

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный  
университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)**

**Физический факультет**

**Квалификационная работа на соискание  
степени бакалавра**

**Кафедра Физики плазмы**

**Мельников Никита Алексеевич**

---

**Название работы:**

**Пространственное разрешение в экспериментах по  
регистрации субмиллиметрового излучения на установке  
ГОЛ-3**

**Научный руководитель:**

канд. физ.-мат. наук Иванов Иван Анатольевич \_\_\_\_\_

**Новосибирск – 2013 год**

# Содержание

Введение.....	2
1. Постановка задачи.....	2
2. Пространственное разрешение .....	3
2.1 Схема эксперимента на ГОЛ-3.....	3
2.2 Области видимости .....	3
2.3 Отражающая способность стенки вакуумной камеры.....	5
3. Моделирование процесса .....	7
4. Эксперимент на участке вакуумной камеры установки ГОЛ-3.....	9
4.1 Схема экспериментального стенда.....	9
4.2 Методика измерений.....	11
4.3 Полученные данные.....	11
4.4 Обработка данных.....	12
4.5 Учет погрешностей .....	13
4.6 Результаты измерений .....	14
4.7 Соответствие результатов измерений с результатами моделирования .....	15
Выводы и заключение.....	16
Библиографический список.....	16

## Введение

Установка ГОЛ-3 представляет собой соленоид с гофрированным магнитным полем [1]. Такая конфигурация установки, называемая также многопробочной ловушкой [2], может быть использована для удержания плазмы с термоядерными параметрами [3]. Для нагрева электронов и подавления продольной электронной проводимости с торца установки дополнительно вводится релятивистский электронный пучок [4]. При взаимодействии электронного пучка с плазмой, находящейся в магнитной ловушке, происходит генерация излучения в субмиллиметровом диапазоне (100 – 500 ГГц) [5]. Этот диапазон соответствует (1) диапазону плазменной (180 ГГц) и двойной плазменной (360 ГГц) частот при данной плотности плазмы ( $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ).

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m_e}} \quad (1)$$

Мощность излучения составляет до 100 ватт в 1 стерадиан из одного кубического сантиметра плазмы [5]. Регистрация этого излучения является важной задачей как для понимания процессов приводящих к генерации излучения, так и для создания источников излучения в данном диапазоне. Однако интерпретация полученных результатов будет зависеть от того, из какой по своим размерам области было излучено данное излучение.

Цель данной работы заключается в определении размеров излучающей области, видимой диагностикой в экспериментах по регистрации терагерцового излучения на установке ГОЛ-3.

## 1. Постановка задачи

Для определения размеров области, из которой диагностика обнаруживает излучение, необходимо провести моделирование процесса отражений и натурные эксперименты с использованием реальной секции вакуумной камеры установки. В натуральных экспериментах источник излучения, который должен давать направленный пучок излучения и иметь возможность перемещаться вдоль секции вакуумной камеры, помещается в определенную область камеры, после чего детектором излучения идентичным тем, что установлены в диагностике измеряется излучение, доходящее до детектора.

## 2. Пространственное разрешение

### 2.1 Схема эксперимента на ГОЛ-3

Субмиллиметровое излучение, генерируемое при взаимодействии электронного пучка с плазмой, проходило через круглое фторопластовое окно в стенке вакуумной камеры и регистрировалось диагностикой излучения. Диаметр окна составлял 30 мм, диаметр входного отверстия прибора диагностики – 70 мм. Схема эксперимента по регистрации излучения представлена на рисунке 1.

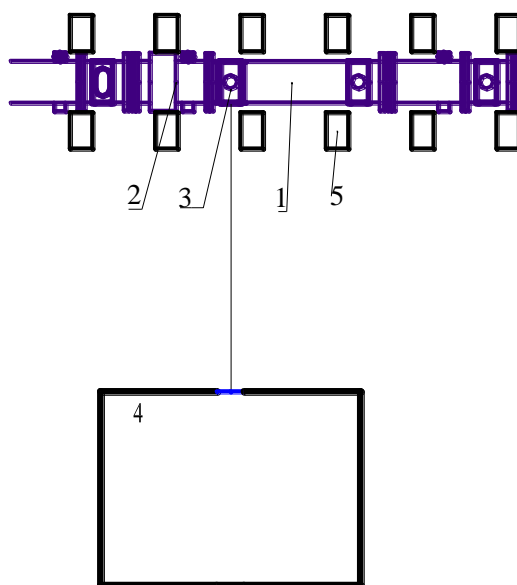


Рис. 1. Схема эксперимента на ГОЛ-3. 1 – секция вакуумной камеры, 2 – секция вакуумной камеры с лимитерами внутри, 3 – окно вакуумной камеры, из которого регистрируется излучение, 4 –диагностика излучения, 5 –катушка электромагнита.

### 2.2 Области видимости

Область пространства, из которой наблюдается генерируемое излучение, складывается из нескольких составляющих, которые могут существенно увеличить ее размер. Эти области указаны на рисунке 2.

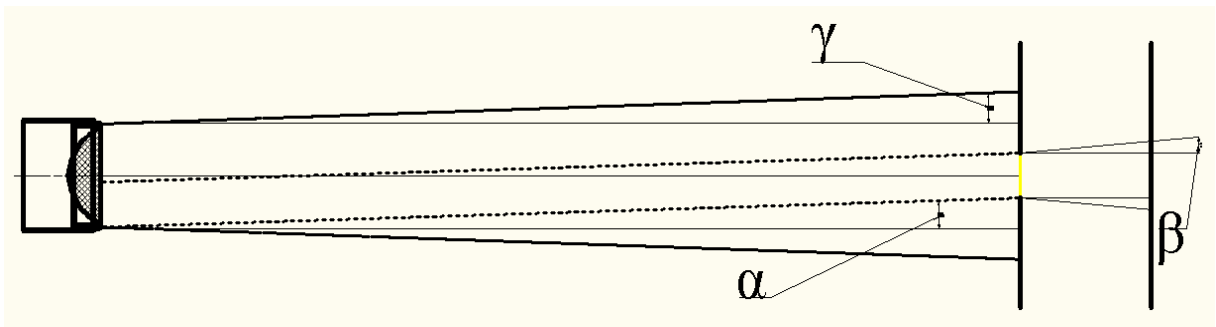


Рис. 2. Области видимости диагностики.  $\alpha$  – угол из геометрической области,  $\beta$  – угол из дифракции на крае окна камеры,  $\gamma$  – угол из дифракции на детекторе.

