

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ:

Факультет	<u>И</u>	Заведующий кафедрой	<u>И1</u>
Выпускающая кафедра	<u>И1</u>	<u>Борейшо А.С.</u>	<u>шифр кафедры</u>
Группа	<u>И162</u>	<small>Фамилия И.О.</small> « 29 » <u>июня</u> 2020 г.	<small>подпись</small> 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

Зверевой Анастасии Олеговны

Фамилия, имя, отчество обучающегося

На тему Разработка экспериментального стенда для изучения плазмы в
высокочастотных и лазерных разрядах

Направление подготовки	<u>12.03.05</u>	<u>Лазерная техника и лазерные</u>
	<small>индекс направления</small>	<small>полное наименование направления</small>
	<u>ТЕХНОЛОГИИ</u>	

Руководитель: _____

подпись

ассистент Швец А.С.

ученая степень, ученое звание Фамилия ИО

«19» июня 2020г.

Обучающийся:

Зверева А.О.

подпись

Фамилия ИО

«19» июня 2020 г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020 г.

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой И1

Борейшо А.С.

Фамилия ИО

подпись

«27» февраля 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающемуся
группы

И162

группа

Зверевой Анастасии Олеговне

Фамилия Имя Отчество

Направление
подготовки

12.03.05

индекс направления

Лазерная техника и лазерные технологии

наименование направления

Тема: Разработка экспериментального стенда для изучения плазмы в
высокочастотных и лазерных разрядах

Исходная информация (общая постановка задачи):

Среда образования плазмы: аргон; Начальная температура 300 К; Диаметр пылевых
частиц 5 мкм; Начальное давление: 0,1 атм для высокочастотной и 1 атм для
лазерной плазмы; Высокочастотное напряжение 13,56 МГц; Длина волны излучения
подсветки 532 нм; Длина волны излучения для поддержания лазерного разряда
1064 нм.

Содержание выпускной квалификационной работы бакалавра:

Теоретическая часть;

Оценка параметров и состава аргоновой плазмы в высокочастотных и лазерных
разрядах;

Методика расчёта мощности для поддержания непрерывного лазерного разряда;

Разработка экспериментального стенда.

Иллюстративные материалы: схема функциональная, схема оптическая
принципиальная, сборочный чертёж, чертёж вида общего.

Срок представления работы: «19» июня 2020г.

Руководитель: _____
подпись

«27» февраля 2020г.

Обучающийся: _____
подпись

«27» февраля 2020г.

РЕФЕРАТ

Данная выпускная квалификационная работа содержит 84 страницы, в том числе 10 страниц приложений, 50 рисунков, 16 таблиц, 16 источников.

Ключевые слова: плазма высокочастотного разряда, плазма лазерного разряда, пылевая плазма, непрерывный лазерный разряд, газоразрядная камера.

Цель работы: разработка экспериментального стенда для изучения плазмы в высокочастотных и лазерных разрядах.

В выпускной квалификационной работе было проведено теоретическое исследование физики плазмы, включающей в себя плазму высокочастотных (ВЧ) и лазерных разрядов, и физики пылевой плазмы. Разработана методика оценки параметров и состава газовой плазмы в ВЧ и лазерных разрядах (среда образования плазмы – аргон), методика оценки максимального заряда пылевой компоненты в пылевой плазме ВЧ-разряда и методика расчета мощности для поддержания непрерывного лазерного разряда, также был выполнен соответствующий расчет. Спроектирована конструкция газоразрядной камеры, и рассчитана и спроектирована зондирующая система, включающая в себя обоснование энергетических характеристик системы регистрации плазменно-пылевых частиц, а также разработана оптическая система ввода силового излучения для поддержания непрерывного лазерного разряда. На основании выполненных расчетов был осуществлен подбор компонентной базы. Итогом является разработанная конструкция экспериментального стенда, а также выпущенная конструкторская документация.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	3
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	7
1.1 Высокочастотные разряды	7
1.2 Лабораторные исследования пылевой плазмы в высокочастотных разрядах	12
1.3 Лазерные разряды	17
2 ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВА ГАЗОВОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И ЛАЗЕРНЫХ РАЗРЯДАХ	20
3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО РАЗРЯДА	30
4 ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО ЗАРЯДА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В АРГОНОВОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ ВЧ-РАЗРЯДА	40
5 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА	42
5.1 Назначение и описание разрабатываемого стенда	42
5.2 Разработка газоразрядной камеры	48
5.3 Разработка зондирующей системы	54
5.3.1 Методика расчета рассеяния излучения пылевыми частицами	54
5.3.2 Подбор компонентов для системы видеофиксации пылевых частиц.	60
5.3.3 Разработка оптической системы формирования лазерного ножа	62
5.4 Разработка оптической системы ввода силового излучения	66
5.5 Экспериментальный стенд	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	74
ПРИЛОЖЕНИЕ. Документация на экспериментальный стенд	76

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей работе применяются следующие сокращения и обозначения:

ВЧ – высокочастотный;

ЕВЧР – емкостной высокочастотный разряд;

РПТ – разряд постоянного тока;

ПСПЗ – приэлектродный слой пространственного заряда;

ИВЧР – индуктивный высокочастотный разряд.

ВВЕДЕНИЕ

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, образующийся в результате термической ионизации атомов и молекул при высоких температурах [1]. Плазма является четвертым агрегатным состоянием вещества, которое было открыто Ульямом Круксом в 1879 году.

Несмотря на проведение многочисленных экспериментов по исследованию плазмы, она остается малоизученным объектом не только в физике, но и в химии (плазмохимии), астрономии и многих других науках.

Кроме того, научный интерес представляет пылевая плазма – плазма, содержащая заряженные пылевые частицы, ставшая в последнее время объектом многочисленных исследований.

В настоящей работе будет рассматриваться низкотемпературная неравновесная плазма, созданная на базе атомов аргона, в ВЧ и лазерных разрядах; а также пылевая плазма, созданная в ВЧ-разрядах.

Целью данной работы является разработка экспериментального стенда для изучения газовой и пылевой плазмы в ВЧ и лазерных разрядах.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Математическое моделирование планируемых экспериментов:
 - Оценка параметров и состава газовой аргоновой плазмы в ВЧ и лазерных разрядах;
 - Оценка максимального заряда пылевой частицы в аргоновой пылевой ВЧ-плазме.
2. Разработка конструкции:
 - Разработка зондирующей системы;
 - Разработка оптической системы ввода силового излучения, в т.ч. оценка мощности, необходимой для поддержания непрерывного лазерного разряда;
 - Разработка газоразрядной камеры.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Высокочастотные разряды

Высокочастотный разряд – вид газового разряда, возникающий в присутствии высокочастотного электромагнитного поля. Высокочастотным предполагается считать разряд, для которого вакуумная длина волны ВЧ поля λ_0 , которая определяется ($\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}$, где ω – круговая частота ВЧ поля, c – скорость света), значительно превышает межэлектродное расстояние d , т.е. $\lambda_0 \gg d$ [2].

Границы частот f , при которых разряд считается высокочастотным, таковы: $10^5 \leq f \leq 10^9$ Гц. Высокочастотные разряды, используемые в технике, реализуются в промышленных устройствах только на разрешенных диапазонах частот, чтобы не создавать помех радиосвязи. Наиболее часто применяемые диапазоны следующие: 440 кГц; 880 кГц; 1,76 МГц; 5,28 МГц; 13,56 МГц; 27,12 МГц; 40,68 МГц.

В основе высокочастотных разрядов лежит процесс ударной ионизации молекул и атомов газа электронами, ускоренными в высокочастотном электромагнитном поле. Этот процесс сопровождается диффузией электронов из области, в которой локализовано поле, а также процессами их рекомбинации с ионами или «прилипания» к нейтральным молекулам и атомам. При этом обычно процессы на ограничивающих разрядную область поверхностях менее существенны, чем в случае электростатических разрядов [2].

В высокочастотных разрядах электроны обычно имеют сложную функцию распределения по энергиям, существенно отличающуюся от равновесной максвелловской. Амплитуда ВЧ поля, необходимого для возникновения высокочастотного разряда, увеличивается с ростом давления газа P и частоты поля f [2].

Различают два основных вида ВЧ разряда, которые отличаются способом возбуждения высокочастотного поля:

1. ЕВЧР или Е-разряд.

Для получения емкостного ВЧ разряда переменное напряжение подают на электроды. В простейшей и наиболее употребительной геометрии это два параллельных плоских электрода (рисунок 1) [3]. Между ними зажигается разряд. Возникновение разряда обусловлено потенциальным электрическим полем конденсатора. Электроды либо помещают в разрядную камеру, наполненную нужным газом при нужном, не слишком высоком давлении, либо располагают снаружи камеры с диэлектрическими стенками. В отличие от постоянного для переменного тока присутствие диэлектрика в цепи не является препятствием. Система электродов в этом случае представляет собой конденсатор, потому такой тип разряд и называют емкостным [2].

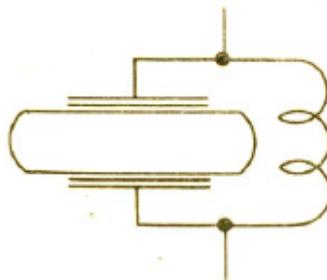


Рисунок 1 – Схема возбуждения ЕВЧР

Наиболее существенные различия в физических свойствах ЕВЧР и РПТ можно представить в следующем виде:

1) в РПТ разрядный ток представляет собой чисто активный ток, а в ЕВЧР полный разрядный ток состоит из активной и реактивной составляющих, причем вклад каждой составляющей может изменяться от 0 до 100 % в зависимости от физических условий поддержания разряда;

2) в отличие от РПТ электрическое поле в ЕВЧР периодически изменяет свое направление, вследствие чего уменьшаются потери заряженных частиц из разрядного промежутка, и только в один из полупериодов ВЧ поля эмитированные из электродов электроны участвуют в поддержании разряда;

3) в РПТ величина напряженности электрического поля E при пробое в газе, плотность разрядного тока j и плотность зарядов плазмы n_e определяются давлением и родом газа, материалом электродов и конфигурацией разрядного промежутка, а в ЕВЧР помимо перечисленных внешних параметров разряда появляется дополнительно новый параметр – частота ВЧ поля ω , зависимость от которой весьма существенная, так, например, имеет место зависимость $n_e \sim \omega^2$, т. е. плотность зарядов растет как квадрат частоты поля; частота поля ω определяет длительность существования приэлектродных электронных пучков, от которой, в частности, зависят возможность развития в плазме ЕВЧР пучково-плазменных неустойчивостей и характер временной релаксации электронного энергетического спектра газоразрядной плазмы;

4) принципиально различна роль столкновений электронов с нейтральными частицами в поддержании РПТ и ЕВЧР: если в РПТ в результате столкновений электроны только теряют свою энергию, то в ЕВЧР электроны могут набрать энергию в переменном поле только благодаря наличию таких столкновений, вследствие чего даже при очень малых ВЧ напряжениях $V_{\sim} < V_i$ (V_i – потенциал ионизации атома) может возникнуть процесс ионизации газа и поддерживаться ЕВЧР;

5) в отличие от РПТ в приэлектродном слое ЕВЧР в результате суперпозиции ВЧ поля и квазистационарного поля пространственного заряда может возникать мгновенная разность потенциалов $V(t)$, существенно превышающая амплитуду приложенного ВЧ напряжения V_{\sim} ($V(t) \leq 2V_{\sim}$);

6) в РПТ имеется два электрода – катод и анод, в ЕВЧР оба электрода по своим функциям аналогичны катоду, а эффективным анодом в отношении квазиэлектростатических эффектов выступает плазма положительного столба; ЕВЧР также отличается от РПТ тем, что может быть как двухэлектродным, так и одноэлектродным, когда в качестве второго эффективного электрода выступает окружающая пространственную область разряда «земля»;

7) важнейшим отличным от РПТ свойством ЕВЧР является возможность создания последнего в замкнутых диэлектрических полостях с использованием внешних электродов, отделенных от газоразрядной плазмы диэлектриком, что позволяет создавать технологическую плазму в химически агрессивных средах без разрушения материала электродов;

8) в РПТ приэлектродные слои пространственного заряда постоянно сохраняют свои параметры, а в ЕВЧР существуют режимы разряда, когда ПСПЗ периодически исчезают, испытывая кратковременный коллапс;

9) в отличие от РПТ в ЕВЧР могут возникать эффекты резонансного усиления ВЧ поля на частоте приложенного ВЧ напряжения, либо на ее гармониках n -го порядка (наблюдались резонансы при $n \geq 40$), что обусловлено возникновением в ЕВЧР собственных последовательных колебательных контуров, образуемых реактивностями ПСПЗ и газоразрядной плазмы противоположного знака.

Различают ЕВЧР в присутствии электродов в разрядной области и в отсутствии их. В последнем случае разряд носит название безэлектродного. Безэлектродный разряд – один из видов электрических разрядов на переменном токе, в котором энергия подводится бесконтактным способом, а цепь разрядного тока замыкается с помощью тока смещения. В безэлектродном разряде основную роль играет объемная ионизация газа, а процессы на поверхностях, ограничивающих разрядную область, имеют второстепенное значение.

В емкостном разряде ионизация газа происходит в результате столкновений с частицами газа электронов, ускоренных переменным электрическим полем E . Разрядный ток в этом виде безэлектродного разряда замыкается с помощью тока смещения (емкостного тока), протекающего через емкость между наружными металлическими электродами и ионизованным газом внутри разрядного сосуда [2].

2. ИВЧР или Н-разряд.

Для получения индуктивного ВЧ разряда газоразрядную трубку помещают внутрь катушки индуктивности колебательного контура (рисунок 2).

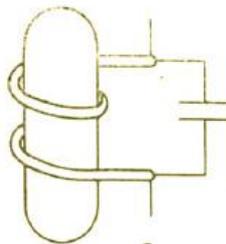


Рисунок 2 – Схема возбуждения ИВЧР

Индуктивный ВЧ разряд без магнитного поля известен уже более ста лет [4,5]. Это разряд, возбуждаемый током, текущим по индуктору, расположенному на боковой или торцевой поверхности, как правило, цилиндрического источника плазмы. Еще в 1891 г. Дж. Дж. Томсон высказал предположение о том [4], что индуктивный разряд вызывается и поддерживается вихревым электрическим полем, которое создается магнитным полем, в свою очередь, индуцируемым током, текущим по антенне. Для индуктивного ВЧ разряда низкого давления характерны высокие плотности электронов при относительно низких эффективных температурах электронов [2].

Наравне с этими видами разряда существует гибридный ВЧ разряд, который является комбинацией Е- и Н-разрядов.

В чистом виде разряды Е- типа и Н- типа можно создать лишь при пониженных частотах поля ($f \leq 13,56$ МГц). Очевидно, что при повышенных частотах ($f \gg 13,56$ МГц) в ВЧ-контуре получить чисто Е- или Н-разряд невозможно, т. к. в конденсаторе С наряду с потенциальной составляющей $E_{\text{пот.}}$ появится вихревая составляющая $E_{\text{вихр.}}$, а в индуктивности L помимо вихревой составляющей $E_{\text{вихр.}}$ появится и потенциальная составляющая $E_{\text{пот.}}$ вследствие более сильного проявления паразитных емкостей газоразрядной системы.

Высокочастотный разряд используется в ионных источниках для создания плазмы, в качестве источника света в спектроскопии, в мощных

молекулярных лазерах для создания однородной активной среды, в плазмохимии – для изучения химических реакций в газах [2].

В данной работе рассматривается емкостной высокочастотный разряд в присутствии электродов в разрядной области при давлении 0,1 атм с частотой задающего генератора 13, 56 МГц. При таком давлении плазма является неравновесной и находит свое применение в возбуждении активной среды мощных лазеров.

1.2 Лабораторные исследования пылевой плазмы в высокочастотных разрядах

В лабораторных исследованиях двумерных плазменно-пылевых систем использовалась газоразрядная камера, являющаяся модифицированной установкой Gaseous Electronics Conference GEC-RF-Reference Cell (рисунок 3).



Рисунок 3 – Вид газоразрядной ВЧ-камеры GEC-RF-Reference Cell

Электродная система состоит из горизонтального управляемого ВЧ-электрода, расположенного в нижней части разрядной камеры, и заземленного или плавающего электрода в верхней части (рисунок 4).

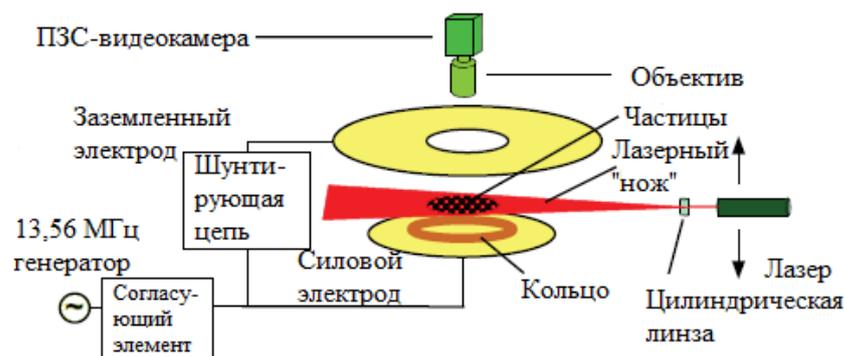


Рисунок 4 – Схема электродной ВЧ-системы

Микрочастицы инжектируются диспенсером (не показан) и левитируют в приэлектродном слое, их перемещение в горизонтальном направлении ограничено потенциальной ямой, создаваемым кольцом, находящемся на электроде. Частицы освещаются узким лучом лазерного света, параллельным электроду, и отраженный свет наблюдается под углом 90° с помощью ПЗС-камеры (см. рисунок 3.). Это позволяет изучать динамику двумерной пылевой системы.

Если верхний электрод удаляется, то металлические стенки вакуумной камеры, окружающие электродную систему и обеспечивающие условия вакуума для разряда низкого давления, выполняют функции этого электрода. Нижний электрод соединяется с ВЧ-генератором с помощью блока согласования Рі-типа. Это обеспечивает согласование низкоомного (50 Ом) сигнала от генератора с высокоомным плазменным устройством. Приложенные высокочастотные токи и напряжения создают высоковольтный емкостной слой между электродом и объемом плазмы, что приводит к стохастическому, или бесстолкновительному нагреву в этом слое и омическому нагреву в объеме. Для возбуждения разряда используются инертные газы, обычно аргон, в диапазоне давлений от 0,1 до 1000 Па (в зависимости от сорта газа). Использование молекулярных газов приводит к появлению отрицательных ионов, именно поэтому инертные газы предпочтительнее, так как они не образуют отрицательных ионов и обеспечивают получение чистой электроположительной плазмы.

