлен на рисунке 1.6.

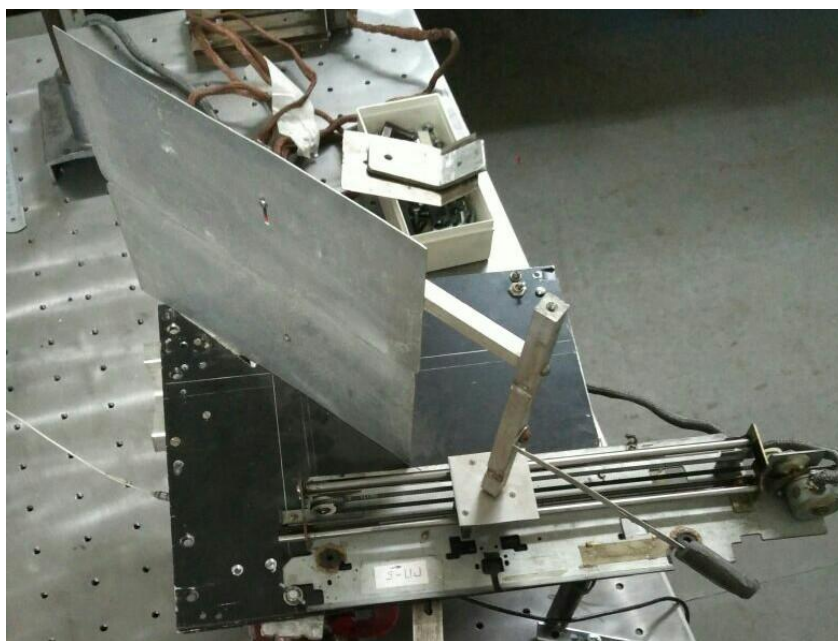


Рисунок 1.6 – Внешний вид интерферометра с делением фронта на основе двух зеркал

Конструктивно данный интерферометр представляет собой две параллельно расположенные дюралюминиевые пластины, одна из которых жестко закреплена, а вторая может перемещаться вдоль заданной линии, при этом оставаясь параллельной неподвижной пластине.

Интерферометр устанавливается таким образом, чтобы излучение падало на пластины под углом  $45^\circ$ . Для регистрации излучения отраженного от пластин интерферометра используется детектор, расположенный в фокусе параболического зеркала, центр которого расположен под углом  $45^\circ$  относительно плоскости пластин. Измеряемая интерферограмма представляет собой зависимость интенсивности излучения от смещения  $\delta$  одной пластины

относительно другой вдоль заданной линии. Смещение  $\delta = 0$  мм соответствует случаю, когда пластины интерферометра расположены в одной плоскости.

Спектры регистрируемого излучения восстанавливаются из измеренных интерферограмм с помощью обратного преобразования Фурье [35]. На рисунке 1.7 представлен пример типичной интерферограммы, измеренной с помощью описанного интерферометра, и соответствующий ей восстановленный спектр излучения.

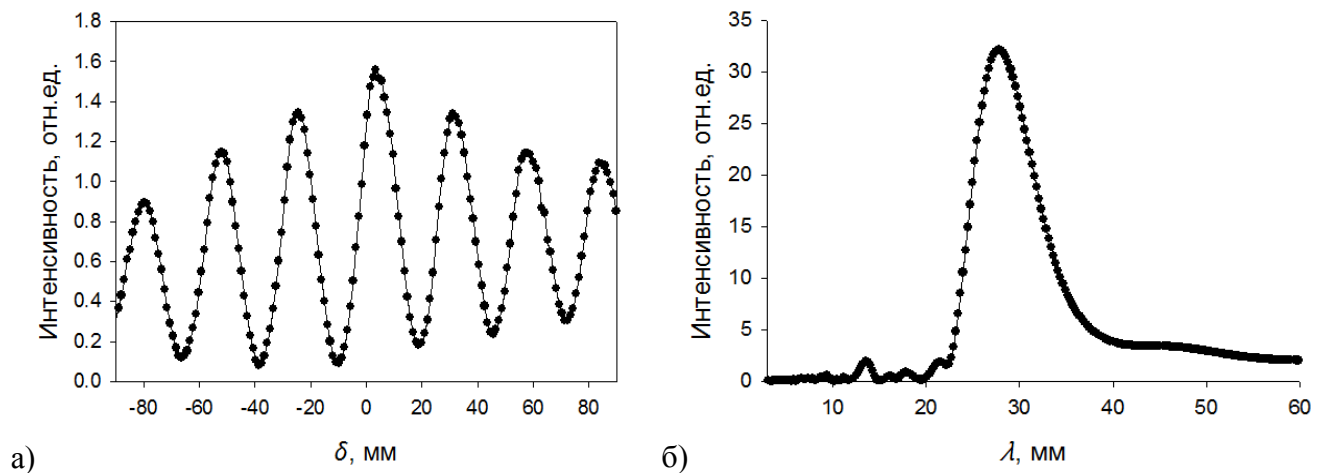


Рисунок 1.7 – Пример: а) – типичной интерферограммы, измеренной интерферометром с делением фронта на основе двух зеркал; б) – спектра, восстановленного из данной интерферограммы

#### 1.4 Система сбора и обработки информации

В проведенных экспериментах использовалась система сбора и обработки данных «SIGMA», блок-схема которой приведена на рисунке 1.8.

Основным элементом данной системы является микроконтроллер AVR, который отвечает за формирование внутренних тактовых и строб-сигналов, управление драйверами шаговых двигателей и релейным коммутатором. Также он отвечает за подготовку пакетов данных и отсылку их в ПК для дальнейшей обработки.

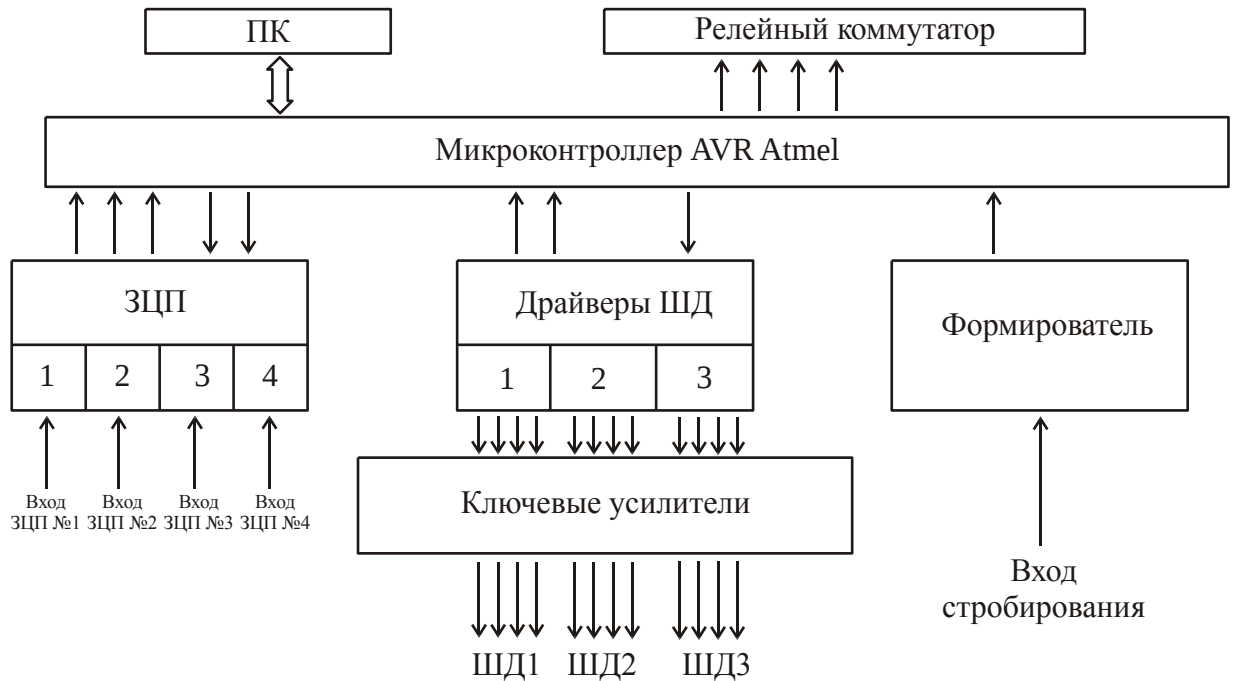


Рисунок 1.8 – Блок-схема системы сбора данных и управления экспериментом

Для обслуживания данной системы используется программа, реализованная в среде C++ Builder, которая позволяет осуществлять настройку используемой в эксперименте аппаратуры и средств ведения эксперимента. Данные, полученные в ходе эксперимента, накапливаются, обрабатываются и выводятся на экран в режиме реального времени в графическом виде. Встроенные функции предварительной обработки результатов позволяют проводить сглаживание полученных зависимостей, их дифференцирование и вычитание фона. Полученные экспериментальные данные записываются в специально созданный файл. Для просмотра файлов с данными используется специально разработанная программа, которая позволяет, помимо просмотра экспериментальных данных и параметров эксперимента, осуществлять обработку результатов эксперимента (сглаживание, вычитание фона, дифференцирование), а также копирования данных в буфер обмена операционной системы.

## **ГЛАВА 2 Спектрально-угловые характеристики излучения в метаматериалах с отрицательным показателем преломления**

В работе [36] дано следующее определение метаматериалам: «Метаматериалы – это искусственно созданные материалы, свойства которых обусловлены не столько их природными физическими характеристиками и свойствами, сколько их периодической микроструктурой». Данное определение является довольно общим, поскольку в данной формулировке под него подходит еще один класс искусственных периодических структур – фотонных кристаллов. И хотя в настоящее время многие исследователи относят фотонные кристаллы к метаматериалам, в рамках данной работы проведем границу между данными понятиями.

Термин «фотонный кристалл» был введен в работе Э. Яблоновича [37], а «метаматериал» – Р. Уэлсером в работе [38]. Фотонные кристаллы представляют собой структуры, характеризующиеся периодическим изменением диэлектрической проницаемости (коэффициента преломления) в пространстве [39]. Распространение излучения в фотонном кристалле принципиально отличается от случая распространения излучения в однородной среде или объемном материале. Благодаря пространственной периодичности показателя преломления распространение излучения внутри такой структуры становится похожим на движение электрона внутри обычного кристалла под действием периодического потенциала. Электромагнитные волны в фотонных периодических структурах имеют спектр, состоящий из разрешенных и запрещенных зон, что означает невозможность распространения в них фотонов с энергией, лежащей в запрещенной зоне. Фотоны с такой энергией отражаются от поверхности фотонно-кристаллической структуры. Эта особенность позволяет создавать на основе фотонных кристаллов миниатюрные оптические переключатели, оптические фильтры и волноводы.

Метаматериалы также как и фотонные кристаллы представляют собой композитный материал, обладающий некоторой периодической структурой. Однако, в отличие от фотонных кристаллов, метаматериалы рассматриваются в длинноволновом приближении, т.е. характерные размеры  $d$  элементов структуры должны быть много меньше длины волны  $\lambda$  взаимодействующего со структурой излучения:  $\lambda \gg d$ .

Особенностью фотонных кристаллов и метаматериалов является возможность получать заданные свойства структуры, варьируя размеры, геометрию и порядок формирующих композит элементов. Возможность выбирать свойства, которыми будет обладать будущий композит, и представляет собой первичную привлекательность обоих видов структур.

## **2.1 Свойства метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления**

Остановимся кратко на свойствах «левых» сред. Во-первых, как уже отмечалось, они обладают отрицательным коэффициентом преломления, и поэтому в реализации закона Снеллиуса появляется особенность: падающий и преломленный луч лежат по одну сторону от нормали к границе раздела двух сред. Выпуклая линза из такого материала является рассеивающей, а вогнутая – собирающей. Также в работе [4] было показано, что плоскопараллельная пластина, у которой  $\varepsilon = -1$  и  $\mu = -1$  при определенных условиях может служить собирающей линзой. Главным условием получения изображения является то, что расстояние от источника до пластины должно быть меньше ее толщины, т.е. пластина не фокусирует лучи приходящие из бесконечности. Такую линзу принято называть линзой Веселаго или суперлинзой. Суперлинза действует только на объекты, расположенные рядом с ней, и переносит все оптическое поле с одной стороны линзы на другую.

Поскольку векторы электрического и магнитного полей составляют левую тройку векторов с волновым вектором, а с вектором Пойнтинга всегда образуют

правую тройку векторов, вектор Пойнтинга и волновой вектор электромагнитной волны в случае среды с отрицательным коэффициентом преломления направлены в противоположные стороны. Следствием этого являются обращенный эффект Доплера и обратное излучение Вавилова – Черенкова. Отметим, что впервые эффект Черенкова в среде с отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$  был рассмотрен В.Е. Пафомовым в работе [40].

## 2.2 Экстракция материальных параметров из коэффициентов отражения и пропускания

Для создания и использования метаматериалов требуется знание их эффективных материальных параметров: диэлектрической и магнитной проницаемостей, импеданса и коэффициента преломления. Метод восстановления материальных параметров метаматериала, использованный в данной работе, основан на экстракции материальных параметров из коэффициентов пропускания  $T$  и отражения  $R$  или эквивалентных им  $S$ -параметров [41-43].