Во-первых, область, видимая из геометрической оптики. Диаметр окна камеры через которое наблюдается излучение равен 30 мм. Таким образом, через окно виден участок вакуумной камеры площадью  $707 \text{ мм}^2$ . Дополнительно эту область расширяет тот факт, что диаметр входного окна детектора больше диаметра окна установки. Это превращает зону видимую детектором из цилиндра с радиусом основания 15 мм в усеченный конус с меньшим основанием радиусом 15 мм и углом раствора в  $1,6^\circ$ . В экспериментах на стенде приемник излучения находился непосредственно перед окном камеры, что убирает расширение области из геометрической оптики.

Во-вторых, расширение этой области, определяемое дифракционными эффектами от края окна и от самого детектора. В имеющемся диапазоне частот эти эффекты обуславливают небольшую расходимость от  $1/50$  радиана (1 градус) на частоте 500 ГГц до 0,09 радиана (5 градусов) на частоте 100 ГГц. При диаметре вакуумной камеры в 100 мм, и центральности плазменного шнура в ней, расширение области видимости для центра вакуумной камеры будет составлять от 1 мм с каждой стороны для частоты 500 ГГц до по 5 мм с каждой стороны для частоты 100 ГГц. Итоговая длина видимого плазменного шнура на центральной оси камеры с учетом этих эффектов должна составить от 32 до 40 мм. Углы, найденные из дифракционных эффектов, будут больше угла определяемого величиной входного отверстия диагностики. Поэтому в экспериментах по моделированию регистрации излучения было решено отказаться от дополнительного отдаления детектора от окна. Дифракция на детекторе связана с его фокусирующей системой (гиперболической линзой) и дает угловое разрешение в 2 градуса. Таким образом, в экспериментах по определению пространственного разрешения угловое разрешение составляет 2 градуса.

В-третьих, электромагнитное излучение путем многократных отражений от стенок камеры может пройти в ней существенную длину, прежде чем выйти через окно и быть зарегистрировано детектором. Кроме того внутренняя поверхность вакуумной камеры неоднородна, она содержит лимитеры (ограничители плазменного шнура), один из которых находится на расстоянии 68 мм от края окна из которого регистрируется излучение. Материал лимитеров – ситалл обладает коэффициентом преломления  $n=2.38$  в данном диапазоне частот. Толщина лимитеров составляет примерно 19 мм. Изучение вопроса о распределении излучения в такой геометрии требует более детального рассмотрения. В основном именно из-за влияния третьего пункта и требуется проведение дополнительных экспериментов по определению пространственного разрешения диагностики.

### **2.3 Отражающая способность стенки вакуумной камеры**

Стенка вакуумной камеры установки ГОЛ-3 металлическая, однако, покрыта слоем углерода (сажи) образующимся в процессе работы установки. Измерение отражающей способности участка вакуумной камеры (фланца) покрытого слоем сажи проводилось в НИЧ НГУ на терагерцовом стенде. Для измерения отражающей способности на стенде была собрана следующая конфигурация. На расстоянии примерно 1 метра от источника субмиллиметрового излучения (лампы обратной волны), чей пучок дополнительно собирался линзой и после прохождения этого расстояния был почти плоскопараллельным под углом 45 градусов было установлено зеркало диаметром 70 мм. Зеркало поворачивало пучок на 90 градусов и направляло его на второе зеркало, после которого была установлена система линза-детектор, собиравшая и регистрировавшая отраженное излучение. Измерение отражающей способности производилось путем замены первого зеркала на образец (фланец с сажой). Одним из главных недостатков такой схемы было наличие между зеркалами стоячих волн, однако методика измерений, заключающаяся в сравнении сигналов от зеркала и образца, позволяла ослабить вклад стоячих волн в измерение коэффициента отражения. Также минусом измерения было то, что не был измерен коэффициент диффузного отражения. Измерение дало следующий результат (рисунок 3).

