

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Мельников Никита Алексеевич

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы **Изучение пространственной области генерации суб-ТГц
излучения в экспериментах по релаксации РЭП в плазме на установке
ГОЛ-3Т**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой,

ученая степень, звание

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2016

Содержание

Содержание	2
Введение	3
1. Установка ГОЛ-3Т	5
2. Цель работы	7
3. Создание новой диагностики	11
3.1. Задачи	11
3.2. Проектирование диагностического прибора	12
3.3. Расчеты в ПО Zemax	18
3.4. Калибровка	21
4. Схема эксперимента	25
5. Полученные результаты и их обработка	26
6. Обсуждение результатов и выводы	28
Список литературы	31

Введение

Взаимодействие плазмы и пучков заряженных частиц, а также следующие за ним процессы изучаются в физике плазмы почти с самого основания этой научной дисциплины. Подобные взаимодействия имеют место как в космических масштабах и физике звезд и Солнца [1,2],-так и используются в экспериментах по термоядерному синтезу для создания плазмы с подходящими для инициирования термоядерной реакции параметрами [3]. В институте ядерной физики имени Будкера исследования такого взаимодействия ведутся на установке ГОЛ-3 [4], открытой ловушке 12 метровой длины с магнитным полем, напряженностью до 5 Тесла. Установка ГОЛ-3 предназначена [4] для проведения экспериментов по удержанию плотной плазмы в магнитном поле с периодически изменяющейся по длине установки напряженностью – многопробочным или гофрированным полем. Кроме того для быстрого нагрева плазмы в установку с торца инжектируется пучок релятивистских электронов большой мощности. В результате взаимодействия электронов плазмы с мощным потоком электронов пучка в плазме возбуждается сильная ленгмюровская турбулентность [5], что приводит к подавлению продольной электронной теплопроводности, составляющей главный канал потерь энергии из подобной магнитной конфигурации [6], а так же к процессам генерации излучения из плазмы в окрестностях плазменной и двойной плазменной частот. В условиях установки ГОЛ-3, где плотность плазмы составляет от 10^{14} до $5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} плазменная частота (1) составляет от 90 до 640 ГГц.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (1)$$

При этом циклотронная частота (2) для электронов при напряженности магнитного поля от 3,6 до 4,7 Тл составляет 88 – 131 ГГц.

$$\omega_{Be} = \frac{eB}{m_e c} \quad (2)$$

Таким образом, частоты, генерируемые при пучково-плазменном взаимодействии, лежат в начале так называемого “терагерцового провала“, – области частот электромагнитного излучения в диапазоне от 0,1 до – 10 ТГц, для которого, вплоть до 90-х годов 20-го века, не существовало ни источников, ни приемников излучения достаточного качества. Нынешний уровень технологий хотя и позволяет создавать оборудование, работающее в данном диапазоне, однако его мощность остается невысокой. Исследования этого излучения ведутся на установке ГОЛ-3 начиная с 2009 года [7]. Первый диагностический комплекс [8] представлял собой четырехканальный полихроматор с разделением каналов по частоте излучения, с возможностью замены частотных фильтров. Эти фильтры были разработаны примерно в то же время для работ по этой и близкой по теме работе по генерации излучения в системе, состоящей из релятивистского пучка электронов и резонатора на основе Брэгговских структур – ЭЛМИ [9]. Для уточнения механизмов генерации в 2009 году на установке ГОЛ-3 был модифицирован источник пучка, и поперечный размер пучка был уменьшен примерно в 3 раза с 43 до 13 мм в диаметре. Было получено подтверждение того, что излучение генерируется именно в месте прохождения пучка в плазме [10]. Кроме того было исследовано распределение мощности излучения по длине установки с помощью одиночных детекторов и было обнаружено, что основная область генерации излучения располагается в пределах первых 2 метров плазменного столба с инжектируемым в него электронным пучком [10], что, согласно данным с диамагнитных петель, соответствует области наиболее интенсивного пучково-плазменного взаимодействия. После возвращения к обычному размеру пучка были созданы новые диагностические комплексы, такие как новый 8 канальный полихроматор, для более точного определения спектрального состава выходящего из плазмы излучения [11, 12], а также поляриметр для определения поляризации излучения плазмы в заданном диапазоне частот. Позже, в

2012 году, в рамках исследований по удержанию при увеличенной длительности пучка, источник пучка был изменен, с коротко импульсного релятивистского, на менее мощный (2–8 МВт) суб-релятивистский (80–100 кэВ) со 100 микросекундной длительностью. Работы по измерению параметров излучения были продолжены в новой конфигурации [13]. Наконец, в 2014 году, в рамках проекта реконструкции комплекса ГОЛ-3, для экспериментов по генерации излучения при пучково-плазменном взаимодействии была создана на имеющейся материально-технической базе установка ГОЛ-3Т.

1. Установка ГОЛ-3Т

Установка ГОЛ-3Т [14], предназначенная для проведения работ по изучению электромагнитного излучения, возникающего при сильно турбулентном [5] взаимодействии плотной плазмы с релятивистским электронным пучком в присутствии сильного продольного магнитного поля состоит из следующих основных частей (Рисунок 1).

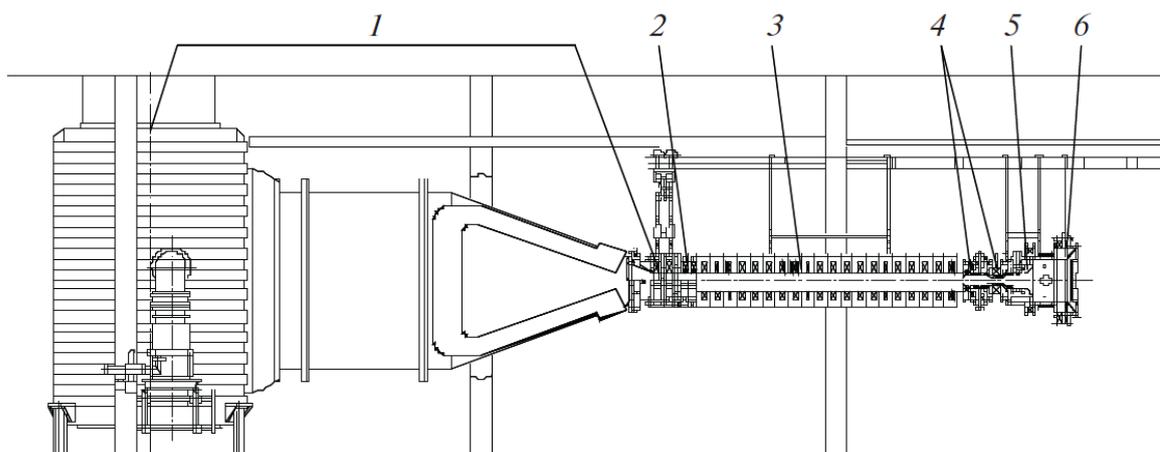


Рисунок 1. Схема установки ГОЛ-3Т: 1 – система создания электронного пучка ускорителя У-2, 2 – входная магнитная пробка, 3 – основной соленоид, 4 – катушки выходных пробок, 5 – система создания начальной плазмы, 6 – расширитель и приемник электронного пучка. Не показаны системы вакуумной откачки и оборудование, размещенное за пределами основного уровня экспериментального зала.

Ускоритель У-2 (Рис.1, 1) [15] предназначен для создания мощного релятивистского пучка микросекундной мощности, используемого для возбуждения в плазме сильной ленгмюровской турбулентности посредством черенковского резонанса между электронами пучка и электронами плазмы. Он создает поток электронов с энергосодержанием до 1 МэВ, током до 40 кА и длительностью от 4 до 8 микросекунд (Рисунок 2).

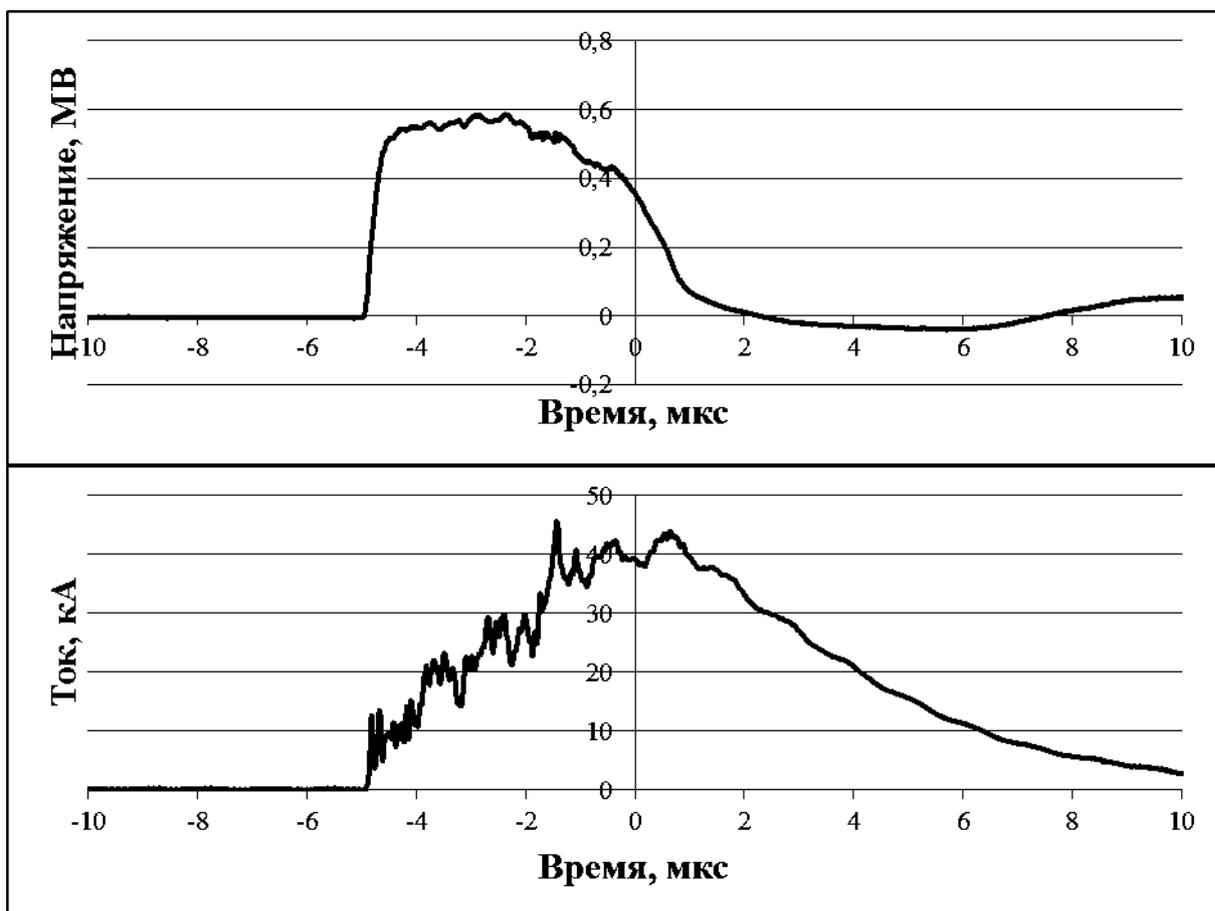


Рисунок 2. Верхний график – напряжение на разряднике ускорителя У-2.

