

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»

Факультет физико-математических и естественных наук

Институт физических исследований и технологий

«Допустить к защите»

Директор ИФИТ

д.ф.-м.н., проф.

_____ О.Т. Лоза

«_____» _____ 20__ г.

**Выпускная квалификационная работа
магистра**

Направление 03.04.02 «Физика»

Магистерская программа «Фундаментальная и прикладная физика»

ТЕМА _____ «Экспериментальные исследования плазменных потоков,
генерируемых двухступенчатым плазменным ускорителем»

Выполнил студент _____ **Шевцов Евгений Александрович**

(Фамилия, имя, отчество)

Группа НФЗмд-01-20

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Студ. билет №1032202207

доцент кафедры прикладной физики
к.ф.м.н. Андреев Виктор Викторович
(Ф.И.О., степень, звание, должность)

(Подпись)

Автор

(Подпись)

г. Москва

2022 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Экспериментальная установка.	7
1.1. СВЧ система	8
1.2. Вакуумная система с газонапуском	10
1.3. Магнитная система.....	13
2. Методы и средства диагностики.	16
3. Контроль, сбор и анализ данных.....	21
4. Результаты и их обсуждение.	25
Заключение	39
Благодарность.....	40
Список литературы	41

Введение

Мощные плазменные потоки, характеризующиеся с большими скоростями истечения можно получать в устройствах где плазма генерируется и ускоряется за счет электрической энергии одного или нескольких типов электрических разрядов. В процессе ускорения участвуют заряды обоих знаков, что способствует поддержанию квазинейтральности среды и снимает ограничения на величину плотности тока, обусловленную величиной пространственного заряда.

Несмотря на то, что тепловые скорости в сильнонеравновесной плазме существенно различны их направленные скорости совпадают. Таким образом основная часть энергии плазменного потока сосредоточена в тяжелой ионной компоненте, в то время как электронная составляющая обеспечивает компенсацию объемного положительного заряда.

За время исследований плазмодинамических систем создано большое разнообразие их типов, а для их классификации применяются различные подходы. Наиболее актуальным является деление плазмодинамических систем по типу режима ускорения: диссипативный или недиссипативный.

В первом варианте в основе лежит электрон-ионное трение и относится к сильноточным системам, что не относится к области безэлектродных плазменных двигателей. Второй вариант плазмодинамических систем, функционирующий в недиссипативном режиме и реализуется на основе теплового или электромагнитного взаимодействия.

Двигательные системы, в основу которых положены различные типы резонансных взаимодействий характерных для микроволновой магнитоактивной плазмы, относятся к семейству безэлектродных плазменных двигателей. В этой концепции микроволны в несколько ГГц используются для генерации и возбуждения волн в плазме, которая затем расширяется в расходящемся магнитном поле, бесконтактно создавая тягу.

Проблема взаимодействия частиц с плазменной волной является центральной для такого типа двигателей. Сложность этой проблемы высока,

так как она является результатом взаимодействия множества одновременных явлений и факторов распространение волн, их поглощение, отражение, конверсия, а также различные типы и характеры резонансных взаимодействий и мод генерируемых колебаний. Все эти механизмы зависят от плазменных и магнитных параметров, в частности плотности и характерных частот столкновений в плазме, напряженности и направления магнитного поля, а также геометрии и границ области взаимодействия. При этом в значительной степени, особенно вблизи резонансов, распространение и поглощение зависят от температуры плазмы, кинетических особенностей, неоднородностей и объемной скорости ионизации плазмы.

К положительным моментам такого подхода можно отнести отсутствие электродов, что исключает эрозию и способствует увеличению срока службы двигателя. Ускорение квазинейтральной плазменной струи означает, что нейтрализатор не требуется. Это приводит к упрощению конструкции устройства и возможности использования широкого спектра видов топлива (тип плазмообразующего газа). Предполагается, что эти двигатели легко масштабируются от средне-низкой до высокой мощности и обеспечивают достаточную дросселируемость (зависимость тяги от удельного расхода топлива и температуры).

Исследования СВЧ разряда в магнитном поле в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) остаются актуальными с тех пор, как это явление было впервые продемонстрировано в 1960-е годы. Впоследствии были предприняты теоретические и экспериментальные усилия, чтобы получить непротиворечивую единую теорию явления ЭЦР. Интерес к исследованиям обусловлен широким спектром возможных применений ЭЦР плазмы как в фундаментальной физике, так и в различного рода приложениях. Среди основных приложений феноменологии ЭЦР следует отметить: эффективный метод нагрева в термоядерной плазме, ЭЦР-источники многозарядных ионов (ECRIS), ЭЦР-источники частиц для плазменной обработки материалов, как источники излучений, а также

комбинация источника ЭЦР с магнитным соплом, которая рассматривается в качестве космического плазменного двигателя [1-8].

Двигатели, в основу которых положено ЭЦР – взаимодействие, состоят из ионизационной камеры - микроволновая система, обеспечивающая локализацию электромагнитной волны в области взаимодействия, системы соленоидов и/или постоянных магнитов, которые обеспечивают магнитное поле необходимой пространственной конфигурации и натекатель плазмообразующего газа. Пример простейшего по конструкции устройства представлен на рис. 1.

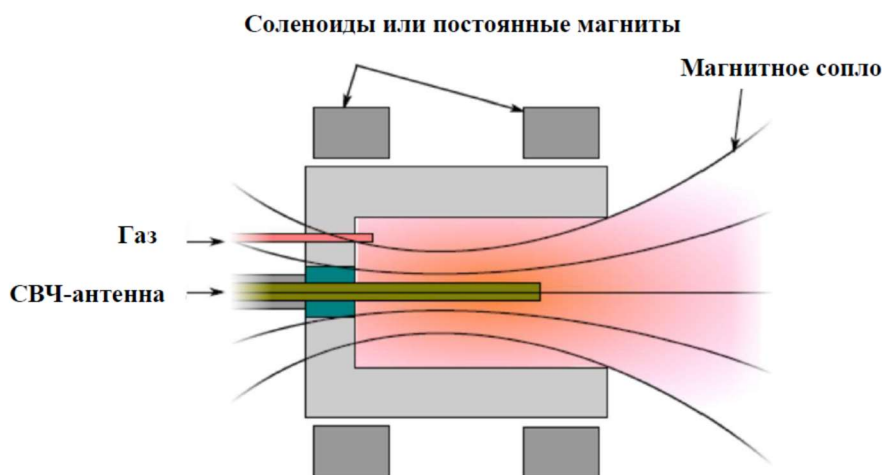


Рисунок 1. Простейший БПРД.