Для создания низкотемпературной плазмы на электрод подается напряжение с частотой 13,56 МГц. Поскольку ионная плазменная частота значительно меньше частоты возбуждения, то ионы не подвержены влиянию переменного электрического поля и их температура остаётся комнатной, благодаря столкновениям с атомами или молекулами, число которых значительно превышает число ионов (типичные степени ионизации лежат в диапазоне $10^{-8} - 10^{-6}$). Только электроны реагируют на ВЧ-поле и нагреваются до температуры порядка нескольких эВ, тем самым вызывая ионизацию нейтрального газа и, таким образом, отвечают за поддержание плазмы. В результате в центральной области разряда образуется однородная объемная плазма с плотностью $10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Высоковольтный приэлектродный слой с отрицательным потенциалом в несколько десятков вольт имеет значение при исследовании комплексной плазмы в наземных условиях. Микрочастицы инжектируются в плазму либо вручную, либо с помощью электрических/электромагнитных диспенсеров. В плазме они мгновенно заряжаются до нескольких тысяч элементарных зарядов (в зависимости от их размера), а затем захватываются электрическим потенциалом, созданным плазмой.

Направленная вверх электростатическая сила, действующая на микрочастицы в приэлектродном слое, уменьшается с высотой, также она способна скомпенсировать силу гравитации и позволяет частицам левитировать в узкой области приэлектродного слоя. Высота левитации зависит от соотношения между зарядом и массой: чем меньше это отношение, тем ниже высота левитации. Поскольку частицы с монодисперсным распределением по размерам чаще всего используются в экспериментах с плазмой, то они заряжаются до одного уровня и образуют однослойные структуры. Получаемые двумерные жидкостные и кристаллические системы и их фазовые переходы являются собой одно из интересных и важнейших тем в исследовании комплексной плазмы.

Большие двумерные пылевые системы активно изучаются в лабораторных условиях. Частицы сильно взаимодействуют посредством экранированных кулоновских сил и в большинстве случаев образуют кристаллические структуры, так называемые гексагональные решетки. Методы статистического анализа кристаллов используют парные и ориентационные корреляционные функции, а также аналоги структурных факторов, измеренных в естественных системах с помощью дифракционных экспериментов. Эти методы демонстрируют структуру и состояние комплексной плазмы. Дополнительно динамические наблюдения позволяют получить информацию о кинетике процессов, происходящих в кристаллах, например, о движении дефектов. Понимание механизмов, лежащих в основе динамики образования и движения дислокаций, представляет большой интерес для материаловедения, для изучения землетрясений, снежных лавин, коллоидных кристаллов, двумерных пен и различных типов сдвиговых трещин.

Впервые образование трехмерного пылевого кристалла в ВЧ-разрядах, так называемого плазменного кристалла, наблюдалось Пайпером и др. [6]. Эти авторы использовали экспериментальную установку, позволяющую получать вид сверху пылевой плазмы в плоскости, параллельной нижнему электроду. При перемещении лазера и оптической системы в вертикальном направлении было возможно получить трехмерное томографическое изображение всей системы. На рисунке 5 показаны изображения двух различных кристаллических структур, объемно центрированной кубической (bcc) и гексагонально ориентированной (hexagonal aligned).

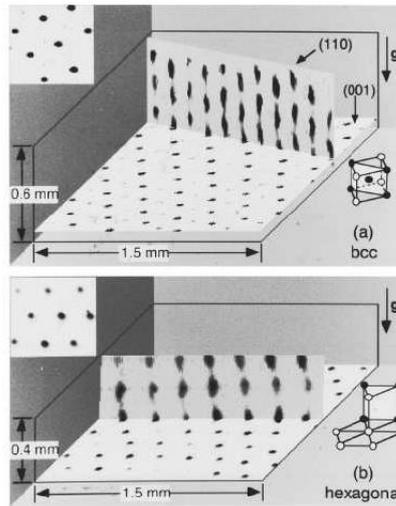


Рисунок 5 – Трехмерное изображение кристаллической структуры многослойного плазменного кристалла [1]. Структуры соответствуют: а – объемно центрированной кубической (bcc) и б – гексагонально ориентированной (hexagonal) решеткам

Позднее с помощью этой методики были определены положения частиц [6]. Зная трехмерные координаты, измеренные этим методом, было обнаружено, что горизонтальное межчастичное расстояние Δ_{xy} уменьшается приблизительно на 40% с верха до низа пылевой структуры. Это было объяснено сжатием под действием гравитационной силы. Распределение частиц в каждом слое довольно узкое, поэтому соседние слои легко различимы. Локальный анализ упорядочения показывает, что в большинстве зон кристалла метастабильная гексагональная плотноупакованная (hcp) структура доминирует над основным состоянием гранецентрированной кубической (fcc) решетки, что говорит о том, что процесс кристаллизации не полностью закончен в момент наблюдения.

Обычно сила гравитации компенсируется электрическим полем в экранирующем слое плазмы над нижним электродом. Другой способ компенсации гравитации - использование термофоретической силы. Эта сила появляется при наличии градиента температуры, и она направлена в сторону более низкой температуры. Термофоретическая сила позволяет создавать условия квазинулевой гравитации в комплексной плазме, что делает

возможным исследование поведения микрочастиц в объеме плазмы в широком диапазоне параметров. На рисунке 6 демонстрируется влияние термофоретической силы на облако частиц. Левый рисунок: вид сбоку на комплексную плазму, образованную частицами диаметра 3,4 мкм, в отсутствие термофоретической силы. Разряд в аргоне при давлении 48 Па, амплитуде ВЧ-напряжения 45 В и мощности разряда 17 мВт. Число частиц порядка 10^6 , размер изображения $32 \times 43 \text{ мм}^2$. Правый рисунок: вид сбоку на комплексную плазму в условиях квазимикрогравитации, созданной термофоретической силой. Температурный градиент, приложенный извне, равен $1170 \text{ К} \cdot \text{м}^{-1}$. Давление 46 Па, амплитуда ВЧ-напряжения 82 В и мощность разряда 57 мВт. Число частиц также порядка 10^6 [1]

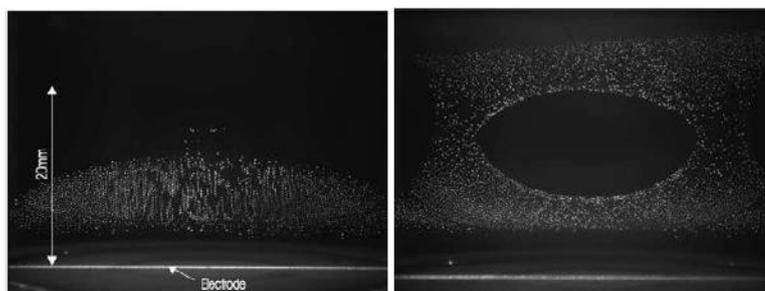


Рисунок 6 – Распределение частиц в облаке без термофоретической силы (левый) и с ней (правый)

1.3 Лазерные разряды

В «долазерную» эпоху, точнее, до середины 60-х годов, в физике и технике газового разряда применялись поля трех основных частотных диапазонов: 1) постоянное электрическое поле, с которым по характеру воздействия отчасти сходны не слишком кратковременное импульсное поле и осциллирующие поля низких частот; 2) высокие частоты (в зарубежной литературе их называют радиочастотами) — широкий диапазон, середина которого лежит в районе мегагерца; 3) сверхвысокие частоты, кратко — СВЧ (в

зарубежной литературе — микроволновый диапазон). Это — частоты, исчисляемые гигагерцами, чему соответствуют сантиметровые, миллиметровые волны. Далее по шкале частот следует оптический диапазон: инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения. Однако в долазерную эпоху никто даже и не помышлял о возможности существования газоразрядных эффектов в световых полях — столь слабы обычные, не лазерные источники света, и столь слабы создаваемые ими поля [7].

После создания достаточно мощных лазеров импульсного и непрерывного действия были обнаружены и исследованы многие эффекты воздействия лазерного излучения на газ и взаимодействия его с ионизированными газами и плазмой. При ближайшем же рассмотрении становится ясным, что среди этих эффектов существует определенный ряд процессов, которые по своему характеру в точности соответствуют объекту изучения физики газового разряда. По существу, лазерная техника подарила физике разряда четвертый, оптический диапазон, и в эту науку органически вписалась совершенно новая, чрезвычайно интересная и практически важная глава о разрядах в полях оптического диапазона [7].

Эффект оптического пробоя был обнаружен еще в 1963 году такими учеными, как П.Мейкер, Р.Терхун и У.Сэвидж [8]. Обнаружение данного эффекта стало доступным благодаря созданию лазера с модулированной добротностью, который дает гигантский импульс. Когда луч рубинового лазера был сфокусирован линзой, в области фокуса вспыхнула искра, и там образовалась плазма, как при пробое разрядного промежутка между электродами.

Лазерный способ поддержания плазмы обладает своими особенностями, которые связаны со свойствами излучений оптического диапазона электромагнитного поля. Главная из них — это возможность свободной передачи световой энергии на расстояние. Если во всех прочих полях для подвода энергии к плазме требуются определенные конструктивные элементы: электроды в дуговом разряде, катушка-индуктор в высокочастотном, волновод

в СВЧ, то световой луч можно подводить к плазме просто через воздух. Это открывает большие возможности для поджигания оптического разряда в труднодоступных местах или прямо в середине комнаты. Можно двигать плазму в пространстве, перемещая световой луч, и таким образом описывать в пространстве «плазменные узоры»; можно продувать газ через разряд — получится оптический плазмотрон. В последнем случае, как и во всех существующих плазмотронах, подводимая извне электромагнитная энергия в конечном счете затрачивается на нагревание до высокой температуры все новых и новых порций поступающего холодного газа. На опыте оптический разряд поджигают в определенном месте, фокусируя лазерный луч линзой или зеркалом. Плазма располагается вблизи фокуса, где интенсивность света велика. Она несколько сдвигается от фокуса по направлению к источнику излучения до того сечения светового конуса, где интенсивности света еще хватает для поддержания горения разряда. Чтобы зажечь стационарный разряд, необходимо создать начальную плазму в области фокуса, ибо мощности луча, достаточной для поддержания уже существующей плазмы, далеко не достаточно для ее создания, т. е. пробоя газа (точно так же обстоит дело и со всеми другими стационарными разрядами). Можно, например, осуществить пробой газа в фокусе при помощи постороннего источника; проще всего, оказалось, ввести в фокус луча на короткое время проволоку и убрать ее после того, как разряд зажжется [7].

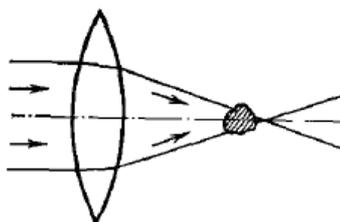


Рисунок 7 – Схема эксперимента по получению непрерывного оптического разряда.

В данной работе демонстрируется возможность инициирования непрерывного лазерного разряда за счет создания начальной ионизации ВЧ-разрядом.

2 ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВА ГАЗОВОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И ЛАЗЕРНЫХ РАЗРЯДАХ

Рассмотрим систему уравнений, позволяющую определить состав и параметры аргоновой плазмы.

При решении уравнений были сделаны допущения, позволяющие выполнить оценку состава плазмы:

1. Температура холодного аргона и стенки камеры одинакова и постоянна: $T_{Ar_cold} = T_0 = 300$ К.
2. Давление холодного аргона и плазмы равно.
3. Рассматривается двухтемпературная модель плазмы. задается температура электронов, а также степень неравновесности θ .
4. Степень неравновесности θ по всему объему камеры неизменна.
5. Концентрация электронов и ионов равна ($n_e = n_i$), т.е. плазма считается однократно ионизированной.
6. Объемная доля плазмы \bar{v} равна:
 - $\bar{v} = 0,8$ для ВЧ-разряда;
 - для лазерного разряда будет определена в результате расчета.
7. Плазма рассматривается как смесь идеальных газов в том смысле, что справедливо термическое уравнение состояния в форме Менделеева-Клайперона [9].

Уравнение состояния для холодного аргона:

$$P = n_{Ar_cold} \cdot k \cdot T_{Ar_cold} \quad (1)$$

где n_{Ar_cold} – концентрация холодного аргона;

k – постоянная Больцмана;

T_{Ar_cold} – температура холодного аргона.

Уравнение состояния для компонентов плазмы:

$$P = n_{ai} \cdot k \cdot T_{ai} + n_e \cdot k \cdot T_e \quad (2)$$

где n_{ai} – концентрация нейтралов и ионов;

T_{ai} – температура ионов;

n_e – концентрация электронов;

T_e – температура электронов.

Из (2) выразим концентрацию тяжелых частиц n_{ai} :

$$n_{ai} = \frac{P - n_e \cdot k \cdot T_e}{k \cdot T_{ai}} = \frac{P}{k \cdot T_{ai}} - n_e \frac{T_e}{T_{ai}} \quad (3)$$

где $\frac{T_e}{T_{ai}}$ – температурный фактор, который обозначим θ .

Степень ионизации плазмы I равна:

$$I = \frac{n_e}{n_{ai}} \quad (4)$$

Тогда (3) с учетом (4) станет следующим:

$$n_{ai} = \frac{1}{1 + I\theta} \cdot \frac{P}{k \cdot T_{ai}} \quad (5)$$

Сумма частиц холодного аргона N_{Ar_cold} и тяжелых частиц плазмы N_{ai} образуют исходное количество частиц аргона в стеклянной камере N_0 , то есть:

$$N_0 = N_{Ar_cold} + N_{ai} \quad (6)$$

N_0 определяется так: $N_0 = 1 \cdot \frac{P_0}{kT_0}$, где 1 – объемная доля аргона в камере, P_0 – исходное давление в камере, T_0 – исходная температура аргона.

Исходным (начальным) давлением в камере для создания плазмы ВЧ-разряда является давление, равное 0,1 атм; для создания плазмы лазерного разряда – 1 атм.

Количество тяжелых частиц плазмы N_{ai} равно:

$$N_{ai} = \bar{v} * n_{ai} = \frac{\bar{v}}{1 + I\theta} \cdot \frac{P}{k \cdot T_{ai}} \quad (7)$$

Количество частиц холодного аргона N_{Ar_cold} равно:

$$N_{Ar_cold} = (1 - \bar{v}) \cdot n_{Ar_cold} = (1 - \bar{v}) \cdot \frac{P}{k \cdot T_{Ar_cold}} \quad (8)$$

Подставим в уравнение (6) выражения (7) и (8) и выразим отношение $\frac{P}{P_0}$.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{(1 - \bar{v}) + \frac{\bar{v}}{1 + I\theta} \frac{T_0}{T_{ai}}} \quad (9)$$

Объемная доля плазмы ВЧ-разряда известна (в допущениях). Для плазмы лазерного разряда необходимо определить объемную долю.

Известно, что объем камеры с газом V равен: $V = 139874,29 \times 10^{-9} \text{ [м}^3\text{]}$. Полученное значение было определено, исходя из габаритов камеры с помощью Solidworks. Радиус лазерной плазмы $r_0 = 50 \times 10^{-6} \text{ [м]}$. Тогда объем лазерной плазмы $V_{\text{лаз}} = \frac{4}{3} \pi r_0^3 = 5,23599 \times 10^{-13} \text{ [м}^3\text{]}$. Объемная доля лазерной плазмы ν равна: $\nu = \frac{V_{\text{лаз}}}{V} = 3,74335 \times 10^{-9}$.

Будем считать, что в плазме имеет место ионизационное равновесие, т.е. справедливо уравнение Саха [10]:

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{g_e g_i}{g_a} \cdot 3 \cdot 10^{21} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{J}{T}} \quad (10)$$

где n_a – концентрация нейтралов плазмы;

g_e – статистический вес свободного электрона;

g_i – статистический вес однократно ионизированного атома аргона;

g_a – статистический вес нейтрального атома аргона;

J – потенциал ионизации;

T – температура электронов.

Чтобы определить статистический вес необходимо знать внутренние степени свободы атомов, ионов и электронов, являющиеся пространственной ориентацией спина и орбитального момента и электронного возбуждения. Вращательные моменты измеряются в квантовых единицах \hbar . Измеренный в этих единицах спин обозначается посредством S , орбитальный момент – посредством L ; эти моменты складываются по правилам квантовой механики, давая полный момент J_j (т.е. момент количества движения), который может принимать значения от $|L + S|$ до $|L - S|$ через единицу. Состояние с моментом J имеет статистический вес $g = 2J + 1$ [10].