$S$ -параметры представляют собой элементы матрицы рассеяния  $S$ , формализм которой удобно использовать для описания поведения волны, падающей на границу раздела двух сред. В СВЧ технике матрица рассеяния используется для описания СВЧ устройств. Для описания преломления и отражения достаточно матрицы  $2 \times 2$  (см. рисунок 2.1) [44,45]:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

где  $b_1, b_2$  – комплексные амплитуды волн, выходящих из четырехполюсника (отраженные волны);  $a_1, a_2$  – комплексные амплитуды волн, входящих в четырехполюсник (падающие волны);  $S_{11}, S_{22}$  – коэффициенты отражения по соответствующим входам четырехполюсника;  $S_{12}, S_{21}$  – коэффициенты передачи амплитуд волн напряжения со второй линии на первую и с первой на вторую соответственно.



Рисунок 2.1 – Схематическое представление оптического элемента, описываемого матрицей рассеяния

Измерение S-параметров возможно для любых устройств СВЧ, поскольку оно сводится к измерению параметров падающей и отраженной волны на входах/выходах устройства.

Расчет материальных параметров осуществлялся с использованием формул Френеля–Эйри [41,42]:

$$\eta = \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T^2}{(1-R)^2 - T^2}}, \quad (2.2)$$

$$n = \pm \frac{1}{kD} \left( \arccos \left( \frac{1 - R^2 + T^2}{2T} \right) + 2\pi m \right) \quad (2.3)$$

и выражений для эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей

$$\varepsilon = \frac{n}{\eta}, \quad (2.4)$$

$$\mu = n\eta, \quad (2.5)$$

где  $\eta$  – волновое сопротивление,  $D$  – толщина структуры;  $R$  и  $T$  – коэффициенты отражения и прохождения соответственно;  $k = \omega/c$  ( $c$  – скорость света,  $\omega = 2\pi/\lambda$  – частота);  $m$  – произвольное целое число. Выбор знаков и числа  $m$  в формулах (2.2) и (2.3) был описан в [42,43].

### 2.3 Выбор элементарной ячейки метаматериала для проведения экспериментов на выведенном пучке микротрона в миллиметровом диапазоне длин волн

Схематично процесс выбора параметров элементарной ячейки представлен на рисунке 2.2. Начальными данными в задаче являются геометрия элементарной ячейки, материал мишени и рабочий диапазон длин волн.



Рисунок 2.2 – Схема выбора параметров элементарной ячейки

Рабочий диапазон длин волн ограничен с одной стороны порогом когерентности, а с другой – рабочим диапазоном используемых детекторов. Порог когерентности излучения для параметров электронного пучка микротрона ФТИ ТПУ составляет 8 мм, т.е. излучение с длиной волны  $\lambda > 8$  мм является когерентным. Учитывая данный факт, рабочий диапазон включает в себя длины волн 8–50 мм (6–37.5 ГГц). В качестве материала для изготовления метамишени был выбран двухсторонний фольгированный стеклотекстолит FR-4 ввиду его доступности и относительной простоты работы с ним. Толщина стеклотекстолитовой пластины составляет 1.5 мм, а толщина медного слоя – 35 мкм. Толщина скин-слоя меди в рассматриваемом диапазоне длин волн составляет 0.3–0.8 мкм.

Как уже было отмечено ранее, на первоначальном этапе развития метаматериалов наиболее простой и распространенной структурой формирования исследуемых композитных сред являлась элементарная ячейка, состоящая из вложенных разомкнутых колец (или рамок) и проволочек (или стрипов). Подобная структура (рисунок 2.3) была выбрана и для формирования мишени при

исследовании особенностей взаимодействия «левых» сред с полем релятивистских электронных сгустков.

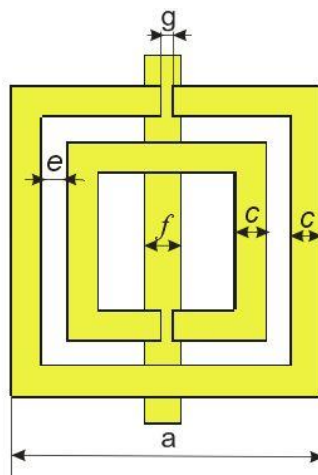


Рисунок 2.3 – Элементарная ячейка метамишени

Используемые для восстановления материальных параметров S-параметры моделировались в пакете программ CST Microwave Studio. Пример получаемых в программе S-параметров приведен на рисунке 2.4. Сама процедура восстановления материальных параметров описана выше в пункте 2.2.

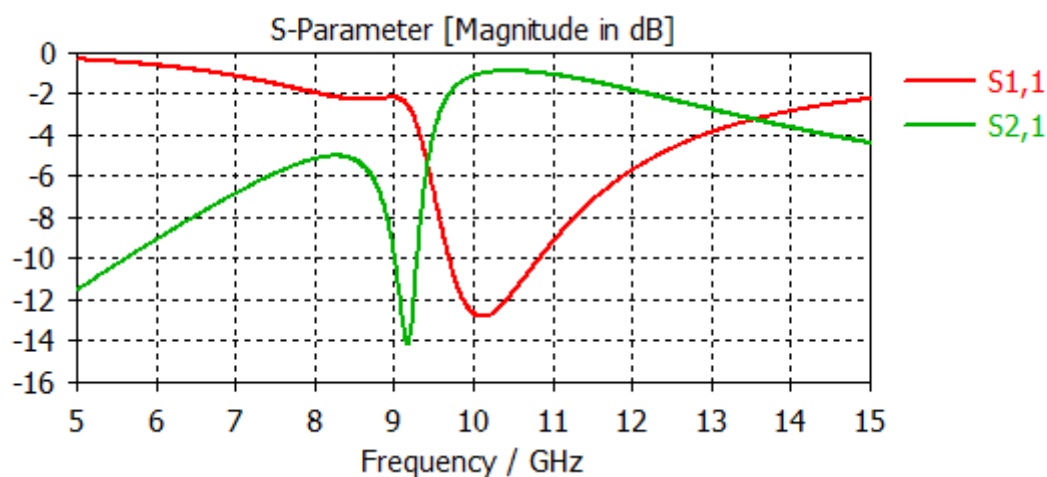


Рисунок 2.4 – Пример получаемых S-параметров при моделировании

По восстановленным материальным параметрам проводилась оценка соответствия параметров элементарной ячейки запрашиваемым требованиям.

Для проводимых исследований было изготовлено две мишени, каждая из которых представляет собой треугольную призму, в основании которой лежит прямоугольный треугольник (рисунок 2.5). Сама призма представляет собой

совокупность параллельно расположенных на расстоянии  $l$  пластин, на которые нанесен массив элементарных ячеек. Параметры используемых мишеней и их элементарных ячеек приведены в таблице 2.1. Для удобства в изложении материала обозначим мишень с размером элементарной ячейки  $a=11.6$  мм – PhC-12, а с размером  $a=2.5$  мм – LHM-3.

Таблица 2.1 – Параметры мишеней и элементарных ячеек

| Мишень | Параметры элементарной ячейки<br>(см. рисунок 2.3) |          |          |          |          | Параметры мишени<br>(см. рисунок 2.5) |          |            |          |
|--------|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------------------------|----------|------------|----------|
|        | $a$ , мм                                           | $c$ , мм | $e$ , мм | $f$ , мм | $g$ , мм | $w$ , мм                              | $b$ , мм | $\alpha$   | $l$ , мм |
| PhC-12 | 11.6                                               | 0.7      | 0.3      | 0.5      | 0.5      | 62                                    | 108      | $42^\circ$ | 9        |
| LHM-3  | 2.5                                                | 0.35     | 0.1      | 0.3      | 0.3      | 40                                    | 60       | $45^\circ$ | 1.5      |

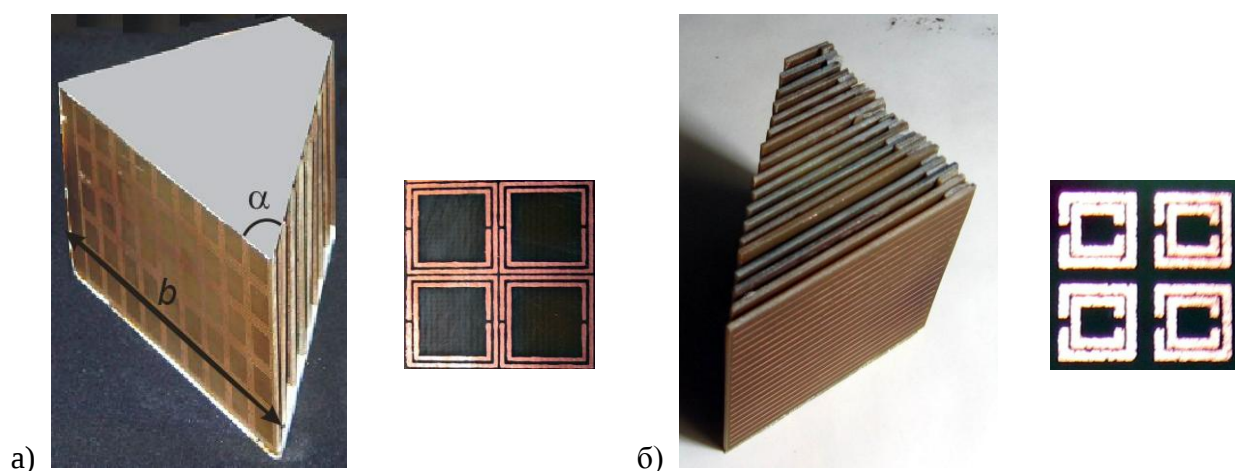


Рисунок 2.5 – Внешний вид используемых мишеней: а) – PhC-12; б) – LHM-3

Несмотря на то, что мишени PhC-12 и LHM-3 сформированы элементарной ячейкой одного и того же вида, в рассматриваемом диапазоне длин волн мишень PhC-12 вероятнее всего будет проявлять свойства фотонного кристалла. Это объясняется тем, что размер элементарной ячейки данной мишени сопоставим с длинами волн рабочего диапазона.

Параметры элементарной ячейки для мишени LHM-3 были подобраны, используя описанный выше алгоритм. На рисунке 2.6 представлены полученные частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической и

магнитной проницаемостей для выбранных параметров элементарной ячейки, так называемые дисперсионные кривые.

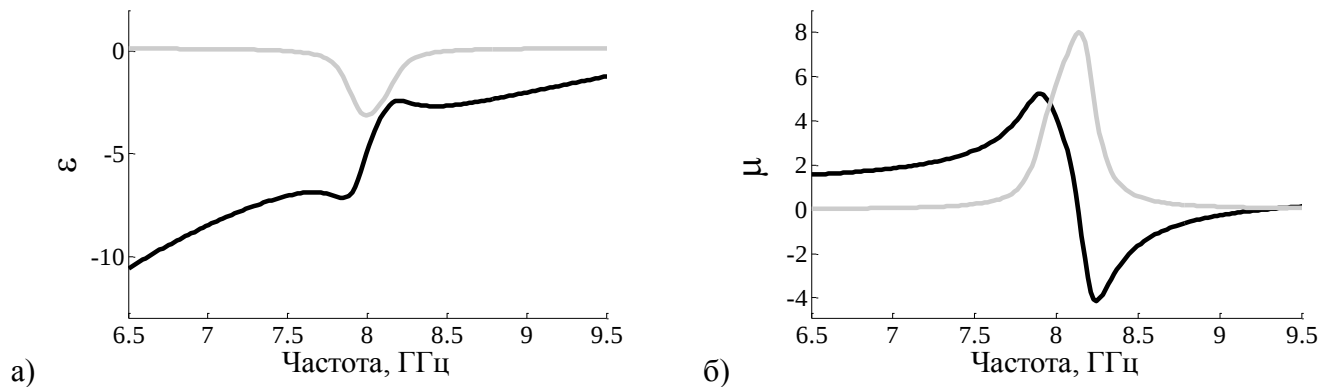


Рисунок 2.6 – Действительная (черная линия) и мнимая (серая линия) части: а) – диэлектрической проницаемости; б) – магнитной проницаемости

Зависимость действительной и мнимой частей коэффициента преломления от частоты представлена на рисунке 2.7.

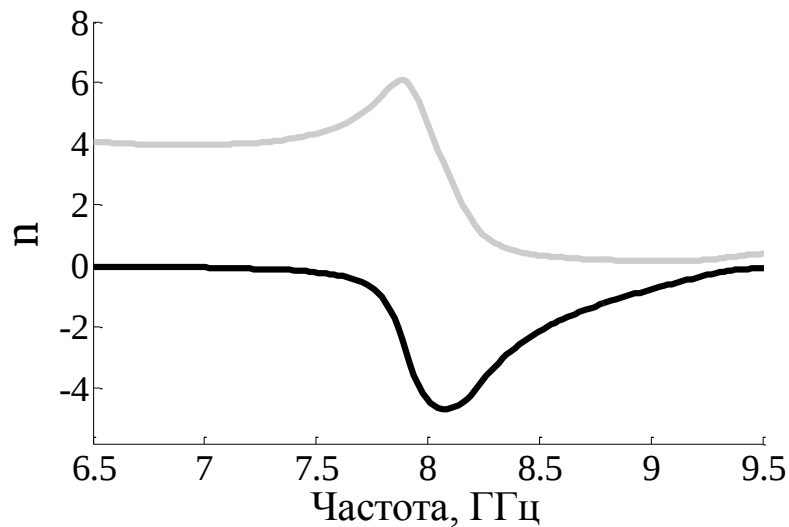


Рисунок 2.7 – Действительная (черная линия) и мнимая (серая линия) части коэффициента преломления для элементарной ячейки с параметрами:  $a = 2.5$  мм,  $c = 0.3$  мм,  $e = 0.1$  мм,  $f = 0.55$  мм,  $g = 0.4$  мм

Из приведенных выше зависимостей видно, что элементарная ячейка с заданными параметрами обладает отрицательным коэффициентом преломления при частоте 8.1 ГГц, что соответствует длине волны 37 мм.