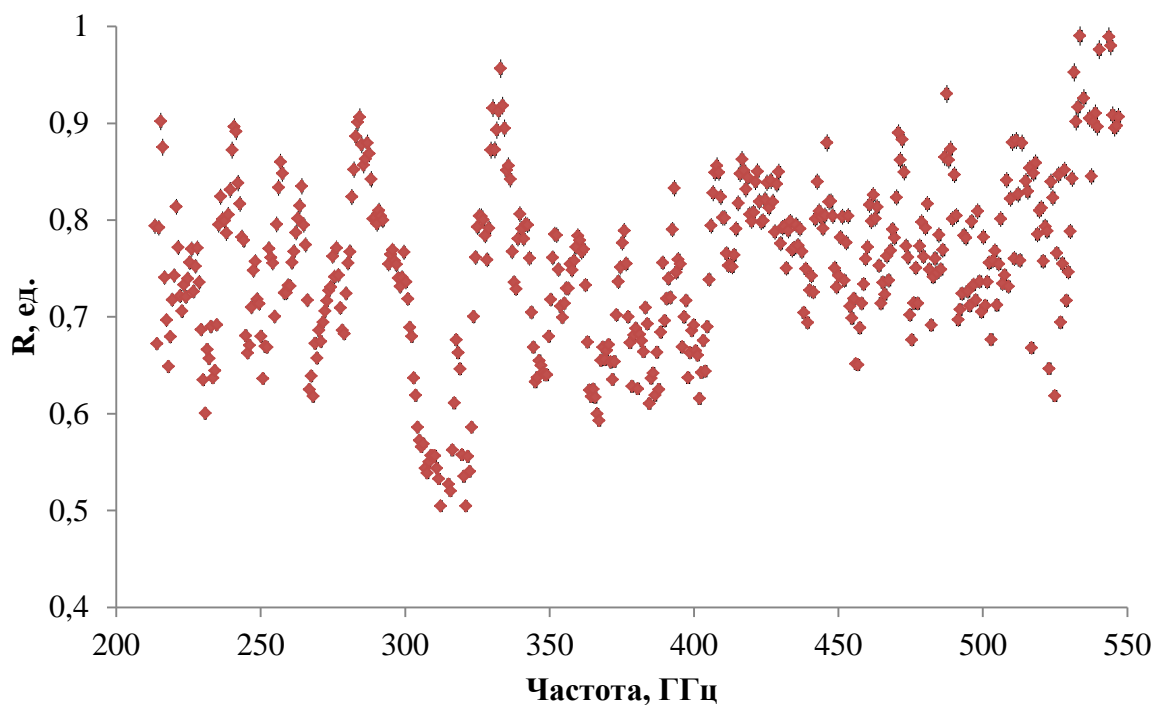
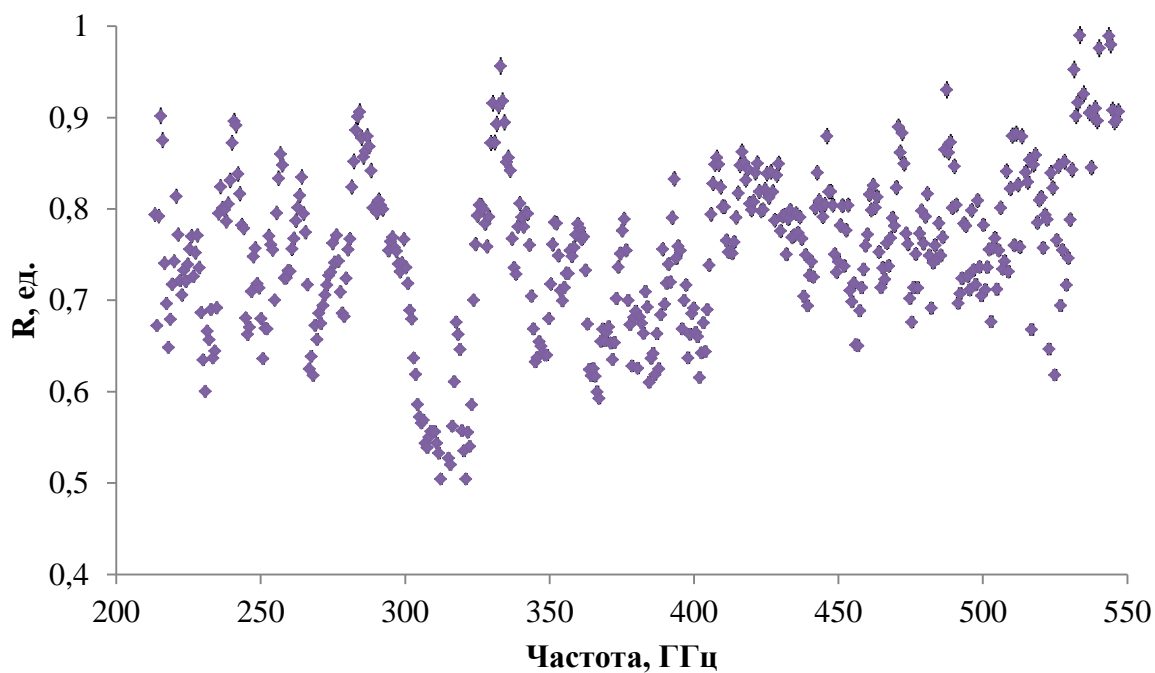


Рис. 3. Отражающая способность стенки вакуумной камеры, покрытой сажей, в диапазоне 200-550 ГГц.

Измерения были проведены два раза, усредненное по диапазону значение коэффициента отражения  $R$  составило  $0,76 \pm 0,08$ . Главным недостатком использованной схемы было то, что коэффициент отражения не был измерен непосредственно на рабочей частоте (140 ГГц). Считая, что он не измеряется в широких пределах при переходе к рабочей частоте, было взято среднее по измеренному

диапазону значение коэффициента отражения. Коэффициент гармоник для ЛОВ, служившей источником излучения,  $10^{-3}$ . Точность детектора приемника излучения 1%.

### 3. Моделирование процесса

Перед проведением натуральных холодных (без плазмы) экспериментов с источником субмиллиметрового излучения и участком камеры установки ГОЛ-3 система была смоделирована на компьютере в программе трассировки лучей Zemax. Следует учесть, что Zemax не моделирует дифракционные эффекты, поэтому они моделируются посредством задания углов наклона источников и ограничения углов наклона лучей, обнаруживаемых детектором. Учитывая это, а так же особенности распространения и обнаружения излучения в программе была задана следующая конфигурация элементов см. рисунок 4.