Нижний график – ток на входе в соленоид. Выстрел 352.

Поток электронов формируется на плоском линейном диоде, после чего проходит через фокусирующую систему, которая сжимает его и формирует пучок круглого сечения, пригодный для инъекции в плазму через входную пробку (Рис.1, 2). Основной соленоид (Рис.1, 3) имеет длину 2 метра и состоит из 20 катушек, отстоящих друг от друга с шагом в

11 см, которые могут быть включены в одном из двух режимов. При совместном включении всех катушек, они создают в вакуумной камере, помещенной вдоль их общей оси, однородное магнитное поле в 4,7 Тесла, а при включении каждой второй катушки – гофрированное поле с периодом в 22 см и перепадом напряженностей магнитного поля (пробочным соотношением) 1,5. Для питания главного соленоида используется конденсаторная батарея с напряжением в 4-5 кВ, которая создает в катушках ток синусоидальной формы с амплитудой в 6-10 кА и полупериодом в 25 мс и таким образом максимальное поле существует в катушках в течение ~ 2 мс. За это время в вакуумной камере осуществляется разряд тока [16], создающий начальную плазму необходимой плотности, после чего производится инъекция в полученную плазму электронного пучка. Разряд тока, создающий начальную плазму, происходит с помощью трех кольцевых электродов (Рис. 1, 5). На первом этапе разряд поджигается между двумя близкорасположенными электродами, после чего на третий электрод системы – катод, подается относительно корпуса вакуумной камеры большой потенциал, что приводит к появлению разряда вдоль вакуумного поля, замыкающегося поперек силовых линий на другом конце камеры облаком тяжелого газа аргона, предназначенного для компенсации пространственного заряда электронного пучка.

2. Цель работы

В предыдущих экспериментах по изучению излучения, идущего из плазмы, было обнаружено [13, 10, 8], что оно имеет временную структуру в виде пиков длительностью от 5 до 20 нс. Частота следования пиков различна при разных параметрах эксперимента.

Для объяснения данного явления могут быть предложены разные теории. Первая из них заключается в том, что в плазме независимо излучают

отдельные зоны малого, существенно меньше, чем поперечный размер пучка, размера. В этих малых областях происходит, обусловленная турбулентностью процесса, генерация излучения электромагнитных волн. Предполагаемые в данном случае процессы следующие: линейная конверсия мод, например, верхнегибридной моды в электромагнитное излучение на градиенте плотности плазмы, возникающем, например, при ионно акустических колебаниях, либо процесс трехволнового взаимодействия – слияние двух плазменных волн в одну электромагнитную. Другое объяснение пичковой структуры излучения заключается в том, что в системе плазма пучок наступают резонансные условия, приводящие к генерации излучения областью с характерным размером сопоставимым с поперечным размером системы и движущейся вдоль плазменного столба. Предыдущие диагностические комплексы [8, 12] предназначались для частотного и поляризационного анализа системы и потому улавливали излучение, идущее из всего объема плазмы, видимого через одно из круглых диагностических окон диаметром 30 мм, напротив которых они располагались. Поэтому имеющиеся диагностики не могут разделить два этих механизма генерации. Для этого необходим прибор, способный рассматривать локальные области в плазме в пределах одного диагностического окна. Формализованная задача о рассмотрении пространственной области генерации выглядит следующим образом (Рисунок 3).

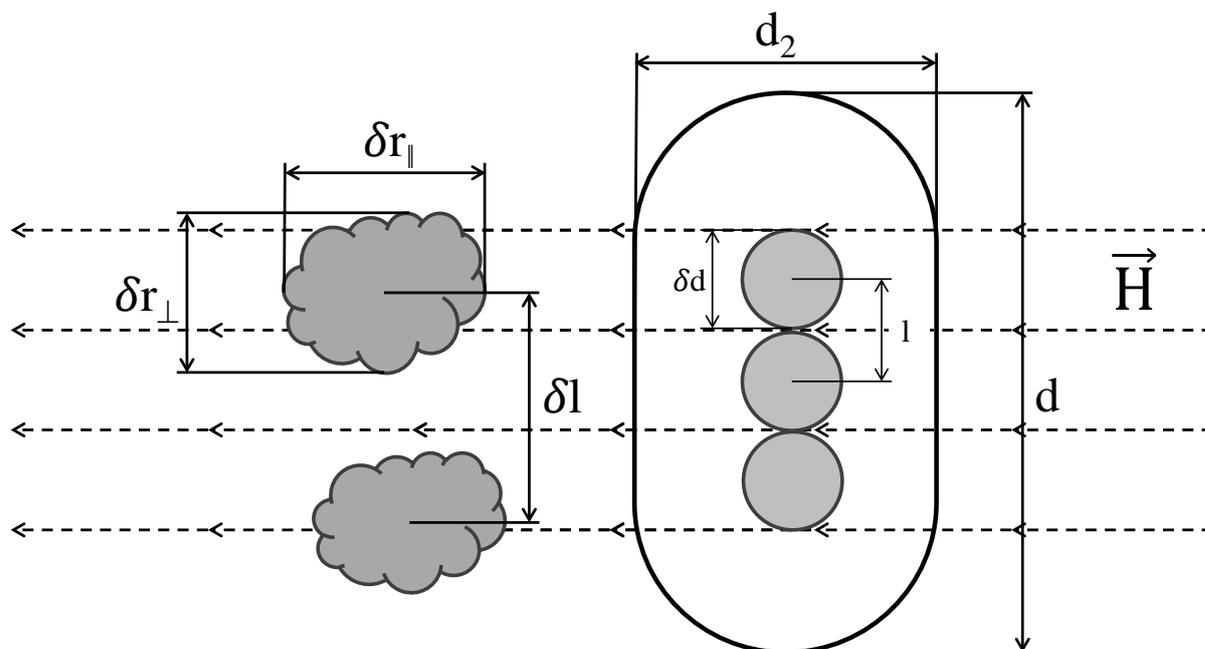


Рисунок 1. Формализация задачи о рассмотрении пространственной области генерации излучения при пучково-плазменном взаимодействии.

Излучающие области (слева): δr_{\parallel} – размер излучающих областей в направлении параллельном направлению магнитного поля, δr_{\perp} – размер излучающих областей в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля, δl – расстояние между излучающими областями.

Области, видимые детекторами и диагностическое окно (справа): d, d_2 – геометрические размеры диагностического окна, l – расстояние между центрами областей, видимыми соседними детекторами, δd – характерный размер области, из которой обнаруживается излучение. \vec{H} – вектор ведущего магнитного поля.

В пространстве, занимаемом плазмой с электронным пучком в ней, существуют области (рис. 3, слева), испускающие излучение в виде пика с характерной длительностью от 5 до 20 нс. Характерный размер этих областей по координате, направленной вдоль магнитного поля составляет δr_{\parallel} , а по координате, перпендикулярной этому направлению – δr_{\perp} , расстояние между областями – δl . В случае реализации первого механизма размер областей δr_{\parallel} , δr_{\perp} будет составлять около 0,1 – 1 мм а расстояние

между ними может быть различно. В случае реализации второго механизма излучения будет наблюдаться одна область с δr_{\perp} сравнимым с диаметром плазмы и произвольным δr_{\perp} . Диагностический прибор рассматривает плазму через диагностическое окно овальной формы с размерами $d=70$ мм и $d_2=30$ мм. Для обнаружения излучающих областей применяются детекторы с пространственным разрешением (рис. 3, справа). Характерный размер области, из которой детектор обнаруживает излучение составляет δd , и должен быть наименьшим из физически возможных. Для наблюдения пространственной структуры излучения используются несколько таких областей, расстояние между которыми составляет l . Это расстояние также должно быть малым, однако области, видимые отдельными детекторами не должны пересекаться между собой. Кроме того, для нахождения двух имеющихся в задаче величин размера излучающей области δr_{\perp} , δr_{\parallel} требуется наличие нескольких точек наблюдения по двум направлениям, либо прибор должен быть легко поворачиваемым, для установления линейки детекторов в нужном направлении.

При прохождении излучающей области через зону, рассматриваемую прибором, пик от её излучения будет наблюдаться в одном (в случае если размер излучающей области меньше либо равен размеру области видимости детектора) либо нескольких соседних детекторных каналах. Считая, что за время акта испускания область не успеет переместиться так, что пик “перейдет” из одного канала в другой либо “придёт” из зоны, не видимой ни одним детектором, полагаем события (пики излучения), не совпадающие во времени с точностью до временных границ пика, независимыми, а сами излучающие их области неподвижными. Кроме того полагаем, что области излучают независимо и потому излучение от них не когерентно. Для случаев, когда размер излучающей области достаточен, чтоб её видели два детектора одновременно, в их каналах будет одновременно наблюдаться пики излучения, различающиеся по

интенсивности. Считая чувствительность каналов одинаковой (либо вводя поправку на неё) и анализируя отношение мощностей пиков можно оценивать поперечный размер излучающей области. Анализируя количество событий с определённым соотношением мощностей излучения от одного пика в разных каналах можно узнать средний размер излучающей области.