У свободного электрона $L = 0; J = S = 1/2$, и его статистический вес $g_e = 2$. У атомов, а также у ионов, у которых не все электроны оторваны, возможны разные состояния электронного возбуждения. Каждое из них характеризуется энергией возбуждения \mathcal{E}_j и статистическим весом g_j . Полным статистическим весом атома или иона называется статистическая сумма по внутренним степеням свободы [10]

$$g = \sum_j g_j e^{-\mathcal{E}_j/T} \quad (11)$$

Если известны энергии и моменты для всех возбужденных уровней, то полный статистический вес атома или иона можно вычислять непосредственно по формуле (11), находя статистические веса различных уровней как [10]

$$g_j = 2J_j + 1 \quad (12)$$

Энергетические уровни и момент количества движения нейтрального атома аргона и однократно ионизированного атома аргона [11], а также статистический вес различных уровней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Энергетические уровни, момент количества движения, статистический вес атома и иона аргона

Нейтральный атом аргона				Однократно ионизированный атом аргона			
J	\mathcal{E} [см ⁻¹]	\mathcal{E} [эВ]	g_j	J	\mathcal{E} [см ⁻¹]	\mathcal{E} [эВ]	g_j
0	0	0	1	1,50	0	0	4
2	93143,7653	11,54768459	5	0,5	1431,5831	0,177483378	2
1	93750,6031	11,62291852	3	0,5	108721,53	13,47896912	2
0	94553,6705	11,72248041	1	3,5	132327,3621	16,40554937	8
1	95399,8329	11,82738508	3	2,5	132481,2071	16,42462261	6
1	104102,1043	12,90626658	3	1,5	132630,7281	16,44315978	4
0	107054,2773	13,27226814	1	0,5	132737,7041	16,45642234	2
3	105462,7649	13,0749572	7	2,5	134241,7392	16,6428881	6
2	105617,2753	13,09411294	5	1,5	135085,996	16,74755653	4
1	106087,2651	13,15238087	3	0,5	135601,7336	16,81149613	2
2	106237,5571	13,17101362	5	1,5	138243,6442	17,13903228	4
1	107131,7139	13,28186849	3	0,5	139258,3384	17,26483102	2

Продолжение таблицы 1

2	107289,7054	13,30145581	5	4,5	142186,3157	17,62783286	10
1	107496,4219	13,3270839	3	3,5	142717,0967	17,6936375	8
0	108722,6247	13,47910484	1	2,5	143107,6804	17,74206089	6
0	111667,771	13,84423525	1	1,5	143371,4365	17,77476058	4
1	111818,033	13,86286428	3	1,5	148620,1411	18,42547923	4
2	112138,929	13,902648	5	2,5	148842,4674	18,45304258	6
1	114147,737	14,15169399	3	1,5	150474,99	18,65543784	4
4	112750,158	13,97842634	9	2,5	151087,3128	18,73135178	6
3	113020,36	14,01192517	7	2,5	155043,1622	19,22178612	6
2	113425,969	14,06221136	5	1,5	155351,1209	19,25996592	4
3	113716,56	14,09823796	7	0,5	155708,108	19,30422411	2
2	113468,478	14,0674815	5	3,5	157234,02	19,4934021	8
1	113643,265	14,08915106	3	2,5	157673,4136	19,5478768	6
2	114640,997	14,21284689	5	1,5	158167,8003	19,60916938	4
3	114821,944	14,23528015	7	0,5	158428,1087	19,64144163	2
2	114805,14	14,23319684	5	2,5	158730,2997	19,67890637	6
1	115366,871	14,30283857	3	1,5	159393,385	19,76111369	4
0	114861,64	14,24020154	1	0,5	159706,5334	19,79993689	2
1	114975,024	14,25425855	3	1,5	160239,428	19,86600357	4
	127109,842	15,75869688		2,5	170401,0168	21,12580686	6
				3,5	170530,4041	21,14184791	8
				1,5	172213,88	21,3505602	4
				0,5	172816,2926	21,42524551	2

Потенциал ионизации $J = 15,75869688$ эВ.

Обозначим правую часть (10) как Q . Преобразуем левую часть (10),

поскольку $n_a = n_{ai} - n_i = n_{ai} - n_e = n_{ai} - In_{ai} = n_{ai}(1 - I)$, то

$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{n_e^2}{n_{ai}(1-I)} = \frac{n_{ai}^2 I^2}{n_{ai}(1-I)} = n_{ai} \frac{I^2}{1-I}$, с учетом выражения (5) получаем:

$$\frac{n_e^2}{n_a} = \frac{1}{1 + I\theta} \cdot \frac{P}{k \cdot T_{ai}} \cdot \frac{I^2}{1 - I} \quad (13)$$

Домножим и разделим правую часть (13) на $P_0 T_0$. Получим:

$$\frac{1}{1 + I\theta} \cdot \frac{P_0}{kT_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_{ai}} \cdot \frac{I^2}{1 - I} = Q \quad (14)$$

где $\frac{P_0}{kT_0} = n_0$ – исходная концентрация атомов аргона.

Подставим (9) в (14), получим:

$$\frac{1}{1 + I\theta} \cdot n_0 \cdot \frac{1}{(1 - \bar{v}) + \frac{\bar{v}}{1 + I\theta} \frac{T_0}{T_{ai}}} \cdot \frac{T_0}{T_{ai}} \cdot \frac{I^2}{1 - I} = Q \quad (15)$$

Преобразуем (13):

$$\frac{n_0}{(1 + I\theta)(1 - \bar{v}) \frac{T_{ai}}{T_0} + \bar{v}} \cdot \frac{I^2}{1 - I} = Q$$

Зная, что $\frac{T_{ai}}{T_0} = \frac{T_e}{\theta T_0}$. Тогда (13) примет вид:

$$\frac{n_0}{\left(\frac{1}{\theta} + I\right)(1 - \bar{v}) \frac{T_e}{T_0} + \bar{v}} \cdot \frac{I^2}{1 - I} = Q$$

Решая это уравнение, найдем значения степени ионизации для произвольно заданного значения степени неравновесности θ (вычисления производились с помощью решателя нелинейных уравнений в Excel). Полученные результаты представлены на рисунке 8.

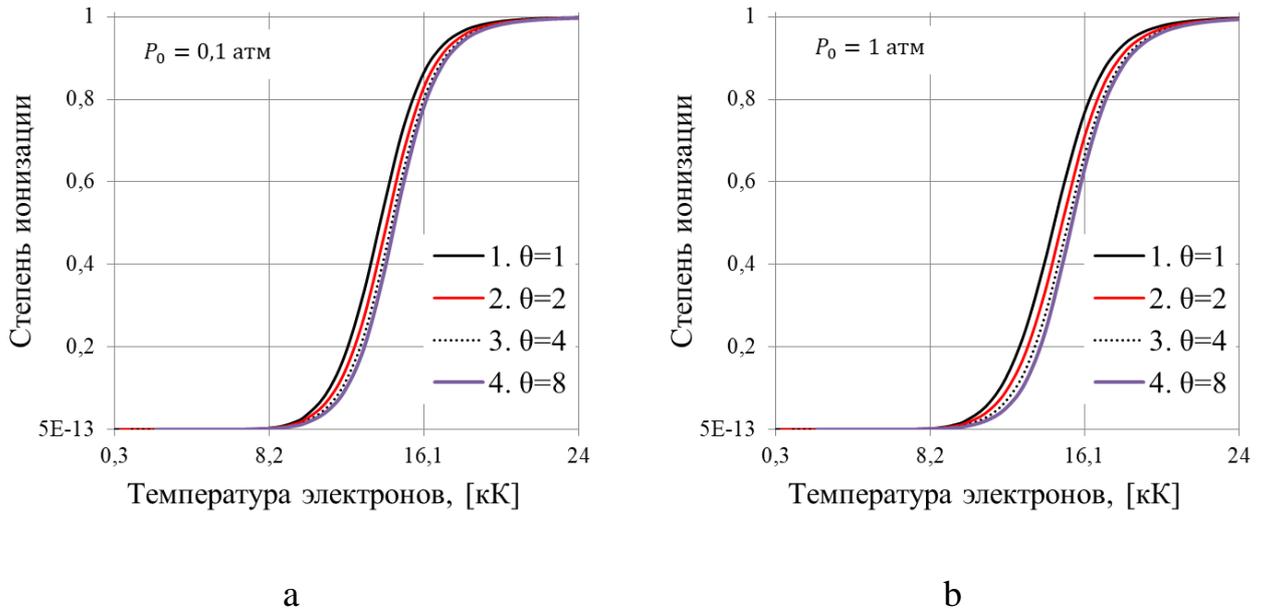


Рисунок 8 – Зависимость степени ионизации от температуры электронов при $\theta = 1 \dots 8$; а – для плазмы ВЧ-разряда, б – для плазмы лазерного разряда

В ВЧ-плазме полная ионизация наступает при меньших температурах, чем в лазерной плазме.

Так при температуре электронов, равной 24 кК для $\theta = 1$ степень ионизации $I = 0,9983$ в ВЧ-плазме. В лазерной же плазме при тех же данных степень ионизации $I = 0,9965$.

Кроме того, температура полной ионизации увеличивается с ростом степени неравновесности θ .

Зная значения степеней ионизации, было посчитано отношение давлений $\frac{P}{P_0}$ по формуле (9). Полученные значения приведены на рисунке 9.

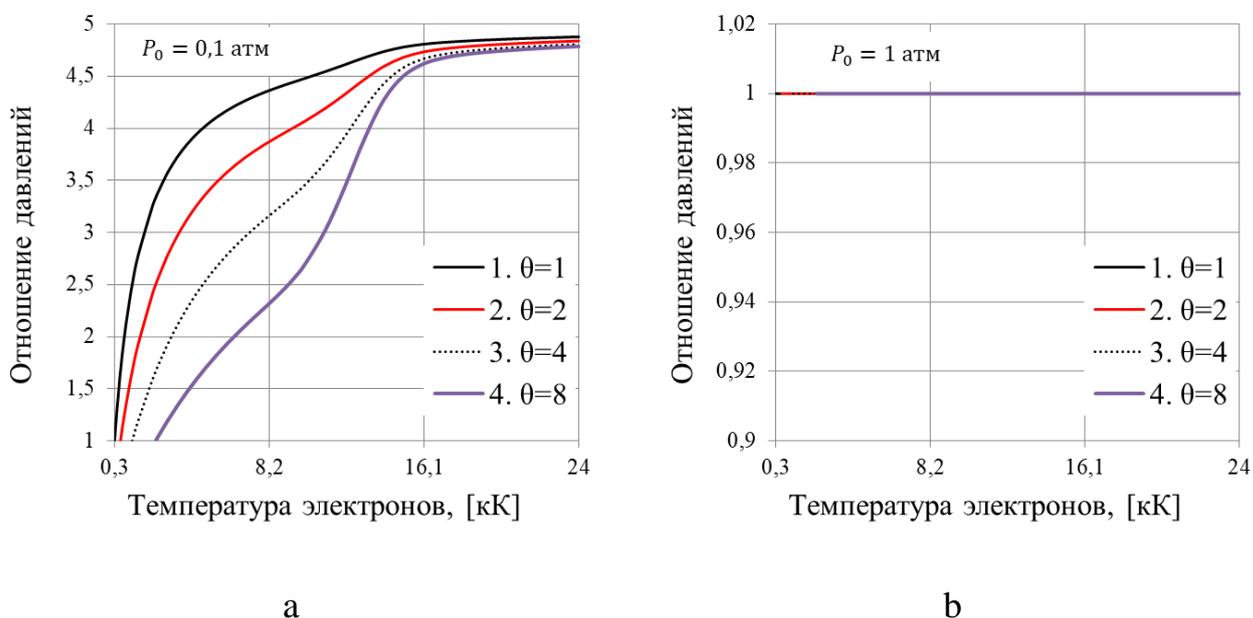


Рисунок 9 – Зависимость отношения давлений в камере от температуры электронов при $\theta = 1 \dots 8$; а – для плазмы ВЧ-разряда, б – для плазмы лазерного разряда

В ВЧ-плазме давление сильно возрастает и становится больше начального давления в несколько раз. Для плазмы лазерного разряда все иначе, давление по мере роста электронной температуры не увеличивается, остается таким же, как было начальное давление. Такое отличие связано с областью пространства, занимаемой плазмой: ВЧ-плазма занимает практически весь объем камеры, а лазерная плазма занимает лишь очень маленькую долю.

Также при разных степенях неравновесности для ВЧ-плазмы в области высоких температур давление уже не изменяется, что говорит о наступлении полной ионизации.

Теперь найдем концентрацию тяжелой компоненты плазмы по формуле (5). Результаты приведены на рисунке 10.

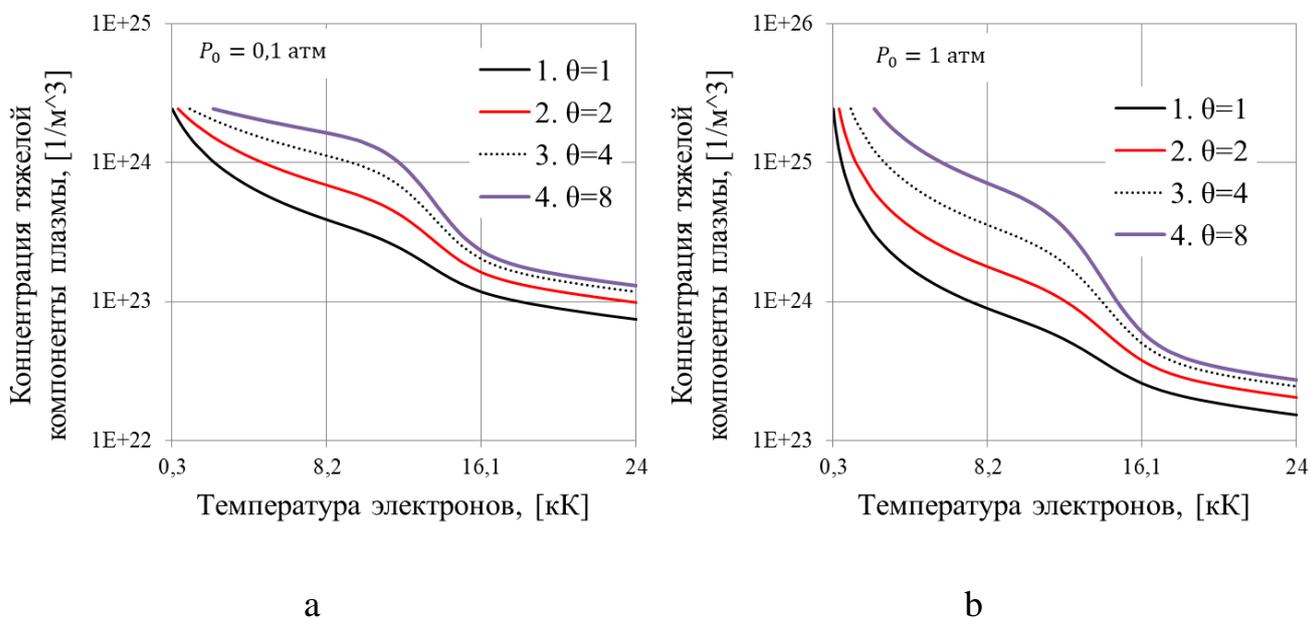
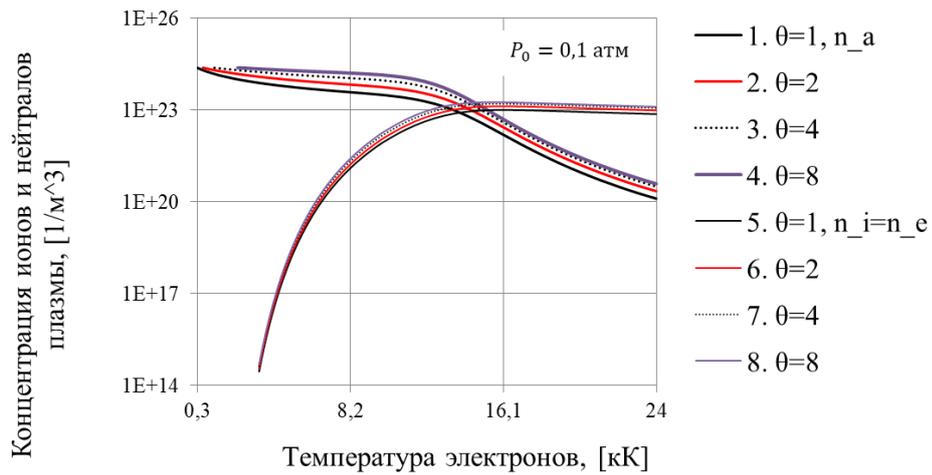


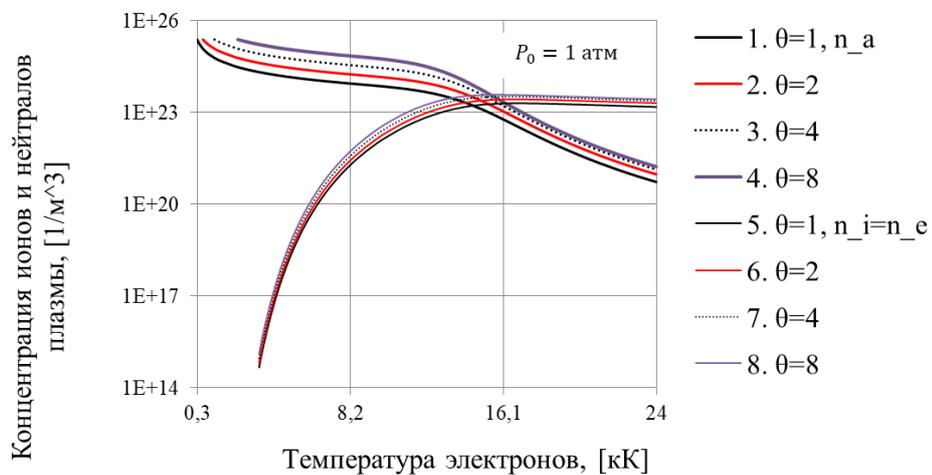
Рисунок 10 – Зависимость концентрации тяжелых частиц от температуры электронов при $\theta = 1 \dots 8$; а – для плазмы ВЧ-разряда, б – для плазмы лазерного разряда

Концентрация тяжелой компоненты плазмы в лазерной плазме на порядок больше, чем в ВЧ-плазме, это связано с различающимся давлением.

Зная степень ионизации и концентрацию тяжелой компоненты плазмы, найдем концентрацию нейтралов и ионов плазмы (концентрация ионов равна концентрации электронов). Полученные результаты представлены на рисунке 11.



a



b

Рисунок 11 – Зависимость концентрации нейтралов и ионов плазмы от температуры электронов при $\theta = 1 \dots 8$; a – для плазмы ВЧ-разряда, b – для плазмы лазерного разряда. 1-4 – зависимость концентрации нейтралов (n_a) от температуры плазмы при $\theta = 1 \dots 8$. 5-8 – зависимость концентрации ионов/электронов ($n_i = n_e$) от температуры плазмы $\theta = 1 \dots 8$

Для ВЧ и лазерной плазмы концентрация электронов с ростом температуры растет, при этом концентрация нейтралов плазмы падает.

Используя уравнение (1), найдем концентрацию атомов холодного аргона. Полученные результаты представлены на рисунке 12.