## 2.4 Испытание мишеней на пучке реальных фотонов

Испытание мишеней на пучке реальных фотонов проводилось в миллиметровом диапазоне длин волн. В качестве источника излучения в эксперименте использовался излучатель на основе диода Ганна, в спектре которого имеются две изолированные линии с регулируемой интенсивностью. Параболическое зеркало, в фокусе которого был расположен источник излучения (см. рисунок 2.8), формировало квазипараллельный пучок излучения и направляло его на мишень. Для регистрации излучения, проходящего через мишень, использовался детектор ДП21М, размещенный на штанге в фокусе параболического отражателя [46]. Ось вращения штанги проходит через середину излучающей грани мишени. Данная конструкция позволяет измерять угловые характеристики излучения без искажения, обусловленного конечными размерами области излучения. В условиях данного эксперимента поворот мишени по часовой стрелке считается положительным, а против – отрицательным.

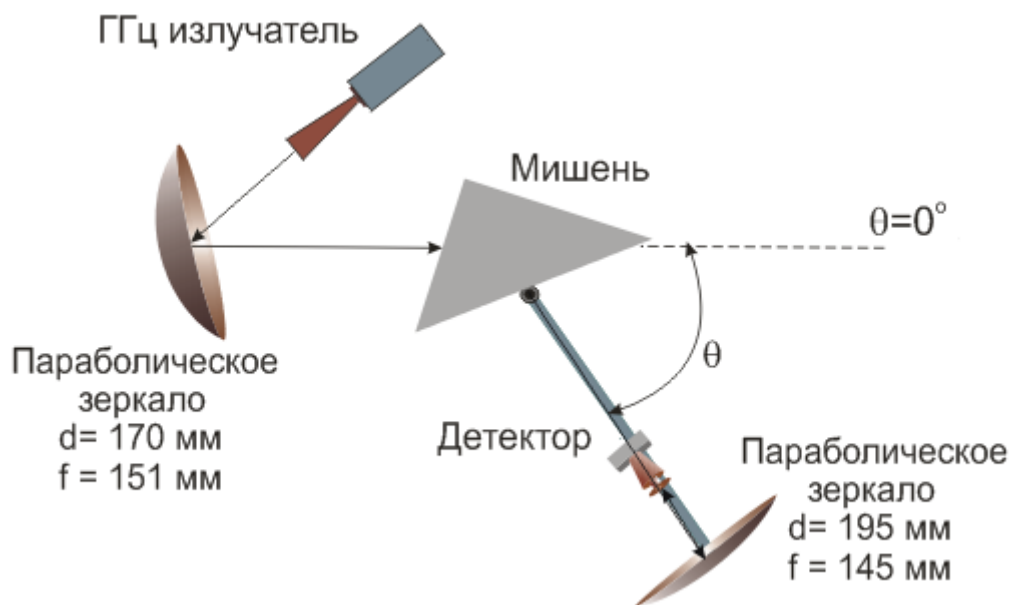


Рисунок 2.8 – Схема измерения углового распределения излучения, проходящего через мишень

При испытании мишени PhC-12 на плоскости  $\{\varphi, \theta\}$  (где  $\varphi$  – угол поворота мишени,  $\theta$  – угол наблюдения, отсчитываемый от направления распространения пучка) были обнаружены области, в которых преломление излучения может быть

интерпретировано как положительное, и области с отрицательным преломлением. Ниже приведены результаты для двух наиболее интересных областей. Геометрии прохождения излучения через мишень PhC-12, соответствующие данным областям, представлены на рисунке 2.9. Отметим, что в экспериментах с мишенью PhC-12 измерялась горизонтальная компонента поляризации излучения.

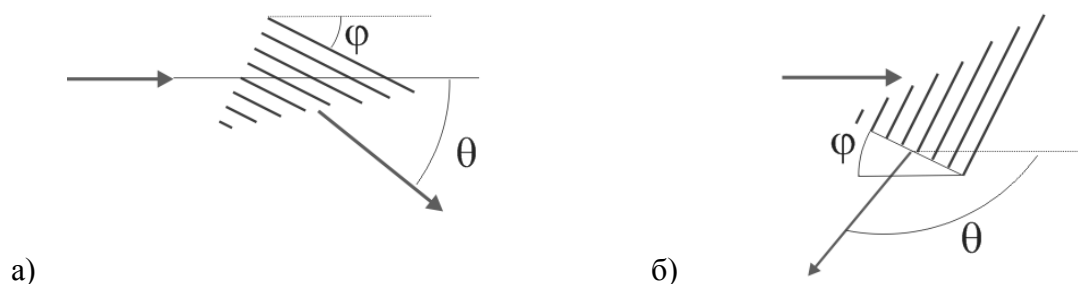


Рисунок 2.9 – Геометрии прохождения излучения через мишень PhC-12: а) – геометрия 1; б) – геометрия 2

Рассмотрим сначала результаты, полученные для первой геометрии (см. рисунок 2.9а). На рисунке 2.10 представлена измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  и угла поворота мишени  $\varphi$ , так называемая ориентационная зависимость.

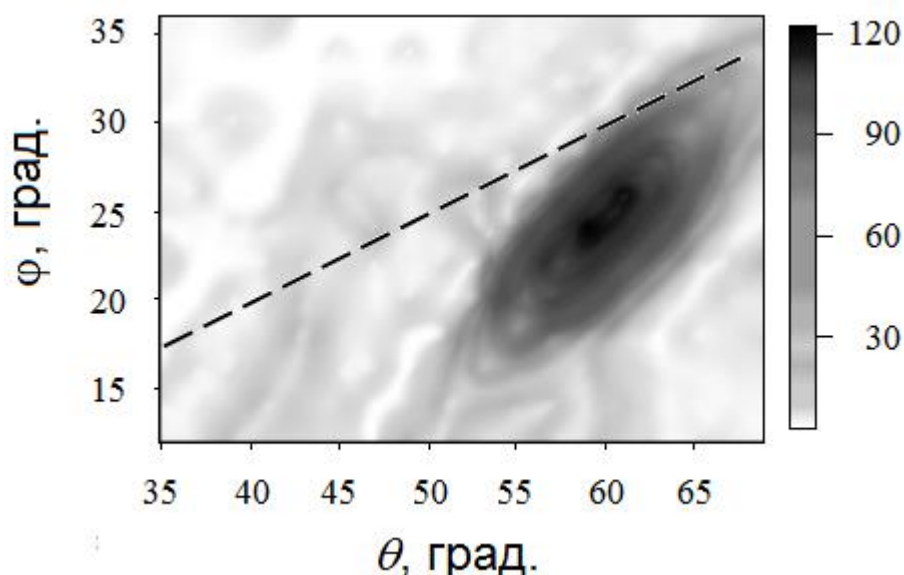


Рисунок 2.10 – Экспериментально измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  и угла поворота мишени  $\varphi$  в геометрии 1 для мишени PhC-12; пунктирная линия – положение области, соответствующей излучению переотраженному между пластинами мишени

Как видно из полученной ориентационной зависимости для первой геометрии, область излучения носит локальный (островной) характер. Это указывает на существование жёсткой связи между угловыми и спектральными характеристиками в процессе преломления излучения. В то же время наблюдается корреляция между углом поворота мишени и углом наблюдения излучения.

Наблюдаемая область излучения не является результатом переотражения излучения между плоскими структурами мишени, поскольку связь между углом поворота мишени  $\varphi$  и углом наблюдения излучения  $\theta$  описывается выражением  $\theta = 2\varphi$ . На плоскости  $\{\varphi, \theta\}$  излучение, испытавшее множественное переотражение между пластинами мишени, занимало бы область, показанную на рисунке 2.10 пунктирной линией. Как видно из представленной зависимости, эти области не совпадают, следовательно, наблюдаемая область излучения не является переотражением.

С помощью интерферометра с делением фронта на основе двух зеркал, описание которого представлено в первой главе, были получены интерферограммы для излучения, проходящего через мишень, и излучения, падающего на неё. Спектры излучения, восстановленные из измеренных интерферограмм, представлены на рисунке 2.11.

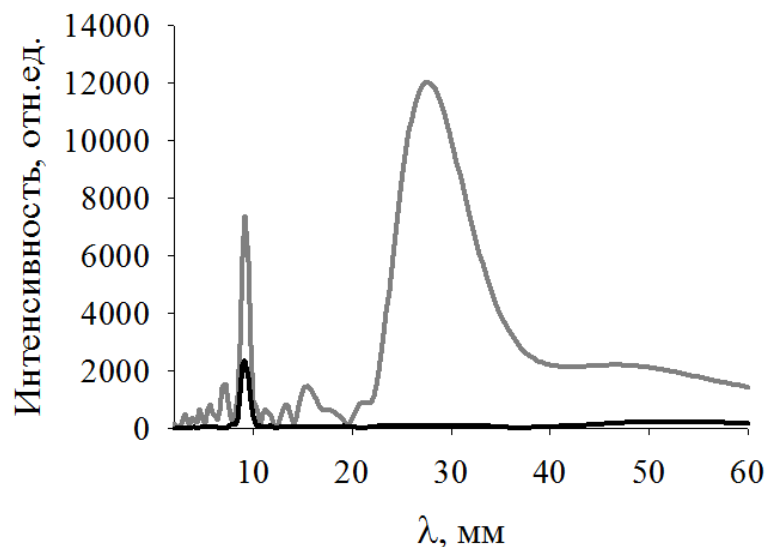


Рисунок 2.11 – Спектр излучателя (серая линия) и спектр излучения, проходящего через мишень PhC-12 в геометрии 1 (чёрная линия)

Из сравнения спектров излучения, падающего на мишень и проходящего через неё, можно видеть, что в данной геометрии эксперимента через мишень проходит только излучение с длиной волны  $\lambda = 9$  мм. Длинноволновая составляющая спектра излучения при этом не проходит через мишень.

Во второй геометрии (см. рисунок 2.9б) область излучения носит локальный характер, однако состоит из ряда протяженных областей (см. рисунок 2.12), т.е. распределение интенсивности излучения по углам оказывается многомодальным. Корреляция между углом поворота мишени и углом наблюдения излучения отсутствует.

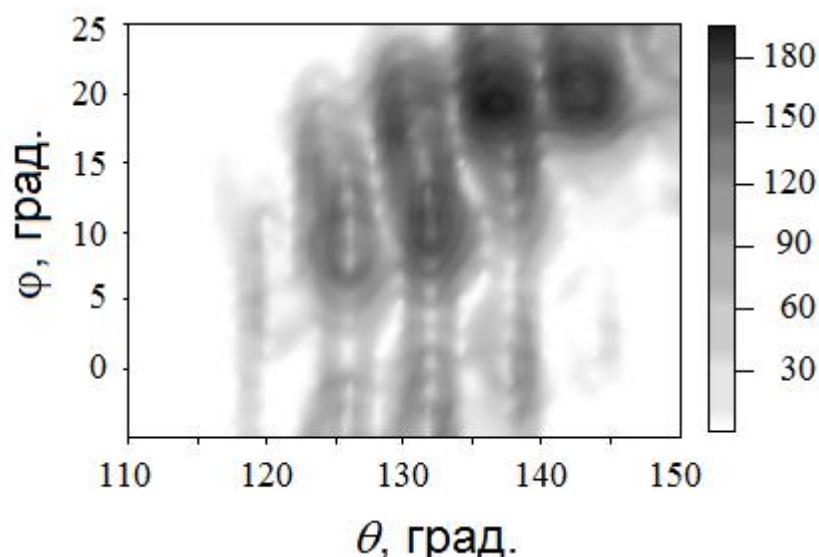


Рисунок 2.12 – Экспериментально измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  и угла поворота мишени  $\varphi$  в геометрии 2 для мишени PhC-12

На рисунке 2.13 приведены спектры излучения, падающего на мишень и проходящего через неё для второй геометрии. Несмотря на то, что в исходном излучении для контрастности интенсивность длинноволновой компоненты была подавлена, в спектре преломленного излучения она является основной, т.е. через мишень проходит излучение с длиной волны  $\lambda = 29$  мм, а коротковолновая составляющая спектра падающего излучения в данной геометрии не проходит через мишень.