3. Создание новой диагностики

3.1. Задачи

Для решения поставленной цели требуется создание нового диагностического прибора, способного разрешить в плазме несколько областей с максимально возможным разрешением. Весь диагностический прибор должен иметь быстроедействие, достаточное для разрешения временной структуры пиков, а также возможность сравнивать расположение пиков в соседних каналах с достаточной точностью. Спектральная чувствительность прибора должна быть такой, чтоб наблюдать излучение только от одного типа взаимодействия. Для определения размеров излучающих областей в приборе должно быть не менее двух пространственно разделенных канала, установленных в линию. Размер областей, из которых обнаруживается излучение, должен быть минимален, как и расстояние между ними. Для определения двух имеющихся в задаче длин, в приборе либо должны быть установлены две линейки детекторов, одна перпендикулярно другой, либо он должен иметь возможность быть повернут на 90 градусов за короткое время. Учитывая большую длину волны и, следовательно, существенность дифракционных эффектов, весь прибор должен быть размещен в непосредственной близости от окна вакуумной камеры, через которое производится наблюдение.

3.2. Проектирование диагностического прибора

Создание новой диагностики началось с выбора оптической схемы. Так как прибор должен обладать пространственным разрешением, расчет поведения излучения в нем лучше всего проводить в приближении геометрической оптики. Для исследуемого излучения с частотами 90 – 500 ГГц длина волны излучения λ составляет от 0,6 – 3 мм. Имея размеры диагностического окна $d=70$ мм и $d_2=30$ мм видим, что эти размеры сравнимы с длиной волны, и потому необходимо учитывать дифракционные эффекты [17, 18], свойственные столь большой длине волны. Используя выражение для числа Френеля Fr (3) получаем, что при заданных длинах волн и минимальном размере диагностического окна d , равном 30 мм переход от геометрической оптики к случаю дифракции Френеля (число Френеля становится из много большего сравнимым с единицей) наступает при значении фокусного расстояния f равного 27 см.

$$Fr = \frac{d^2}{\lambda f} \quad (3)$$

Таким образом, весь прибор должен быть размещен в пределах 30 сантиметров от источника излучения. Радиус вакуумной камеры составляет 5 см, однако в месте размещения диагностического окна в камере размещены вставки прямоугольной формы со стороной ($2R$) в 13 см. Для наблюдения излучения используется диагностическое окно, изготовленное из фторопласта, прозрачное для электромагнитного излучения данного диапазона частот.

Простая схема с одной асферической линзой из фторопласта была выбрана для данного диагностического прибора (Рисунок 4). Показатель преломления этого материала для данного диапазона частот составляет 1,44 и почти не зависит от частоты, а также имеет слабое поглощение.

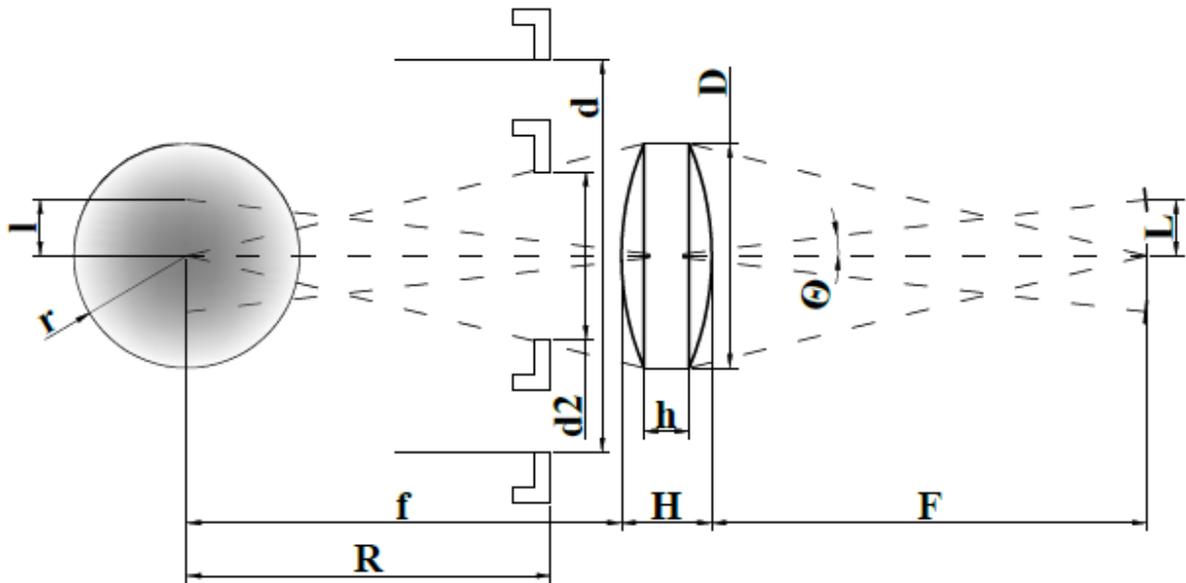


Рисунок 4. Оптическая схема диагностического прибора. l – расстояние между фокусными точками в пространстве предметов, r – радиус области, из которой может идти излучение, f – расстояние от источников до линзы, R – расстояние от центра до окна вакуумной камеры, d , $d2$ – размеры диагностического окна, H – полная толщина линзы, h – толщина линзы по оправе, D – поперечный размер линзы, θ – угловое расстояние между детекторами, F – расстояние между линзой и детекторами.

В такой схеме излучение, испущенное из плазмы, собирается линзой из областей примерно соответствующих конусам с основанием в ширину линзы и высотой равной выбранному фокусному расстоянию. После чего линза переводит собранное излучение в точки, в которых расположены детекторы. Для уменьшения областей пересечения конусов фокусное расстояние было взято таким, чтоб лучи собирались в точку, соответствующую центру вакуумной камеры. На данном этапе, однако, не учитывалось влияние показателя преломления плазмы, учет которого, как будет показано позже, не приведет к ухудшению разрешающих свойств прибора.

Таким образом, учитывая необходимость размещения выделяющих необходимый частотный диапазон элементов схемы непосредственно перед входной линзой получаем, что длина переднего фокусного расстояния (f) будет составлять не менее 7 см. Кроме того важным обстоятельством является то, что вакуумная камера установки ГОЛ-3Т расположена внутри соленоида (Рис. 1, 3), поперечные размеры катушек которого значительны: их внешний радиус составляет 17,3 см, а расстояние между катушками 11 см, что при ширине катушки в 6 см оставляет лишь 5 см в ширину для размещения прибора в непосредственной близости от окна. Следовательно, по крайней мере первые 11 см прибора должны иметь размеры, вписывающиеся в этот формат. Для упрощения механической схемы при креплении детекторов было принято решение о том, что в приборе будет одна линейка, состоящая из трех расположенных в ряд детекторов, имевшихся в распоряжении. Следовательно, для определения двух имеющихся в задаче длин излучающих областей, прибор должен быть поворачиваем относительно оси своей оптической схемы, и оба размера первой части прибора должны иметь поперечный размер не более 5 см. Диаметр линзы был взят равным 4 см, а фокусные расстояния справа (F) и слева (f) – одинаковыми и равными 7,7 см.

Линза имеет круглую апертуру и является апертурной диафрагмой в случае если линейка детекторов расположена вдоль большего размера диагностического окна. Для определения минимального расстояния, на котором могут находиться детекторы, используется оценка радиуса пятна Эйри (4).

$$\delta l = 0,61 \frac{\lambda F}{D/2} \quad (4)$$

Для обеспечения пространственного разрешения радиусы первых светлых областей дифракционной картины не должны пересекаться. Имея длину волны $\lambda=3$ мм (100ГГц), радиус линзы $D/2=20$ мм и заднее фокусное расстояние $F=77$ мм получаем, что радиус центральной светлой области

составляет 7,8 мм. В случае расположения прибора линейкой детекторов вдоль меньшего диаметра окна вакуумной камеры (d_2), следует брать за апертурную диафрагму её длину и, так как окно имеет овальную форму, радиус пятна рассчитывается как расстояние до первого минимума ($m=1$) при дифракции на цели (5).

$$\frac{\delta l}{F} d = m\lambda \quad (5)$$

Для имеющихся в схеме величин значение δl равно 7,7 мм при длине волны в 3 мм. Обобщив полученные результаты, расстояние между детекторами было выбрано равным 1 сантиметру, равно как и расстояние между излучающими точками в плазме.

В разрабатываемом диагностическом приборе будут использоваться детекторные секции [8, 12] на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ) с быстродействием не более 2 нс. Детекторные секции представляют собой цельные функциональные блоки в которых излучение, заходя в детектор через волноводное окно с размерами 3,6 на 1,8 мм, переходящий во внутренний волновод с сечением $0,72 \times 0,36 \text{ мм}^2$, к которому присоединяется микрополосковая линия, соединенная с GaAs диодом с барьером Шоттки и предназначенная для согласования диода с волноводом, вызывает в диоде появление тока усиленного встроенным в секцию операционным усилителем. Кроме того усилитель служит для поддержания на диоде опорного напряжения и согласования его с измерительной линией с сопротивлением в 50 Ом. Важно отметить, что детекторные секции обладают поляризационной чувствительностью и обнаруживают излучение, чей вектор электрического поля \vec{E} направлен вдоль узкой стороны входного волновода. Поперечный размер волноводных секций составляет 2 на 2 см, следовательно, для детектирования ими излучения из точек, расположенных на расстоянии в 1 см друг от друга требуется добавить в оптическую схему волноводы. Волноводы, изготовленные из медной трубки круглого сечения с внутренним диаметром в 4 мм и толщиной стенки в 1 мм были выбраны

для этой цели. В приборе используются 2 изогнутых волновода с радиусом изгиба 3 см и углом в 36 градусов и один прямой длиной 3 см. Таким образом, полный поперечный размер минимальной области, из которой будут улавливаться сходящиеся после линзы в точку волны, определяется суммой размеров пятна Эйри и поперечного размера волновода. Это размер будет составлять 10 мм для длины волны в 3 мм и будет уменьшаться по мере уменьшения длины волны. Вольт-ваттные характеристики детекторов представлены на графике (Рисунок 5).