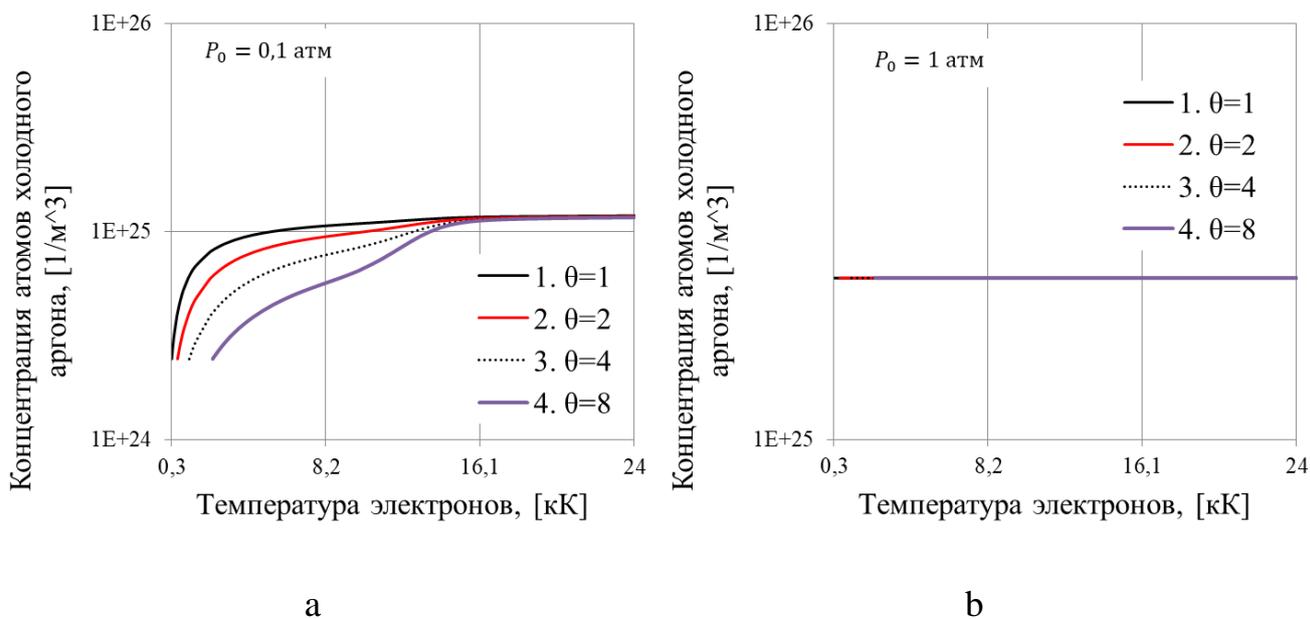


Рисунок 12 – Зависимость концентрации нейтралов холодного аргона от температуры электронов при $\theta = 1...8$; а – для плазмы ВЧ-разряда, б – для плазмы лазерного разряда

Для плазмы ВЧ-разряда концентрация атомов холодного аргона возрастает, что связано с вытеснением газа из области разряда, при высоких температурах концентрация становится постоянной для разных степеней неравновесности, это связано с наступлением полной ионизации. Для плазмы лазерного разряда концентрация атомов холодного не изменяется в силу малой области горения разряда.

3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО РАЗРЯДА

Рассмотрим сферически симметричную задачу (см. рисунок 13). Лазерная плазма занимает очень маленький объем в камере. Тепловой поток распространяется во все стороны и уменьшается с ростом радиуса. На стенке камеры тепловой поток равен 0.

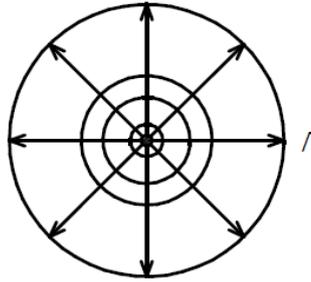


Рисунок 13 – Сферическое распространение теплового потока

Тогда $\frac{\partial}{\partial r} r^2 q(r) = 0$. Проинтегрируем это выражение и домножим на телесный угол, равный 4π , получим:

$$4\pi r^2 q(r) = W \quad (16)$$

где r – радиус распространения теплового потока;

$q(r)$ – тепловой поток;

W – мощность.

$$q(r) = \lambda \frac{dT}{dr} \quad (17)$$

где λ – теплопроводность.

Подставим (17) в (16).

$$4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} = W \quad (18)$$

Мощность $W = const$ и одинакова на всех радиусах в силу закона сохранения энергии, т.е. $W = W(r) = const$.

Интегрируем (18) и разделяем переменные.

$$dT = \frac{W}{4\pi\lambda} \frac{dr}{r^2} \quad (19)$$

Общая мощность равна сумме мощностей тяжелой и легкой компоненты плазмы, т.е.

$$W = W_e(r) + W_{ai}(r) \quad (20)$$

Разделим условно сферу (рисунок 13) на две части: в одной содержатся только электроны, в другой только нейтралы и ионы. Отношение площадей этих частей пропорционально отношению концентраций.

Тогда выражение для нахождения мощности легкой компоненты выглядит так:

$$W_e(r) = 4\pi\lambda_e(T_e) \frac{n_e}{n_e + n_{ai}} r^2 dT_e \quad (21)$$

где $\frac{n_e}{n_e + n_{ai}}$ – доля электронов в объеме плазмы.

Как известно, $T_e = \theta T_{ai}$.

Тогда (21) примет такой вид:

$$W_e(r) = 4\pi\lambda_e(T_e) \frac{n_e}{n_e + n_{ai}} r^2 \theta \frac{dT_{ai}}{dr} \quad (22)$$

Выражение для нахождения мощности тяжелой компоненты выглядит так:

$$W_{ai}(r) = 4\pi\lambda_{ai}(T_{ai}) \frac{n_{ai}}{n_e + n_{ai}} r^2 \frac{dT_{ai}}{dr} \quad (23)$$

где $\frac{n_{ai}}{n_e + n_{ai}}$ – доля нейтралов и ионов в объеме плазмы.

Подставим (22) и (23) в (20) и вынесем общие множители за скобку.

$$W = \frac{4\pi r^2}{n_e + n_{ai}} [n_e \lambda_e(T_e) \theta + n_{ai} \lambda_{ai}(T_{ai})] \frac{dT_{ai}}{dr} \quad (24)$$

Из (24) выразим $\frac{dT_{ai}}{dr}$.

$$\frac{dT_{ai}}{dr} = \frac{W}{\frac{4\pi r^2}{n_e + n_{ai}} [n_e \lambda_e(T_e) \theta + n_{ai} \lambda_{ai}(T_{ai})]} \quad (25)$$

Для решения данного уравнения сделаем аппроксимацию вида:

$$\frac{T_{ai}(r_{i+1}) - T_{ai}(r_i)}{r_{i+1} - r_i} = \frac{W}{\frac{4\pi r_i^2}{n_e + n_{ai}} [n_e \lambda_e(T_e)\theta + n_{ai} \lambda_{ai}(T_{ai})]}$$

Выразим r_{i+1} .

$$r_{i+1} = r_i + \frac{\frac{4\pi r_i^2}{n_e + n_{ai}} [n_e \lambda_e(T_e)\theta + n_{ai} \lambda_{ai}(T_{ai})]}{W} [T_{ai}(r_{i+1}) - T_{ai}(r_i)] \quad (26)$$

При решении (26) необходимо учитывать, что расчет r_{i+1} производится снизу вверх, т.е. от плазменного очага до стенки камеры (температура убывает по мере роста радиуса), значит необходимо поставить модуль в последних скобках, т.е. $|T_{ai}(r_{i+1}) - T_{ai}(r_i)|$, чтобы разность была положительной.

Также для решения (26) необходимо ввести начальные и граничные условия.

Начальные условия:

1. Начальным радиусом сферы r_0 считаем радиус лазерной плазмы, т.е. $r_0 = 50 \times 10^{-6}$ [м], которому соответствует температура 24 [кК].

Граничные условия:

1. Конечной температуре, принятой за 300 К, должен соответствовать радиус камеры $r = 50 \times 10^{-3}$ [м].

Кроме того, чтобы решить (26) необходимо знать теплопроводности «тяжелого» и «легкого» газа.

Теплопроводность газообразного аргона при атмосферном давлении описывается уравнением [12]:

$$\lambda = 10^{-3} \cdot (7,8T^{0,3} + 4,5T^{-1} - 30,4 + 1,14 \cdot 10^{-2}T) \quad (27)$$

Эта теплопроводность является теплопроводностью тяжелой компоненты плазмы (ионов и нейтралов) λ_{ai} .

Теплопроводность равновесной аргоновой плазмы при атмосферном давлении λ_{ai+e} , т.е. теплопроводность тяжелой и легкой компонент плазмы (нейтралов, ионов и электронов) представлена на рисунке 14:

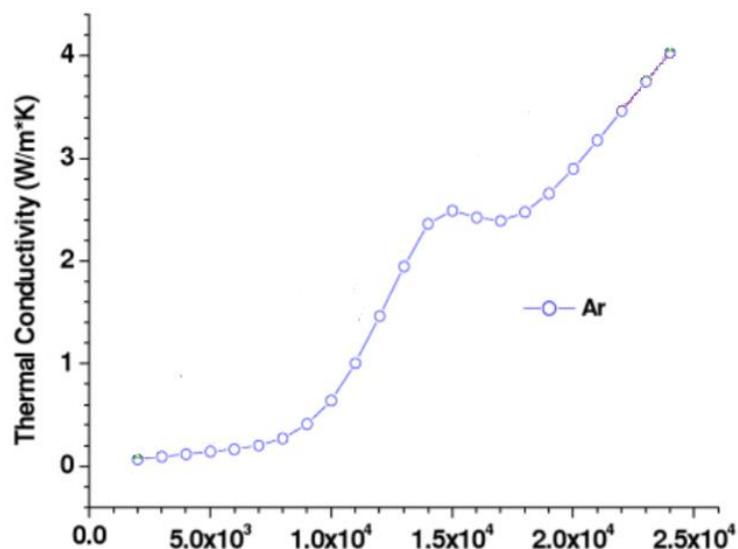


Рисунок 14 – Теплопроводность равновесной аргоновой плазмы [13]

Представим часть объема плазмы в виде трубки квадратного сечения с заданной длиной $L = 1$ [см] и площадью $S = 1$ [см²] (рисунок 15). «Тяжелый» и «легкий» газ занимают одно и то же пространство. Теплопередача между этими компонентами отсутствует, т.к. нет температурной разности в силу равновесности плазмы. Тепловой поток идет по одному каналу для тяжелой компоненты и по другому каналу для легкой.

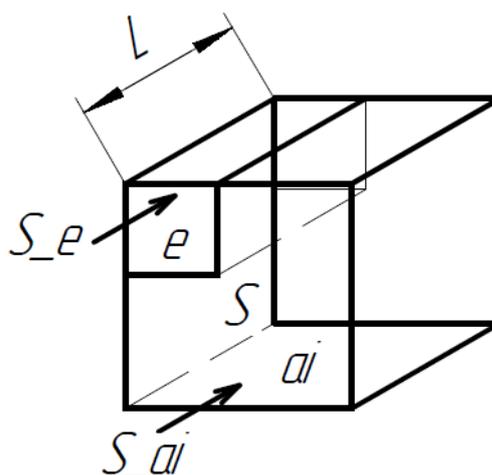


Рисунок 15 – Часть объема плазменной среды. S_e – площадь, занимаемая электронами, S_{ai} – площадь, занимаемая нейтралами и ионами

Рассмотрим термическое уравнение состояния в форме Менделеева-Клайперона, учитывая, что давление легкой и тяжелой компоненты плазмы равно:

$$P = n_e k T_e = n_{ai} k T_{ai} \quad (28)$$

Температуры тяжелой и легкой компоненты плазмы равны в силу равновесности плазмы: $T_e = T_{ai}$.

Таким образом, уравнение (28) преобразуется:

1. вместо n_e будет $\frac{n_e}{S_e}$, т.е. все электроны находятся в трубке площадью S_e .
2. вместо n_{ai} будет $\frac{n_{ai}}{S_{ai}}$, т.е. все нейтралы и ионы находятся в трубке площадью S_{ai} .

Для случая неравновесной плазмы теплопередача между тяжелой и легкой компонентой присутствует и идет с одним и тем же перепадом температур ΔT . Суммарный тепловой поток Q складывается из тепловых потоков «тяжелого» и «легкого» газа.

$$Q = \lambda_e S_e \frac{\Delta T}{L} + \lambda_{ai} S_{ai} \frac{\Delta T}{L} = \lambda_{ai+e} S \frac{\Delta T}{L} \quad (29)$$

Получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} S_e + S_{ai} = 1 \\ \frac{n_e}{S_e} = \frac{n_{ai}}{S_{ai}} \\ \lambda_{ai+e} = \lambda_e \frac{S_e}{S} + \lambda_{ai} \frac{S_{ai}}{S} \end{cases}$$

В результате получаем, что

$$S_e = \frac{\frac{1}{n_{ai}}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}};$$

$$S_{ai} = \frac{\frac{1}{n_e}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}}$$

и

$$\lambda_{ai+e} = \lambda_e \frac{\frac{1}{n_{ai}}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}} + \lambda_{ai} \frac{\frac{1}{n_e}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}}$$

Выразим теплопроводность электронного газа λ_e .

$$\lambda_e = \frac{\lambda_{ai+e} - \lambda_{ai} \frac{\frac{1}{n_e}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}}}{\frac{1}{\frac{n_{ai}}{\frac{1}{n_{ai}} + \frac{1}{n_e}}}} \quad (30)$$

Для диапазона температур от 300 К (начальная температура) до 24 кК были посчитаны концентрации тяжелой и легкой компоненты с помощью уравнения Саха, затем были найдены доли площадей, занимаемых соответствующими компонентами, также была посчитана «тяжелая» теплопроводность по формуле (27). С рисунка 14 были сняты значения теплопроводности тяжелой и легкой компоненты, и затем была посчитана теплопроводность легкой компоненты плазмы по формуле (30). Полученные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения концентраций легкой и тяжелой компонент плазмы, долей площади, теплопроводностей

№	T, [кК]	n_e , [м ³]	n_{ai} , [м ³]	S_e	S_{ai}	λ_{ai} , [Вт / м · К]	λ_{ai+e} , [Вт / м · К]	λ_e , [Вт / м · К]
1	0,3	0	2,45E+25			0,016	0,016	
2	0,4	0	1,84E+25			0,021	0,021	
3	0,56	0	1,31E+25			0,028	0,028	
4	0,6	0	1,22E+25			0,030	0,030	
5	0,7	0	1,05E+25			0,033	0,033	
6	0,8	0	9,18E+24			0,037	0,037	
7	0,9	0	8,16E+24			0,040	0,040	
8	1,12	0	6,56E+24			0,046	0,046	
9	1,2	0	6,12E+24			0,049	0,049	
10	1,5	0	4,89E+24			0,057	0,057	
11	2,24	0	3,28E+24			0,074	0,074	
12	2,4	0	3,06E+24			0,078	0,078	

Продолжение таблицы 2

13	2,5	0	2,94E+24			0,080	0,080	
14	3	4,67E+12	2,45E+24	1,907E-12	1	0,090	0,090	
15	3,5	4,65E+14	2,10E+24	2,217E-10	1	0,100	0,100	
16	4	1,27E+16	1,84E+24	6,926E-09	1	0,109	0,109	
17	4,5	1,67E+17	1,63E+24	1,024E-07	1	0,118	0,118	
18	5	1,32E+18	1,47E+24	8,964E-07	1	0,127	0,127	
19	5,5	7,14E+18	1,33E+24	5,349E-06	1	0,136	0,148	2313,413
20	6	2,93E+19	1,22E+24	2,393E-05	1	0,144	0,158	582,746
21	6,5	9,68E+19	1,13E+24	8,570E-05	1	0,152	0,165	147,923
22	7	2,70E+20	1,05E+24	2,575E-04	1	0,160	0,180	75,962
23	7,5	6,58E+20	9,78E+23	0,001	0,999	0,169	0,192	35,128
24	8	1,43E+21	9,16E+23	0,002	0,998	0,176	0,238	39,565
25	8,5	2,85E+21	8,61E+23	0,003	0,997	0,184	0,298	34,607
26	9	5,26E+21	8,11E+23	0,006	0,994	0,192	0,395	31,697
27	9,5	9,06E+21	7,64E+23	0,012	0,988	0,200	0,472	23,427
28	10	1,47E+22	7,19E+23	0,020	0,980	0,207	0,6	19,761
29	11,05	3,49E+22	6,30E+23	0,053	0,947	0,223	1,000	15,013
30	12,05	6,64E+22	5,43E+23	0,109	0,891	0,238	1,455	11,406
31	13,05	1,08E+23	4,55E+23	0,192	0,808	0,252	1,955	9,139
32	14,05	1,50E+23	3,72E+23	0,288	0,712	0,267	2,375	7,600
33	15,05	1,82E+23	3,06E+23	0,373	0,627	0,281	2,500	6,228
34	16,1	1,98E+23	2,58E+23	0,434	0,566	0,296	2,410	5,165
35	17,1	2,00E+23	2,29E+23	0,466	0,534	0,310	2,395	4,782
36	18,1	1,96E+23	2,10E+23	0,483	0,517	0,324	2,48	4,792
37	19,05	1,89E+23	1,96E+23	0,490	0,510	0,337	2,645	5,044
38	20,1	1,81E+23	1,85E+23	0,495	0,505	0,351	2,914	5,532
39	21,1	1,73E+23	1,75E+23	0,497	0,503	0,365	3,194	6,059
40	22,1	1,65E+23	1,67E+23	0,498	0,502	0,378	3,485	6,616
41	23,1	1,59E+23	1,59E+23	0,499	0,501	0,392	3,715	7,055
42	24	1,53E+23	1,53E+23	0,499	0,501	0,404	4	7,609

Графики зависимостей теплопроводности от температуры электронов приведены на рисунках 16 и 17. На рисунке 17 электронная теплопроводность построена в логарифмическом масштабе.