В ионизационной камере, помещенной в магнитное поле с резонансным значением индукции электромагнитная энергия волны накачки ионизирует плазмообразующий газ и нагревает образовавшуюся плазму. Дополнительная магнитная система формирует магнитное сопло, обеспечивающее бесконтактное ускорение плазмы, генерируя магнитную тягу, а изменение направления магнитной индукции сопла позволяет легко управлять вектором тяги.

Реализуемый в лаборатории физики сильно неравновесной плазмы ИФИТ РУДН новаторский подход направлен на демонстрацию осуществимости технологии тандемного двигателя в основу которого положено ЭЦР – взаимодействие.

Измерения энергетических характеристик плазменного потока являются основаниями, подтверждающими его эффективность. Из многих методов экспериментального измерения этих характеристик можно выделить метод, использующий электростатическое торможение заряженных частиц внешним электрическим полем. Одним из широко распространенных устройств, основанных на данном принципе, является многосеточный анализатор.

Достаточная компактность и простота его конструкции, с учетом ожидаемых параметров плазменного потока (концентрации, максимальной энергии заряженных частиц), позволяет с достаточной достоверностью оценить характеристики потока.

Цель работы состоит в измерении энергии распределения ионной компоненты вдоль оси магнитной системы в тандемной плазмодинамической установке, в которой предусмотрены вариации: осевого профиля магнитного поля, потока газовой смеси, а также СВЧ мощности в каждой из ступеней.

Основные задачи данной работы:

- Разработка и реализация систем управления экспериментального стенда, сбора и анализа данных;
- Разработка и реализация систем диагностики плазменного потока.

1. Экспериментальная установка.

Экспериментальный стенд представляет тандемный плазменный инжектор с основными модулями:

- модуль генерации плазмы;
- модуль плазменного ускорения.

Каждый из модулей представляет собой осесимметричную систему, состоящую из СВЧ-резонатора и магнитных катушек, обеспечивающих поддержание магнитного поля необходимой напряженности, и пространственного распределения, интегрированных в единую вакуумную систему и систему газообеспечения.

Схема установки представлена на рисунке 2.

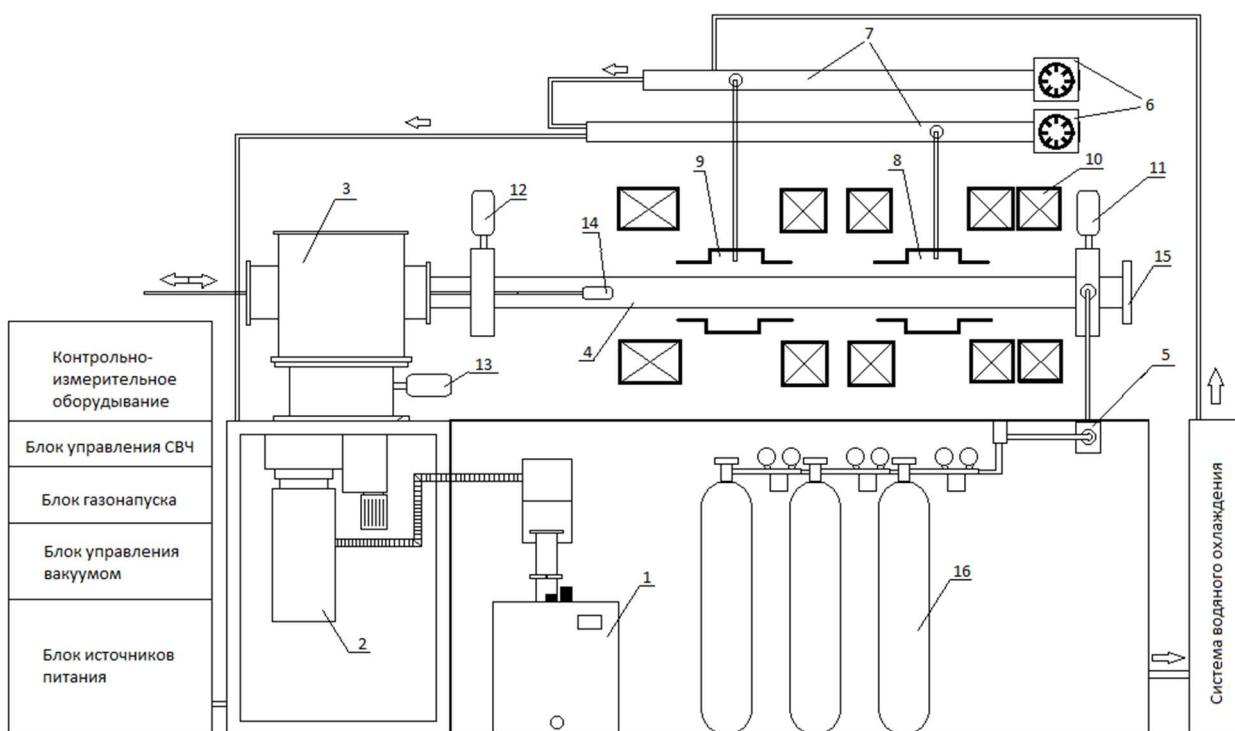


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки. 1-форвакуумный насос, 2-турбомолекулярный насос, 3-вакуумная камера, 4-кварцевое стекло (рабочий объем), 5-система газонапуска, 6-магнетроны, 7-волноводы, 8-резонатор TE111, 9-резонатор E010, 10-катушки индуктивности, 11-13 -

магниторазрядные лампы, 14-анализатор, 15-окно наблюдения, 16-баллоны рабочего газа.

1.1. СВЧ система

Стенд состоит из двух цилиндрических резонаторов с запердельными волноводами последовательно и осесимметрично размещенных с диэлектрическим вакуумным каналом - плазмопроводом (кварцевая труба, диаметр 6 см, толщина стенки 2.5 мм, длина 200 см).