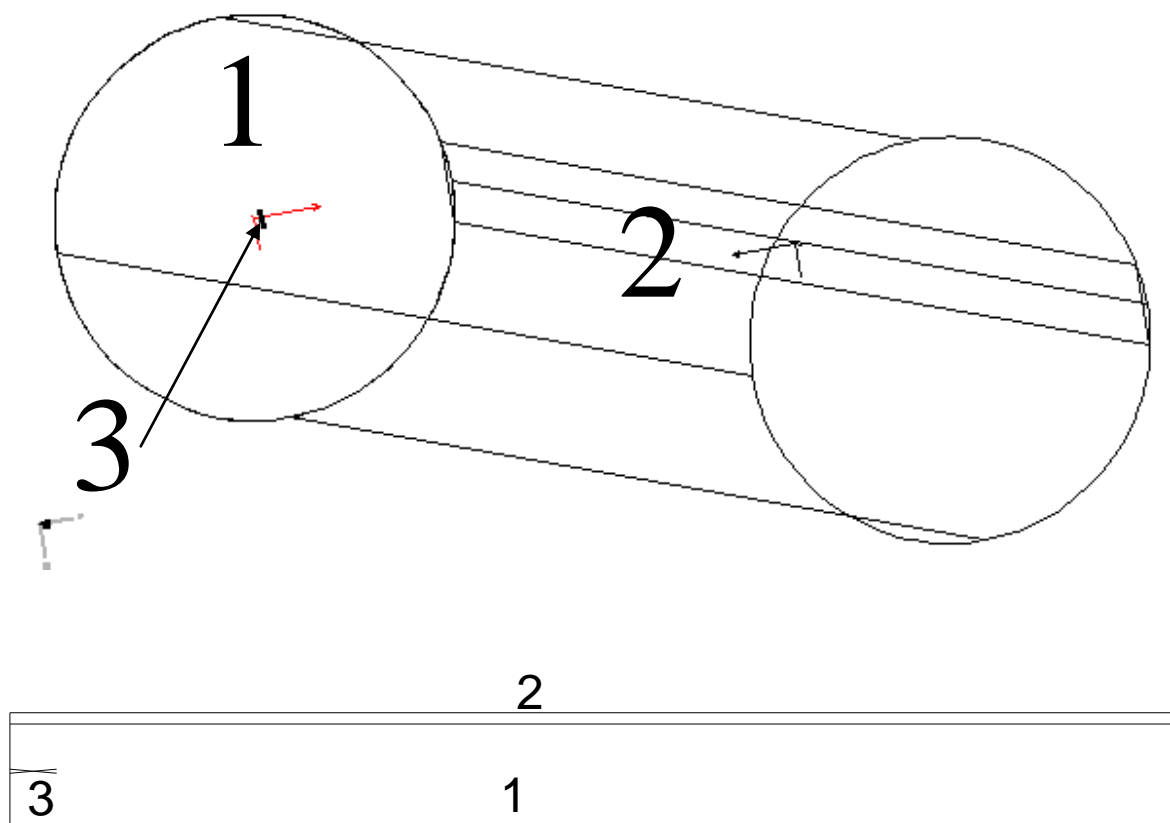


Рис. 4 .Конфигурация элементов системы для моделирования эксперимента по пространственному разрешению. 1 – труба с отражающей стенкой, 2 – детектор на стенке трубы, 3 – источник излучения виде двух плоскостей.

В цилиндрической трубе (1), отражающие свойства материала которой были заданы согласно полученным в ходе измерений отражающей способности данным, были



установлены источник излучения (3) и детектор (2). Источник излучения представлял собой две излучающих плоскости размером 4 на 4 мм, смотрящих вверх и вниз под углами 5 градусов от оси трубы и дающих плоские пучки волн. Такая конфигурация позволяла рассмотреть сразу два выделенных направления – вверх и вниз. Именно в этих направлениях распространяется излучение видимое детектором. Размер используемого источника меньше расстояния проходимого излучением вдоль трубы между двумя отражениями, что соответствует условиям проводимого эксперимента. Детектор представлял собой прямоугольник размером 20 на 1000 мм, состоящий из массива 10 на 1000 пикселей. Угловое разрешение каждого пикселя составляет 5 градусов. Таким образом, моделировалось связанное с дифракционной расходимостью на крае окна ограничение по углу входящего излучения. Детектор, использовавшийся в модели, измеряет падающую на него мощность, но не поглощает ее, что позволяет получить распределение мощности по всей длине секции за один этап моделирования. Был получен следующий график распределения интенсивности сигнала (рисунок 5).

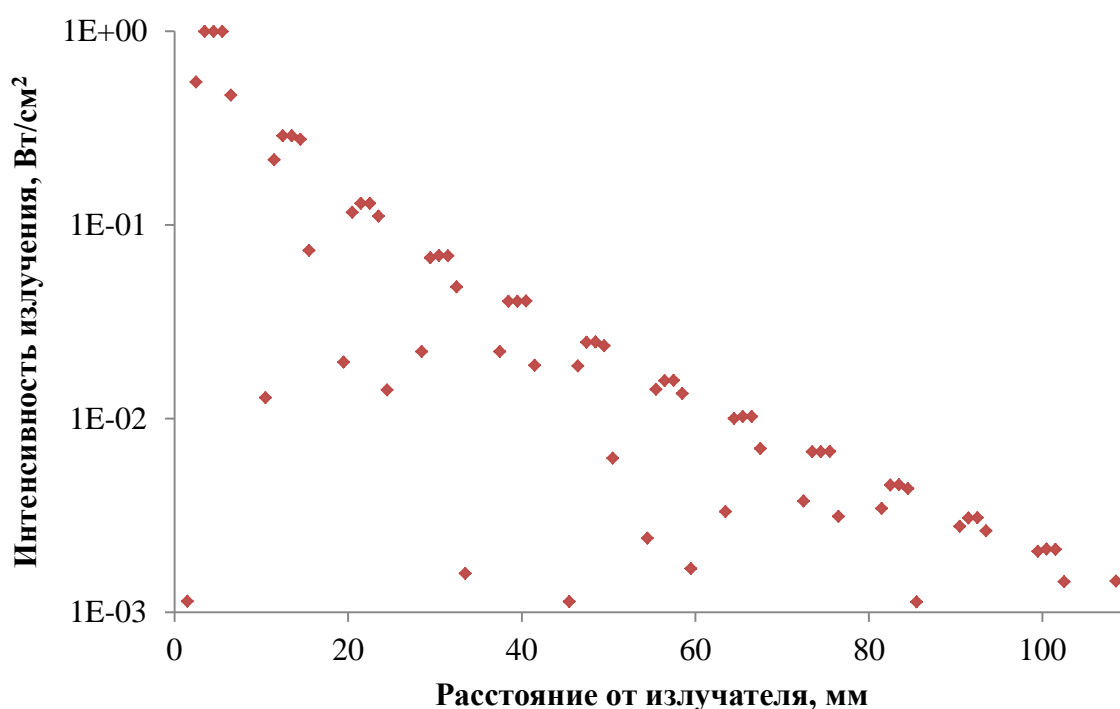


Рис. 5. Результат моделирования системы в программе Zemax. Начало отсчета соответствует центру источника излучения.

По результатам моделирования можно сказать, что размер области, в которой амплитуда излучения падает до уровня 0,1 составляет 22 мм от центра излучателя соответствующего центру окна, через которое проводится детектирование излучения на ГОЛ-3. Считая от центра до края окна 15 см и взяв нижний предел измеряемого

излучения  $10^{-3}$  от максимально обнаруживаемого, получаем, что в процентном соотношении на отражения приходится 19% от обнаруженной мощности. Характерная пилообразная форма графика получается вследствие того что источник излучения меньше длины, проходимой лучом вдоль модели при одном отражении от стенки камеры. В экспериментах на ГОЛ-3 источник излучения напротив, существенно длиннее, однако общий характер зависимости остается тем же.

## 4. Эксперимент на участке вакуумной камеры установки ГОЛ-3

### 4.1 Схема экспериментального стенда

Для экспериментальной проверки характера пространственного распределения излучения в секции вакуумной камеры были проведены измерения с использованием двух участков вакуумной камеры установки ГОЛ-3 (с диафрагмой и без неё), источника терагерцового излучения с частотой генерации 140 ГГц и детектора двух миллиметрового излучения Орион Д-2. Схема стенда для холодных испытаний показана на рисунке 6.