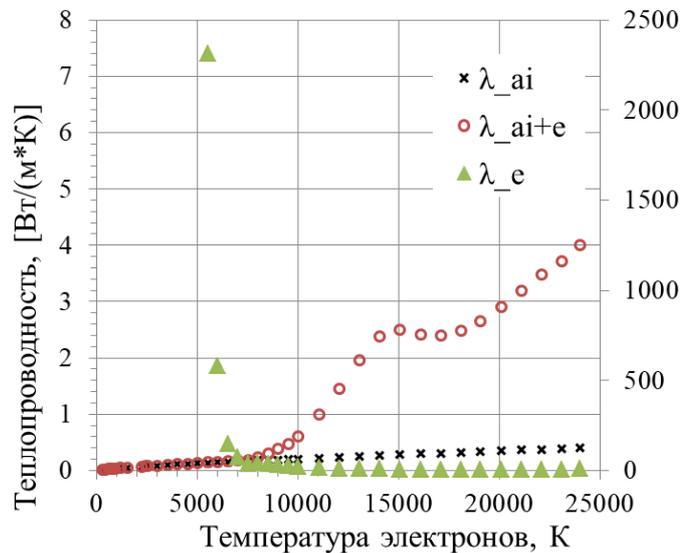


Рисунок 16 – Зависимость теплопроводности от температуры электронов. λ_{ai} – теплопроводность тяжелой компоненты плазмы, λ_{ai+e} – теплопроводность тяжелой и легкой компонент плазмы, λ_e – теплопроводность легкой компоненты плазмы

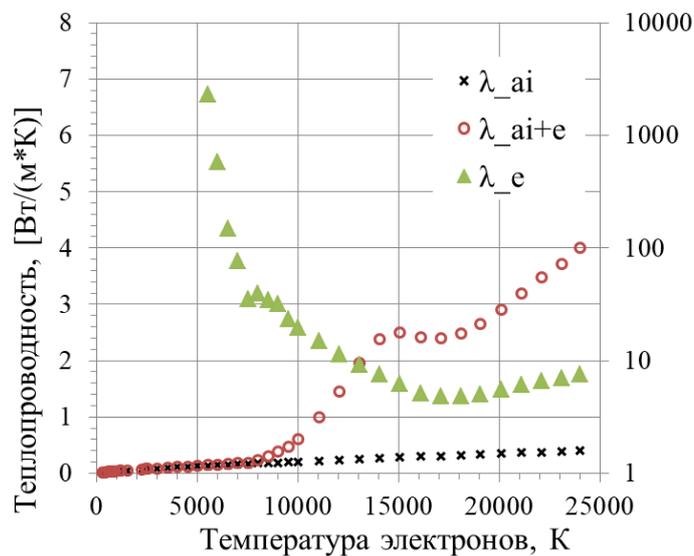


Рисунок 17 – Зависимость теплопроводности от температуры электронов. λ_{ai} – теплопроводность тяжелой компоненты плазмы, λ_{ai+e} – теплопроводность тяжелой и легкой компонент плазмы, λ_e – теплопроводность легкой компоненты плазмы

Мощность, необходимая для поддержания непрерывного лазерного разряда, была посчитана для разных степеней неравновесности: $\theta = 2; 4; 8$. Полученный результат приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет мощности

№	$T_{ai}, [K]$	$\theta = 2,$	$T_{ai}, [K]$	$\theta = 4,$	$T_{ai}, [K]$	$\theta = 8,$
		$W = 15,6824 [Вт]$		$W = 14,1715 [Вт]$		$W = 13,1326 [Вт]$
		$r, [м]$		$r, [м]$		$r, [м]$
1	300	5,00E-02	300	5,00E-02	300	5,00E-02
2	350	4,74E-02	375	4,38E-02	313	4,79E-02
3	400	4,47E-02	560	3,34E-02	375	4,02E-02
4	450	4,21E-02	600	3,09E-02	438	3,40E-02
5	560	3,72E-02	625	2,94E-02	500	2,90E-02
6	600	3,54E-02	750	2,42E-02	563	2,49E-02
7	750	3,01E-02	875	2,02E-02	625	2,16E-02
8	1120	2,20E-02	1000	1,70E-02	688	1,89E-02
9	1200	2,01E-02	1125	1,45E-02	750	1,62E-02
10	1250	1,89E-02	1250	1,24E-02	813	1,40E-02
11	1500	1,52E-02	1375	1,08E-02	875	1,23E-02
12	1750	1,24E-02	1500	9,27E-03	938	1,08E-02
13	2000	1,03E-02	1625	8,03E-03	1000	9,54E-03
14	2250	8,67E-03	1750	7,05E-03	1063	8,15E-03
15	2500	7,38E-03	1875	6,20E-03	1125	6,76E-03
16	2750	6,36E-03	2000	5,48E-03	1188	5,40E-03
17	3000	5,45E-03	2125	4,74E-03	1250	4,30E-03
18	3250	4,72E-03	2250	4,00E-03	1381	2,88E-03
19	3500	4,13E-03	2375	3,28E-03	1506	1,82E-03
20	3750	3,64E-03	2500	2,68E-03	1631	1,12E-03
21	4000	3,22E-03	2762,5	1,86E-03	1756	6,90E-04
22	4250	2,80E-03	3012,5	1,23E-03	1881	4,32E-04
23	4500	2,40E-03	3262,5	7,94E-04	2013	2,83E-04
24	4750	2,01E-03	3512,5	5,15E-04	2138	2,03E-04
25	5000	1,68E-03	3762,5	3,41E-04	2263	1,54E-04
26	5525	1,21E-03	4025	2,37E-04	2381	1,23E-04

Продолжение таблицы 3

27	6025	8,29E-04	4275	1,78E-04	2513	9,89E-05
28	6525	5,62E-04	4525	1,40E-04	2638	8,15E-05
29	7025	3,84E-04	4762,5	1,14E-04	2763	6,81E-05
30	7525	2,69E-04	5025	9,40E-05	2888	5,76E-05
31	8050	1,97E-04	5275	7,88E-05	3000	5,00E-05
32	8550	1,54E-04	5525	6,68E-05		
33	9050	1,26E-04	5775	5,71E-05		
34	9525	1,05E-04	6000	5,00E-05		
35	10050	8,87E-05				
36	10550	7,57E-05				
37	11050	6,52E-05				
38	11550	5,65E-05				
39	12000	5,00E-05				

Таким образом, для поддержания лазерного разряда при разных степенях неравновесности необходима мощность:

- 1) При $\theta = 2$ $W = 15,6824$ [Вт].
- 2) При $\theta = 4$ $W = 14,1715$ [Вт].
- 3) При $\theta = 8$ $W = 13,1326$ [Вт].

4 ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО ЗАРЯДА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В АРГОНОВОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ ВЧ-РАЗРЯДА

Будем считать, что заряд пылевой частицы отрицательный, то есть $q < 0$; вкладом заряда ионов в заряд частиц пренебрегаем в силу маленькой скорости ионов.

Энергию электрона определим так [14]:

$$\frac{m_e V_e^2}{2} = \frac{3}{2} kT_e \quad (31)$$

где $\frac{m_e V_e^2}{2}$ – кинетическая энергия движения электронов;

$\frac{3}{2} kT_e$ – энергия теплового движения электронов;

m_e – масса электрона;

V_e – скорость электрона.

Разность потенциалов $\Delta\varphi$, которую электрон способен преодолеть от бесконечности до частицы, тормозясь до 0, определяется следующим образом:

$$\frac{m_e V_e^2}{2e} = \Delta\varphi \quad (32)$$

Потенциал на поверхности частицы определяется [15]:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \frac{d}{2}} \quad (33)$$

где d – диаметр частицы (= 5 мкм).

В итоге максимальный заряд частицы определяется:

$$q = \frac{3\pi\epsilon_0 d}{e} kT_e \quad (34)$$

Полученный результат представлен на рисунке 18.

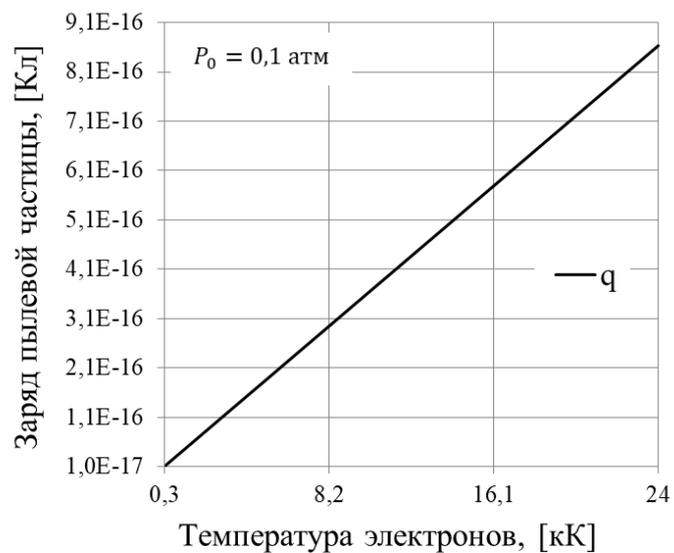


Рисунок 18 – Зависимость заряда пылевой частицы от температуры электронов

Заряд пылевой частицы с ростом температуры электронов увеличивается, при заданных температурах заряд частицы остается порядка 10^{-16} Кл.

5 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

5.1 Назначение и описание разрабатываемого стенда

На основании имеющегося опыта разработок лабораторных установок для проведения экспериментов по изучению свойств плазмы, а также частиц, инжектированных в нее, была разработана схема экспериментальной установки, изображение которой приведено на рисунках 19 и 20. Полная версия этой схемы содержится в приложении.

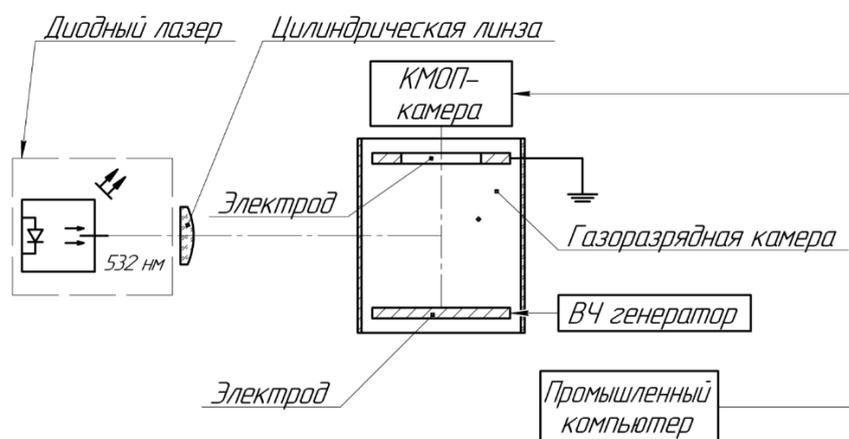


Рисунок 19 – Схема экспериментальной установки (вид спереди)

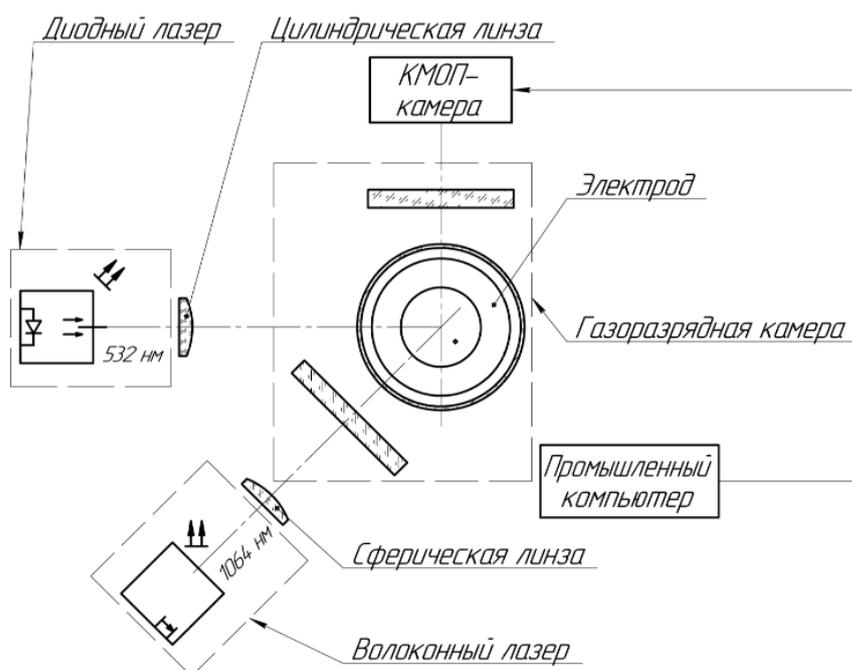


Рисунок 20 – Схема экспериментальной установки (вид сверху)

Экспериментальный стенд включает в себя:

1. Газоразрядную камеру, в которой расположены электроды: верхний – заземленный, нижний – управляется ВЧ-генератором.
2. Зондирующую систему, включающую в себя систему формирования излучения: лазер и линзу и систему видеофиксации – КМОП-камеру.
3. Генератор ВЧ «ИВЭ-171RFS» (рисунок 21) одноканальный, который имеет выходное высокочастотное напряжение с частотой 13,56 МГц. Этот генератор имеет гальванически оптоизолированный интерфейс внешнего управления «RS-485», ориентированный для работы в составе автоматического согласующего устройства «АСУ-171S» (рисунок 22) [16]. Его основные технические характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные технические характеристики ВЧ-генератора

Характеристика	Значение
Выходная активная ВЧ(RF)-мощность, регулируемая*, Вт	от 30 до 600
Выходное амплитудное ВЧ(RF)-напряжение, регулируемое*, В	от 10 до 250
Нестабильность выходной ВЧ(RF)-мощности, %, не более	3
Нестабильность выходного ВЧ(RF)-напряжения, %, не более	2
Частота выходного напряжения, МГц	13,56
Максимальное амплитудное напряжение RF-защиты, В	280
Максимальный амплитудный ток RF-дугозащиты, А	6
Предел выходной реактивной амплитудной RF-мощности, ВА	1680
КПД (PDC/PAC // PBC/PDC // PBC/PAC), не менее	0,85//0,55//0,467
Потребляемая электрическая мощность, Вт	1300
Напряжение питающей сети	220В -15% +10%, 48~62 Гц
Масса, кг	15
Габаритные размеры, мм	224 x 133 x 417

* на резистивном эквиваленте нагрузки сопротивлением 50 Ом через кабель ИВЭ4.171.030



Рисунок 21 – Генератор ВЧ «ИВЭ-171RFS»



Рисунок 22 – Автоматическое согласующее устройство «АСУ-171S»

4. Насос XDS35i (рисунок 23) – вакуумный спиральный безмасляный насос. Технические характеристики насоса представлены в таблице 5.



Рисунок 23 – Спиральный насос XDS35i

Таблица 5 – Технические характеристики XDS35i

Характеристика	Значение
Производительность (50/60 Гц)	43 м ³ /ч (12,1 л/с)
Максимальная быстрота откачки (50/60 Гц)	35 м ³ /ч (10 л/с)
Предельное остаточное давление (полное давление)	10 ⁻² мбар (8×10 ⁻³ Торр)
Входное соединение	фланец NW40

Продолжение таблицы 5

Выходное соединение	фланец NW25
Максимально допустимое давление на выходе	1 бар
Максимально допустимое давление на входе	0,5 бар
Максимально допустимое давление паров воды на входе	50 мбар / 38 Торр
Максимальная скорость откачки паров воды:	
газобалласт – малый поток	70 г/ч
газобалласт – большой поток	240 г/ч
Мощность двигателя	520 Вт
Класс электрозащиты	IP44
Электропитание	100-120/220-230 В, 50/60 Гц
Рабочая температура	10 - 40 °С
Вес	48 кг
Шум	57 дБА
Вибрация	< 4,5 мм/с (rms)
Герметичность	< 10 ⁻⁶ мбар·л/с

5. Баллон аргоновый стальной, 40 л, ГОСТ 949-73 (рисунок 24).

Технические характеристики баллона приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики аргонового баллона

Характеристика	Значение
Объем газа	6,3 м ³
Допустимое давление, max	150 атм
Присоединительная резьба	G3/4
Длина баллона	1400 мм
Диаметр цилиндра	219 мм
Вес	65 кг



Рисунок 24 – Аргоновый баллон

6. Редуктор аргоновый БАРО-50-4 БАМЗ СВ000003236 (рисунок 25), его основные технические характеристики представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные технические характеристики газового редуктора

Характеристика	Значение
Входное давление	200 бар
Мах рабочее давление	1,25 МПа
Мах пропускная способность	50 м ³ /ч
Входное соединение	G3/4
Выходное соединение	M16×1,5
Материал	латунь
Количество манометров	2
Габариты	170×170×155 мм
Вес	1,75 кг



Рисунок 25 – Газовый редуктор

Редуктор предназначен для регулирования, поддержания и формирования необходимого давления, поступающего из баллона. Два манометра

обеспечивают контроль давления на входе и в камере рабочего давления. Подсоединяется к газовому баллону и рукаву для последующей подачи газа.

7. Промышленный компьютер iROBO-3000-00i6-G4 (рисунок 26), который представляет собой компактную вычислительную систему для сбора и обработки информации. Его основные характеристики приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Основные характеристики промышленного компьютера

Характеристика	Значение
Конструкция корпуса	стальной корпус
Тип поддерживаемых процессоров	Intel Core i3, Intel Core i5, Intel Core i7, Intel Pentium, Intel Xeon E3 v5
Тип установленного процессора	Intel Pentium G5400
Частота процессора	3,7 ГГц
Чипсет	Intel C246
Тип оперативной памяти	DDR4 2400
Установленный объем оперативной памяти	4 ГБ
Максимальный объем оперативной памяти	64 ГБ
Количество жёстких дисков	1
Вид монтажа	настольный, монтаж на стене
Габариты (Ш×В×Г)	330×196×406
Вес	17 кг



Рисунок 26 – Промышленный компьютер

Кроме того, необходимо дополнительное оборудование: монитор, клавиатура и мышь.

Разрабатываемый экспериментальный стенд предназначен:

- 1) для изучения аргоновой плазмы, возбуждаемой ВЧ-разрядом;
- 2) для изучения плазмы, возникающей в результате первичной ионизации за счет ВЧ-разряда и поддерживаемой непрерывным лазерным разрядом;
- 3) для изучения пространственных структур, образованных заряженными пылевыми частицами в газоразрядной плазме, а также для исследования их динамического поведения.

5.2 Разработка газоразрядной камеры

Технические требования, предъявляемые к камере, представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Исходные данные

Характеристика	Значение
Основные размеры (диаметр × длина)	∅ 114 мм × 130 мм
Среда заполнения	аргон
Начальное давление внутри камеры	0,1 атм для ВЧ-плазмы 1 атм для лазерной плазмы
Материал стенок	кварц
Диаметр пылевых частиц	∅ 5 мкм
Диаметр дисковых электродов	∅ 60 мм
Расстояние между электродами	30 мм

Полученная конструкция имеет следующий вид (см. рисунок 27).