Один из резонаторов (Рис. 2, 8) является основным узлом модуля генерации плазмы. В данном резонаторе на рабочей частоте собственного магнетронного генератора возбуждалась мода со структурой TE_{111} колебаний (Рис. 3)

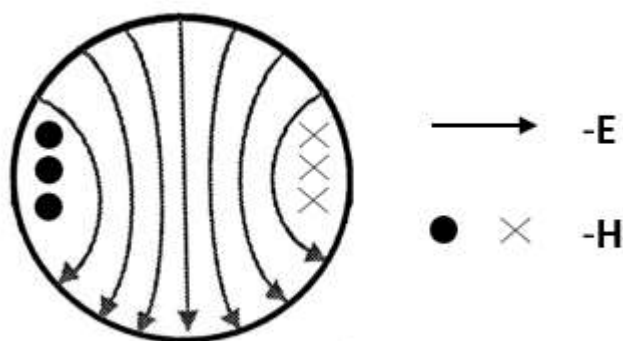


Рисунок 3. Структура E и H полей резонатора с модой колебаний TE_{111}

Второй резонатор с модой E_{010} (Рис.2, 9), также возбуждается на

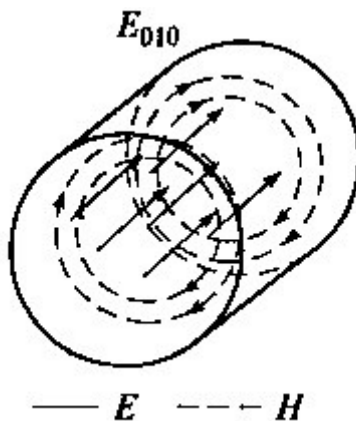


Рисунок 4. Структура E и H полей резонатора с модой колебаний E_{010}

схожей рабочей частоте от собственного магнетронного генератора и используется для ускорения частиц плазмы продольно-осциллирующим СВЧ – электрическим полем.

Для возбуждения резонаторов использовались два магнетронных генератора (М-105-1, $f_0 = 2.45\text{ГГц}$) со стабилизированными источниками питания подключенные к СВЧ-трактам для каждого генератора, состоящим из прямоугольных волноводов с согласованной водяной нагрузкой, для обеспечения режима бегущей волны. Магнетронные генераторы были оснащены модернизированной системой жидкостного охлаждения. Возбуждение резонатора на моде TE_{111} осуществляется двумя штыревыми антеннами, расположенными под углом 90 градусов по азимуту, разность длин плеч коаксиальных антенн сопряженных с волноводом составляла $\lambda/4$ (рис 5 а). Это приводит к формированию вращающегося в необходимую сторону радиального СВЧ-электрического поля и позволяет увеличить напряженность поля по сравнению с линейным возбуждением. Резонатор E_{010} возбуждается петлевой пристеночной антенной, от второго магнетронного генератора (рис. 5 б).

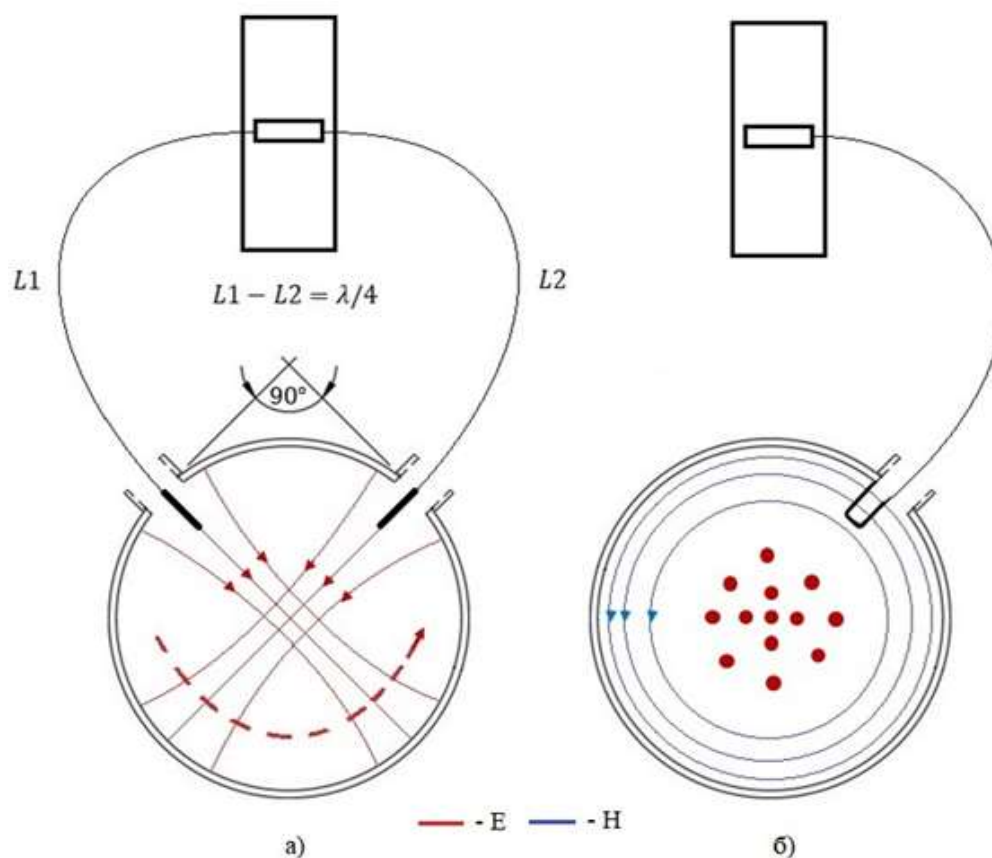


Рисунок 5. Схемы возбуждения резонаторов а) TE_{111} , б) E_{010}

1.2. Вакуумная система с газонапуском

Вакуумный объем установки можно разделить на две составляющие: рабочий вакуумный плазмопровод из кварцевой трубы подключенный к стальному (12X10HT) объему цилиндрической формы, обеспечивающем подключение вакуумных агрегатов и систем и вводу диагностических элементов в плазмопровод. Сорт стали определялся исходя из низкого показателя газоотделения и низкого значения магнитной восприимчивости.

Для получения высокого вакуума используется система из двух насосов: пластинчато-роторный насос Терго BW40 и турбомолекулярный насос 01AB-1500-004 (ТМН) (рис. 6). Форвакуумная система обеспечивает предварительную откачку и поддержание разрежения на выпускном патрубке ТМН во время откачки. Остаточное давление в системе в рабочем режиме было не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ Торр.



Рисунок 6. Пластинчато-роторный и турбомолекулярный насосы

Натекание рабочего газа обеспечивается пьезоэлектрической системой напуска СНА-1 (рис. 7). Диапазон регулировки рабочего давления ($2.25 \cdot 10^{-8} - 30$ Торр). В качестве плазмообразующих газов используются: *Ar*, *He*, *Xe*, *N₂*.



Рисунок 7. Натекатель СНА-1

Для измерения давления использовались следующие приборы:

- Вакуумметры манометрические 13ВТЗ-003 с преобразователи ПМТ-6-3. Диапазон рабочего давления $2 \cdot 10^{-3}$ до 750 Торр.
 - Вакуумметр магнитный ВМБ-14 с магниторазрядной лампой ПММ-32-1. Диапазон рабочего давления от $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-9}$ Торр.
- с аналоговыми выходами для сбора и анализа полученных данных.