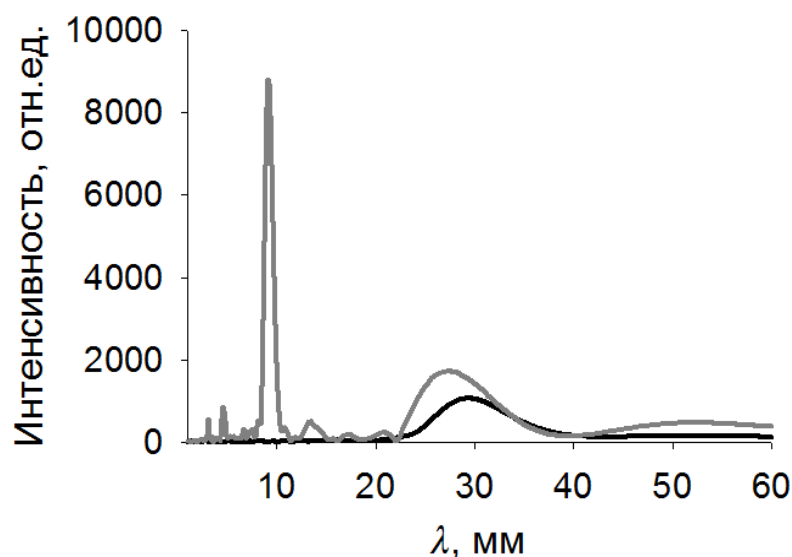
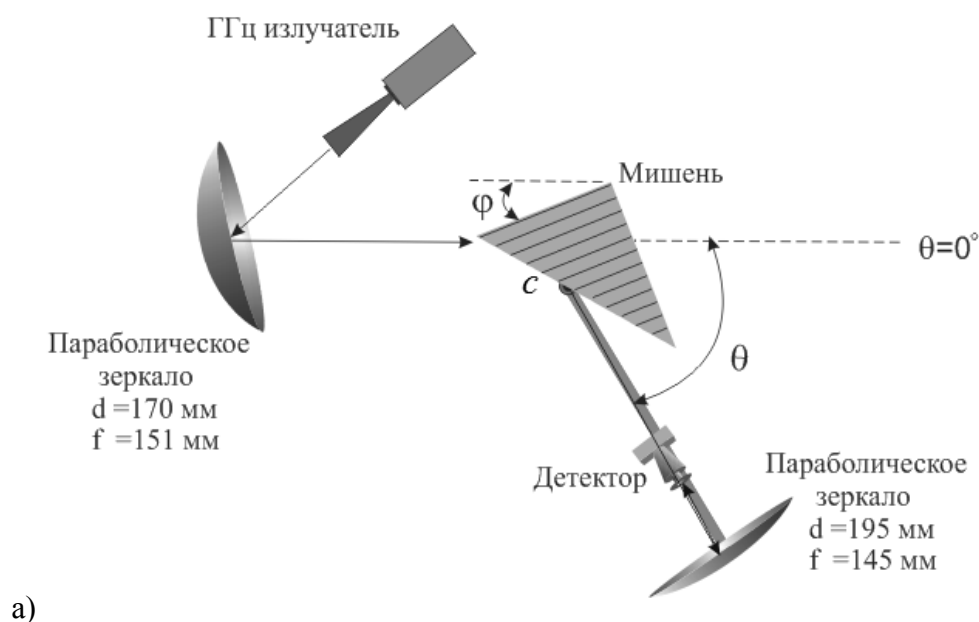


Рисунок 2.13 – Спектр излучателя (серая линия) и спектр излучения, проходящего через мишень PhC-12 в геометрии 2 (чёрная линия)

Для мишени LHM-3 были измерены зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  при различных углах поворота мишени  $\varphi$ . На рисунке 2.14а представлена схема проведенного эксперимента. Как и в эксперименте с мишенью PhC-12 в качестве источника излучения использовался излучатель на основе диода Ганна. Отличием является использование вместо детектора ДП21М детектора ДПММ-01, характеристики которого описаны в первой главе. Также следует отметить, что в экспериментах с мишенью LHM-3 измерялась вертикальная компонента поляризации излучения.



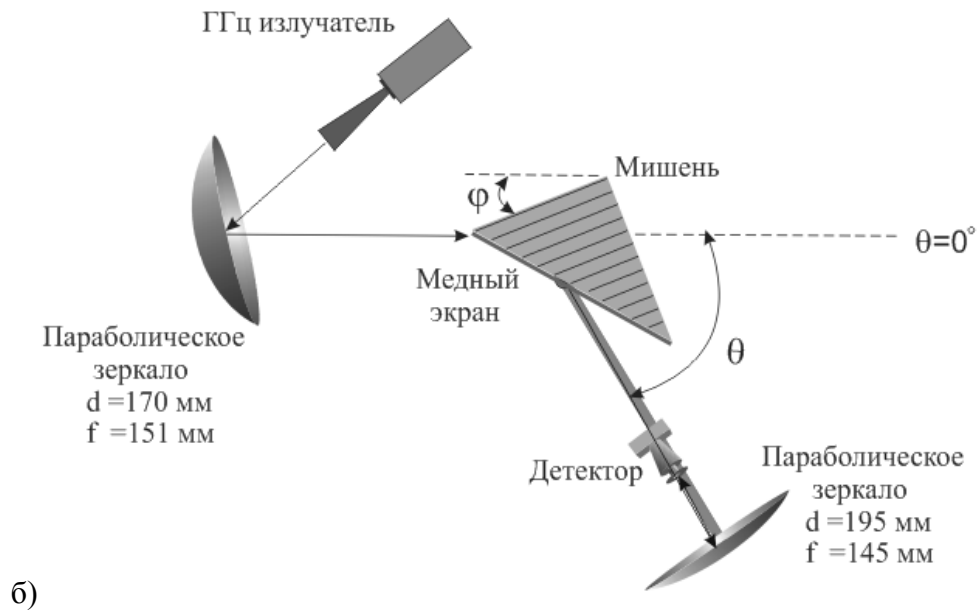


Рисунок 2.14 – Схема экспериментальной установки: а) – измерение углового распределения излучения, проходящего через мишень LHM-3; б) – измерение углового распределения излучения в случае, когда выходная поверхность закрыта медным экраном

Как видно из измеренной зависимости (рисунок 2.15а), излучение от мишени распространяется в двух направлениях. Для идентификации регистрируемого излучения, на грань «с» был установлен экран (см. рисунок 2.14б). Из полученной зависимости (рисунок 2.15б) видно, 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.

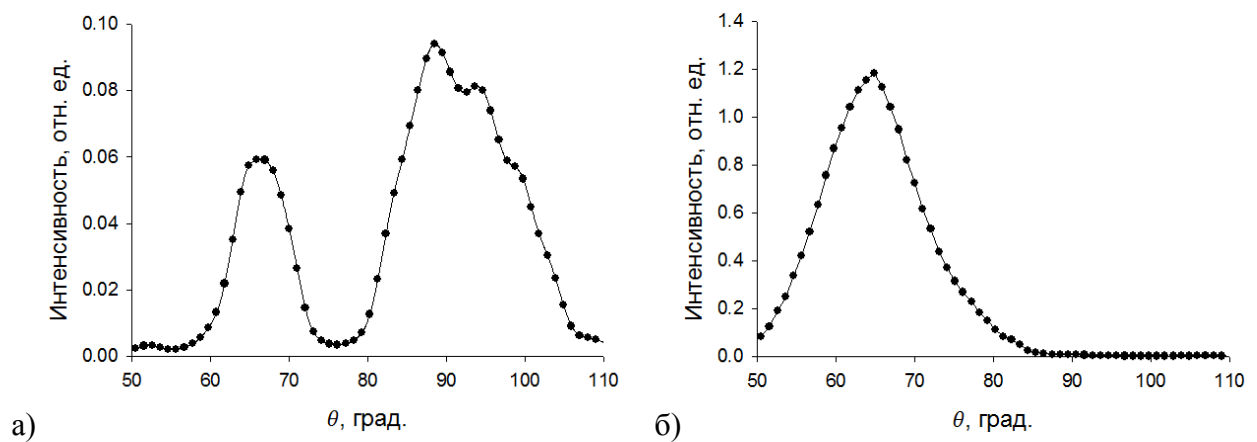


Рисунок 2.15 – Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  при

$\varphi = -12^\circ$ : а) – по схеме на рисунке 2.14а; б) – по схеме на рисунке 2.14б

Спектр излучения, распространяющегося под углом  $\theta = 90^\circ$ , и спектр падающего на мишень излучения представлены на рисунке 2.16.

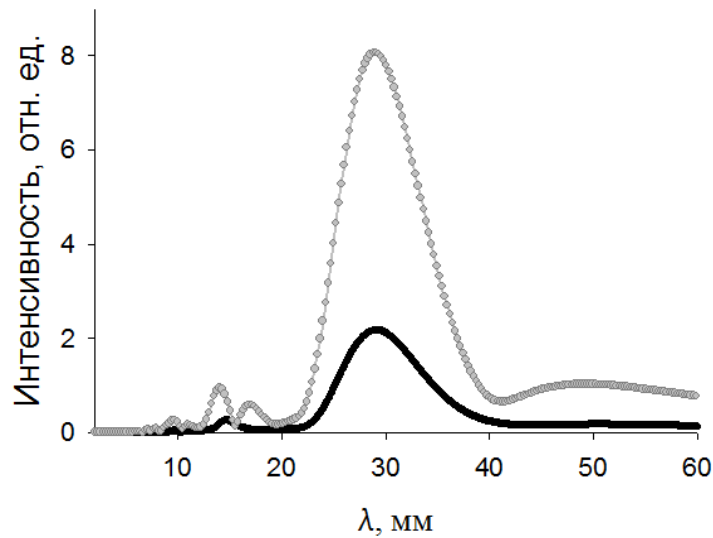


Рисунок 2.16 – Спектр излучателя (серая линия) и спектр излучения, проходящего через мишень LHM-3 (чёрная линия)

Спектр излучения прошедшего через мишень LHM-3 имеет две изолированные линии:  $\lambda_1 = 15$  мм и  $\lambda_2 = 29$  мм.

## 2.5 Спектрально-угловые характеристики излучения релятивистских электронов в метаматериалах

Эксперименты по исследованию взаимодействия поля релятивистских электронов с метаматериалами проводились на пучке микротрона ФТИ ТПУ. Описание экспериментальной установки и методики приведено в первой главе.

Мишень PhC-12 исследовалась в двух геометриях эксперимента, которые представлены на рисунке 2.17. Данные схемы эксперимента соответствуют геометриям, использованным при испытании мишени на источнике миллиметрового излучения (см. рисунок 2.9). В ходе эксперимента мишень располагалась вблизи траектории движения электронного пучка. Кратчайшее расстояние от траектории движения электронов до мишени (импакт-фактор)  $h$  составлял величину 10 мм, Расстояние от выводного патрубка до мишени  $L$  при угле поворота мишени  $\varphi = 0^\circ$  составляло 300 мм. В условиях данного

эксперимента поворот мишени по часовой стрелке считается положительным, а против – отрицательным. Для измерения характеристик излучения использовался детектор ДП21М, при этом измерялась горизонтальная поляризация излучения. Значения в каждой точке приведенных зависимостей являются усредненными по 20 макроимпульсам.

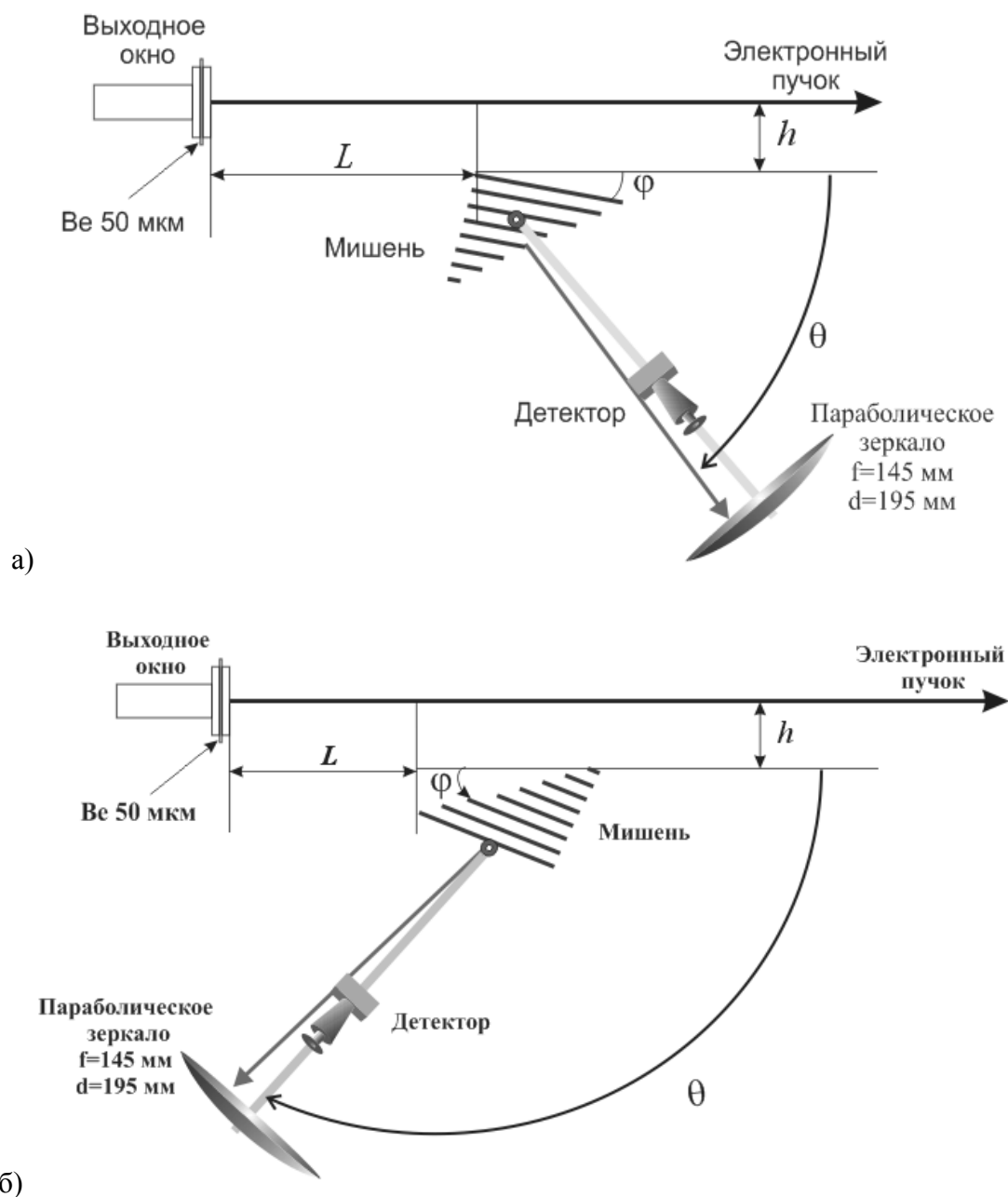


Рисунок 2.17 – Схема измерения углового распределения излучения и ориентационной зависимости для мишени PhC-12: а) – геометрия 1, б) – геометрия 2

Ориентационная зависимость, измеренная в первой геометрии, представлена на рисунке 2.18. Из полученной зависимости можно видеть, что в геометрии 1 область излучения носит локальный характер. Если обратиться к зависимостям, полученным при исследовании прохождения электромагнитного излучения через данную мишень (см. рисунок 2.10), можно указать на схожесть зависимостей, полученных в обоих экспериментах.