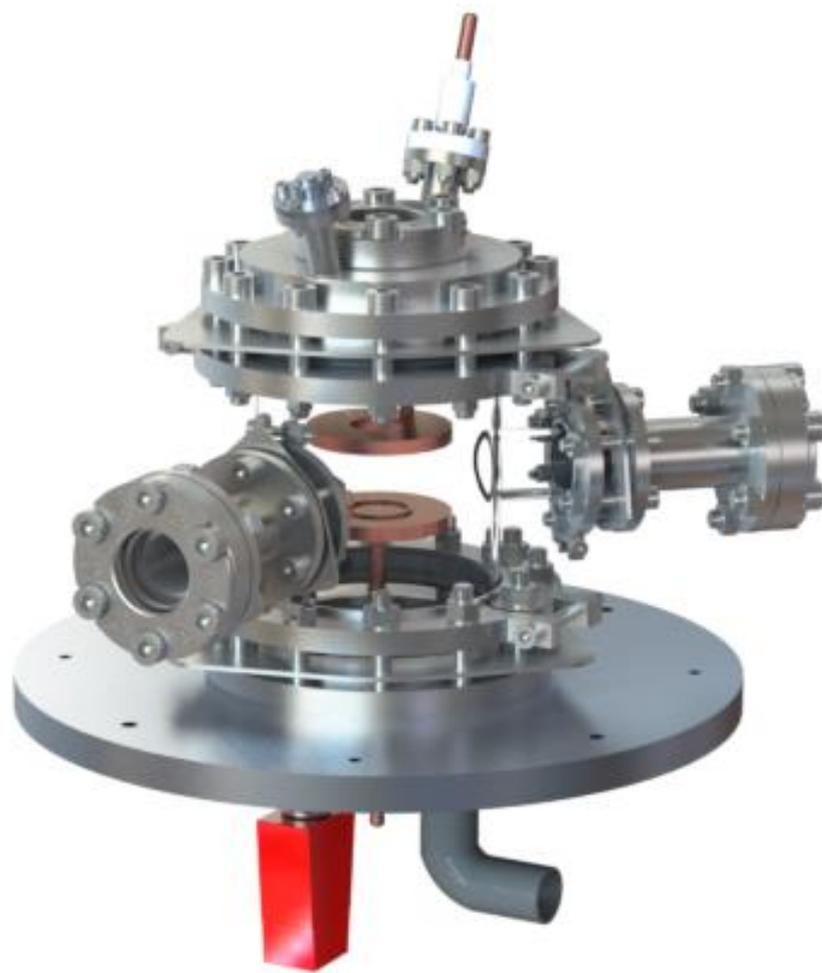


Рисунок 27 – Газоразрядная камера

Составляющие газоразрядной камеры представлены на рисунке 28.

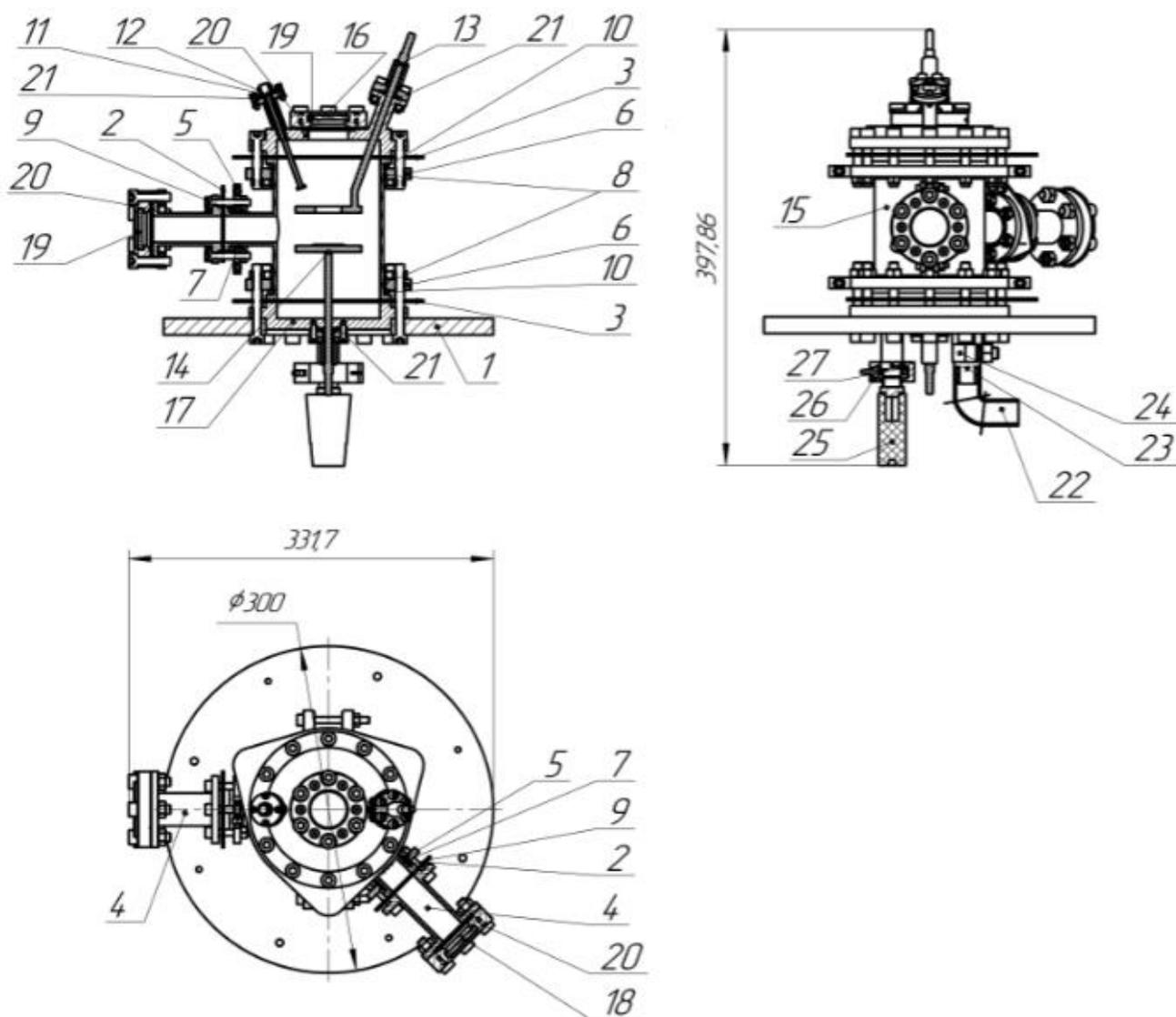


Рисунок 28 – Газоразрядная камера: 1 – основание; 2 – прокладка металлическая малая; 3 – прокладка металлическая большая; 4 – патрубок с двумя фланцами; 5 – фланец накладной разъемный малый; 6 – фланец накладной разъемный большой; 7 – резиновое кольцо вида 1 малое; 8 – резиновое кольцо вида 1 большое; 9 – резиновое кольцо вида 2 малое; 10 – резиновое кольцо вида 2 большое; 11 – диспенсер; 12 – фланец для диспенсера; 13 – заземленный электрод; 14 – высокочастотный электрод; 15 – кварцевый корпус; 16 – верхний фланец; 17 – нижний фланец; 18 – фланец с оптическим окном VPCH42-C; 19 – фланец с оптическим окном VPCH42-A; 20 – медное кольцо VGC10; 21 – медное кольцо; 22 – рукав для инертного газа 1440-00-04; 23 – фитинг 5074-02-04; 24 – червячный хомут DIN3017 5564-12-22; 25 – датчик

Пирани APG100-ХМ; 26 – хомут быстросъемный NW10/16; 27 – уплотнение с центрирующим кольцом NW16

Для создания условий вакуума внутри кварцевого корпуса, представленного на рисунке 29, необходимо обеспечить плотные соединения, гарантирующие отсутствие утечки газа. Используем фланцевые соединения металлической и стеклянной труб. К окончанию стеклянного патрубка надевается резиновое кольцо ((9) или (10) в зависимости от диаметра патрубка). Далее к стеклянному патрубку прикрепляется металлический патрубок с двумя фланцами (4) или просто фланец (верхний (16)/нижний (17)) (зависит от диаметра патрубка) с помощью накидного разъемного фланца ((5) или (6)), в котором расположено резиновое кольца ((7) или (8) в зависимости от диаметра патрубка). Между металлической и стеклянной трубами располагается металлическая прокладка ((2) или (3) в зависимости от диаметра патрубка).

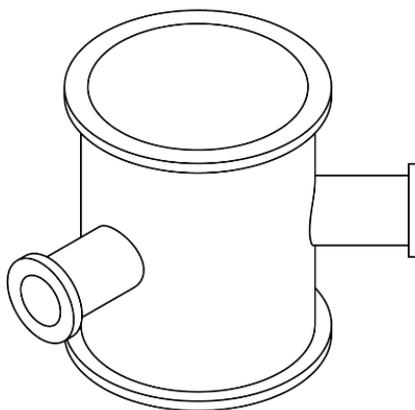


Рисунок 29 – Кварцевый корпус

В случае боковых фланцевых соединений металлической и стеклянной трубы ко второму фланцу металлического патрубка прикрепляются фланцы ((18) см. рисунок 30а или (19) см. рисунок 30б), в которых расположены оптические окна, вакуумное соединение обеспечивается использованием медного кольца (20) (рисунок 30в).

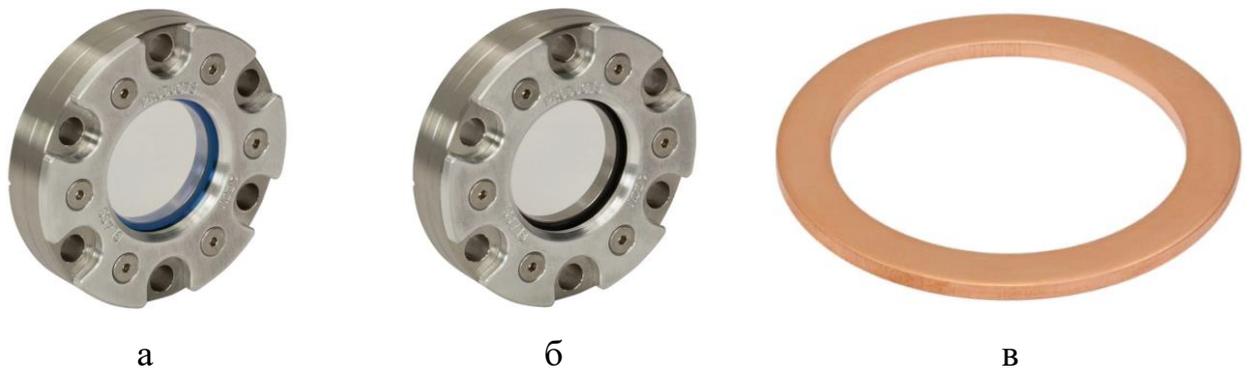


Рисунок 30 – а, б – фланцы с оптическими окнами; в – медное кольцо

Одно из оптических окон необходимо для ввода излучения в камеру (для лазерного разряда (рисунок 31а)), а второе (рисунок 31б) для наблюдения с помощью видеокамеры за динамикой пылевых частиц в вертикальной плоскости. Оптические окна отличаются покрытием (рисунок 31а – покрытие 1050-1700 нм, рисунок 31б – покрытие 350-700 нм).

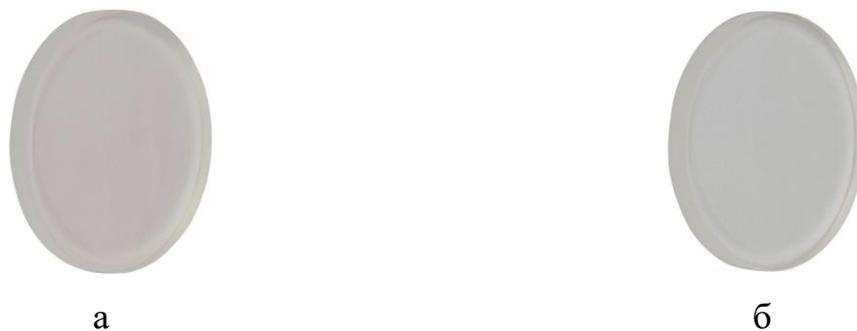


Рисунок 31 – Оптические окна: а - оптическое окно VPW42-С; б - оптическое окно VPW42-А

К верхнему фланцу (16) прикрепляется фланец (19) (см. рисунок 30б), в котором расположено оптическое окно, с помощью глухих винтов, вакуумное соединение обеспечивается использованием медного кольца (20) (см. рисунок 30в). Это оптическое окно (рисунок 31б) необходимо также для наблюдения за динамикой пылевых частиц, но уже в горизонтальной плоскости. Кроме того, у верхнего фланца имеются патрубки, оканчивающиеся фланцами. Они необходимы для крепления диспенсера (11), первоначально закрепленного во фланце (12), и для крепления электрического разъема под заземленный электрод (13). Вакуумное соединение обеспечивается благодаря использованию медных колец (21). Диспенсер представляет собой приводимый в движение

магнитным полем плунжер, на конце которого находится объем для хранения микрочастиц, который закрывается сетчатым фильтром с подобранными по размеру частиц ячейками. Микрочастицы просеиваются через этот фильтр в разрядную камеру под действием приводимых в движение электромагнитным образом толчков плунжера. Микрочастицы левитируют в приэлектродном слое, их перемещение в горизонтальном направлении ограничено потенциальной ямой, создаваемой кольцом, находящемся на нижнем электроде (ВЧ электроде).

Для контроля давления внутри камеры используется датчик Пирани (25) (см. рисунок 32а), чтобы обеспечить вакуумное соединение между ним и нижним фланцем (17) необходимо применить уплотнение с центрирующим кольцом (27) (см. рисунок 32в) и затем соединить их с помощью быстросъемного хомута (26) (см. рисунок 32б). Хомут имеет коническую внутреннюю поверхность, соответствующую внешней конической поверхности фланцев.



Рисунок 32 – а – датчик Пирани; б – хомут быстросъемный; в – уплотнение с центрирующим кольцом

Также к нижнему фланцу крепится электрический разъем с приваренным к нему ВЧ-электродом, вакуумное соединение обеспечивается при использовании медного кольца (21).

Для вакуумирования всей газоразрядной камеры к нижнему фланцу с помощью фитинга (23) (см. рисунок 33б) и червячного хомута (24) (см. рисунок 33в) присоединяется рукав для инертного газа (22) (см. рисунок 33а).



а



б



в

Рисунок 33 – а – рукав для инертного газа; б – фитинг; в – червячный хомут

Отверстия, сделанные в основании (1) газоразрядной камеры, необходимы для крепления стоек, которые, в свою очередь, прикрепляются к оптическому столу, а также для стоек, к которым прикрепляется видеокамера.

Массогабаритные характеристики газоразрядной камеры представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Массогабаритные характеристики газоразрядной камеры

Габариты, мм	397,86 × 331,7 × 331,7
Масса, кг	10,62

5.3 Разработка зондирующей системы

5.3.1 Методика расчета рассеяния излучения пылевыми частицами

Сначала определяем характеристики рассеяния.

Рассмотрим случай, когда сферическая частица зеркально отражает параллельный поток падающего на нее излучения лазерного ножа. Размер частицы много больше длины волны $r \gg \lambda$.

От частицы излучение отражается под разными углами (рисунок 34). Введем систему координат, ось «х» которой параллельна направлению

падающего излучения, ось «у» находится в плоскости рисунка. Рассмотрим ход двух близких лучей, один из которых проходит в плоскости рисунка на расстоянии y от оси «х», другой – на расстоянии $y + dy$.

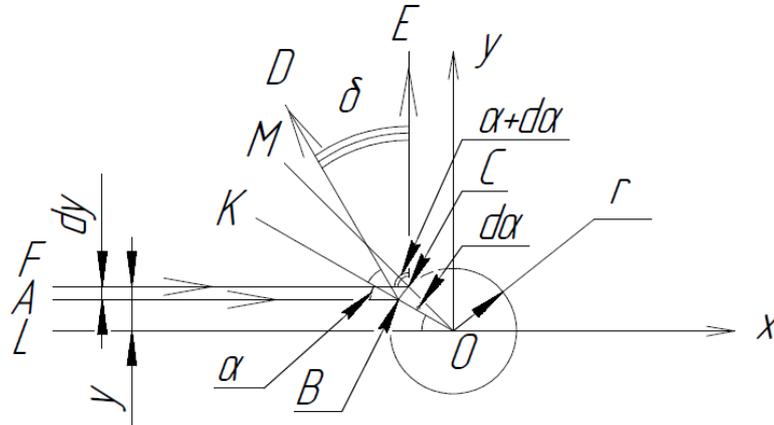


Рисунок 34 – Ход лучей

α – угол падения луча АВ (1 луч) на частицу, прямая АВ параллельна прямой LO (оси «х»), КО – локальная нормаль в точке падения луча АВ на поверхность частицы. Тогда $\alpha = \angle LOB$ (как соответственные углы).

$(\alpha + d\alpha)$ – угол падения луча FC (2 луч) на частицу, прямая FC параллельна прямой LO, МО – локальная нормаль в точке падения луча FC на поверхность частицы. Тогда $(\alpha + d\alpha) = \angle LOM$ (как соответственные углы).

Тогда $\angle KOM = d\alpha$.

По закону зеркального отражения 1 луч отражается от поверхности частицы под углом, равным углу падения (α); 2 луч под углом $\alpha + d\alpha$. Перпендикуляры, с помощью которых были построены отраженные лучи, образуют угол, равный $d\alpha$. Угол между отраженными лучами определим, воспользовавшись рисунком 34.

$\angle ABD = 2\alpha, \angle FCE = 2(\alpha + d\alpha)$. Тогда угол $\delta = 2(\alpha + d\alpha) - 2\alpha = 2d\alpha$.