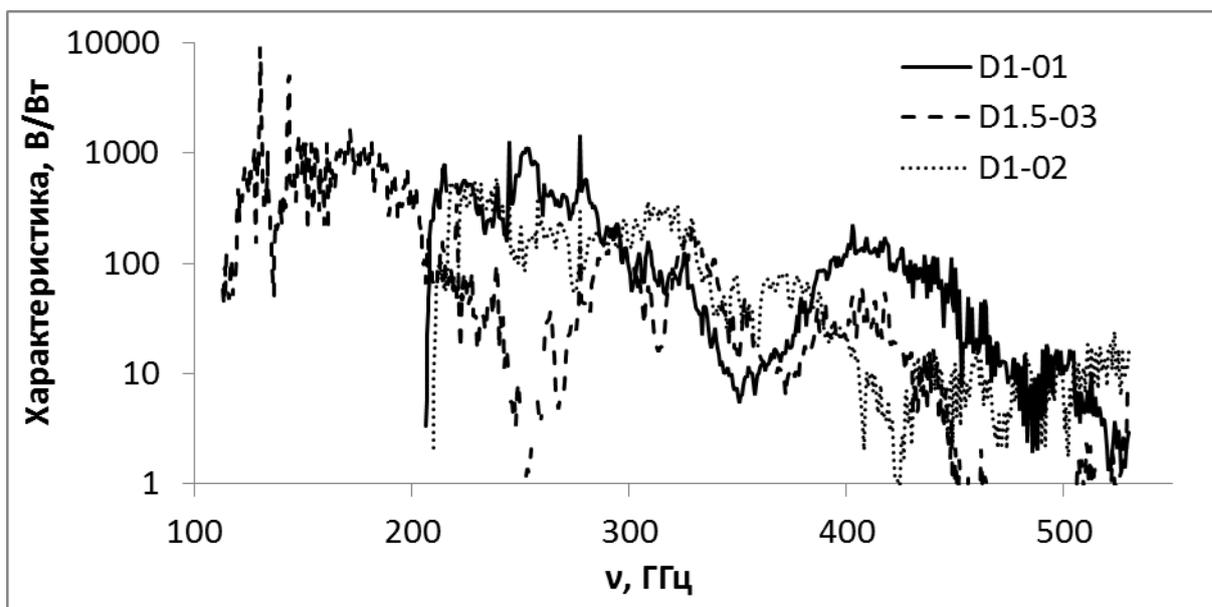


Рисунок 5. Вольт-ваттные характеристики детекторных секций, использованных в диагностическом приборе.

Как видно из представленного графика из трех имеющихся в распоряжении детекторов два имеют хорошую чувствительность, начиная с частоты около 200 ГГц. Следовательно, прибор будет работать в диапазоне частот соответствующем второй плазменной гармонике и выше. Для отделения мощного потока излучения с частотами меньше 300 ГГц в приборе используются отсекающие фильтры с частотой отсечки 300 ГГц, изготовленные по LiGA технологии [9]. Зависимость коэффициента пропускания фильтра от частоты представлена на рисунке (Рисунок 6).

Небольшое расхождение в коэффициенте пропускания фильтра обусловлено несовершенством технологии изготовления.

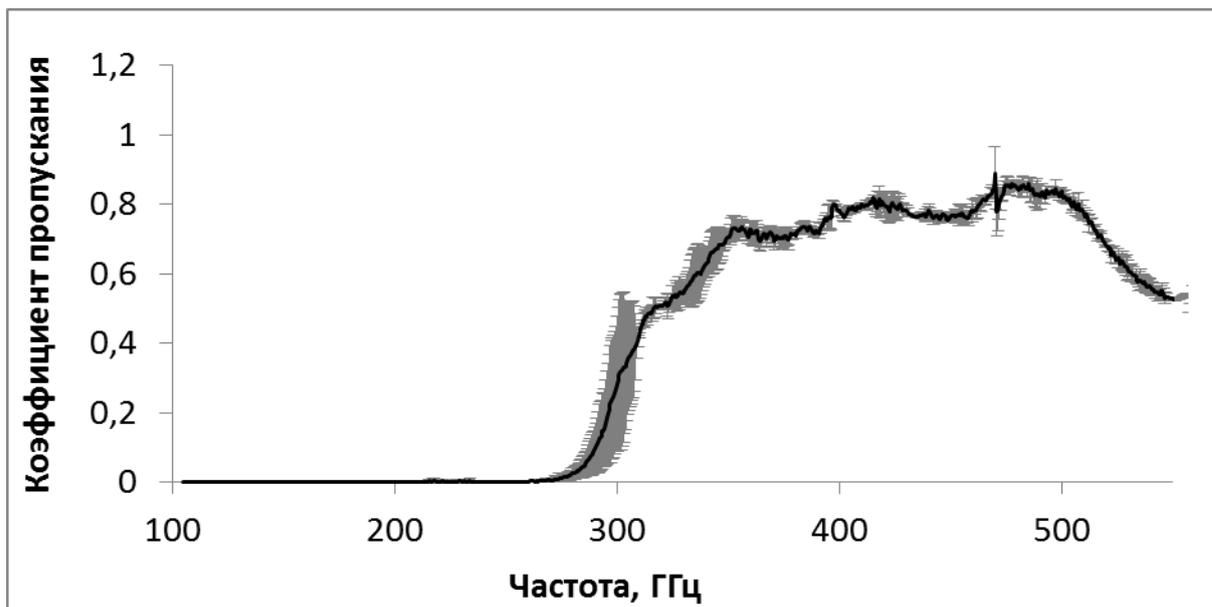


Рисунок 6. Зависимость коэффициента прохождения излучения через фильтр от частоты. Основная полоса пропускания находится в пределах 300 – 500 ГГц.

Полная спектральная чувствительность прибора как системы, состоящей из детекторов и двух отсекающих фильтров и дополнительного аттенюатора с коэффициентом пропускания $T=0,3$ представлена на графике (Рисунок 7).

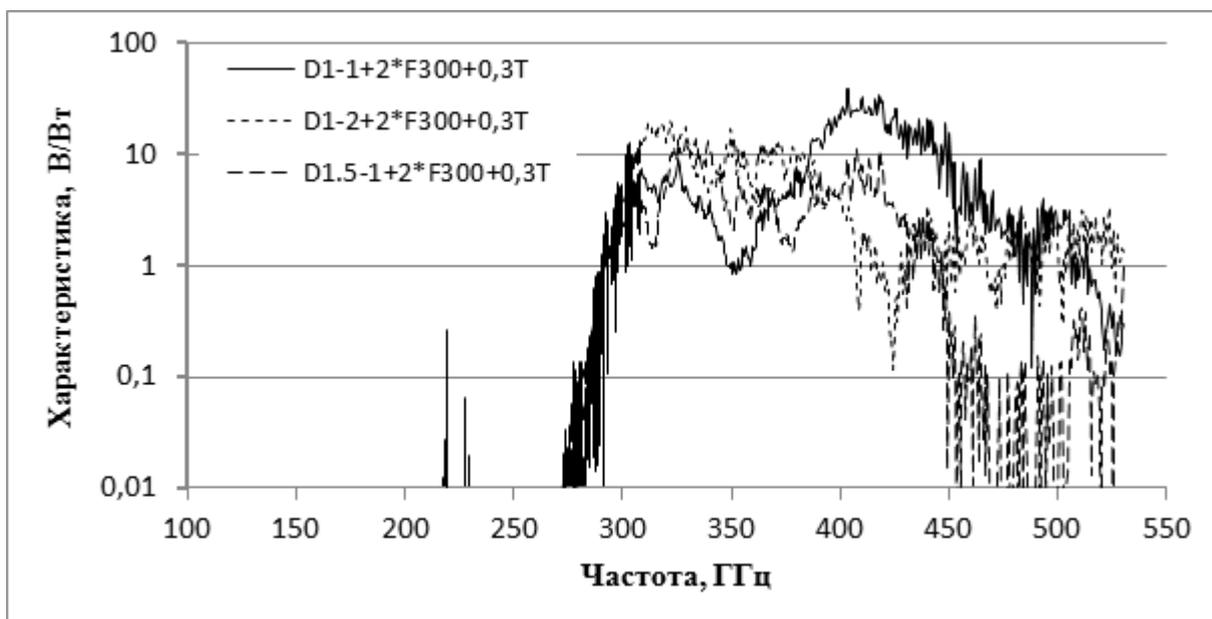


Рисунок 7. Полная спектральная чувствительность прибора. Используются два отсекающих фильтра с частотой отсечки 300 гигагерц, один из которых дополнительно снабжен аттенюатором с коэффициентом пропускания 0,3.