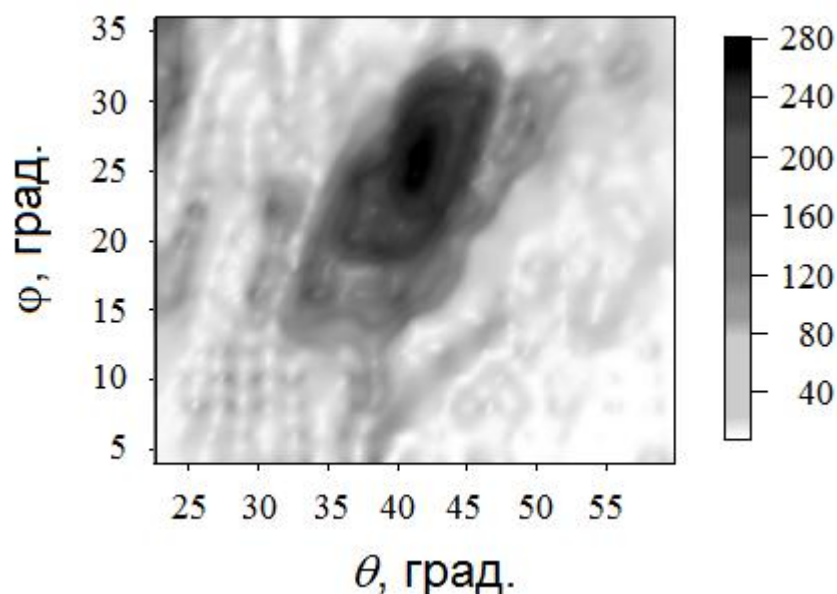


Рисунок 2.18 – Экспериментально измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  и угла поворота мишени  $\varphi$  для мишени PhC-12 в геометрии 1

Для геометрии 2 измерение ориентационной зависимости оказалось невозможным. Как видно из углового распределения излучения, представленного на рисунке 2.19, в данной геометрии при угле поворота мишени  $\varphi = -20^\circ$  максимум интенсивности излучения наблюдается под углом  $\theta = 143^\circ$ . Проведение измерений в области больших углов было невозможным, поскольку электронный пучок перекрывался бы параболическим отражателем.

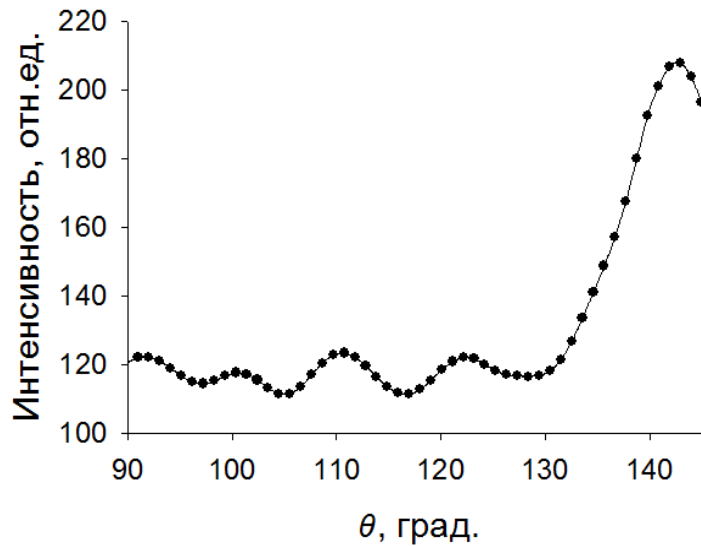


Рисунок 2.19 – Экспериментально измеренное угловое распределение излучения в геометрии 2 от мишени PhC-12 для угла поворота мишени  $\varphi = -20^\circ$

Поскольку спектральный состав излучения является важной характеристикой как для метаматериалов, так и фотонных кристаллов, то для излучения, выходящего из объема мишени, были измерены спектры (рисунок 2.20). Для сравнения на этом же рисунке приведен измеренный спектр поля электронов.

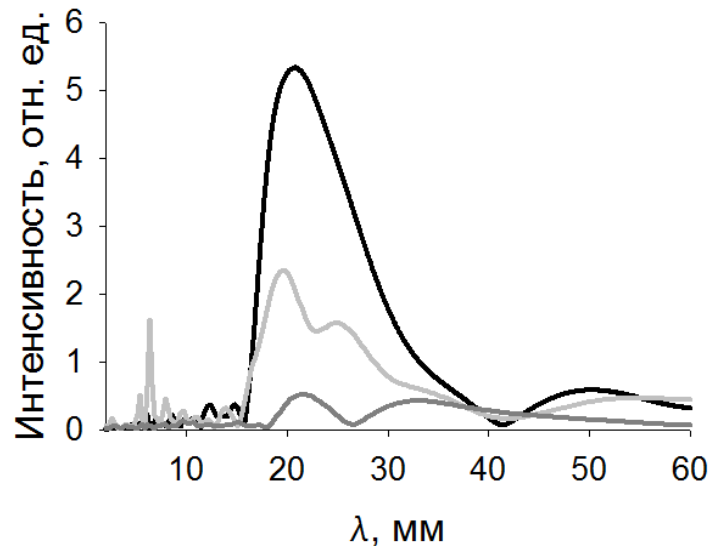


Рисунок 2.20 – Спектр поля электронов (черная линия), спектр излучения, выходящего из мишени PhC-12, в геометрии 1 (серая линия) и геометрии 2 (темно-серая линия)

Из сравнения полученных спектров можно видеть, что в результате взаимодействия поля релятивистских электронов с мишенью PhC-12 возникает

излучение, которое в зависимости от геометрии расположения мишени по отношению к электронному пучку имеет различный спектральный состав.

Схема эксперимента по исследованию радиационных свойств мишени LHM-3 представлена на рисунке 2.21. Ориентация мишени была выбрана, исходя из результатов стендовых измерений и изначально поставленной цели: наблюдение ОИВЧ. Как известно ОИВЧ, в отличие от случая обычного излучения Вавилова – Черенкова (ИВЧ), генерируется под тупым углом к направлению движения заряженной частицы, поэтому мишень целесообразно располагать по схеме, представленной на рисунке 2.21, для удобства вывода излучения из объема мишени.

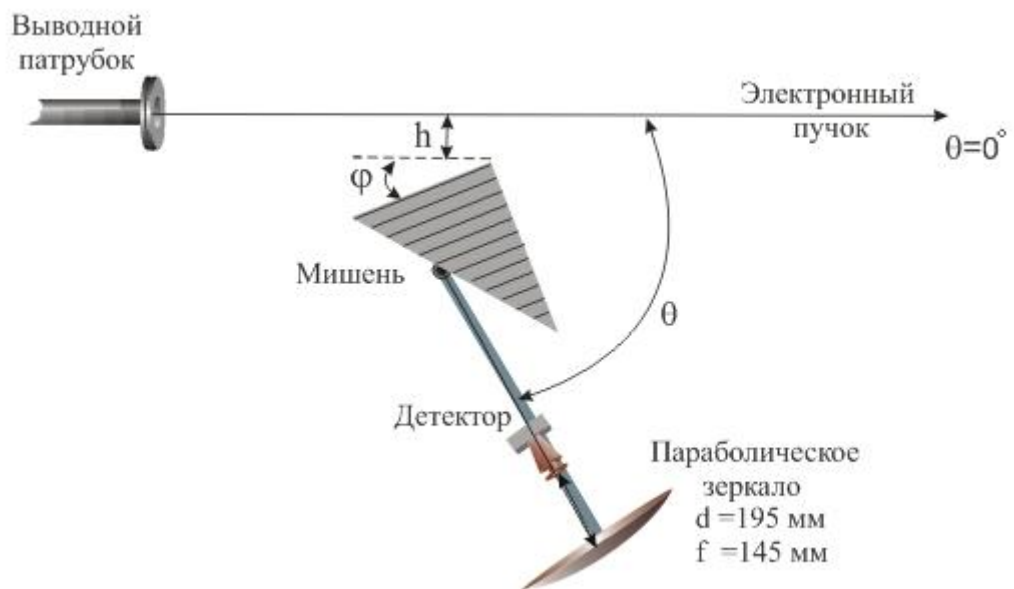


Рисунок 2.21 – Схема измерения углового распределения излучения от мишени LHM-3

В результате были измерены угловые зависимости для различных углов поворота мишени. Ниже приведены результаты для угла поворота мишени  $\varphi = -10^\circ$  и  $\varphi = -20^\circ$  (рисунок 2.22). Для того, чтобы показать, что наблюдаемый эффект обусловлен элементами, нанесенными на стеклотекстолитовую подложку, была изготовлена мишень для измерения фона аналогичной формы и размеров без резонансных структур на подложке.

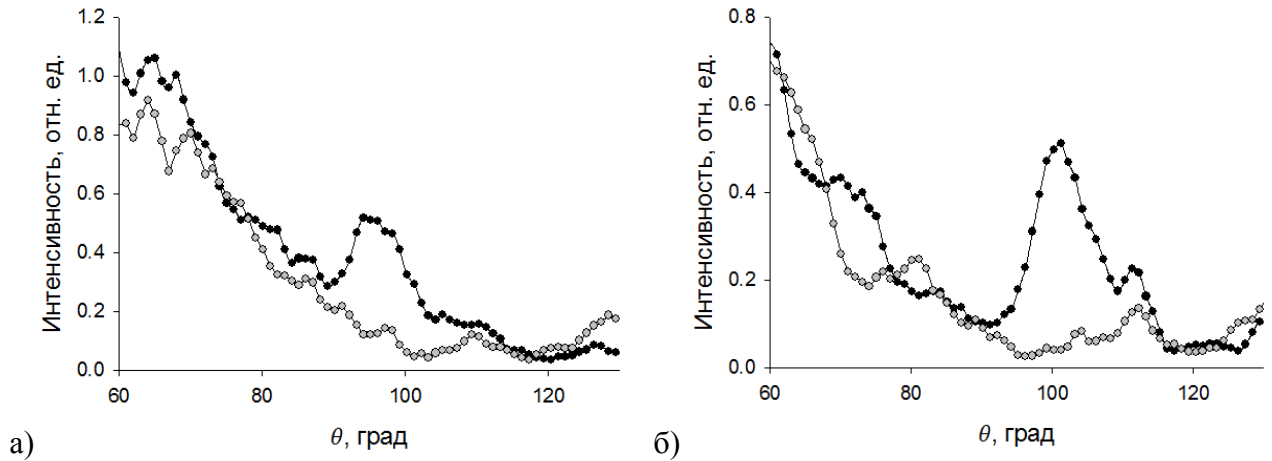


Рисунок 2.22 – Экспериментально измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  для мишени LHM-3: а) –  $\varphi = -10^\circ$  ; б) –  $\varphi = -20^\circ$

Как видно из полученных зависимостей, наблюдаемый эффект обусловлен наличием на стеклотекстолитовой подложке массива металлических элементов. Генерируемое в объеме мишени LHM-3 излучение выходит из мишени в обратную полусферу, что является косвенным доказательством отрицательного значения коэффициента преломления исследуемой структуры.

В рассматриваемом случае диэлектрическая и магнитная проницаемости метаматериала являются тензорными величинами, так как исследуемая мишень является анизотропной структурой. При этом коэффициент преломления зависит от направления распространения излучения. В связи с отсутствием математического аппарата, описывающего связь характеристик излучения с тензорным коэффициентом преломления, мы воспользуемся приближением скалярного коэффициента преломления.