1) Определим мощность излучения dP , падающую на частицу в кольцевом зазоре между цилиндрами, имеющими радиусы y и $y + dy$. Площадь сечения кольцевого зазора определяется выражением:

$$S = \pi \cdot ((y + dy)^2 - y^2) = \pi \cdot (2dy \cdot y + dy^2) \quad (35)$$

Поскольку dy^2 имеет более высокий порядок малости по сравнению с dy , этим слагаемым в (35) можно пренебречь. Тогда мощность излучения определяется выражением:

$$dP = 2\pi I y dy, \quad (36)$$

где I – интенсивность излучения лазерного ножа.

2) Определим телесный угол $d\Omega$, в котором находятся отраженные лучи, падающие на поверхность частицы в кольцевом зазоре. Введем пробную сферу радиуса $R \gg r$ (рисунок 35). Площадь dS , занимаемая на поверхности пробной сферы отраженными лучами определим так:

$$dS = 2R d\alpha \cdot 2\pi R \sin(2\alpha) = 4\pi R^2 \sin(2\alpha) d\alpha \quad (37)$$

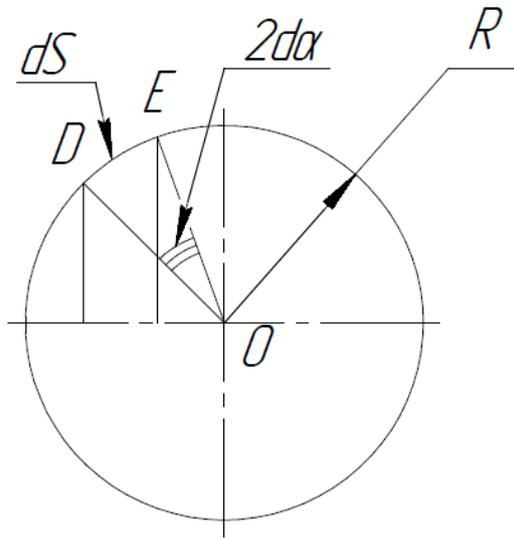


Рисунок 35 – Пробная сфера и определение телесного угла

Тогда телесный угол $d\Omega$ определим следующим образом:

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{2R d\alpha \cdot 2\pi \cdot R \sin(2\alpha)}{R^2} = 4\pi \sin(2\alpha) d\alpha \quad (38)$$

Дифференциальное сечение рассеяния определим так:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{dP}{I d\Omega} = \frac{I \cdot 2\pi \cdot p \cdot dp}{I \cdot 4\pi \sin(2\alpha) d\alpha} = \frac{1 \cdot p \cdot dp}{2 \sin(2\alpha) d\alpha} = \frac{1 \cdot p \cdot dp}{4 \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha} \\ &= \frac{1 \cdot r \sin\alpha \cdot r \cos\alpha}{4 \sin\alpha \cdot \cos\alpha} = \frac{r^2}{4} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{ср}} \right] \end{aligned} \quad (39)$$

Обратим внимание на то, что дифференциальное сечение рассеяния не зависит от угла рассеяния.

Затем определяем характеристики лазерного ножа.

1) Рассмотрим наблюдение частицы камерой, расположенной на расстоянии R от плоскости лазерного ножа (рисунок 36).

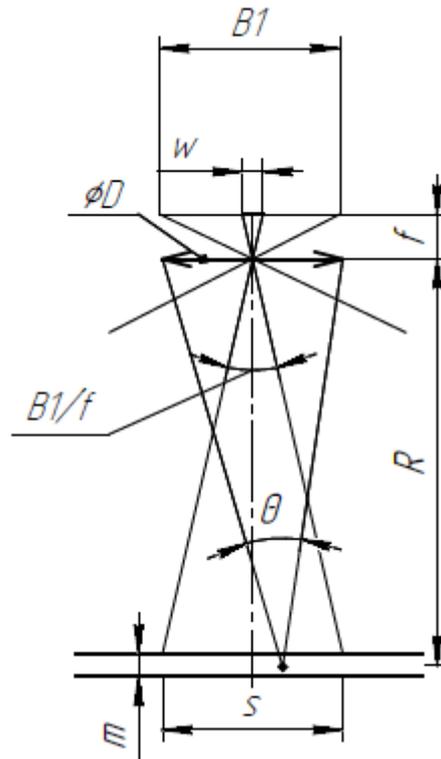


Рисунок 36 – Взаимное расположение камеры и лазерного ножа. w – размер пикселя, s – размер его изображения, t – толщина ножа, R – расстояние от объектива до середины ножа, $B1$ – размер матрицы в одном направлении, f – фокусное расстояние объектива, Θ – телесный угол

Концентрацию частиц, засвеченных лазерным ножом, обозначим n . Объем части облака, засвеченной лазерным ножом, изображение которой попадает на один пиксель, обозначим V_1 . Тогда среднее число частиц N_1 , изображение которых попало на пиксель, будет $N_1 = nV_1$, где $V_1 = \left(\frac{w}{f} \cdot R\right)^2 \cdot d$, где d – диаметр пылевой частицы. Потребуем, чтобы количество частиц, изображение которых попадает на матрицу, было существенно меньше количества пикселей на матрице. В этом случае перемещение изображений частиц от кадра к кадру может быть отслежено и частицы могут быть идентифицированы. Тогда $1 \ll MN_1 = N \ll M$, где M – количество пикселей в

матрице. С другой стороны, $MN_1 = N = M \cdot \left(\frac{B_1}{f} \cdot R\right)^2 \cdot m \cdot n$, где $\left(\frac{B_1}{f} \cdot R\right)^2$ - площадь поверхности лазерного ножа, изображение которой попадает на матрицу.

Мощность P , приходящая от одной частицы в плоскость матрицы (см. рисунок 36):

$$P = \Phi I \Theta = \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{Dr}{R}\right)^2 \cdot I \quad (40)$$

где $\Theta = \frac{\pi D^2}{4R^2}$ - телесный угол, под которым объектив камеры виден из точки рассеяния.

Энергия, приходящая на пиксель камеры за время экспозиции Δt :

$$E = P \cdot \Delta t = \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{Dr}{R}\right)^2 \cdot I \cdot \Delta t \quad (41)$$

Тогда отношение сигнал/шум:

$$SNR = \frac{E}{\hbar\nu} \eta = \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{Dr}{R}\right)^2 \cdot I \cdot \Delta t \cdot \eta \quad (42)$$

где $\hbar\nu$ – энергия кванта;

η – квантовая эффективность;

U – шум считывания.

2) Рассмотрим формирование лазерного ножа.

Рассмотрим рисунок 37, верхняя часть рисунка представляет собой вид сверху излучения, прошедшего через цилиндрическую линзу; нижняя часть – вид сбоку.

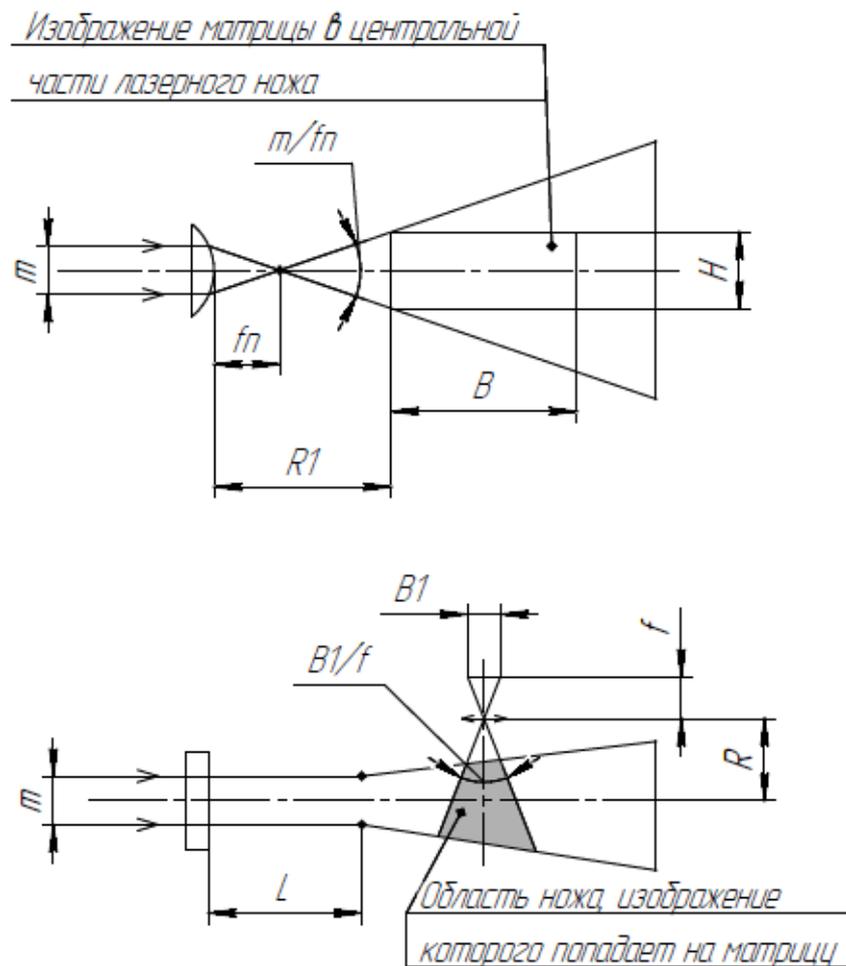


Рисунок 37 – Ход лучей через цилиндрическую линзу, образующую лазерный нож. m – размер падающего пучка; fn – фокусное расстояние цилиндрической линзы ножа; $R1$ – расстояние от цилиндрической линзы до ближайшего края рабочей зоны; B , H – размеры изображения матрицы в плоскости ножа; f – фокусное расстояние объектива камеры; R – расстояние от объектива до середины ножа; L – «ближняя зона»

Размеры пучка d' , распространяющегося в пределах «ближней зоны» ($d' < m$), определяются как $d' = \frac{\lambda}{dL'}$, где $L' \in L$. Размеры пучка, распространяющегося в пределах «дальней зоны» ($d' > m$), определяются как $d' = \frac{\lambda}{dK'}$, где $K' > L$. В пограничной области, где число Френеля равно 1, выполняется равенство $d' = m$.

Тогда площадь лазерного ножа S :

$$S = H \cdot m \quad (43)$$

Интенсивность лазерного ножа I :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{H \cdot m} \quad (44)$$

Соотношение сигнал/шум:

$$SNR = \frac{\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{Dr}{R}\right)^2 \cdot \frac{P}{H \cdot m} \cdot \Delta t}{h \cdot c / \lambda} \eta / U = \frac{\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{Dr}{R}\right)^2 \cdot P \cdot \Delta t \cdot \eta}{H \cdot m \cdot h \cdot c \cdot U} \quad (45)$$

5.3.2 Подбор компонентов для системы видеофиксации пылевых частиц.

Источником фото- и видеосъемки является высокоскоростная КМОП-камера MQ003CG-CM (см. рисунок 38) от производителя Ximea. Высокоскоростные камеры являются обязательным инструментом для исследования пылевой плазмы. Среди многих методов оптической диагностики высокоскоростная визуализация стала одним из самых мощных методов, подходящих для отслеживания траекторий небольших объектов.



Рисунок 38 – Высокоскоростная камера.

Основные характеристики камеры приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Характеристики камеры

$w = 7,4 \text{ мкм}$	- размер одного пиксела
$Q = 648 \times 488$	- количество пикселов

Продолжение таблицы 11

$N1 = 648$	- количество пикселей в одном направлении
$N2 = 488$	- количество пикселей в другом направлении
$\eta = 0,55$	- квантовая эффективность
$\Delta t = 54 \text{ мкс} - 1 \text{ с}$	- время экспозиции
$Dd = 60 \text{ dB}$	- динамический диапазон
$Fe = 20000 \text{ e}$	- фотоэлектронная емкость
CMOS Matrix B/W	- тип матрицы
CMOSIS CMV300	- модель матрицы
C или CS	- крепление объектива
$26 \times 26 \times 25 \text{ мм}$	- габариты
26 г.	- масса
1/3"	- размер сенсора

Недостающим параметром камеры является шум считывания U , который легко определяется по формуле (46), которая следует из выражения для вычисления динамического диапазона: $Dd = 20 \lg \left(\frac{Fe}{U} \right)$

$$U = Fe \cdot 10^{-\frac{Dd}{20}} \quad (46)$$

Получается, $U = 20$.

Для фокусировки излучения, рассеянного пылевой частицей, на матрицу камеры будем использовать объектив производства Thorlabs MVL50M23, изображение которого приведено на рисунке 39, а также его необходимые характеристики приведены в таблице 12.



Рисунок 39 – Объектив

Таблица 12 – Характеристики объектива

C - mount	- крепление
$f = 91,5$ мм	- фокусное расстояние
$G = 200$ мм	- минимальное расстояние до объекта исследования
$D = 21,5$ мм	- апертура

5.3.3 Разработка оптической системы формирования лазерного ножа

Для подсветки пылевых частиц будет применяться лазер производства Coherent OBIS 1264455 | FP 532nm LS 40mW Laser, Fiber Pigtail, FC изображение которого приведено на рисунке 40, а также его необходимые характеристики приведены в таблице 13.



Рисунок 40 – Диодный лазер с оптоволоконным выводом

Таблица 13 – Характеристики лазера

$\lambda = 532 \text{ нм}$	- длина волны излучения лазера
$P = 40 \text{ мВт}$	- выходная мощность лазера
$NA = 0,06$	- числовая апертура волокна
$70 \times 40 \times 38 \text{ мм}$	- габариты

Зададим параметры пылевой частицы (таблица 14), которые будут использоваться при расчете параметров лазерного ножа и в дальнейшем для энергетического расчета.

Таблица 14 – Параметры частицы

$d_{\text{частицы}} = 5 \text{ мкм}$	- диаметр пылевой частицы
$N = 1,5 \times 10^4$	- число частиц, изображение которых попадает на матрицу
$n = 5 \times 10^5 \frac{1}{\text{см}^3}$	- концентрация частиц

Зная параметры частицы, приведенные в таблице 14, определим:

1. Расстояние z между частицами:

$$z = \sqrt[3]{\frac{1}{n}} \quad (47)$$

Получается, $z = 464,16 \text{ [мкм]}$.

2. Размер d' изображения частицы, попадающей на матрицу:

$$d' = d_{\text{частицы}} \cdot f/R \quad (48)$$

где R – расстояние от объектива до середины ножа ($R = G = 200 \text{ [мм]}$).

Получается, $d' = 2,3 \text{ [мкм]}$.

3. Объемная доля частиц fi :

$$fi = \frac{\pi}{6} \cdot n \cdot d_{\text{частицы}}^3 \quad (49)$$

Получается, $fi = 3,27 \cdot 10^{-5}$. Это означает, что частицы расположены не плотно.

4. Длина свободного пробега частиц Λ :

$$\lambda = \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot d_{\text{частицы}}^2 \quad (50)$$

Получается, $\lambda = 1,96$ [мм].

Определим параметры лазерного ножа, используя известные значения параметров подобранных компонентов:

1. Размеры объекта – рабочей зоны ножа (см. рисунок 37):

$$B = B1 \cdot \frac{R}{f}; H = B2 \cdot \frac{R}{f} \quad (51)$$

где $B1$ – размер матрицы в одном направлении: $B1 = w \cdot N1$;

$B2$ – размер матрицы в другом направлении: $B2 = w \cdot N2$.

В результате вычислений получилось:

$$B = 10,5 \text{ [мм]}; H = 7,9 \text{ [мм]}.$$

2. Толщина ножа m :

$$m = \frac{N}{nBH} \quad (52)$$

Получается, $m = 363$ [мкм].

Определим параметры цилиндрической линзы, формирующей лазерный нож.

Фокусное расстояние цилиндрической линзы fn :

$$fn = \frac{R1}{1 + \frac{H}{m}} \quad (53)$$

где $R1$ – расстояние от цилиндрической линзы до ближайшего края рабочей зоны (= 175 [мм]).

Получается, $fn = 7,7$ [мм].

Линзе с полученным фокусным расстоянием соответствует линза производства Thorlabs LJ1874L2-A, длина которой равна 14 мм, а высота 7 мм (см. рисунок 41).



Рисунок 41 – Цилиндрическая линза

Теперь выполним энергетический расчет, задачей которого является обеспечение регистрации изображений индивидуальных частиц.

1. Интенсивность I светового потока в объеме ножа:

$$I = \frac{P}{mH} \quad (54)$$

Получается, $I = 1,4 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right]$.

2. Мощность, рассеянная одной частицей:

$$P1 = I \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{частицы}}^2 \quad (55)$$

Получается, $P1 = 2,74 \cdot 10^{-7} [\text{Вт}]$.

3. Мощность, улавливаемая объективом камеры:

$$Pc = \left(\frac{P1}{4\pi} \right) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2}{R^2} \quad (56)$$

Получается, $Pc = 1,98 \cdot 10^{-10} [\text{Вт}]$.

4. Пусть время экспозиции $t = 54$ [мкс].

Количество Ne электронов в пикселе:

$$Ne = \frac{Pc \cdot t \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (57)$$

где h - постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ [кг · м²/с];

c – скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ [м/с].

Получается, $Ne = 15768$.

5. Отношение сигнал/шум SNR :

$$SNR = \frac{Ne}{U} \quad (58)$$

Получается, $SNR = 788$.

Таким образом, оптическая система формирования излучения для подсветки пылевых частиц, будет состоять из:

- 1) диодного лазера с оптоволоконным выводом;
- 2) коллиматора;
- 3) плоско-выпуклой цилиндрической линзы.

Коллиматор был выбран производства Thorlabs F110APC-532 (рисунок 42) с фокусным расстоянием 6,09 мм. Зная числовую апертуру оптоволоконна, определим диаметр пучка $d_{\text{пучка}}$ на выходе из коллиматора: $d_{\text{пучка}} = 0,06 \cdot 6,09 = 365,4$ [мкм]. Это значение практически совпадает с толщиной лазерного ножа, равной 363 [мкм].



Рисунок 42 – Коллиматор

5.4 Разработка оптической системы ввода силового излучения

Оптическая система ввода силового излучения, необходимая для поддержания непрерывного лазерного разряда, будет состоять из:

- 1) лазера;
- 2) плоско-выпуклой сферической линзы.

На основании расчета, выполненного в разделе 3, в качестве источника излучения был выбран волоконный иттербиевый одночастотный непрерывный лазер с линейной поляризацией с выходной мощностью до 20 Вт YLR-20-LP-SF производства IPG Photonics (см. рисунок 43). Его основные характеристики приведены в таблице 15.