- Вакуумметры магниторазрядные АВ3235 с магниторазрядными лампами АВ3276. Диапазон рабочего давления от 1×10^{-2} до 5×10^{-9} Торр.

Аналоговые выходы вакуумметров обеспечивали измерение рабочих значений давлений и применялись при анализе результатов экспериментальных исследований.

Магниторазрядные лампы (преобразователи) были расположены таким образом, чтобы определить распределение давления в рабочем объёме (рис. 2). Результаты измерения представлены в Таблице 1 и на Рисунке 8.

Таблица 1

<i>Распределение давления в рабочем объёме, ксенон.</i>			
№ изм.	АВ3276 (Рис.2, 11), Торр	АВ3276 (Рис.2, 12), Торр	ПММ-32-1 (Рис.2, 13), Торр
1	$3.96 * 10^{-7}$	$3.28 * 10^{-7}$	$2.76 * 10^{-7}$
2	$1.72 * 10^{-5}$	$2.32 * 10^{-6}$	$3.96 * 10^{-7}$
3	$9.20 * 10^{-5}$	$9.20 * 10^{-6}$	$9.60 * 10^{-7}$
4	$6.40 * 10^{-4}$	$5.20 * 10^{-5}$	$3.96 * 10^{-6}$
5	$3.64 * 10^{-3}$	$1.88 * 10^{-4}$	$1.24 * 10^{-5}$

Расстояние между магниторазрядными лампами 11 и 12 составляло 1.6м.

В измерении №1 подача рабочего газа полностью перекрыта. В таком случае давление в системе выравнивается, это свидетельствует о герметичности системы. В измерении (№ 2, 3, 4, 5) видно, что при изменении расхода рабочего газа, перепад давления в измеряемых точках не изменялся.

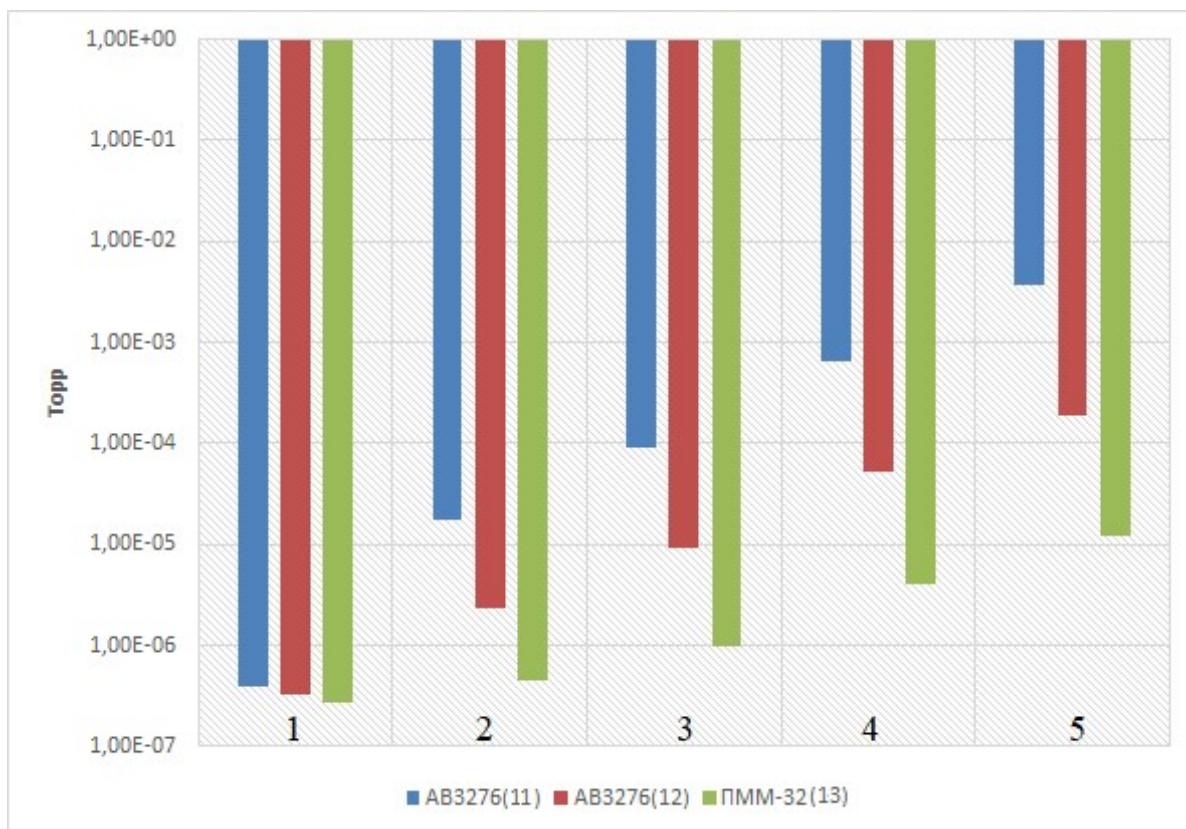


Рисунок 8. Распределение давления в рабочем объеме.

1.3. Магнитная система

Магнитная система (рис. 9) обеспечивает:

- условия, обеспечивающие поддержание резонансных условий (ЭЦР).
Условия ЭЦР при частоте 2,45 ГГц будут выполняться в поле со значением индукции - 875 Гс.
- термоизоляцию плазменных потоков от стенок
- инжекцию плазмы в сторону диагностических систем

Основным компонентом системы являются соленоиды (катушки), обеспечивающие продольное аксиально-симметричное магнитное поле.