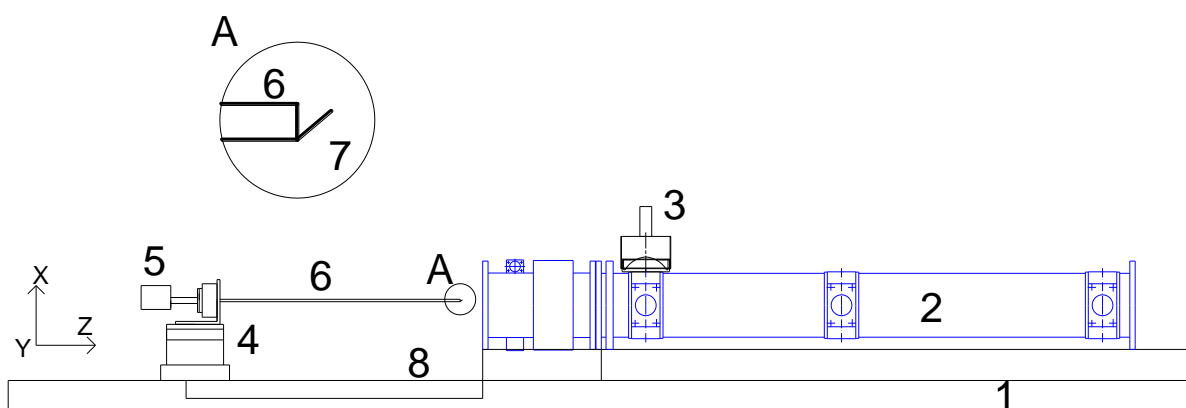


Рис. 6. Схема экспериментального стенда для проверки пространственного разрешения.

1 – основа оптический рельс, 2 – секция вакуумной камеры ГОЛ-3, 3 – детектор двухмиллиметрового излучения, 4 – подвижно-поворотное устройство, 5 – генератор двухмиллиметрового излучения, 6 – волновод, 7 – зеркало на конце волновода, 8 – линейка для измерения координаты  $z$ .

Экспериментальный стенд представляет собой оптический рельс-основу (1), на которой установлены: секция вакуумной камеры (2) с детектором (3) напротив открытого окна,

подвижно-поворотное устройство (4), в котором смонтирован волновод (5) с зеркалом(7) и генератор излучения (6), а также линейка (8) для определения координаты z. Подвижно поворотное устройство позволяет проводить измерения по расстоянию от окна z и по азимутальному углу  $\theta$ . Согласно диаграмме направленности детектора, определяемой дифракционной расходимостью на его линзе, а также дифракционными эффектами на крае окна, не требуется проверять падение луча под углами более  $5^\circ$  от нормали к внутренней стенке камеры. Волновод, использовавшийся для транспортировки излучения, имел размеры 7 на 3,3 мм, на его конце было установлено зеркало (7), направляющее излучение в сторону стенки вакуумной камеры. Перед проведением экспериментов по отражению диаграмма направленности волновода была экспериментально измерена в плоскости XZ. Для этого детектор был помещен в поворотное крепление длиной 37,6 см, на оси которого находился волновод. Измерения проводились с шагом в 5 градусов. Диаграмма направленности волновода с зеркалом представлена на рисунке 7.

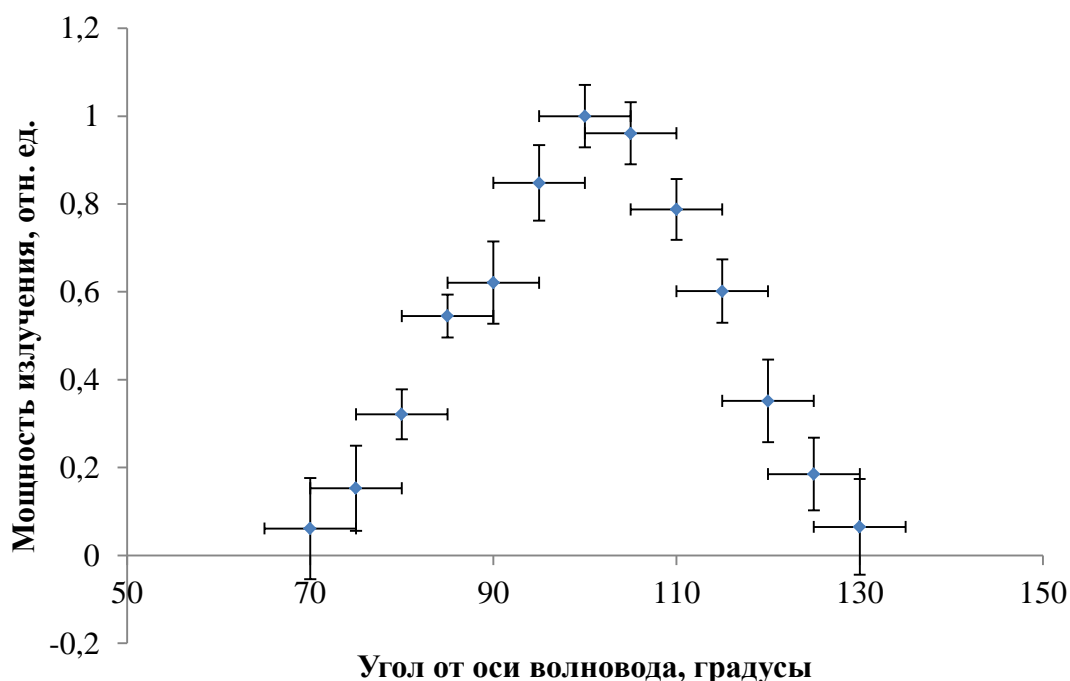


Рис. 7. Диаграмма направленности конца волновода с зеркалом.

Из рисунка следует, что диаграмма направленности волновода имеет ширину 40 градусов по уровню 0,2. Столь широкий угол позволяет проводить измерения не изменяя угла наклона зеркала.