Рисунок 43 – Волоконный лазер

Таблица 15 – Характеристики волоконного лазера

$\lambda = 1064$ нм	- длина волны излучения
$W_{\text{cp}} = 20$ Вт	- максимальная средняя мощность
$M^2 = 1,1$	- качество пучка
483×403×133 мм	- габариты
5 мм	- диаметр пучка на выходе из волокна

Для того чтобы подобрать необходимую линзу, сделаем расчет.

Сначала определим значение $F\#$ -числа (диафрагменного числа):

$$F\# = \frac{d}{2,44\lambda} \quad (59)$$

где d – диаметр сфокусированного излучения (=100 [мкм]);

λ – длина волны излучения (=1064 [нм]).

Получается, $F\# = 38,52$.

В то же время $F\#$ -число определяется так:

$$F\# = \frac{F}{D} \quad (60)$$

где D – диаметр излучения на оптическом окне;

F – расстояние от центра камеры до оптического окна.

Выражая D из (60) получаем: $D = 4,5$ [мм].

Пусть в качестве необходимой линзы выступит плоско-выпуклая сферическая линза производства Thorlabs LA1708-YAG (рисунок 38), имеющая диаметр 25,4 мм, толщину 2,8 мм, фокусное расстояние 200 мм и заднее фокусное расстояние 197,49 мм.



Рисунок 44 – Плоско-выпуклая сферическая линза

Обратимся к рисунку 45, представленному ниже. Определим диаметр пучка на линзе dd из подобия треугольников.

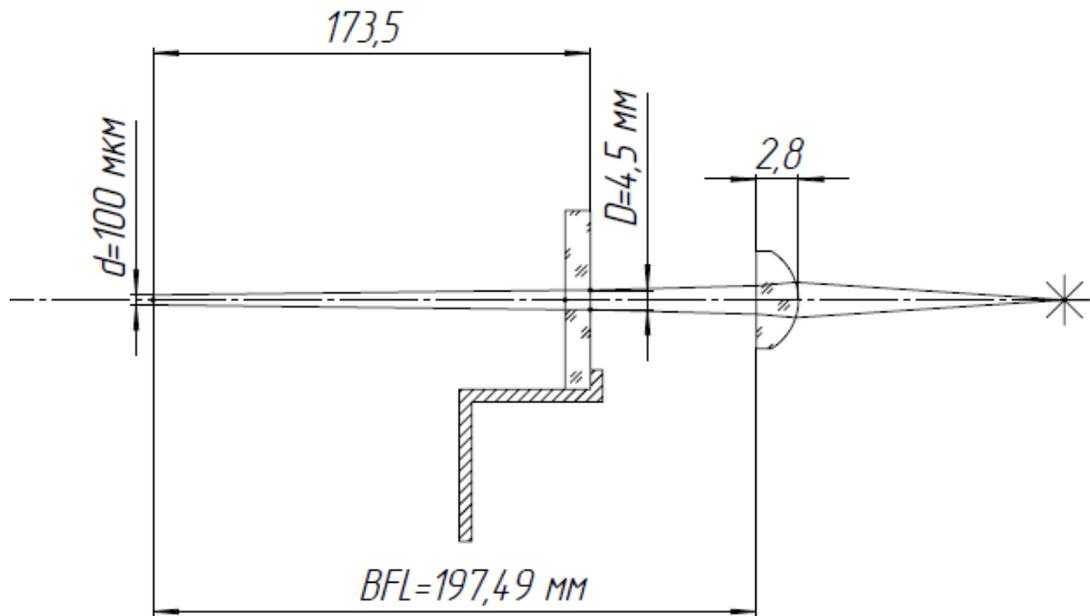


Рисунок 45 – Определение размеров пучка

$$\frac{4,5/2}{173,5} = \frac{dd/2}{197,49 + 2,8}$$

Получаем, $dd = 5,2$ [мм].

Теперь определим, на каком расстоянии от линзы необходимо расположить лазер, чтобы получить пучок с рассчитанным диаметром.

Оценим расходимость излучения, воспользовавшись калькулятором на сайте RP Photonics Encyclopedia, полученное значение представлено на рисунке 46.

Beam Quality Calculations

Center wavelength:

M^2 factor: (from BPP)

Beam parameter product: (from M^2)

Beam waist radius: (using the BPP)

Divergence half-angle: (using the BPP)

Рисунок 46 – Определение расходимости лазерного излучения

Пусть расстояние между лазером и линзой будет 53,5 мм. Тогда диаметр пучка, приходящий на линзу будет равен:

$$dd_1 = tg(0,00373) \cdot 53,5 + 5 = 5,2 \text{ мм}$$

Получается, что dd и dd_1 равны. Значит, компоненты подобраны верно.

5.5 Экспериментальный стенд

Оптическая схема стенда представлена на рисунке 47. Полная версия этой схемы содержится в приложении. Конструкция зондирующей системы и оптической системы формирования ввода силового излучения представлена на рисунке 48.

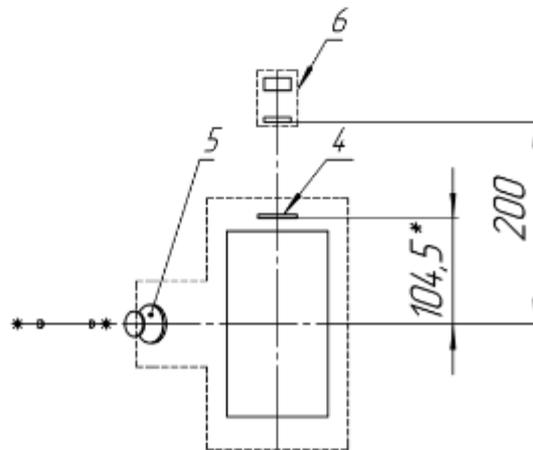
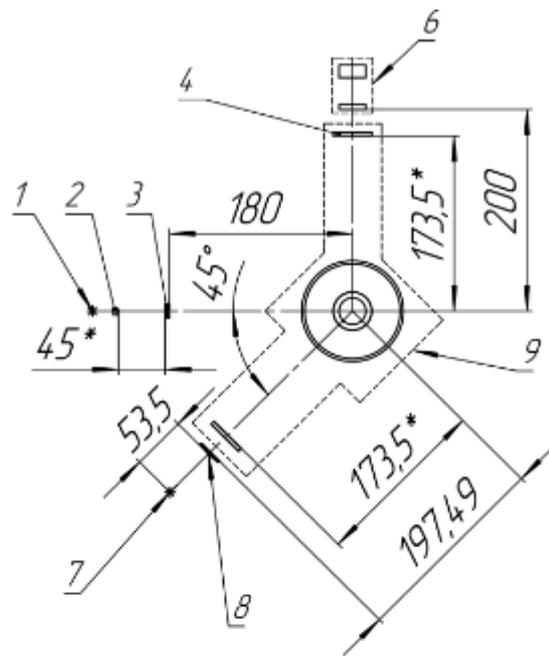


Рисунок 47 – Оптическая схема стенда. 1 – диодный лазер с оптоволоконным выводом; 2 – коллиматор; 3 – плоско-выпуклая цилиндрическая линза; 4 – оптическое окно VPW42-A; 5 – оптическое окно VPW42-A; 6 – объектив КМОП-камеры; 7 – волоконный лазер; 8 – плоско-выпуклая сферическая линза; 9 – газоразрядная камера; 45 мм; 104,5 мм; 173,5 мм – размеры, определяемый конструкцией

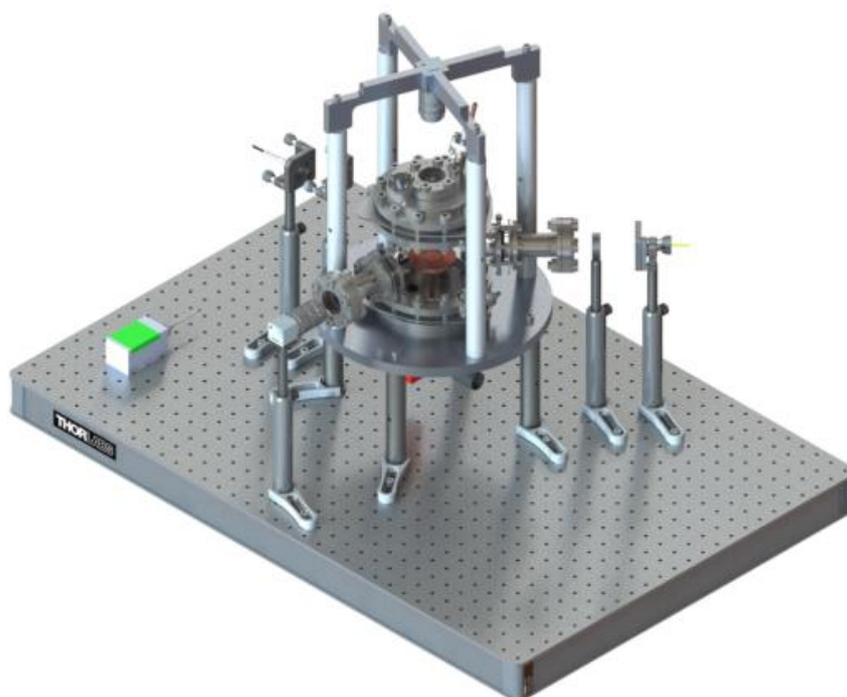


Рисунок 48 – Оптическая система станда

Газоразрядная камера вместе с оптической системой ставится на оптический стол В6090АХ (рисунок 49б), который помещается на стойку PFM52501 (рисунок 49а). На стойку снизу вкладывается плита с креплениями (рисунок 49в), на нее ставится модуль волоконного лазера и ВЧ генератор. Недалеко от стола на пол ставится спиральный насос и газовый баллон.

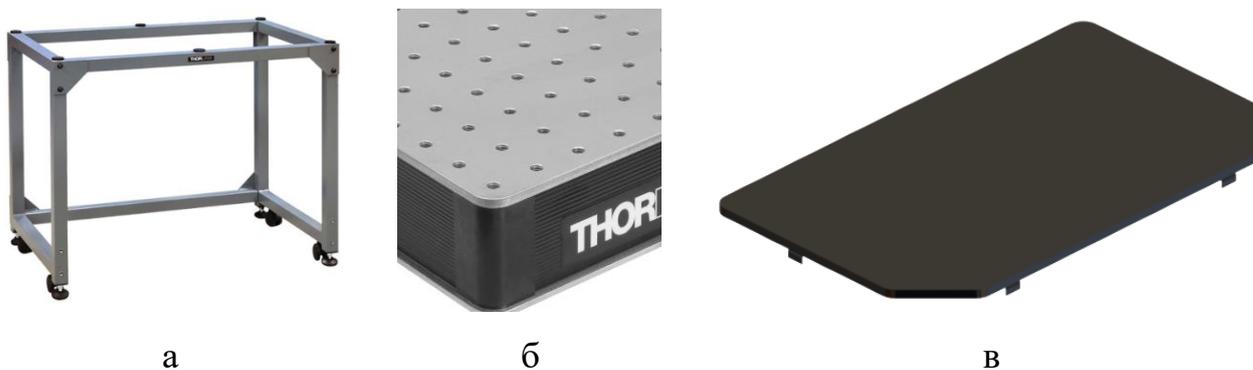


Рисунок 49 – а – стойка; б – оптический стол; в – плита

Промышленный компьютер и дополнительное оборудование помещается на рабочий стол, за которым будет находиться сотрудник лаборатории (не показано в рамках экспериментального станда).

Итоговый вид экспериментального станда приведен на рисунке 50. Его массогабаритные характеристики представлены в таблице 16.

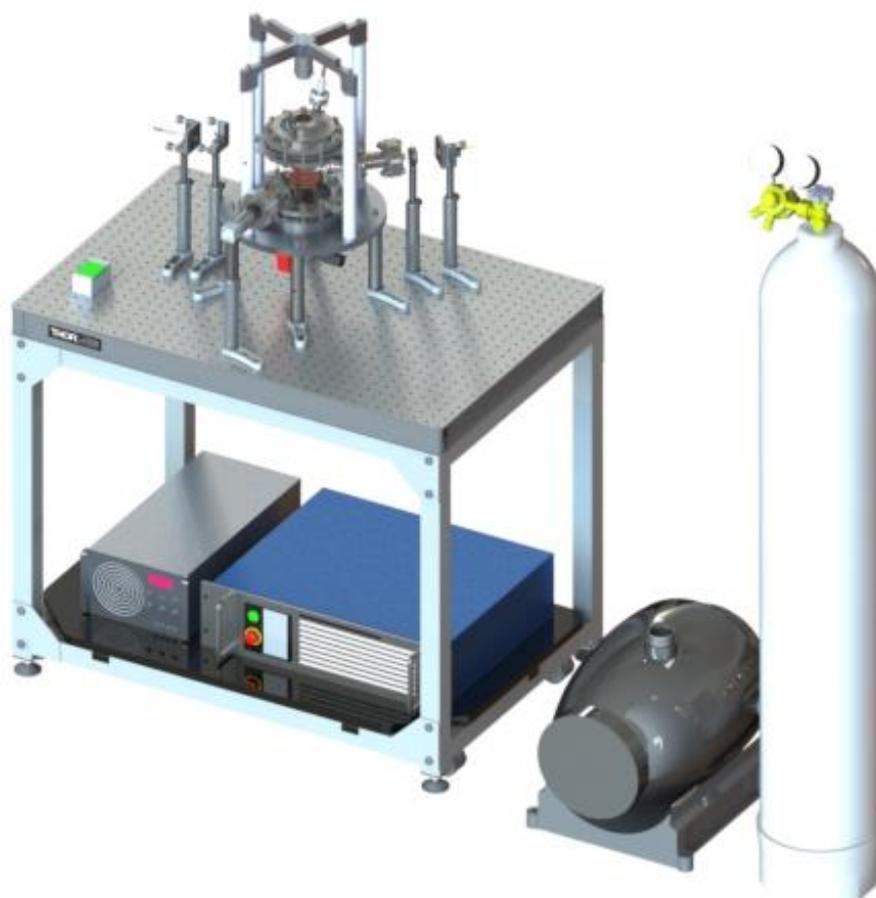


Рисунок 50 – Экспериментальный стенд

Таблица 16 – Массогабаритные характеристики экспериментального стенда

Габариты, мм	1767 × 1482,02 × 666
Масса, кг	212,03

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполненной выпускной квалификационной работы является разработка экспериментального стенда для изучения газовой и пылевой плазмы в высокочастотных и лазерных разрядах.

В данной работе были выполнены следующие задачи:

1. Разработка методики определения параметров и состава аргоновой плазмы в ВЧ и лазерных разрядах на основе двухтемпературной модели плазмы.
2. Разработка методики оценки максимального заряда в аргоновой пылевой плазме ВЧ-разряда.
3. Разработка методики расчета мощности для поддержания непрерывного лазерного разряда.
4. Разработка конструкции газоразрядной камеры.
5. Разработка зондирующей системы, в том числе обоснование энергетических характеристик системы регистрации плазменно-пылевых частиц.
6. Разработка оптической системы ввода силового излучения.
7. Подбор компонентной базы для экспериментального стенда.
8. Разработка конструкторской документации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аликберова, Л.Ю. Основы строения вещества [Текст]:метод.пособие/ Л.Ю. Аликберова, Е.В. Савинкина, М.Н. Давыдова.- М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2004.
2. Жуков А.А., Круглов М.С. Физические процессы в плазме емкостного высокочастотного разряда низкого давления [Текст]: учебное пособие/А.А. Жуков, М.С. Круглов, И.Н. Егоршин.-Хабаровск: Изд-во Дальневосточ. гос. гуманитар. ун-та, 2012.-127 с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда [Текст]: Учеб. руководство: Для вузов – 2-е изд, перераб. и доп./ Ю.П. Райзер – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1992 – 536 с.
4. Thomson J J, Philos. Mag., 32 321 (1891).
5. Hittorf W, Ann. Phys. Chem., 21 90 (1884).
6. Fortov V.E. and Morfill G.E. (2009). Complex and dusty plasmas: from laboratory to space [Text]./ V.E. Fortov and G.E. Morfill – CRC Press – 436.
7. Райзер Ю. П. Оптические разряды [Электронный ресурс], "УФН", 1980.
8. Maker P. D., Terhune R. W., Savage C. M. - In: III Intern. Conference on Quantum Electronics / P. D. Maker, R.W. Terhune, C.M. Savage - Paris, 1963.
9. Клайперона уравнение// Физическая энциклопедия: [в 5 т.] [Текст]/ Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т.2: Добротность – Магнитооптика. – С.371. – 704 с.
10. Франк-Каменецкий, Д.А. Лекции по физике плазмы [Текст]. 2-изд./ Д.А. Франк-Каменецкий. – М., Атомиздат, 1968 – 288 с.
11. Basic Atomic Spectroscopic Data. Argon [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/argontable5.htm> (дата обращения 8.03.2020).

12. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст]/С 74. Варгафтик Н.Б, Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е.. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-352 с.
13. Basil R. Marple, Margaret M. Hyland, Yuk-Chiu Lau, Chang-Jiu Li, Rogerio S. Lima, Ghislain Montavon. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions.
14. Годэн, А.М. Флотация [Текст]/ А.М. Годэн – М.: Гос. тех. издат., 1959.- 653 с.
15. Андреев А.Д., Черных Л.М. Физика. Электростатика: Конспект лекций [Текст]/ А.Д. Андреев, Л.М. Черных. СПб ГУТ. – СПб, 2004.- 37 с.
16. Компания Плазма Тех. Высокочастотные генераторы. Режим доступа: <https://www.plazmateh.ru/vchgenerator> (дата обращения 5.05.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ. Документация на экспериментальный стенд

Конструкторская документация:

1. БГТУ.413312.000ВО – Чертеж общего вида;
2. БГТУ.16206.01.00.000СБ – Сборочный чертеж газоразрядной камеры;
3. БГТУ.16206.01.00.000 – Спецификация на газоразрядную камеру;
4. БГТУ.413312.000ЛЗ – Схема оптическая принципиальная;
5. БГТУ.413312.000С2 – Схема комбинированная функциональная;
6. БГТУ.413312.000Е1 – Схема деления структурная.