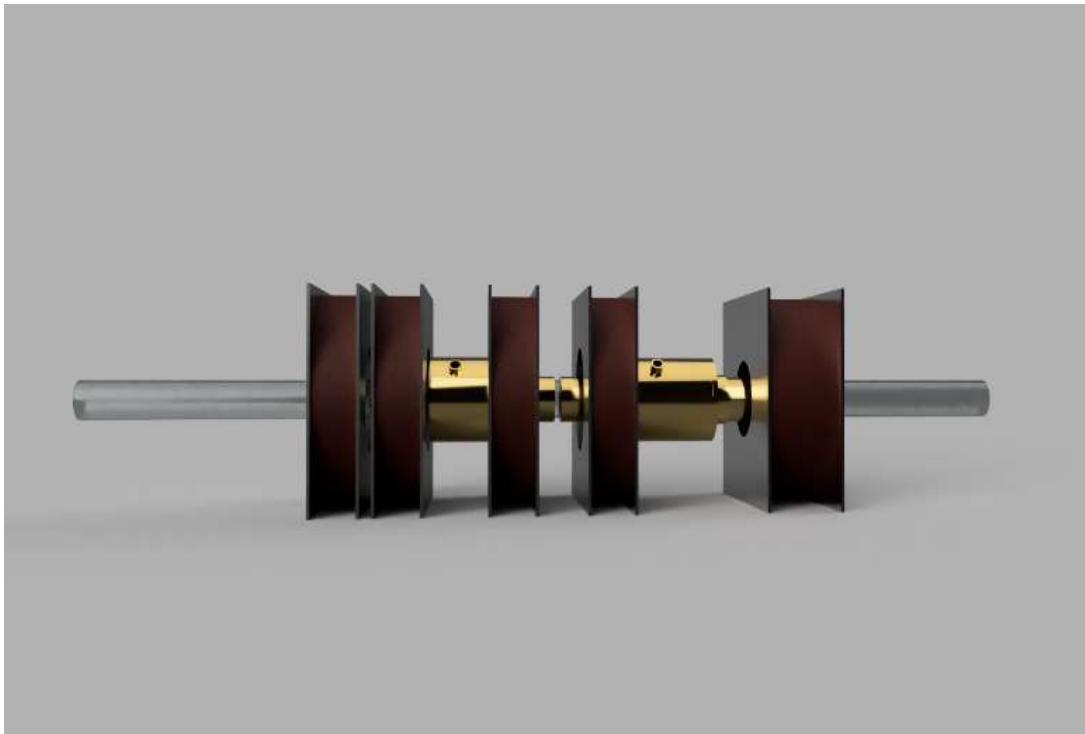


Рисунок 9. 3-D модель магнитной системы с резонаторами.

Каждая катушка питается отдельно от стабилизированного источника постоянного напряжения (ГОРН-К-360В/20А) (рис. 10).



Рисунок 10. ГОРН-К-360В/20А с пультом управления L2.668.

Управление источником питания осуществляется пультом L2.668 (рис. 10) который позволяет:

- поддерживать величину тока в катушках магнитного поля на требуемом уровне, либо плавно изменять ее;
- задавать уставку требуемых значений напряжения и тока;

- задавать время до автоматического отключения источника;
- отключать источник питания в случае возникновения аварийных ситуаций.

Для защиты блоков питания от тока индукции, при аварийном отключении стенда, в цепь параллельно подключался диод. Профиль магнитного поля по оси представлен на рис. 11

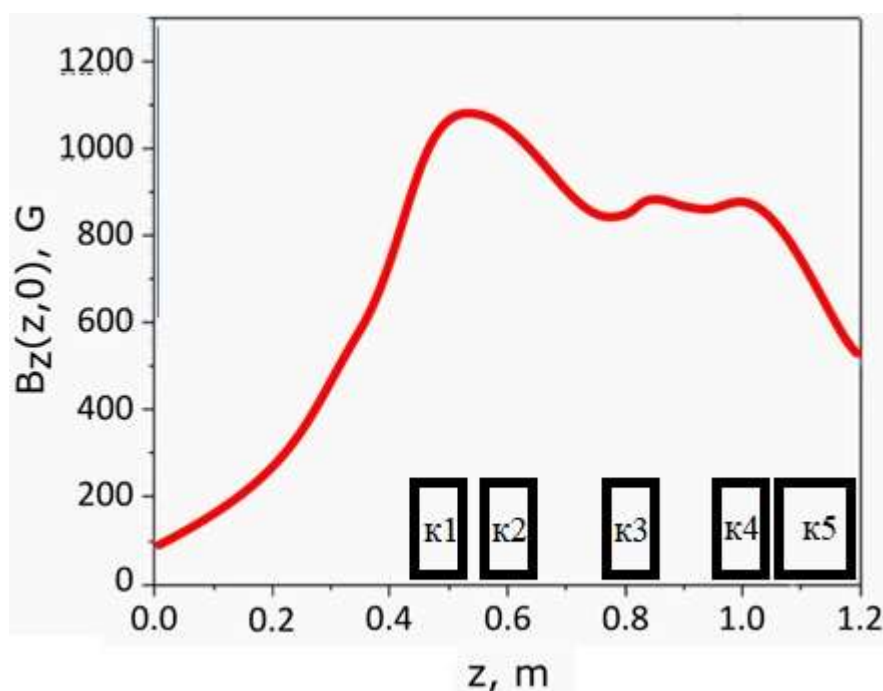


Рисунок 11. Аксиальное распределение магнитного поля.

На рис. Все подписи – русский размерность

Измерения проводились с координатами катушек и величинами тока в них представленными в Таблице 3.

Таблица 3.

Параметры катушек.					
	К1	К2	К3	К4	К5
I, А	15	15	12	9	10
Z, м	0,49	0.60	0.82	1.00	1.15

2. Методы и средства диагностики.

Основной целью проводимых исследований является создание мощных плазменных потоков. В этой связи первичные эксперименты были направлены на постановку диагностик, обеспечивающих интегральный характер измерений. В условиях, когда ожидаемая величина плотности плазмы составляет от 10^9 см^{-3} , одним из наиболее распространенных методов диагностики являются корпускулярные методы. Реализация данного метода подразумевает разделение заряженных плазменных компонент и последующему энергетическому анализу выделенной компоненты [10].

Одним из наиболее распространенным подходом данного метода являются сеточные анализаторы, которые позволяют определить основные параметры плазменных потоков: ток и функцию распределения плазменных компонент по энергиям [10].

Сеточный анализатор (рис. 12) представляет собой набор электростатических сеток для избирательного отталкивания составляющих плазмы и коллектор, на который попадают ионы, прошедшие через все сетки. Сетки и коллектор помещены в корпус, который препятствует проникновению внутрь анализатора внешних полей и попаданию плазмы непосредственно на коллектор, минуя какую-либо из сеток или все сетки сразу. Коллимационное отверстие обеспечивает анализ фиксированного сечения генерируемого в инжекторе плазменного потока.