3.3. Расчеты в ПО Zemax

После того как все параметры оптической схемы (фокусные расстояния (f , F), длины (l , L), апертуры (D) и частотный диапазон) были определены форма линзы была оптимизирована в пакете программ для моделирования оптических систем Zemax. Данный программный продукт имеет широкий набор возможностей для создания и оптимизации оптических систем методом трассировки лучей. Однако в общем случае Zemax работает в приближении геометрической оптики, а дифракционные эффекты рассчитываются в простых приближениях либо на ограниченном числе поверхностей оптической схемы. Оптическая схема прибора была смоделирована в Zemax, после чего параметры линзы: фокусное расстояние и коническая постоянная k подгонялись методом наименьших квадратов так чтобы мощность, приходящая в детектор от соответствующего источника, была максимальна. Так как линза была выбрана симметричной, то это уменьшило количество подгоняемых параметров с четырех (по два параметра на переднюю и заднюю поверхности) до двух. Продольная координата z – ‘стрелка прогиба’ поверхности в зависимости от расстояния r от главной оси линзы считается как (6)

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (6)$$

Где c – обратный радиус кривизны поверхности, k – коническая константа, равная квадрату эксцентриситета взятого со знаком минус. Были получены следующие параметры линзы радиусы кривизны передней (+) и задней (–) поверхности $1/c=34,46$; конические постоянные $k= - 2,05$. Кроме того поведение лучей в плазме было промоделировано используя

[19, 20] простейшее приближение для холодной замагниченной плазмы с коэффициентом преломления рассчитываемым по Эппелтону и Хартри (7).

$$N = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2})}{\omega^2(1 - (\frac{0.5\sin[\theta]^2\omega_B^2}{\omega^2} \pm \sqrt{\frac{0.25\sin[\theta]^4\omega_B^4}{\omega^4} + \frac{\cos[\theta]^2\omega_B^2(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2})^2}{\omega^2}}) - \frac{\omega_p^2}{\omega^2})}}}} \quad (7)$$

Уже в этом выражении присутствует зависимость показателя преломления от угла к магнитному полю (θ) и поляризации излучения (\pm). Угловой размер, входной апертуры составляет 15 градусов от главной оптической оси. Проводя расчет показателя преломления для 90 и 75 градусов видим, что различия между ними незначительны, поэтому в моделировании хода лучей можно взять одно значение показателя преломления, для всех углов распространения луча. Также в уравнении Эппелтона-Хартри присутствует зависимость от поляризации волны излучения относительно направления магнитного поля. В предыдущих экспериментах было показано [21], что излучение, идущее из плазмы в основном поляризовано поперек направления магнитного поля (E волна), поэтому и новая диагностика будет смотреть эту поляризацию, имея, однако, возможность рассмотрения другой поляризации с помощью поляризаторов, устанавливаемых непосредственно перед линзой. Результаты трассировки лучей в обратном направлении (от детекторов к областям, из которых будет получено излучение в реальном эксперименте) представлено на рисунке (Рисунок 8).

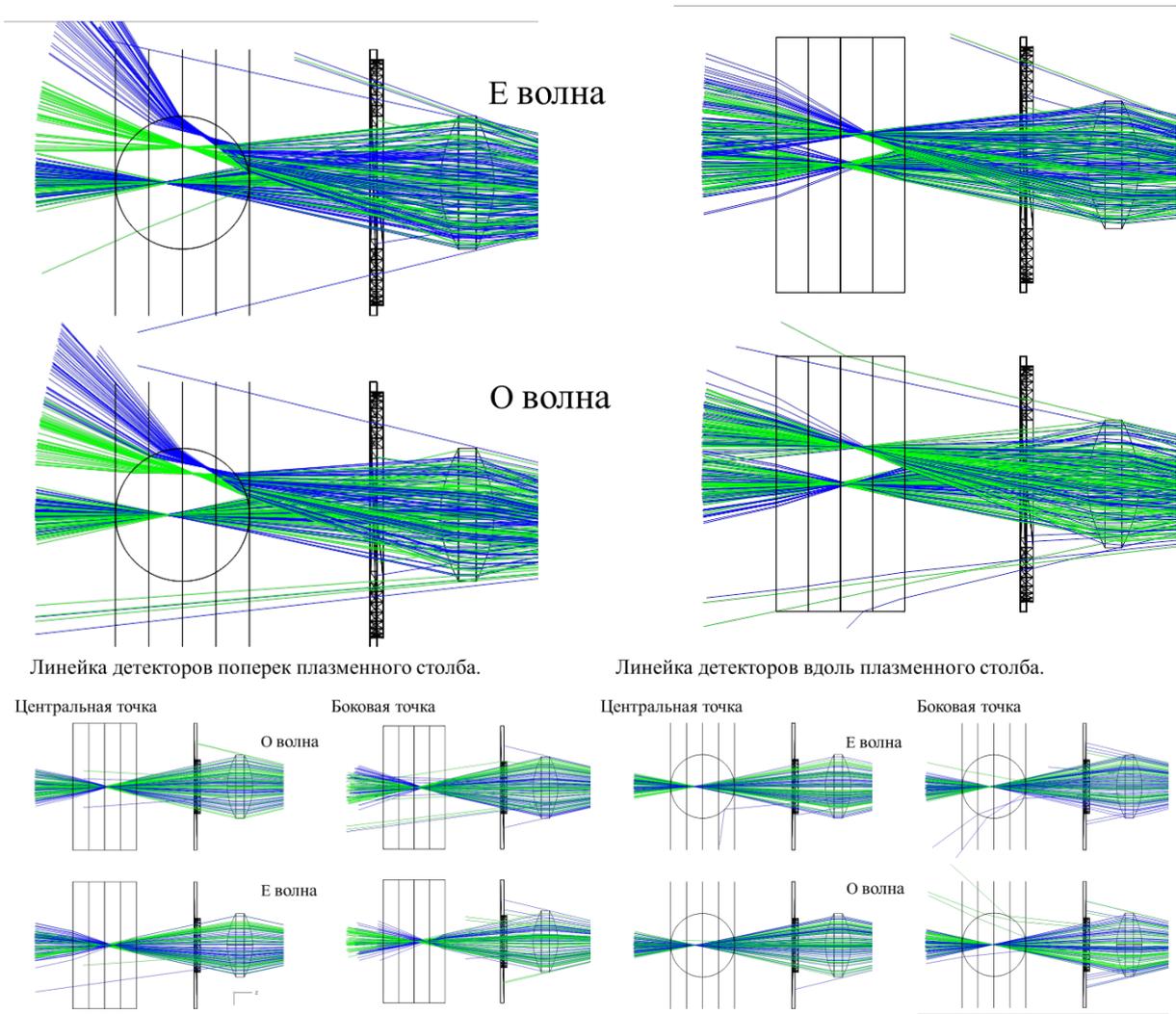


Рисунок 8. Результаты моделирования поведения лучей в плазме методом обратной трассировки лучей в программе Zemax. Сверху – плоскость источников для случаев: слева – случай расположения прибора линейкой детекторов поперек направления магнитного поля, справа – случай расположения прибора линейкой детекторов вдоль направления магнитного поля. Внизу – поведение лучей для центральной и боковой точек для плоскости перпендикулярной плоскости детекторов.

На рисунке взяты два источника из трех существующих. Различное поведение лучей на верхнем рисунке – частоты 300 ГГц (верхние фокусы) и 500 ГГц (нижние фокусы). В остальных случаях поведение лучей разных частот практически идентично. Следовательно, расчеты по разрешающей

способности и калибровки не будут значительно расходиться с реальными измерениями излучения из плазмы.

После того, как все параметры оптической схемы были определены, был спроектирован окончательный облик диагностического прибора. В нем все элементы размещаются на плате-основании, корпус прибора изготовлен из проводящего материала для предотвращения электромагнитных наводок, возникающих при работе установки, а детекторные секции и волноводы изолированы от корпуса прибора. Кроме того внешняя поверхность корпуса покрыта многослойной полиэтилентерефталатовой (лавсановой) пленкой для предотвращения электрического контакта с катушками соленоида. Внутри оптического тракта стенки прибора обклеены поглощающим материалом для предотвращения паразитных засветок. Также для борьбы с электромагнитными помехами все места стыков элементов корпуса были дополнительно укрыты фольгой, а неразъёмные стыки попаяны.

3.4. Калибровка

После изготовления прибора он был прокалиброван для определения реального пространственного разрешения в НГУ в Лаборатории перспективных исследований по миллиметровому и терагерцовому излучению на терагерцовом стенде. Для калибровки прибора использовался источник СВЧ излучения, которым служила лампа обратной волны (ЛОВ). Прибор помещался от выходного фланца ЛОВ на поворотной основе на расстоянии равном расстоянию до его фокусных точек (f). После чего поворотом прибора имитировалось перемещение источника излучения вдоль прямой, в которой лежат точки фокусировки лучей. Выходной фланец волновода имел размер $1 \times 2 \text{ мм}^2$, и такой источник излучения полагался точечным и излучающим равномерно во все стороны в пределах измеряемых углов. График полученной пространственной чувствительности представлен на графике (Рисунок 9).