## **4.2 Методика измерений**

Терагерцовое излучение, прошедшее в камере и вышедшее через окно измерялось детектором излучения двухмиллиметрового диапазона. Методика измерений в эксперименте имеет свою специфику. Для уменьшения влияния случайных наводок измерения проводились в импульсном режиме. Для обеспечения работы генератора в таком режиме в волноводном тракте был установлен электронный обтюратор. На управляющий вход обтюратора подавался сигнал прямоугольной формы. Этот же сигнал подавался и на осциллограф и запускал запись осциллограммы. За одно измерение записывалось 60 периодов генерации излучения. Так как сигнал с детектора в экспериментах должен был изменяться в достаточно широких пределах (в случае значительного перемещения источника от окна вакуумной камеры), то в электрическую схему регистрации был введен широкополосный усилитель. В качестве усилителя использовался прибор УЗ-29 со ступенчато изменяемым коэффициентом усиления до 200. Усилитель обладал полосой пропускания от 50 до 20 МГц и коэффициентом нелинейных искажений в 5%. Регистрировался сигнал осциллографом АКПП-4113 с погрешностью около 1%.

## **4.3 Полученные данные**

Были проведены 4 серии измерений пространственного разрешения вдоль оси  $z$ , по два измерения на участок с диафрагмами и без них. В одной серии рупор был направлен вверх, во второй вниз. Шаг измерения по оси  $z$  составлял 5 мм. В общей сложности в одной серии были сделаны около 35 измерений. Вид типичной осциллограммы полученной в измерениях изображен на рисунке 8.

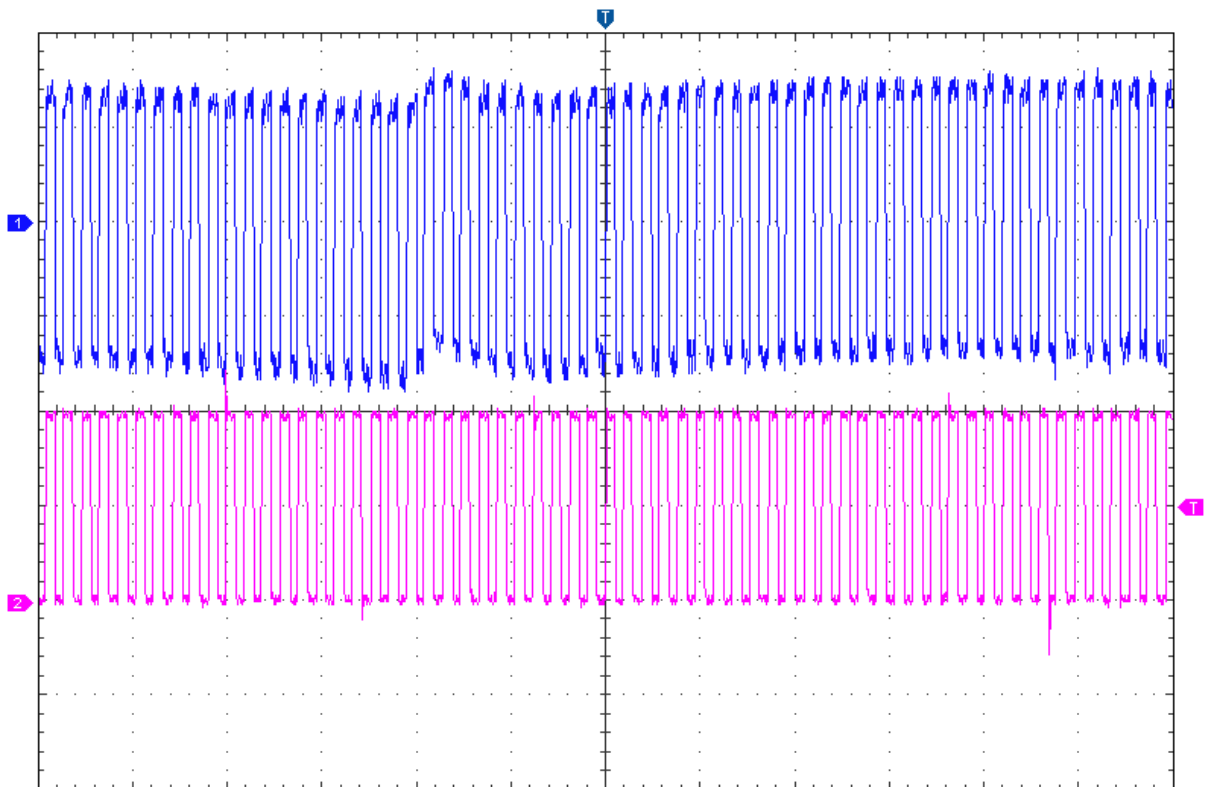


Рис. 8. Типичная осциллограмма сигнала с детектора (канал 1) и синхрои импульса (канал 2).

Параметры осциллограмм следующие: временное разрешение 500 мкс, амплитуда сигнала до 1,5 вольт в канале измерения и 5 вольт в канале синхронизации.

#### 4.4 Обработка данных

Осциллограммы, полученные в ходе измерений, содержали в общей сложности 1200 точек содержащих значения сигнала с детектора. Из полученных осциллограмм требовалось извлечь составляющую сигнала соответствующую сигналу с детектора. Частота этого сигнала совпадала с частотой модуляции источника сигнала, а амплитуда давала значение средней мощности сигнала. Для этого над исходными данными была проведена операция дискретного преобразования Фурье. Так как сигнал был прямоугольной формы, то для точного определения амплитуды требуется взять сумму по нечетным гармоникам сигнала с соответствующей частотой. Однако для определения относительной интенсивности достаточно использовать только первую гармонику рабочей частоты. Для проведения Фурье анализа был использован математический пакет MathCAD. Результаты Фурье анализа представлены на рисунке 9.