В приближении скалярного значения коэффициента преломления, для данной геометрии эксперимента можно получить значение коэффициента преломления из трансцендентного уравнения:

$$\sin(\alpha + |\varphi| - \pi + |\theta_{CR}|) = \frac{1}{n} \sin(\pi - |\varphi| - \alpha - \theta), \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  – угол прямоугольного треугольника в основании призмы (см. таблицу 2.1),  $\varphi$  – угол поворота мишени,  $\theta_{CR} = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right)$  – угол генерации ИВЧ,  $n$  – скалярный коэффициент преломления мишени LHM-3.

Из уравнения (2.6) для угла поворота мишени  $\varphi = -10^\circ$  коэффициент преломления составил величину  $n = -2.5$ , а углу поворота мишени  $\varphi = -20^\circ$  соответствует коэффициент преломления  $n = -2.9$ . Как и ожидалось, различным углам поворота мишени соответствуют разные коэффициенты преломления, что обусловлено анизотропией исследуемой мишени.

## 2.6 Обсуждение результатов главы

В данной главе представлены результаты измерений характеристик излучения, генерируемого полем релятивистских электронов в структурах типа метаматериал и типа фотонный кристалл. Также приведены результаты испытаний данных структур на источнике миллиметрового излучения.

Из проведенных испытаний мишени PhC-12 на реальных фотонах следует, что излучение, проходящее через мишень, в разных геометриях эксперимента обладает различным спектральным составом. Если в первой геометрии (см. рисунок 2.9) через мишень проходила коротковолновая составляющая спектра излучателя, то во второй – длинноволновая. Из этого можно сделать вывод, что мишень PhC-12 работает как своеобразный фильтр и в зависимости от ориентации мишени пропускает различные длины волн. Аналогичный вывод был сделан, и при измерении спектрально-угловых характеристик излучения, генерируемого в объеме мишени полем релятивистских электронов.

Излучение, генерируемое в объеме мишени LHM-3 при взаимодействии с полем релятивистских электронов, наблюдалось в обратной полусфере. Наблюдаемый эффект был интерпретирован как обратное излучение Вавилова – Черенкова.

Экспериментальные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [47-49].

## ГЛАВА 3 Когерентное излучение сгустков релятивистских электронов в присутствии периодических проволочных структур

В этой главе приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия поля релятивистских электронов с плоскими и объемными периодическими проволочными структурами. Этому вопросу посвящен ряд теоретических работ. Так в работе [50] приведен анализ объемного излучения и поверхностных волн, генерируемых сгустком заряженных частиц, движущимся перпендикулярно к полубесконечной плоской сетке из проволочек. А в работах [19,22,23] аналитически и численно исследуются свойства излучения Вавилова – Черенкова в бесконечном и полубесконечном проволочном метаматериале. Экспериментально данный вопрос исследовался автором данной диссертационной работы совместно с Г.А. Науменко и В.В. Блеко [51-54].

### 3.1 Свойства проволочного метаматериала

Проволочным метаматериалом или проволочной средой называют композитный материал, представляющий собой массив из тонких металлических проволочек расположенных параллельно (рисунок 3.1).

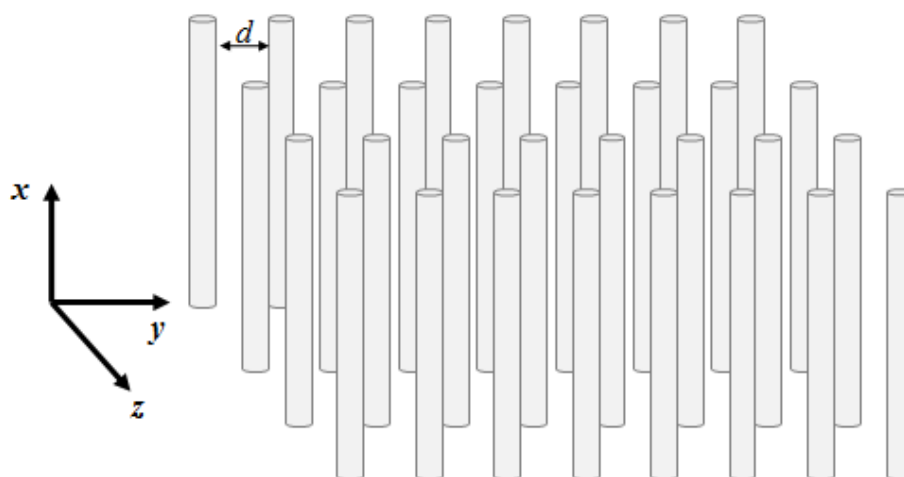


Рисунок 3.1– Проволочный метаматериал

Очевидным является, что эта двумерная проволочная структура является анизотропной средой и обладает как частотной, так и пространственной дисперсией.

Диэлектрическая проницаемость проволочного метаматериала описывается тензором следующего вида [55,56]:

$$\hat{\varepsilon}(\omega, k_x) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\parallel}(\omega, k_x) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

при этом ось  $x$  параллельна проводам, а параллельная компонента тензора имеет вид

$$\varepsilon_{\parallel}(\omega, k_x) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - k_x^2 c^2 + 2i\omega_d \omega}, \quad (3.2)$$

где  $\omega_p$  – эффективная плазменная частота,  $k_x$  – проекция волнового вектора на ось  $x$ ,  $\omega$  – циклическая частота электромагнитной волны,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\omega_d$  – параметр, отвечающий за затухание электромагнитной волны в среде. Отметим, что  $\omega_d = 0$  в случае если материал проволочек является идеальным проводником, а среда заполнения (фоновая среда) является непроводящей. Магнитная проницаемость проволочного метаматериала равна магнитной проницаемости среды заполнения.

### 3.2 Когерентное излучение релятивистских электронов от плоской проволочной структуры

Плоская проволочная мишень, внешний вид которой представлен на рисунке 3.2, исследовалась в двух геометриях эксперимента: в одной из них электроны двигаются вблизи мишени, а во второй пересекают плоскость мишени.



Рисунок 3.2 – Внешний вид плоской проволочной мишени

Исследуемая мишень представляет собой однослойную структуру, которая состоит из периодически расположенных медных проволочек. Размер плоской проволочной структуры  $200 \times 200$  мм. Диаметр проволочек – 0.5 мм, а период проволочек – 1 мм (дисперсия периода проволочек – 15%).

### **3.2.1 Излучение пучка релятивистских электронов, движущегося вблизи плоской проволочной структуры**

Схема проведенного эксперимента представлена на рисунке 3.3. Мишень в данной геометрии располагалась в горизонтальной плоскости над траекторией движения электронных сгустков. Расстояние от пучка до плоскости мишени составляло величину 15 мм, а расстояние от выводного патрубка до центра мишени – 350 мм. Угол поворота мишени  $\alpha = 0^\circ$  соответствует перпендикулярной ориентации проволочек мишени относительно траектории электронного пучка. Для регистрации излучения использовался детектор ДП21М, при этом измерялась горизонтальная компонента поляризации излучения. В условиях данного эксперимента поворот мишени против часовой стрелки считается положительным.

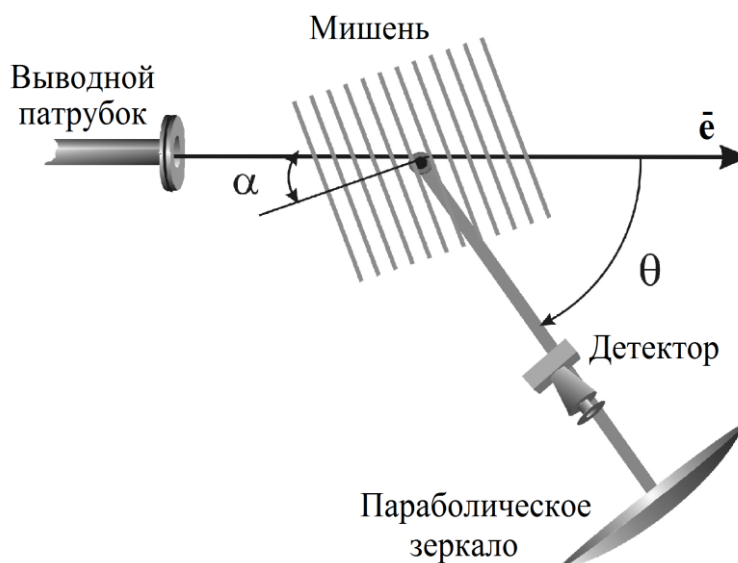


Рисунок 3.3 – Схема эксперимента с плоской проволоочной мишенью, расположенной над электронным пучком

Полученные угловые распределения для различных углов поворота мишени  $\alpha$  представлены на рисунке 3.4.

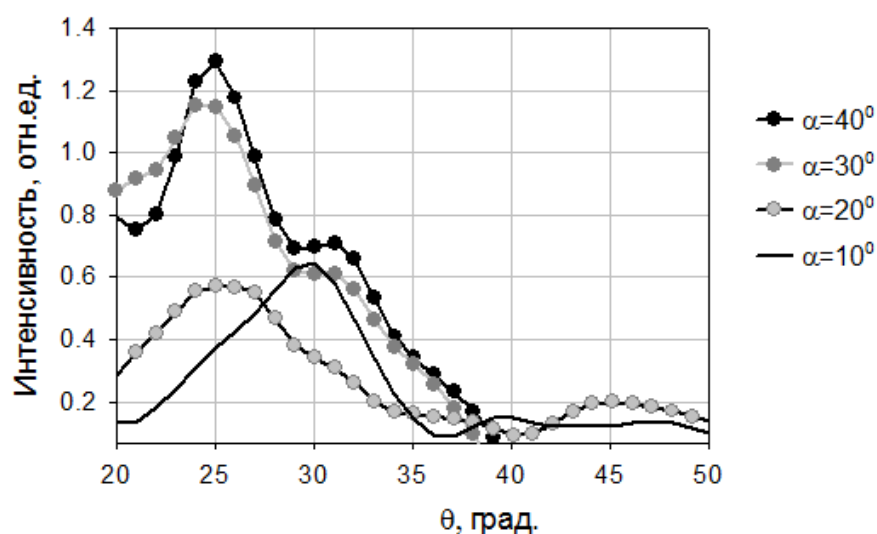


Рисунок 3.4 – Угловые распределения излучения от плоской проволоочной структуры для различных углов поворота мишени  $\alpha$

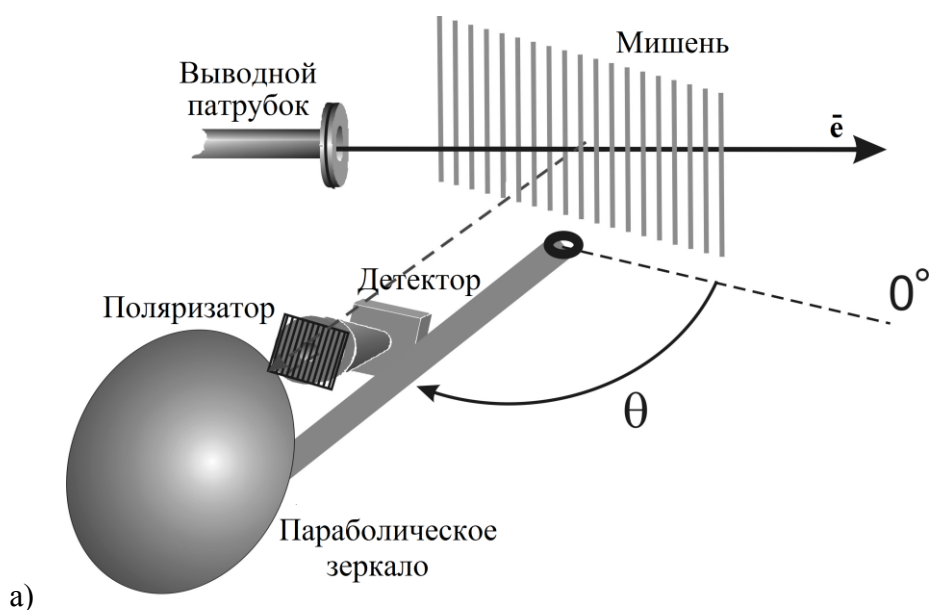
Как видно из полученной зависимости, излучение в данной геометрии генерируется под малыми углами относительно направления движения электронов. Интенсивность излучения возрастает с увеличением угла поворота

мишени, при этом угол наблюдения излучения сдвигается в область меньших углов.

### 3.2.2 Излучение пучка релятивистских электронов, пролетающих сквозь плоскую проволочную структуру

Вторую геометрию эксперимента с плоской проволочной мишенью можно назвать геометрией обратного переходного излучения (ОПИ). В условиях данного эксперимента мишень располагалась в вертикальной плоскости, как показано на рисунке 3.5а. Угол поворота мишени относительно направления движения электронных сгустков составлял  $45^\circ$ . При неизменном положении мишени относительно электронного пучка, в ходе эксперимента менялась ориентация проволочек, т.е. проволочки внутри мишени располагались вертикально или горизонтально относительно траектории движения электронов.

Поскольку когерентное обратное переходное излучение от плоской проволочной мишени должно обладать асимметрией относительно ориентации проволочек по отношению к измеряемой поляризации излучения, в эксперименте измерялась горизонтальная компонента поляризации излучения. Для измерений использовался детектор ДП21М.