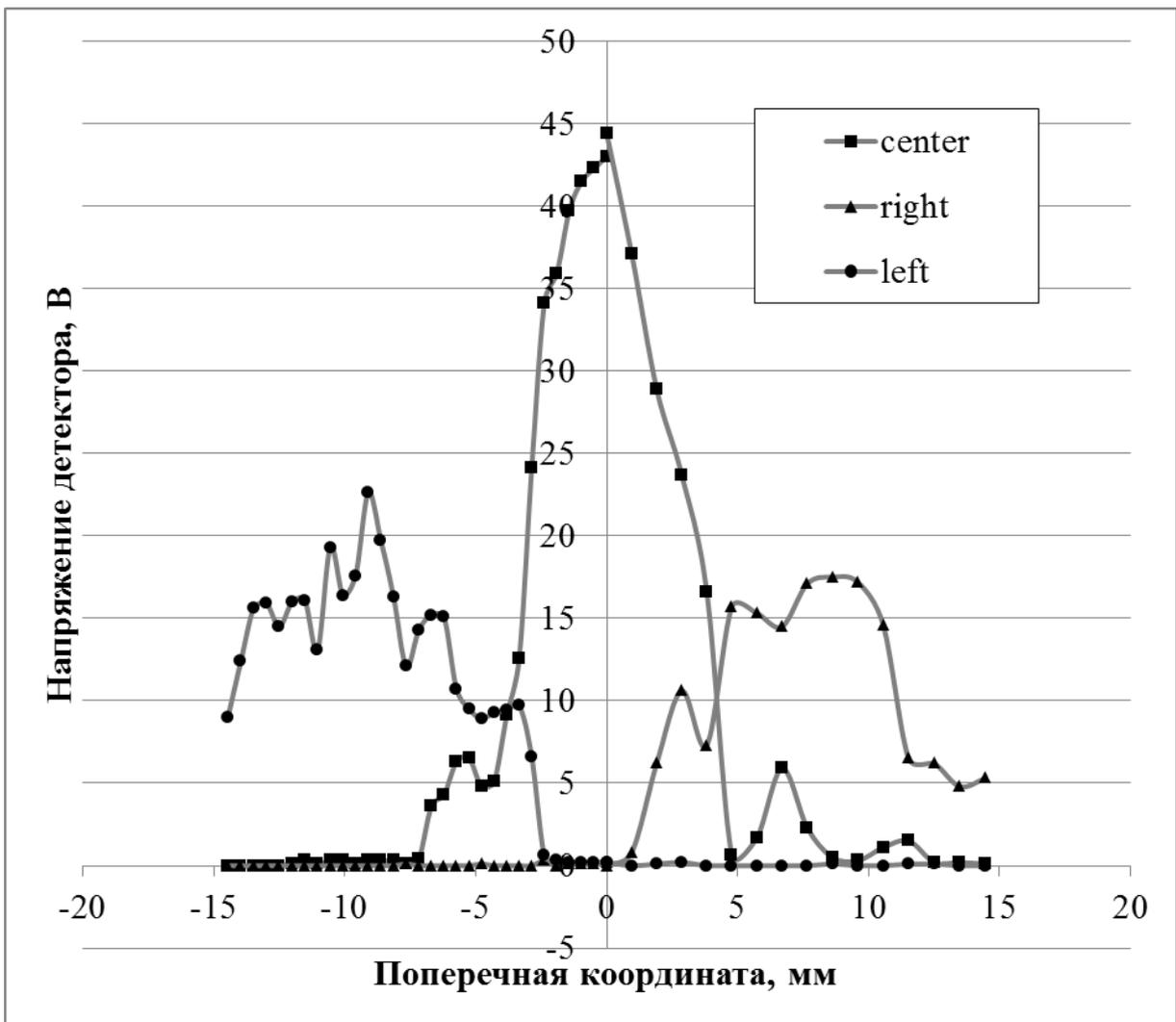


Рисунок 9. Зависимость напряжения на детекторе от положения излучающей точки. Шаг измерения 0,5 мм для левой полуплоскости и 1 мм для правой.

Погрешность определения величины напряжения и погрешность стабильности мощности излучения около 0,1%. Соответствие между положением детектора и использованной детекторной секцией представлено в таблице (Таблица 1).

Таблица 1. Сопоставление детекторов и названий каналов диагностики.

Используемая детекторная секция	Название канала при калибровке	Название канала в эксперименте
D1-02	left	up
D1-01	center	center
D1.5-03	right	down

Для левого и центрального канала использовалась частота излучения 217 ГГц, для правого, вследствие резкого снижения его чувствительности на этой частоте, частота в 181 ГГц. Для центрального канала имеется различие формы кривой для правой и левой половины графика, связанное с порядком измерений и разным шагом измерений для левой и правой полуплоскости. Анализируя данный график, получаем, что диагностика имеет следующие параметры: относительная контрастность по уровню $\frac{1}{2}$ для центрального пикселя – 0,9, для боковых – 1; угловое разрешение 7 градусов; пространственное разрешение 9 мм. Полученные параметры подтверждают способность прибора различить три области, из которых идет излучение. Кроме того, используя данные калибровки, можно получить распределение отношения интенсивностей боковых каналов к центральному в зависимости от размера излучающей области. Для этого полученные при калибровке данные дополняются большим числом точек с помощью сплайна третьей степени, после чего для источника заданного размера суммируются сигналы, видимые несколькими соседними точками (Рисунок 10).

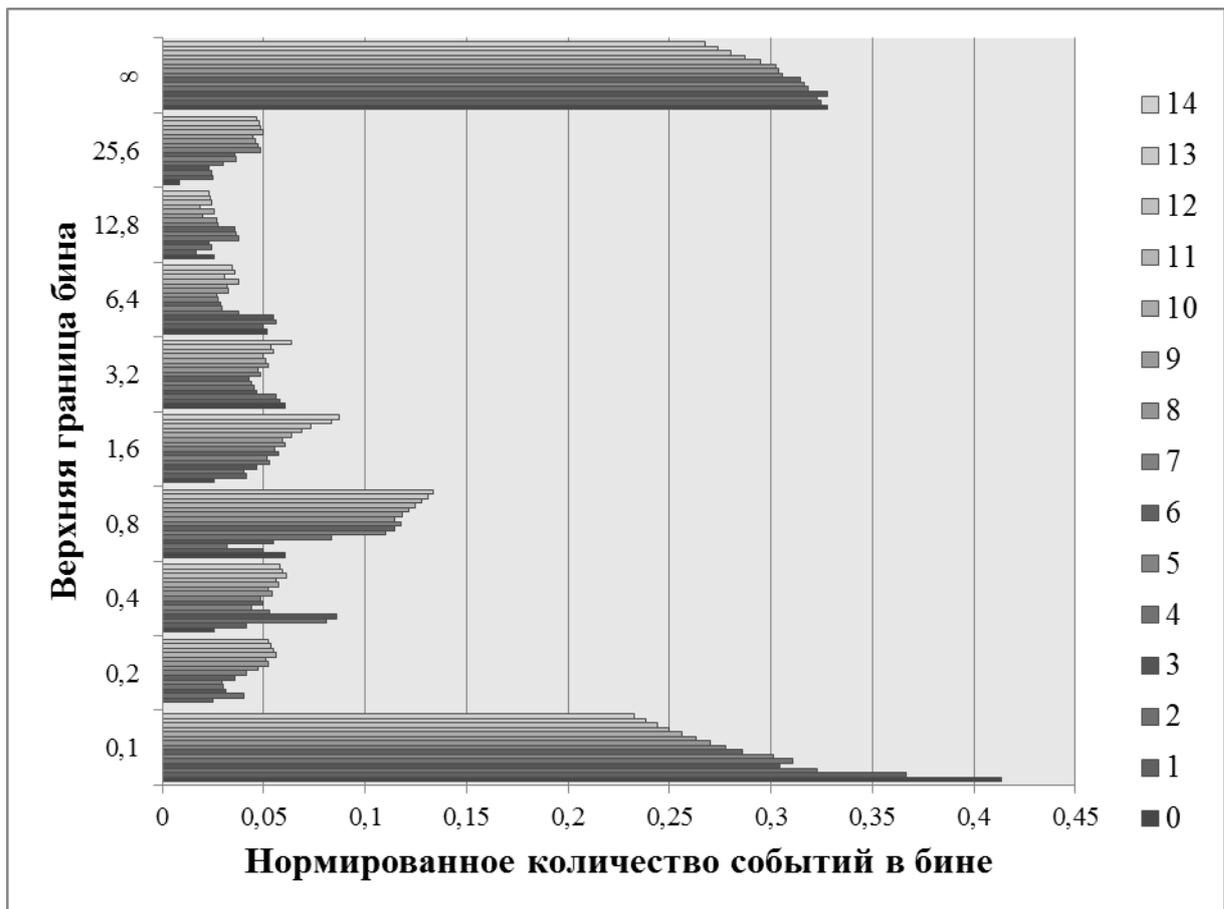


Рисунок 10. Калибровочная гистограмма распределения количества событий в зависимости от величины отношения интенсивностей бокового канала left к центральному center. Нормирована на общее число событий.

Порядковый номер бина в группе соответствует значению размера источника в мм, указанного справа.

Учитывая тот факт, что пространственное разрешение измерялось в калибровке для частот более низких, чем рабочие, можно утверждать, что при повышении частоты оно будет только улучшаться при повышении частоты из-за уменьшения влияния волновых эффектов. Для частоты в 300 ГГц радиус пятна Эйри (4) сократится в полтора раза по сравнению с частотами, на которых проводилась калибровка, однако суммарное пространственное разрешение увеличится не столь значительно из-за большого постоянного вклада, связанного с поперечным размером волновода. Сравнивая результаты подобного распределения для экспериментальных данных с полученным теоретическим распределением

методом наименьших квадратов можно подсчитать размер излучающей области в зависимости от величины отношения интенсивностей пиков для двух каналов. Аналогичные расчеты, проведенные для второго бокового канала, уточнят этот расчет.

4. Схема эксперимента

В первой серии экспериментов на установке ГОЛ-3Т, проводимых с постоянным магнитным полем в 4,7 Тл по всей длине соленоида, прибор устанавливался на свое место у диагностического окна между 4-5 катушкой соленоида (Рисунок 11) в одном из двух возможных положений линейкой детекторов поперек либо вдоль направления магнитного поля соленоида.