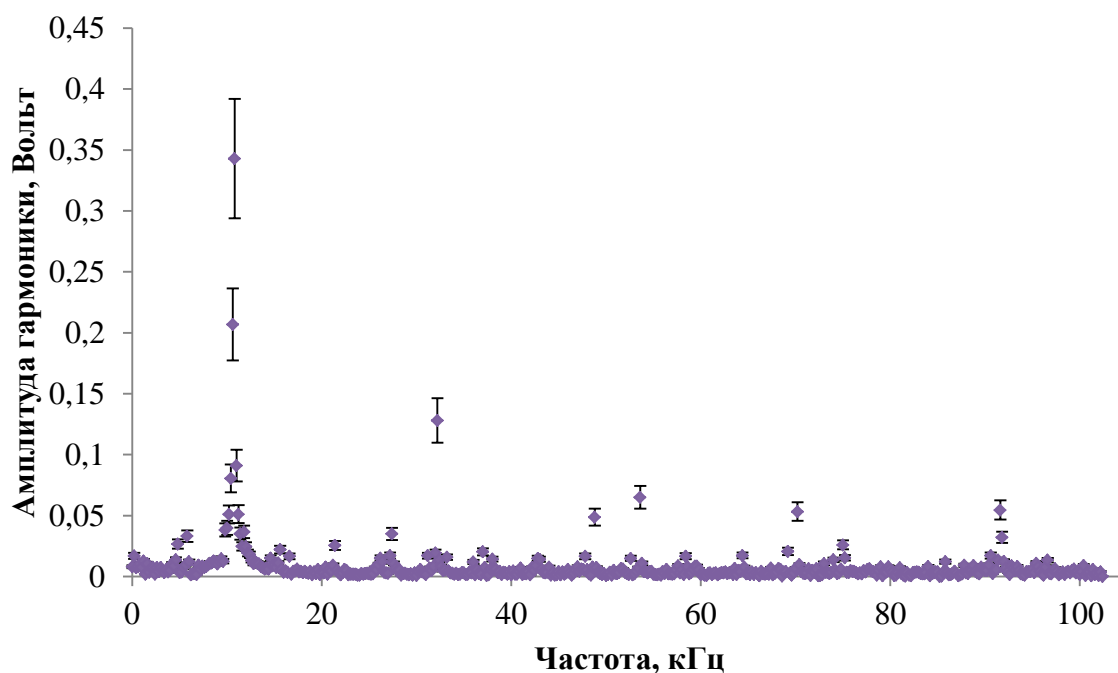


Рис. 9. Характерный результат дискретного преобразования Фурье сигнала с осциллографа при измерениях амплитуды сигнала детектора.

Из рисунка видно, что в измеренной осциллограмме присутствуют множественные шумы, вызванные различными источниками. Однако, амплитуды Фурье гармоник необходимого сигнала на порядок выше уровня шумов. Таким образом, выделение нужной амплитуды не представляет трудности.

#### 4.5 Учет погрешностей

Источниками погрешностей в данной работе были следующие факторы: шумы на рабочей частоте; погрешности измерительно-усилительного тракта; ошибка, возникающая в результате проведения операции преобразования Фурье.

Для определения характеристики шумов и выбора оптимальной рабочей частоты были проведены тестовые измерения без работающего генератора СВЧ. Они показали, что в окрестностях частоты 100 кГц шум близок по спектральным характеристикам к белому. Таким образом, для отсечки шума при измерениях достаточно вычесть из уровня сигнала уровень ближайших по спектру частот. Средний уровень шума на рабочей частоте 0,01 В. Погрешности измерительного тракта складываются из погрешностей детектора излучения ( $\sigma_d=5\%$ ), погрешности усилителя ( $\sigma_y=5\%$ ) и погрешности осциллографа ( $\sigma_o=1\%$ ). Погрешность преобразования Фурье увеличивала ошибку в  $\sqrt{2}$  раза.

## 4.6 Результаты измерений

Результаты измерений представлены на следующих рисунках. Рисунок 10 демонстрирует график пространственного разрешения в трубе с диафрагмой на расстоянии 68 мм от ближайшего края окна. Рисунок 11 демонстрирует график пространственного разрешения в трубе без диафрагм.

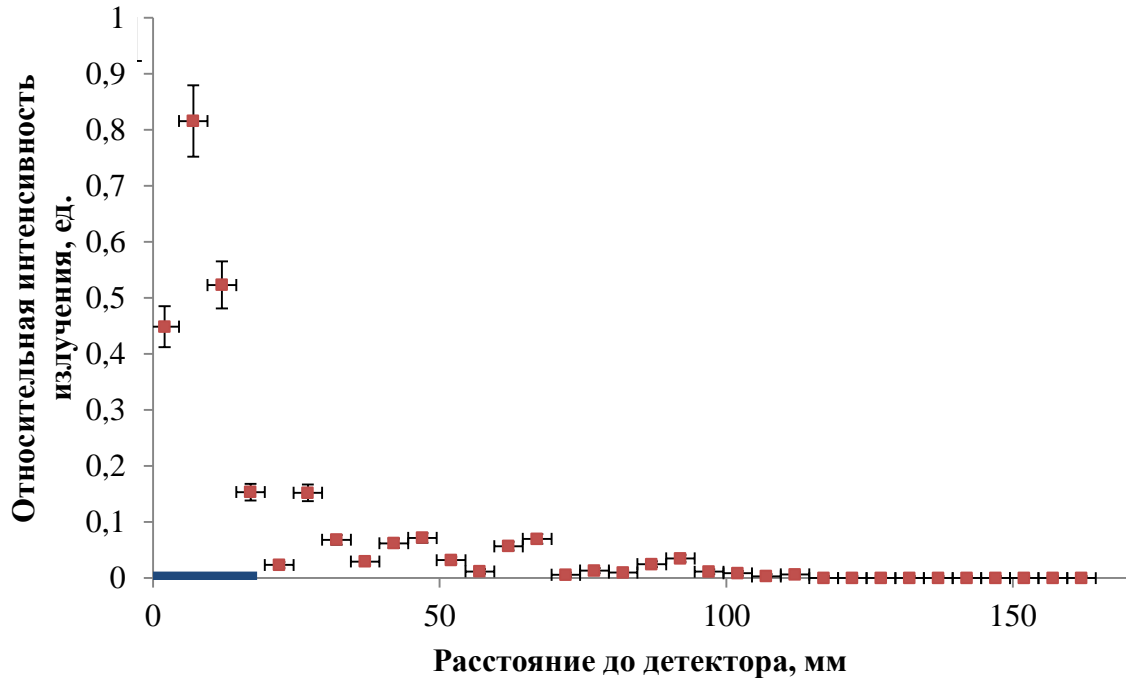


Рис. 10. Относительная интенсивность излучения вдоль трубы с диафрагмами. Начало отсчета расстояния соответствует центру диагностического окна. Толстая линия на оси – зоне прямой видимости детектора.