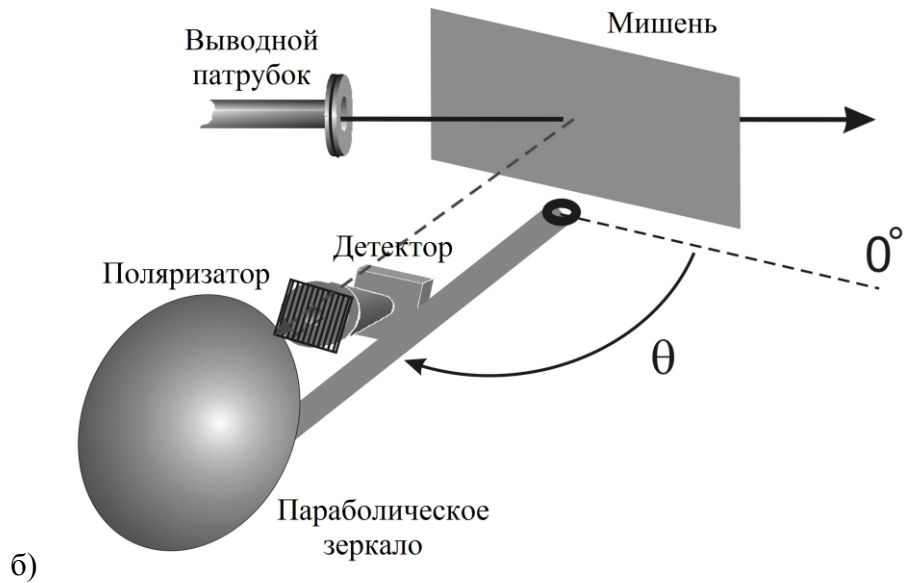


Рисунок 3.5 – Схема измерения ОПИ от: а) – плоской проволочной мишени; б) – медного экрана

Для сравнения излучения от плоской проволочной структуры с традиционным ОПИ вместо проволочной мишени на пути движения электронных сгустков был установлен медный экран (см. рисунок 3.5б). Измерение угловых характеристик излучения от проволочной мишени и медного экрана были проведены в идентичных условиях.

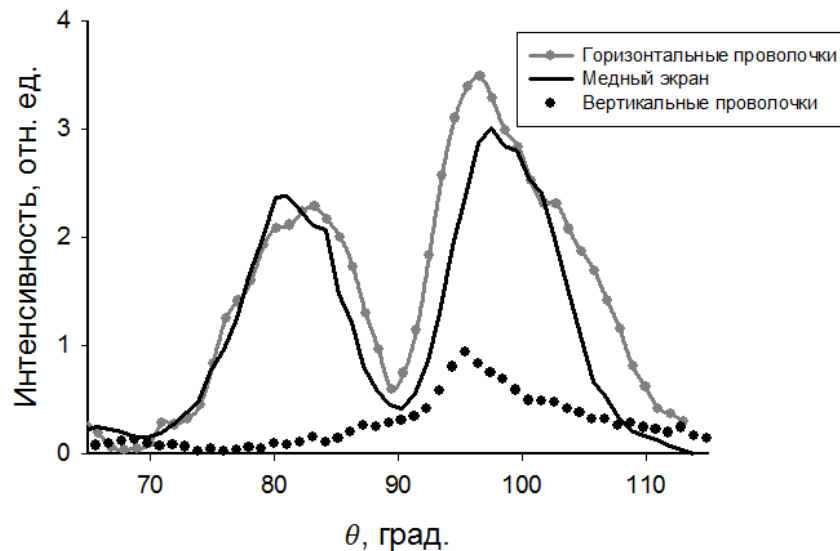


Рисунок 3.6 – Зависимость интенсивности излучения ОПИ от плоской проволочной мишени и проводящего экрана

Как видно из зависимости, представленной на рисунке 3.6, угловое распределение излучения от плоской проволочной мишени в случае, когда

проволочки расположены горизонтально, имеет такую же форму, как и традиционное ОПИ и сравнимо с ним по интенсивности. В случае, когда проволочки расположены вертикально излучение практически отсутствует.

Таким образом, 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 со структурой метаматериала. Последняя проявляется в асимметрии поляризации излучения по отношению к ориентации проволочек.

### **3.3 Излучение Вавилова – Черенкова от объемной проволочной структуры**

Объемная проволочная мишень, внешний вид которой приведен на рисунке 3.7, представляет собой прямую треугольную призму, состоящую из четырех слоев плоских проволочных структур. Диаметр проволочек составляет величину 0.5 мм. Период проволочек в горизонтальной плоскости – 1 мм, а в вертикальной плоскости – 10 мм. Дисперсия периода проволочек в горизонтальной плоскости – 15%. Длина обоих катетов основания призмы составляет 170 мм. Каркас проволочной призмы изготовлен из оргстекла.

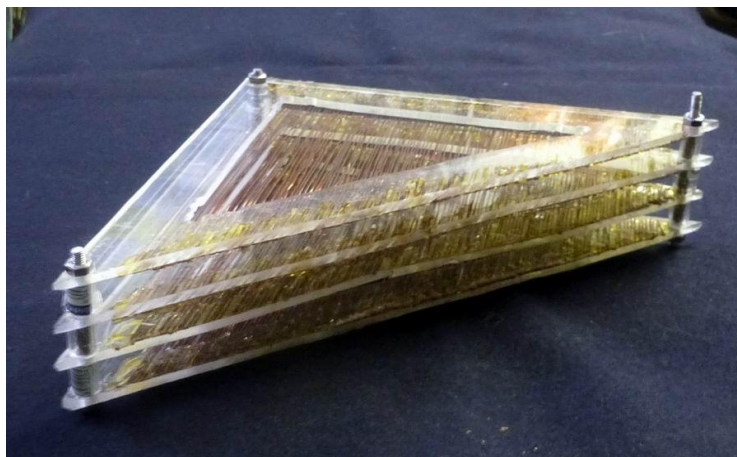


Рисунок 3.7 – Внешний вид проволочной призмы

Схема эксперимента с проволоочной призмой представлена на рисунке 3.8. В условиях данного эксперимента мишень располагалась на расстоянии 300 мм от выводного патрубка с прицельным параметром  $h = 10$  мм.

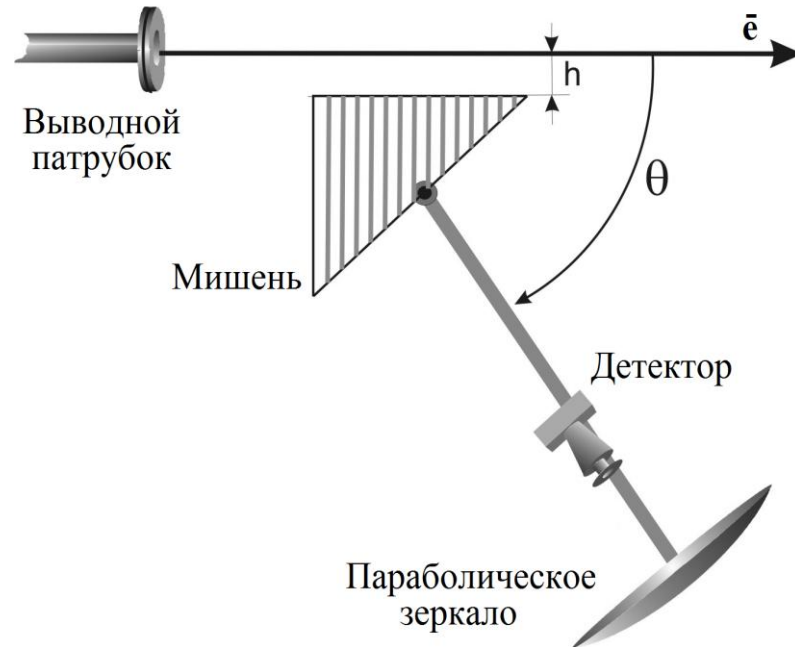


Рисунок 3.8 – Схема измерения углового распределения излучения от проволоочной призмы

Как было отмечено ранее, в случае взаимодействия поля релятивистских электронов с диэлектрической призмой возможна генерация сразу нескольких типов поляризационного излучения: излучения Вавилова – Черенкова и дифракционного излучения (ДИ) [57]. В геометрии эксперимента, подобной представленной на рисунке 3.8, за генерацию черенковского излучения от диэлектрической призмы отвечает грань параллельная пучку электронов, а ДИ генерируется на грани перпендикулярной направлению движения электронного пучка. Поэтому является весьма целесообразным сравнение спектрально-угловых характеристик излучения от проволоочной призмы и излучения от диэлектрической призмы близких размеров. Для этой цели была использована тефлоновая призма (см. рисунок 3.9б). Высота призмы 74 мм, длина обоих катетов 175 мм. Также, для того чтобы показать, что наблюдаемое в эксперименте излучение не является излучением от конструкции каркаса мишени, была

изготовлена идентичная мишень без проволочек, фотография которой представлена на рисунке 3.9а.

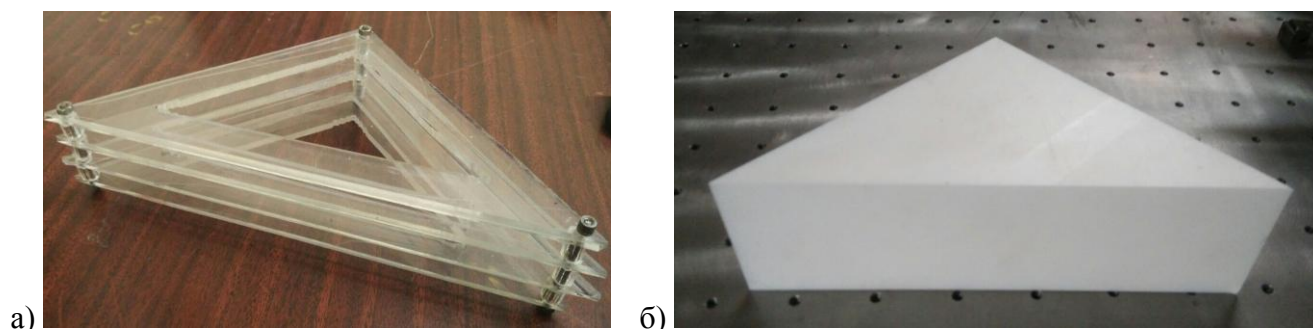


Рисунок 3.9 – Внешний вид мишеней: а) – мишень для измерения фона; б) – тефлоновая призма

Измеренные зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения для используемых в эксперименте мишеней представлены на рисунке 3.10. Из сравнения полученных зависимостей видно, что излучение в области малых углов обусловлено конструкцией каркаса, а излучение с пиком интенсивности  $\theta = 48^\circ$  является излучением от проволочной структуры.

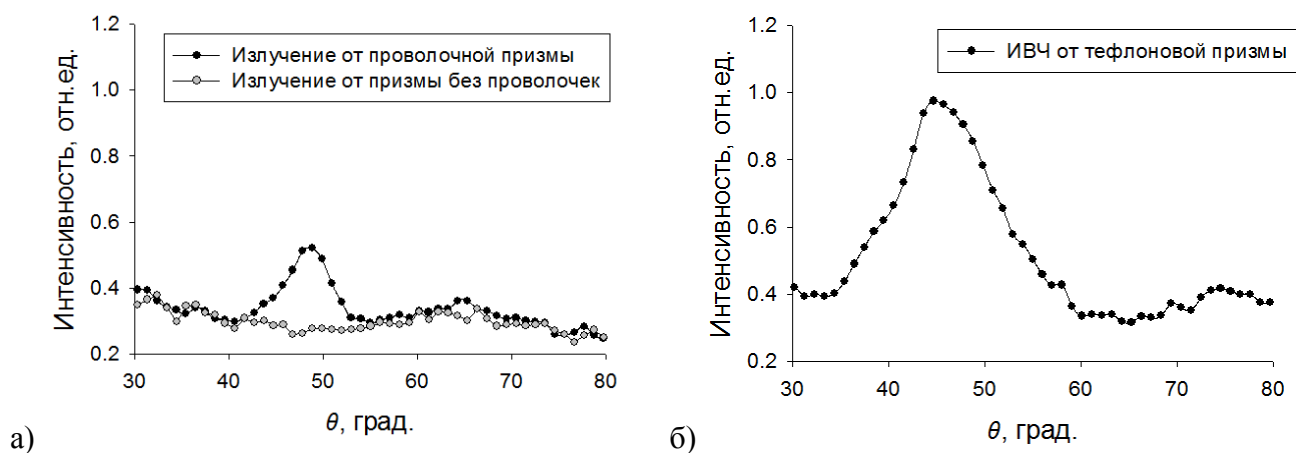


Рисунок 3.10 – Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения  $\theta$  для:

а) – проволочной призмы и каркаса мишени; б) – тефлоновой призмы

На рисунке 3.11 представлены спектры излучения от тефлоновой и проволочной призм. Как видно из полученных спектров, ИВЧ от проволочной и тефлоновой призм имеют схожий спектральный состав.