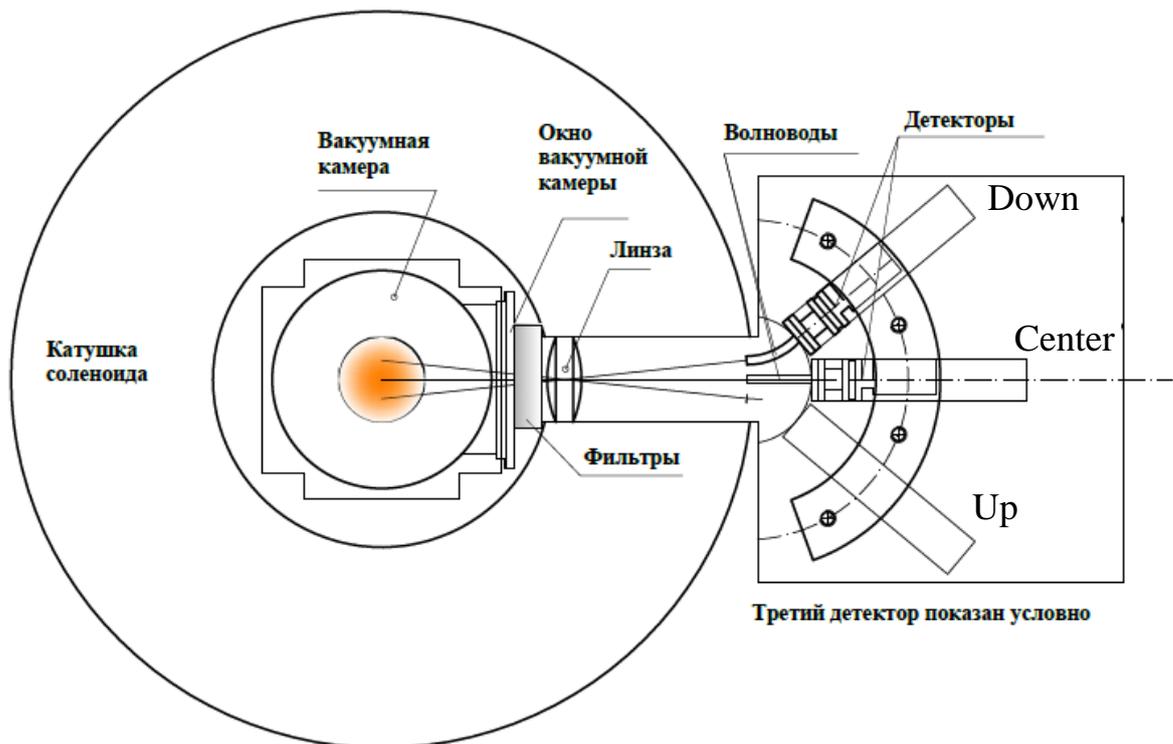


Рисунок 11. Схема установки прибора в экспериментах по регистрации суб-ТГц излучения. Справа указаны названия диагностических каналов.

Блок частотных и поляризационных фильтров, обладая достаточно малой толщиной, устанавливался непосредственно на окно вакуумной камеры. Поляризация принимаемого излучения выбиралась перпендикулярной

направлению магнитного поля (Е волны). Корпус прибора не имел электрического контакта с частями соленоида благодаря своей электроизоляции. Сигналы с детекторов передавались из них на АЦП по экранированному кабелю, в котором также размещались провода питания усилителей детекторных секций. Экраны кабеля и прибора имели электрический контакт, включавший в себя также корпус измерительного бокса (крейта), в котором размещались АЦП и источники питания. В работе использовались аналого-цифровые преобразователи А12500 с частотой дискретизации 500 МГц, размерностью выходной шины 12 бит, 3М отсчетов на канал и синхронным стартом [22] от измерительного комплекса установки ГОЛ-3Т [23].

5. Полученные результаты и их обработка

Типичный вид осциллограмм получаемых прибором в выстреле с пучком представлен на графике (Рисунок 12).

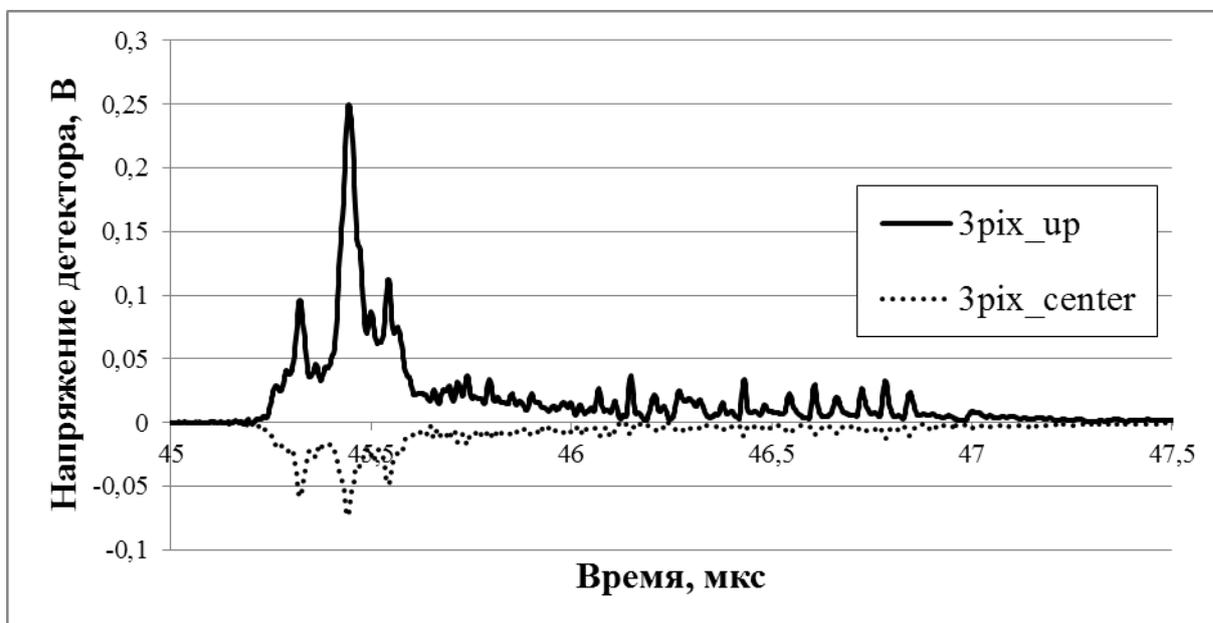


Рисунок 12. Типичная форма двух каналов разрешающей диагностики. Сигнал канала 3pix_center отражен относительно горизонтальной оси для наглядности. Выстрел 288.

На полученной осциллограмме видна характерная пиковая структура излучения. Анализируются два канала измерений из трех, так как в третьем канале в большинстве выстрелов присутствовал зашкал сигнала в измерительной секции вызванный, по всей видимости, несовершенством частотно-селективной части прибора. Размещение частотных фильтров вне закрытого оптического тракта приводило к переотражениям сигнала, не проходящего через фильтры и обнаружением этой паразитной засветки третьим каналом (down), вследствие, высокой чувствительности, применяемой в этом канале детекторной секции d1.5-03. Погрешность измерений АЦП составляет половину кванта оцифровки и при разрядности в 12 бит и пределах измерения от -1, 2 до 1,2 вольта равна 0,3 мВ.

Для обработки сигнала использовалось программное обеспечение MATLAB позволявшее автоматизировать процесс обработки данных и набора статистики. Обработка сигналов от одного выстрела происходила следующим образом. В первую очередь сигнал усреднялся по 15 точкам, что давало ошибку в определении значения сигнала как стандартную ошибку среднего, рассчитываемую как отношение стандартного отклонения шумового сигнала к корню из количества точек усреднения. Если стандартное отклонение шумового сигнала равно $6e-4$ вольта, то эта погрешность составит $1,5e-4$ вольта. После этого в сигнале искались точки соответствующие центру пика, как такое положение точек трех сигнала при котором центральная больше по значению, чем две соседние. Аналогично находились положения провалов, которые считались границами пика. Затем пики в двух каналах сравнивались и если они совпадали с заданной точностью (отступ в 3 такта АЦП, следующий из уровня шума), то пики в соседних каналах считались проявлением одного и того же события испускания излучения светящейся областью. Далее вычислялось отношение величин пиков, взятых как разность амплитуды пика к средней амплитуде его границ. Полученные данные собирались в гистограмму, показывающую зависимость количества событий с данным

отношением амплитуд пиков от этого отношения. Для двух положений прибора поперек и вдоль направления магнитного поля были получены следующие гистограммы (Рисунок 13).

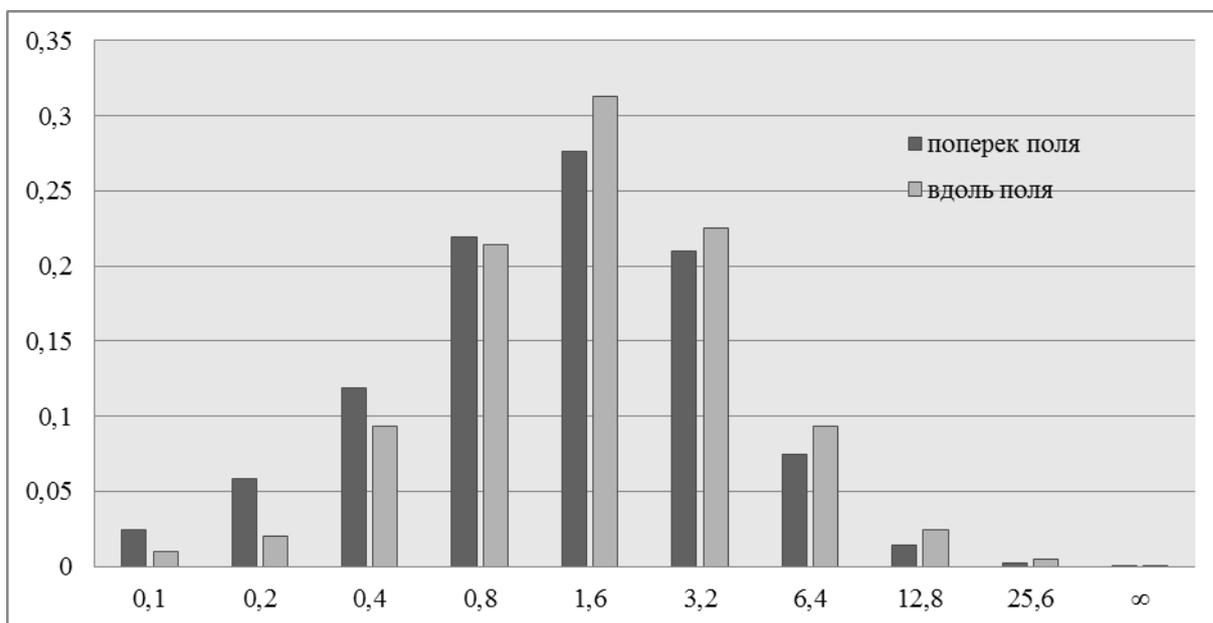


Рисунок 13. Экспериментальная гистограмма распределения количества событий в зависимости от величины отношения интенсивностей бокового канала left к центральному center. Нормирована на общее число событий.