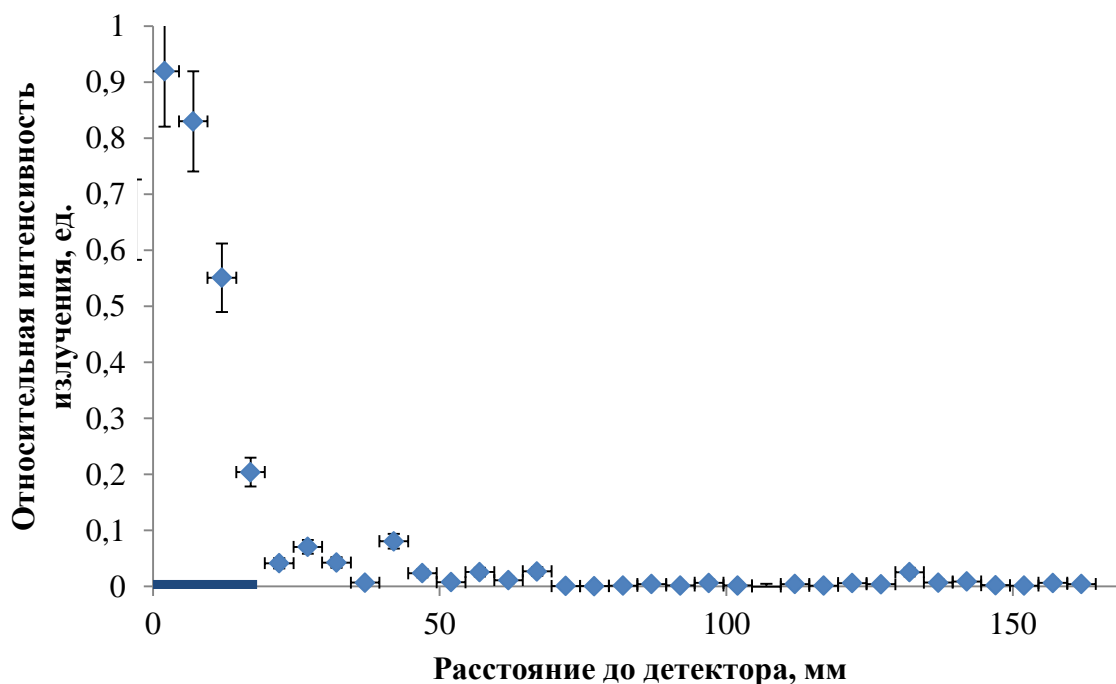


Рис. 11. Результаты измерений пространственного разрешения в трубе без диафрагм. Начало отсчета расстояния соответствует центру диагностического окна. Толстая линия на оси – зоне прямой видимости детектора.

Из графиков видно, что излучение быстро спадает при выходе из зоны прямой видимости окна. На графике эта область заканчивается на отметке 17 мм. Размер области, в которой происходит падение амплитуды сигнала до уровня 0,1, составляет 15 мм от ближнего края окна (32 мм от начала графика), причем интегрально область вне прямой видимости детектора содержит всего около 12% от всего приходящего излучения для случая трубы без диафрагм и 24% для случая трубы с диафрагмами. Характерный вид графиков в случае когда излучатель не находится в прямой видимости детектора (периодические пики с уменьшающейся амплитудой) позволяет говорить о том, что имеют место быть отражения от стенок камеры.

#### 4.7 Соответствие результатов измерений с результатами моделирования

Сравнение результатов моделирования системы показало неплохую согласованность с натурными экспериментами. В модели излучение убывает медленнее, что может быть связано с неправильно смоделированными свойствами поверхности, от которой отражается излучение либо с тем фактом, что для использовавшейся частоты не была напрямую измерена отражающая способность стенки вакуумной камеры.



## Выводы и заключение

Был измерен размер области, из которой регистрируется терагерцовое излучение. Было выяснено, что отражения от стенки камеры дают несущественный вклад в размер этой области, составляя 12% всей интенсивности излучения в случае трубы без диафрагмы и 24% для случая трубы с диафрагмой.

Реальное пространственное разрешение в экспериментах с плазмой, к сожалению, не может быть получено в ходе данных исследований. Наличие турбулентной плазмы в области транспортировки переотражённого излучения, ход которого был промоделирован, может дать как увеличение пространственного разрешения, так и его уменьшение. Влияние плазмы может быть оценено только при наличии данных о величине модуляции плотности плазмы в течение инжекции электронного пучка, влияющего на рефракцию, а также реального коэффициента ослабления излучения плазмой. Однако оба этих эффекта очевидно должны приводить только к улучшению пространственного разрешения в данных экспериментах. Поэтому, полученные результаты с учетом погрешностей, приводимых в работах [5, 6] не должны существенно влиять на оценку удельной мощности излучения плазмы в пучковых экспериментах на ГОЛ-3.

## Библиографический список

1. BURDAKOV, A. V., et al., "Status and Prospects of GOL-3 Multiple-Mirror Trap", *Fusion Sci. Technol.*, **55** (No. 2T) (2009) 63.
2. Д.Д. Рютов. *Успехи физических наук*, том 154, вып. 4, 1988, с.565-614.
3. А.В. Аржанников, и др. *Физика плазмы*, том 31, № 6, 2005, с.506-520.
4. А.В. Аржанников, и др. *Письма в ЖЭТФ*, том 77, вып.7, с.426, 2003.
5. A.V. Arzhannikov, S.A. Kuznetsov, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, V.V. Postupaev, S.V. Polosatkin, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov. "Subterahertz Emission at Strong REB-Plasma Interaction in Multimirror Trap GOL-3". *Transactions of Fusion Science and Technology*, 2011, January.
6. M.K.A. Thumm, A. V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, N.S. Ginzburg, I.A. Ivanov, P.V. Kalinin, S. A. Kuznetsov, M.A. Makarov, K. I. Mekler, A.G. Paulish, N. Yu. Peskov, S. V. Polosatkin, S.A. Popov, V. V. Postupaev, A. F. Rovenskikh, A.S. Sergeev, S. L. Sinitsky, V. F. Sklyarov, V.D. Stepanov, L. N. Vyacheslavov, V. Yu. Zaslavsky "Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM". *Terahertz Science and Technology*, 2012, March.