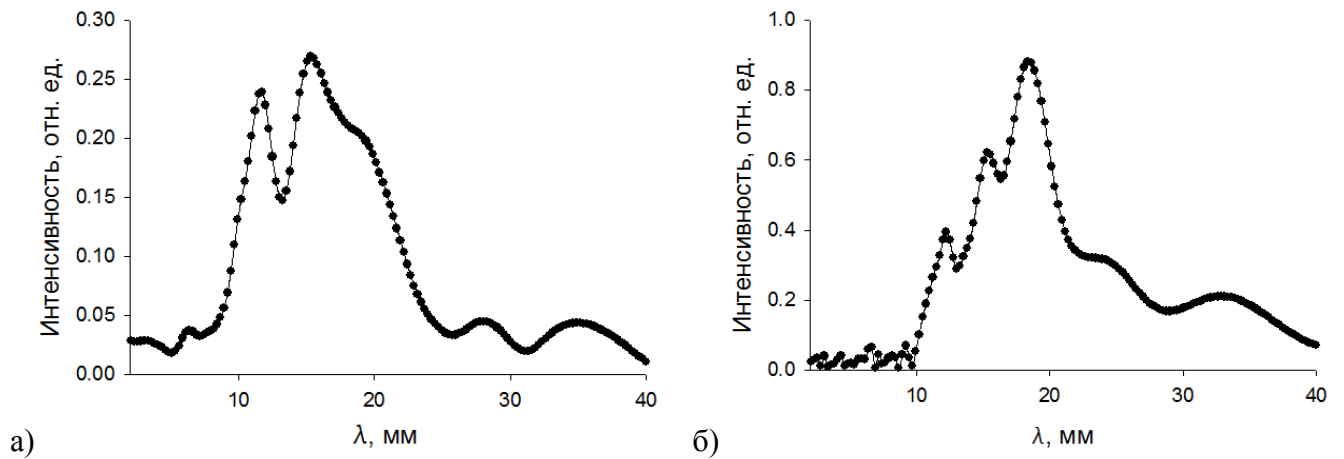


Рисунок 3.11 – Спектр излучения от: а) – проволочной призмы; б) – тефлоновой призмы

Из сравнения излучения Вавилова – Черенкова от проволочной призмы с излучением от тефлоновой призмы видно, что интенсивность излучения от тефлоновой призмы в 3 раза больше интенсивности излучения от проволочной призмы. Однако использованная в эксперименте мишень состоит всего из четырех слоев. Увеличивая плотность наполнения проволочной призмы, можно многократно увеличить интенсивность излучения.

### 3.4 Обсуждение результатов главы

В результате исследования плоской проволочной мишени в геометрии обратного переходного излучения, была выявлена асимметрия характеристик излучения относительно ориентации проволочек в мишени. Показано, что обратное переходное излучение от плоской проволочной структуры с горизонтально ориентированными проволочками имеет угловое распределение той же формы, что и традиционное переходное излучение от проводящей мишени и сопоставимо с ним по интенсивности.

Интенсивность излучения, генерируемого в случае, когда плоская проволочная мишень располагается над траекторией движения электронов, зависит от ориентации мишени относительно пучка.

Экспериментально исследовано излучение Вавилова – Черенкова, генерируемое объемной проволочной мишенью в результате взаимодействия с полем релятивистских электронов. Выполнено сравнение спектрально-угловых

характеристик данного излучения с характеристиками ИВЧ, генерируемого в тефлоновой призме близких размеров. Показано, что интенсивность излучения, генерируемого в проволочной призме, меньше интенсивности излучения от тефлоновой призмы. Однако полученный результат указывает на потенциальную возможность увеличения интенсивности черенковского излучения в проволочном метаматериале за счет увеличения плотности заполнения структуры в вертикальной плоскости по сравнению с интенсивностью ИВЧ в обычных средах.

## **Заключение**

В работе были получены следующие основные результаты:

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, что объясняется большим периодом структуры в вертикальном направлении.
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 ее ориентации к электронному пучку.

В заключении хочу выразить глубокую благодарность своему научному руководителю Г.А. Науменко и В.В. Блеко за помощь в проведении экспериментальных исследований и многочисленные плодотворные обсуждения результатов работы, а также А.П. Потылицыну за проявленное внимание к проводимым исследованиям, конструктивную критику и полезные замечания. Также выражаю свою признательность персоналу микротрона, на котором была выполнена большая часть исследований, Г.А. Саруеву и Н.А. Лашуку за обеспечение хорошей и надежной работы ускорителя на протяжении длительного времени.

## Список литературы

1. Lamb H. On group velocity // Proc. London Math. Soc. – 1904. – Vol. 1. – Pp. 473–479.
2. Pocklington H.C. Growth of a Wave-group when the Group-velocity is Negative // Nature. – 1905. – Vol. 71. – Pp. 607–608.
3. Schuster A. An Introduction to the Theory of Optics. – London: Edward Arnold, 1904. – Pp. 313–318.
4. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // УФН. – 1967. – Т. 92. – С. 517–526.
5. Сивухин Д.В. Об энергии электромагнитного поля в диспергирующих средах // Оптика и спектроскопия. – 1957. – Т. 3. – С. 308–312.
6. Веселаго В.Г. Электромагнитные и акустические волны в метаматериалах и структурах // УФН. – 2011. – Т. 181, №11. – С. 1201–1205.
7. Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction // Science. – 2001. – Vol. 292. – Pp. 77–79.
8. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena / Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. – 1999. – Vol. 47, no. 11. – Pp. 2075–2081.
9. Experimental study on several left-handed metamaterials / Ran L., Huangfu J., Chen H. et al. // PIER. – 2005. – Vol. 51. – Pp. 249–279.
10. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's Law / Parazzoli C.G., Greigor R.B., Li K. et al. // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – P. 107401.
11. Novel broadband terahertz negative refractive index metamaterials: analysis and experiment / Wongkasem N., Akyurtlu A., Li J. et al. // PIER. – 2006. – Vol. 64. – Pp. 205–218.

12. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НТБ. – 2009. – №7. – С. 70–79.
13. Pendry J. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85, no. 18. – Pp. 3966–3969.
14. Zhang S., Yin L., Fang N. Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102. – P. 194301.
15. Grbic A., Eleftheriades G.V. Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens// Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 92. – P.117403.
16. Realization of optical superlens imaging below the diffraction limit / Lee H., Xiong Y., Fang N. et al. // New J. Phys. – 2005. – Vol. 7. – P. 255.
17. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. Controlling electromagnetic fields // Science. – 2006. – Vol. 312. – Pp. 1780–1782.
18. Kildishev A.V, Shalaev V.M. Transformation optics and metamaterials // Phys. Usp. – 2011. – Vol. 54. – Pp. 53–63.
19. Fernandes D.E., Maslovski S.I., Silverina M.G. Cherenkov emission in a nanowire material // Phys. Rev. B. – 2012. – Vol. 85. – P. 155107.
20. Reversed Cherenkov-Transition Radiation by a Charge Crossing a Left-Handed Medium Boundary / Galyamin S., Tyukhtin A., Kanareykin A., Schoessow P. // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 103. – P. 190802.
21. Galyamin S., Tyukhtin A. Electromagnetic Field of a Moving Charge in the Presence of a Left-Handed Medium // Phys. Rev. B. – 2010. – Vol. 81. – P. 235134.
22. Vorobev V.V., Tyukhtin A.V. Nondivergent Cherenkov radiation in a wire metamaterial // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 108. – P. 184801.
23. Tyukhtin A.V., Vorobev V.V. Radiation of charges moving along the boundary of a wire metamaterial // Phys. Rev. E. – 2014. – Vol. 89, no. 1. – P. 013202.

24. Experimental Verification of Reversed Cherenkov Radiation in Left-Handed Metamaterial / Xi S., Chen H., Jiang T. // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 103. – P. 190801.
25. Reversed Cherenkov emission of terahertz waves from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core and left-handed cladding / Bakunov M.I., Mikhaylovskiy R.V., Bodrov S.B., Luk'yanchuk B.S. // *Optics Express.* – 2010. – Vol. 18. – Pp. 1684–1694.
26. Синхротрон ТПИ на 1.5 ГэВ / Воробьев А.А., Чучалин И.П., Власов А.Г. и др. – М.: Атомиздат, 1968. – 160 с.
27. Капица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон. – М.: Наука, 1969. – 211 с.
28. Detector for coherent synchrotron radiation measurements from separate electron bunches in a millimeter wavelength region / Naumenko G., Potylitsyn A., Kube G. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* – 2009. – Vol. 603. – Pp. 35–37.
29. Шевелев М.В., Исследование свойств когерентного излучения релятивистских электронов в макроскопических структурах для создания средств диагностики пучков: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.20 / Шевелев Михаил Викторович. – Томск: ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012. – 96 с.
30. Schlott V., Loos H., Gentz H. et al. // *Particle Accelerators.* – 1996. – Vol. 52. – P. 45.
31. Overall comparison of subpicosecond electron beam diagnostics by the polychromator, the interferometer and the femtosecond streak camera / Watanabe T., Sugahara J., Yoshinatsu T. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* – 2002. – Vol. 480. – Pp. 315–327.
32. Measurements of coherent diffraction radiation and its application for bunch length diagnostics in particle accelerators / Castellano M., Verzilov V., Catani L. et al. // *Phys. Rev. E.* – 2001. – Vol. 63. – P. 056501.

33. Electron bunch shape measurement using coherent diffraction radiation / Feng B., Oyamada M., Hinode F., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2001. – Vol. 475. – Pp. 492–497.
34. Sub-millimeter bunch length non-invasive diagnostic based on the diffraction and Cherenkov radiation / Shevelev M., Deng H., Potylitsyn A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2012. – Vol. 357. – P. 012023.
35. Froehlich L. Bunch length measurements using a Martin-Puplett interferometer at the VUV-FEL // DESY-THESIS 2005-011, FEL-THESIS 2005-02. – 2005. – 56 p.
36. Сарычев А.К., Шалаев В.М. Электродинамика метаматериалов. – М.: Научный мир, 2011. – 224 с.
37. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2059.
38. Walser R. Metamaterials: What are they and what are they good for? // APS March Meeting. – Minneapolis, USA, 2000. – Pp. 20–24.
39. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light second edition / Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. – Princeton University Press, 2008. – 304 p.
40. Пафомов В.Е. Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела // Труды ФИАН. – 1969. – Т. XLIV. – С. 28–167.
41. Studying the possibility of extracting material parameters from reflection and transmission coefficients of plane wave for multilayer metamaterials based on metal nanogrids / Belov P.A., Yankovskaya E.A., Melchakova I.V. et al. // Optics and spectroscopy. – 2010. – Vol. 109, no. 1. – Pp. 85–96.
42. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients / Smith D.R., Schultz S., Markoš P. et al. // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65. – P. 195104.

43. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials / Chen X., Grzegorzczak T.M., Wu B.-I. et al. // *Phys. Rev. E.* – 2004. – Vol. 70. – P. 016608.
44. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике. – М.: Мир, 1988. – 432 с.
45. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
46. Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах / Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* – 2006. – Т. 84, № 3. – С. 136–140.
47. Соболева В.В., Шевелев М.В., Блеко В.В. Исследование спектральных, ориентационных и угловых характеристик излучения при взаимодействии поля релятивистских электронов с метаматериалами в миллиметровом диапазоне длин волн // *Известия вузов. Физика.* – 2012. – Т. 55, № 11/2. – С. 141–145.
48. Соболева В.В., Блеко В.В., Науменко Г.А. Излучение Вавилова – Черенкова в метаматериалах // *Известия вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56, № 11/2. – С. 200–204.
49. Vavilov-Cherenkov radiation in meta-materials in millimeter wavelength region / Naumenko G.A., Potylitsyn A.P., Soboleva V.V. et al. // *Days on Diffraction: Proceedings of International Conference.* – Saint Petersburg, Russia, 2013. – Pp. 105-109.
50. Tyukhtin A.V., Vorobev V.V., Galyamin S.N. Radiation of charged-particle bunches passing perpendicularly by the edge of a semi-infinite planar wire structure // *Phys. Rev. E.* – 2015. – Vol. 91. – P. 063202.
51. Когерентное излучение релятивистских электронов в анизотропных периодических проволочных структурах / Науменко Г.А., Соболева В.В., Блеко В.В., Шумейко А.О. // *Известия вузов. Физика.* – 2014. – Т. 57, №. 11/2. – С. 66–68.

52. Coherent transition radiation from wire metamaterials / Naumenko G.A., Bleko V.V., Soboleva V.V., Shumeyko A.O. // *Advanced Materials Research*. – 2015. – Vol. 1084. – Pp. 213–216.
53. Soboleva V.V., Naumenko G.A., Bleko V.V. Radiation of relativistic electrons in a periodic wire structure // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. – 2015. – Vol. 355. – Pp. 132–134.
54. Soboleva V., Naumenko G., Bleko V. Coherent radiation of relativistic electrons in wire metamaterial // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 732. – P. 012007.
55. Tyukhtin A.V., Doilnitsina E.G. Effective permittivity of a metamaterial from coated wires // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2011. – Vol. 44, no. 26. – P. 265401.
56. Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit / Belov P.A., Marques R., Maslovski S.I. et al. // *Phys. Rev. B*. – 2003. – Vol. 67. – P. 113103.
57. Обнаружение дифракционного излучения в диэлектрической мишени в условиях генерации излучения Вавилова-Черенкова / Науменко Г.А., Потылицын А.П., Шевелёв М.В. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 2011. – Т. 94, №.4 – С. 280–283.