6. Обсуждение результатов и выводы

Как видно полученные гистограммы не совпадают с калибровочными в бинах, соответствующих самым малым и самым большим значениям отношения сигналов. Это объясняется тем, что при анализе осциллограмм отбрасывались случаи, в которых пик существовал только в одном канале. Однако хорошее разбиение позволяет сравнивать эти гистограммы только по средним бинам, так как при движении к крайним бинам наблюдается достаточно плавный спад количества событий как в калибровочной, так и в экспериментальной гистограммах.

Проводя сравнение методом наименьших квадратов получаем, что размеры излучающей области в продольном и поперечном направлении совпадают и равны примерно 4,5 мм. Хотя для случая продольной

ориентации гистограмма имеет больше событий в правой части, что может свидетельствовать о том, что размер излучающей области немного больше чем в случае поперечной.

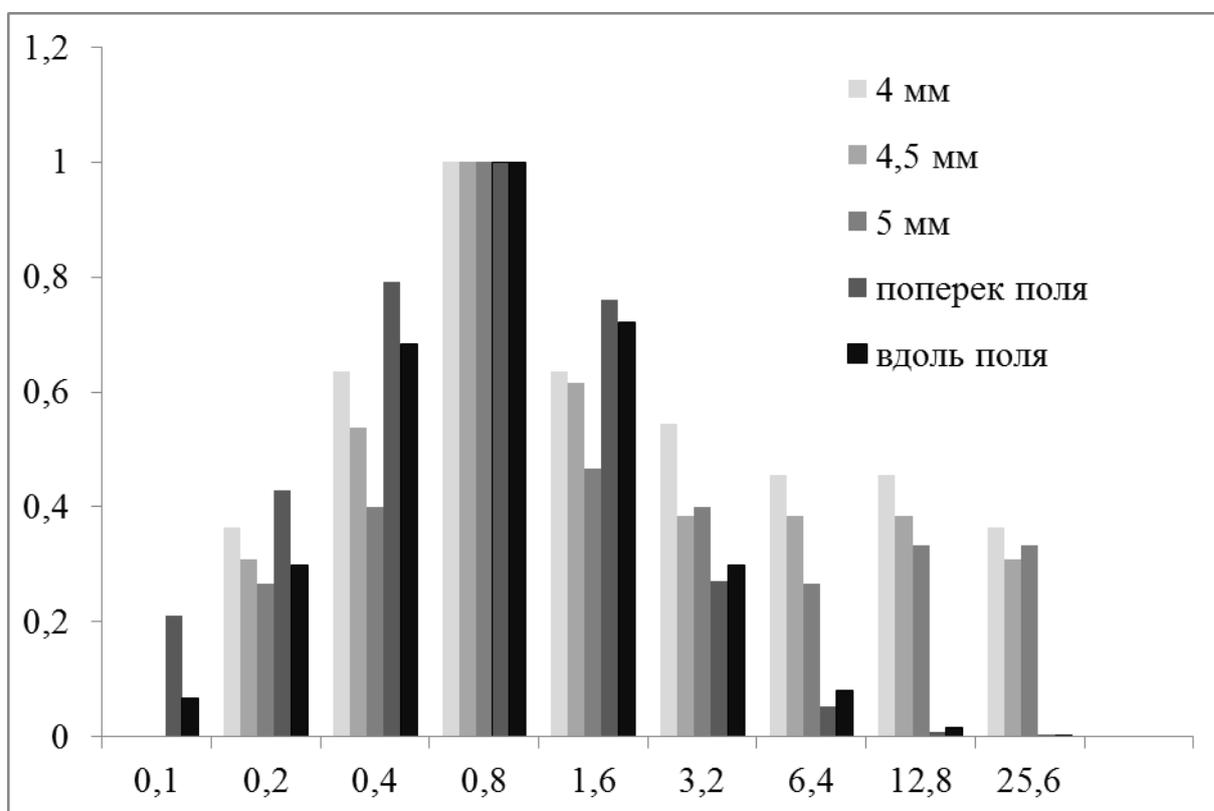


Рисунок 14. Сравнение экспериментальных гистограмм распределения количества событий в зависимости от величины отношения интенсивностей бокового канала left к центральному center с калибровочными для трех наиболее подходящих размеров источников.

В данной работе исследовалась пространственная структура суб-терагерцового излучения генерирующегося при сильно турбулентном взаимодействии мощного релятивистского пучка электронов с плотной плазмой в сильном магнитном поле. Было создан диагностический прибор для изучения области генерации излучения и определения размера излучающих областей, дающих мелкомасштабную пикированную структуру. Он позволяет различить в плазме три (в случае отсутствия низкочастотной составляющей) области из которых регистрируется излучение. Прибор обладает компактностью и мобильностью. В

экспериментах было обнаружено, что размеры излучающих областей составляют около 4,5 мм в направлениях продольном и перпендикулярном к магнитному полю.

Список литературы

1. Theory of type II radio emission from the foreshock of an interplanetary shock / S. A. Knock, Iver H. Cairns, P. A. Robinson, Z. Kuncic // Journal of Geophysical Research. — 2001. — Vol. 106, no. A11. — P. 25041.
2. Reid Hamish Andrew Sinclair, Ratcliffe Heather. A review of solar type III radio bursts // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2014. — Vol. 14, no. 7. — P. 773–804.
3. Temporal structure of double plasma frequency emission of thin beam heated plasma / V. V. Postupaev, A. V. Burdakov, I. A. Ivanov et al. // Physics of Plasmas. — 2013. — Vol. 20, no. 9. — P. 092304.
4. Burdakov A., Azhannikov A., Astrelin V., Beklemishev A., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kotelnikov I., Kovenya V., Kozlinskaya T., Kuklin K., Kuznetsov A., Kuznetsov S., Lotov K., Timofeev I., Makarov A., Mekler K., Nikolaev V., Popov S., Postupaev V., Polosatkin S., Rovenskikh A., Shoshin A., Shvab I., Sinitsky S., Sulyaev Yu., Stepanov V., Trunoy Yu., Vyacheslavov L., Zhukov V., Zubairov Ed. // Fusion Sci. Technol. 2007.V. 51. № 2Т. P. 106.
5. Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V. et al. // Fusion Sci. Techn. 2009. V. 55. № 2Т. P. 63.
6. Открытые ловушки / Рютов Д. Д. // УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, 1988. Том 154, выпуск 4.
7. Quasi-Optical Spectral System for Submm-Wave Radiometry of Turbulent Plasma / S.A. Kuznetsov, A.V. Arzhannikov, Yu.G. Goncharov, et al. // Proc. 39th European Microwave Conference (EuMC-2009), Rome, Italy, 173-176, 2009.
8. МНОГОКАНАЛЬНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ / С. А. Кузнецов, А.

- В. Аржанников, А. В. Гельфанд, А. В. Зоренко, Б. П. Горшунов // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Том 5, выпуск 3.
9. Development and Characterization of Quasi-Optical Mesh Filters and Metastructures for Subterahertz and Terahertz Applications / S.A. Kuznetsov, A.V. Arzhannikov, V.V. Kubarev, et al., // Key Engineering Materials, 437, 276-280, (2010).
 10. A. V. Arzhannikov, A.V. Burdakov et al., "Experimental and theoretical investigations of high power sub-millimeter wave emission at two-stream instability of high-current REB", Transactions Of Fusion Science And Technology, 63, 82-87 (2013).
 11. Diagnostic system for studying generation of subterahertz radiation during beam-plasma interaction in the GOL-3 facility / A. V. Arzhannikov, et al., // , Plasma Physics Reports, 2012. 38, 450.
 12. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕНЕРАЦИИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3 / А. В. Аржанников, А. В. Бурдаков, Л. Н. Вячеславов, И. А. Иванов, М. В. Иванцовский, А. А. Касатов, С. А. Кузнецов, М. А. Макаров, К. И. Меклер, С. В. Полосаткин, В. В. Поступаев, С. С. Попов, С. Л. Сеницкий, В. Ф. Скляр, М. К. А. Тумм // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2012. том 38, № 6, с. 496–505.
 13. MM-wave emission by magnetized plasma during sub-relativistic electron beam Relaxation / I. A. Ivanov, A. V. Arzhannikov, A. V. Burdakov, et al., // Physics Of Plasmas 22, 122302 (2015).
 14. ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ГОЛ-3Т / А. В. Аржанников, А. В. Бурдаков, В. С. Бурмасов, И. А. Иванов, С. А. Кузнецов, К. Н. Кушлин, К. И. Меклер, С. В. Полосаткин, В. В. Поступаев, А. Ф. Ровенских, С. Л. Сеницкий, В. Ф. Скляр // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2015. Т. 41, № 11, с. 935–945.

15. Arzhannikov A.V., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L., Smirnov A.V., Yushkov M.V., Zotkin R.P. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. P. 1657.
16. ФОРМИРОВАНИЕ ДЛИННОГО СТОЛБА ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ / А. В. Бурдаков, В. С. Койдан, К. И. Меклер, С. В. Полосаткин, В. В. Поступаев // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2014. Т. 40, № 3, с. 223–240.
17. М. Борн, Э. Вольф Основы оптики / М., 1970 г., 856 с.
18. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 4. Оптика / Д. В. Сивухин – М.: Физматлит, 2006. 792 с.
19. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург – М.: Наука, 1967. – 684 с.
20. Кадомцев, Б. Б. Коллективные явления в плазме / Б. Б. Кадомцев – М.: Наука, 1976. – 240 с.
21. V. Arzhannikov, A. V. Burdakov, et al., “Observation of spectral composition and polarization of sub-terahertz emission from dense plasma during relativistic electron beam–plasma interaction”, Physics of Plasmas 21, 082106 (2014).
22. Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Зубарев П.В., Иванова А.А., Иваненко С.В. // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 3. С. 75.
23. Бурдаков А.В., Квашнин А.Н., Койдан В.С., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Хильченко А.Д. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 38.