Анализ литературы показал, что первая сетка (с1) может заземляться или оставаться под плавающим потенциалом. Она препятствует проникновению внутрь анализатора внешних силовых полей, а также исключает проникновение полей последующих сеток в исследуемую плазму, сводя к минимуму возмущение плазмы [5, 11-14]. На вторую сетку (с2) анализатора подается отрицательный потенциал такой величины, что бы он смог отразить все электроны, попадающие на вторую сетку. Заземленная третья сетка (с3), предназначена для экранировки поля сетки с2, а также для сохранения неизменным распределение частиц по энергиям для последующего их анализа. На четвертую сетку (с4) подается положительный потенциал. Ионы, имеющие энергию ниже этого потенциала, будут отражаться в обратном направлении, а ионы с большей энергией будут проходить сквозь сетку. Варьируя потенциал четвертой сетки в широких пределах, получаем кривую запираения ионов, то есть зависимость сигнала с коллектора (к) от подаваемого на четвертую сетку потенциала. Взаимодействие частиц с материалом сеток во второй, третьей и четвертой, могут стать причиной вторичной электронной эмиссии, которая может исказить кривую запираения (антидинаatronный эффект). Для предотвращения этого эффекта на пятую сетку (с5) подается отрицательный потенциал, который подавляет это искажение. Так же попадая на коллектор, ионы могут стать источником вторично электронной эмиссии. Электрон, выбитый из коллектора, дает такой же сигнал, как и ион, пришедший на коллектор. Таким образом, кривая запираения так же будет значительно искажаться. Однако, отрицательный потенциал, подаваемый на пятую сетку, отражает эти электроны в обратном направлении так, что они снова попадают на коллектор, таким образом, минимизируя искажение кривой запираения.

Ионы, преодолевшие потенциальный барьер четвертой сетки, при попадании на катод будут создавать сигнал равный:

$$dI(v) = neS_k v f(v) dv$$

где n - плотность плазмы, e - заряд электрона, S - площадь входного отверстия анализатора, k - суммарный коэффициент прозрачности всех сеток анализатора, $f(v)$ - функция распределения ионов, попадающих в анализатор, по скоростям (все скорости ионов положительны, так как ионы с отрицательной скоростью двигались бы в противоположном от анализатора направлении)[2]. Очевидно, что если проинтегрировать функцию распределения ионов по всем возможным скоростям, то мы получим: $\int f(v) dv = n$. Тогда уравнение, описывающее зависимость сигнала с коллектора от запирающего потенциала третьей сетки, $U_{\text{зап}}$, иными словами, кривую запираения ионов, будет иметь вид:

$$I(U_{\text{зап}}) = neS\gamma \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{U_{\text{зап}}}^{\infty} \sqrt{U_{\text{зап}}} f(U_{\text{зап}}) dU_{\text{зап}},$$

где скорость ионов связана с запирающим напряжением выражением $mv^2/2 = eU_{\text{зап}}$. Следует подчеркнуть, что v - это скорость ионов после прохождения ими первой, заземленной, сетки, а не скорость ионов во внешней плазме. В любой точке пространства, где электростатический потенциал равен нулю, энергия ионов будет равна их кинетической энергии. Тогда, приняв потенциал заземленной сетки равным нулю, можем найти производную кривой запираения:

$$\frac{dI}{dU_{\text{зап}}} = \frac{neS\gamma}{m} \sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U_{\text{зап}}} f(U_{\text{зап}}).$$

Отсюда можно выразить функцию распределения ионов по энергиям:

$$f(E) = \frac{\sqrt{2}S\gamma}{n} \left(\frac{e}{m}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{U_{\text{зап}}}} \frac{dI}{dU_{\text{зап}}}.$$

Для экспериментов на установке был разработан пятисеточный анализатор, конструкция которого представлена на рис. 12.

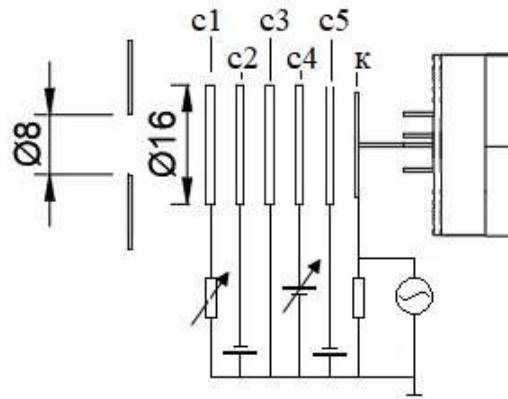


Рисунок 12. Схема многосеточного анализатора.

Первая сетка (с1) имеет возможность заземления, а также может оставаться под плавающим потенциалом. Анализатор мог перемещаться вдоль оси стеклянной трубки без нарушения вакуума. Размер ячейки сеток и расстояние между сетками ограничиваются дебаевским радиусом. Если размер ячейки будет много больше радиуса Дебая, то отдельные проволочки сетки будут экранироваться так, что потенциал, подаваемый на сетку, не будет проникать внутрь плазмы, позволяя ей проходить сквозь сетку. Даже если размер ячейки всего в два раза больше радиуса Дебая, будет существенное провисания потенциала между отдельными проволочками. Таким образом, сквозь сетку смогут пройти частицы с меньшей энергией, что приведет к искажению кривой запирания.

Радиус Дебая определяется по формуле:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{e^2 n}}$$

Тогда можно определить максимальную плотность плазмы, которая может падать на сетку:

$$n < \frac{\epsilon_0 kT}{e^2 h^2},$$

где h -размер ячейки.

Расстояние между сетками должно быть меньше, чем приближение, приведенное в уравнении

$$x \approx 4\lambda_D$$

Если расстояние между сетками слишком велико, произойдет накопление заряда, которое сведет на нет эффекты предыдущей заряженной сетки. [11]

Исходя из этих уравнений и учитывая ожидаемые характеристики плазмы были выбраны следующие параметры сеток: h (размер ячейки) = 0,3 мм, x (расстояние между сеток) = 3 мм, κ (прозрачность) = 50%. Данные параметры позволяют проводить измерения в плазме, концентрация которой не превышает $9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, при температуре электронов в несколько сотен эВ.



Рисунок 13. 3-D модель сеточного анализатора.

Корпус анализатора выполнен из молибдена, сетки из никеля, торцевая вставка с выходным отверстием из графита. Выбор таких материалов связан с целью уменьшить влияние вторичных электронов на кривую запираения ионов.

Потенциал на отражающую (с2) и антидинаatronную (с5) сетки подавался от двух источников питания постоянного тока Agilent Technologies N5752A (рис. 14 а), а потенциал на анализирующую сетку 4 подавался генератором низкочастотных сигналов ГЗ-123 (рис. 14 б).



Рисунок 14. а) Источник постоянного тока N5752A, б) ГЗ-123

3. Контроль, сбор и анализ данных.

Для поддержания рабочих режимов экспериментального стенда, сбора и анализа экспериментальных результатов создан программно-аппаратный комплекс (ПАК) на основе промышленного компьютера с аналого-цифровыми преобразователями. Одной из основных задач данного комплекса является расчет распределения магнитного поля вдоль оси системы, при различных вариациях расположения катушек и номиналов силы тока в каждой из них.

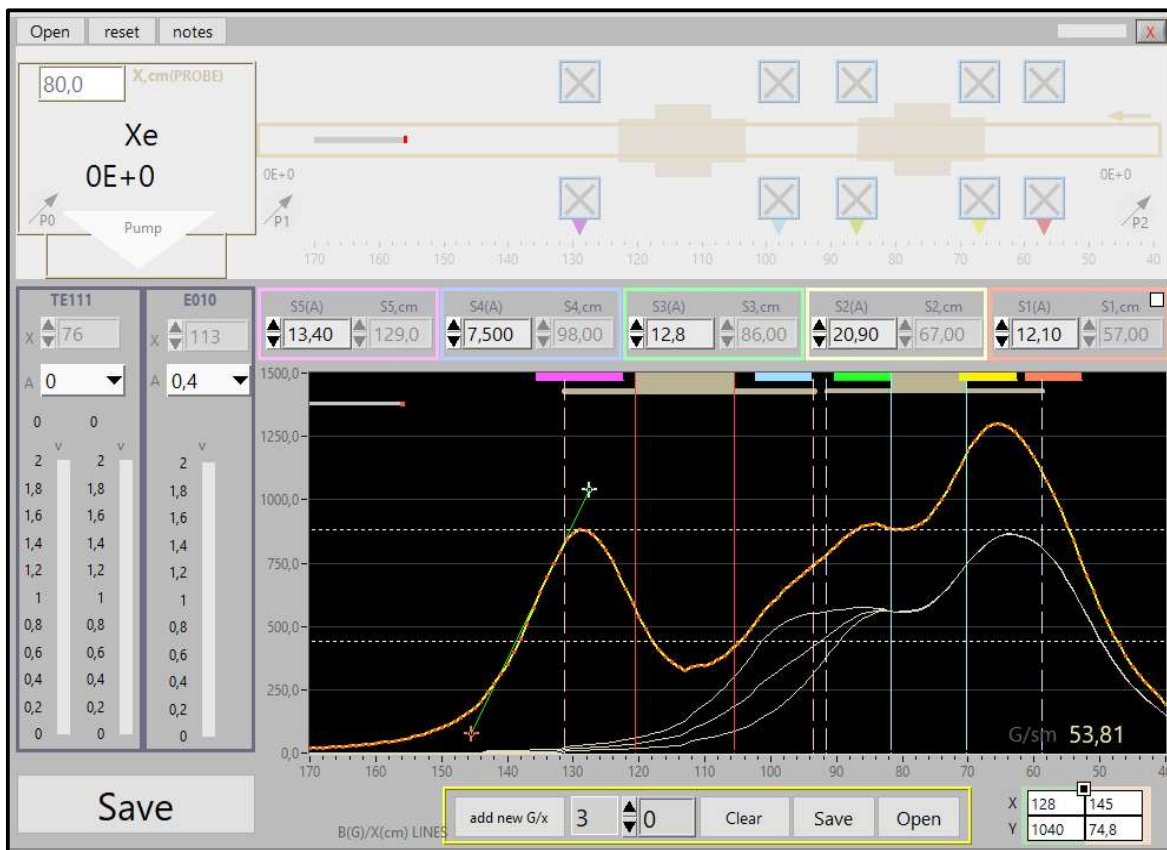


Рисунок 15. Интерфейс программы расчета осевого магнитного поля.

Еще одной задачей ПАК является поддержание значения давления на заданном уровне, что реализовано по методу обратной связи с временными задержками.

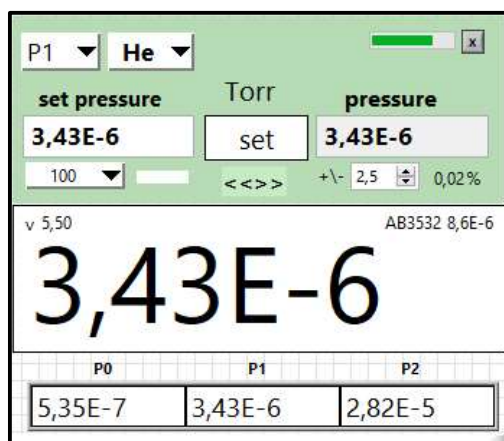


Рисунок 16. Интерфейс программы для отслеживания и поддержания давления в системе.

Отдельная система ПАК обеспечивала сбор и обработку данных многосеточного анализатора и обработку вольт-амперных характеристик (ВАХ) с коллектора анализатора.

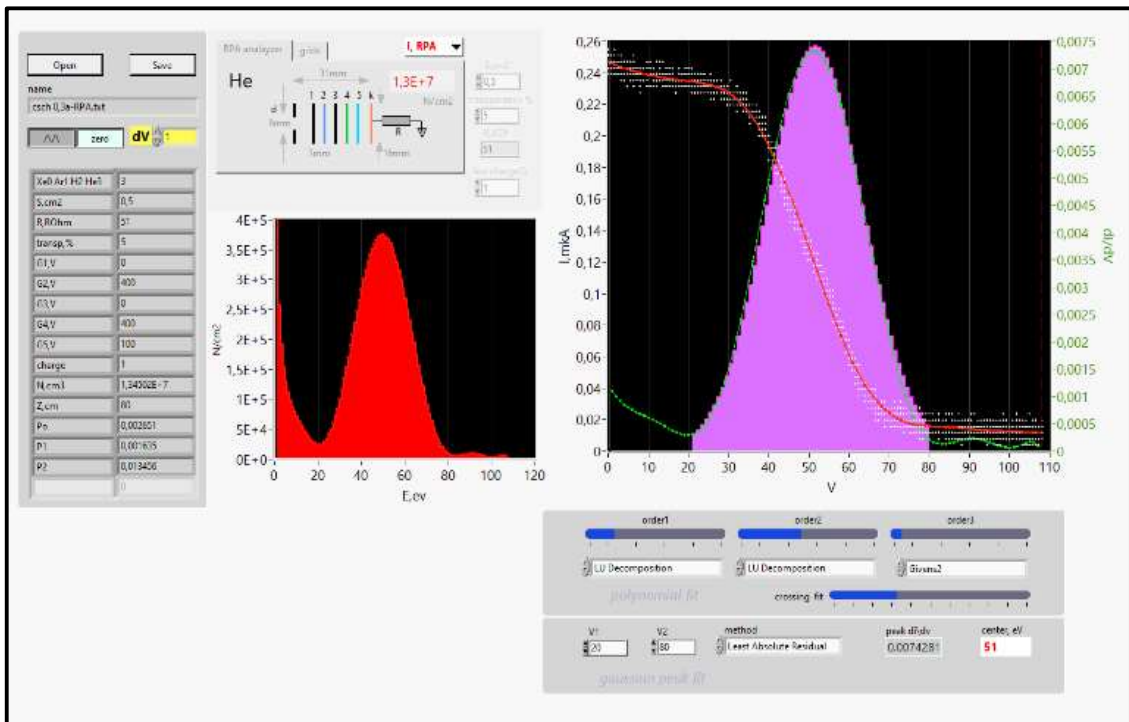


Рисунок 17. Интерфейс программы для обработки ВАХ с коллектора анализатора.

Сигнал фиксируемый с коллектора многосеточного анализатора представлен на рисунке 18.

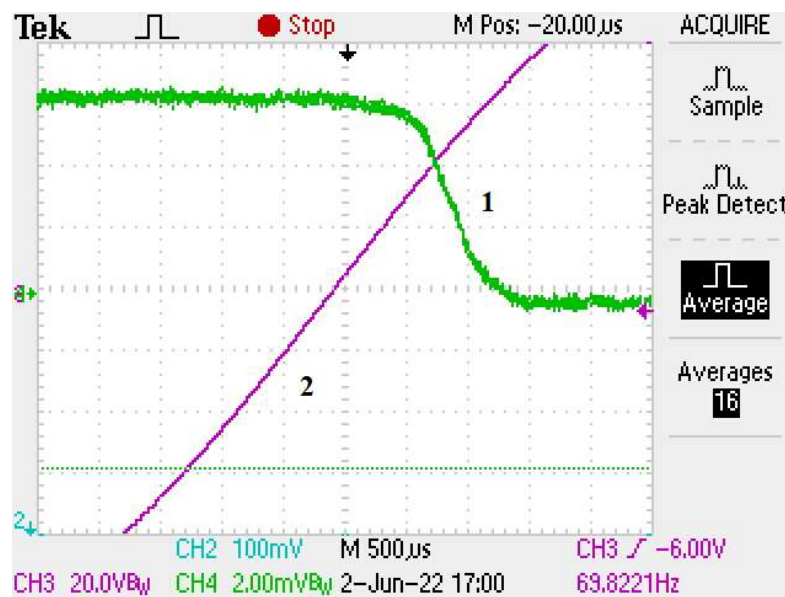


Рисунок 18. 1-сигнал с коллектора многосеточного анализатора, 2-напряжение на анализирующей сетке 4.

Обработка вольт-амперной характеристики тока коллектора представлена на рисунке 19.

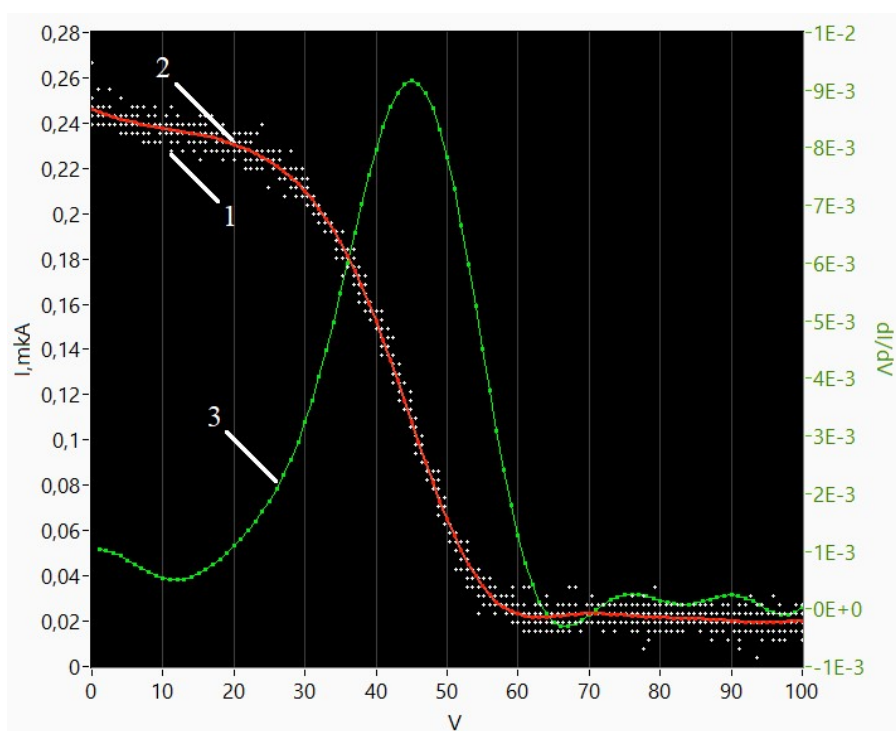


Рисунок 19. Интерфейс обработки тока с коллектора многосеточного анализатора. 1– сигнал с коллектора. 2– приближение сплайном 11 порядка. 3– дифференцирование функции сплайна с шагом в 1В.

С помощью данных (энергия и интегральный ток создаваемый ионами) полученных после обработки ВАХ, можем рассчитать плотность потока ионов в каждом интервале энергий по формуле:

$$N = \frac{I \cdot \sqrt{M}}{4.8 \cdot 10^{-10} \cdot 1.38 \cdot 10^6 \cdot k \cdot S \cdot \sqrt{W}},$$

где N -количество ионов пришедшее на коллектор, k -коэффициент прозрачности для всех сеток, S -площадь входного отверстия коллиматора, M -атомный вес иона используемого газа.

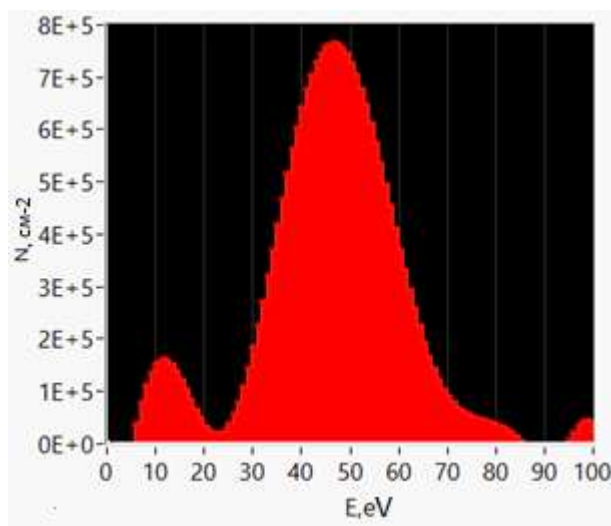


Рисунок 20. Концентрация ионов в каждом интервале энергий.

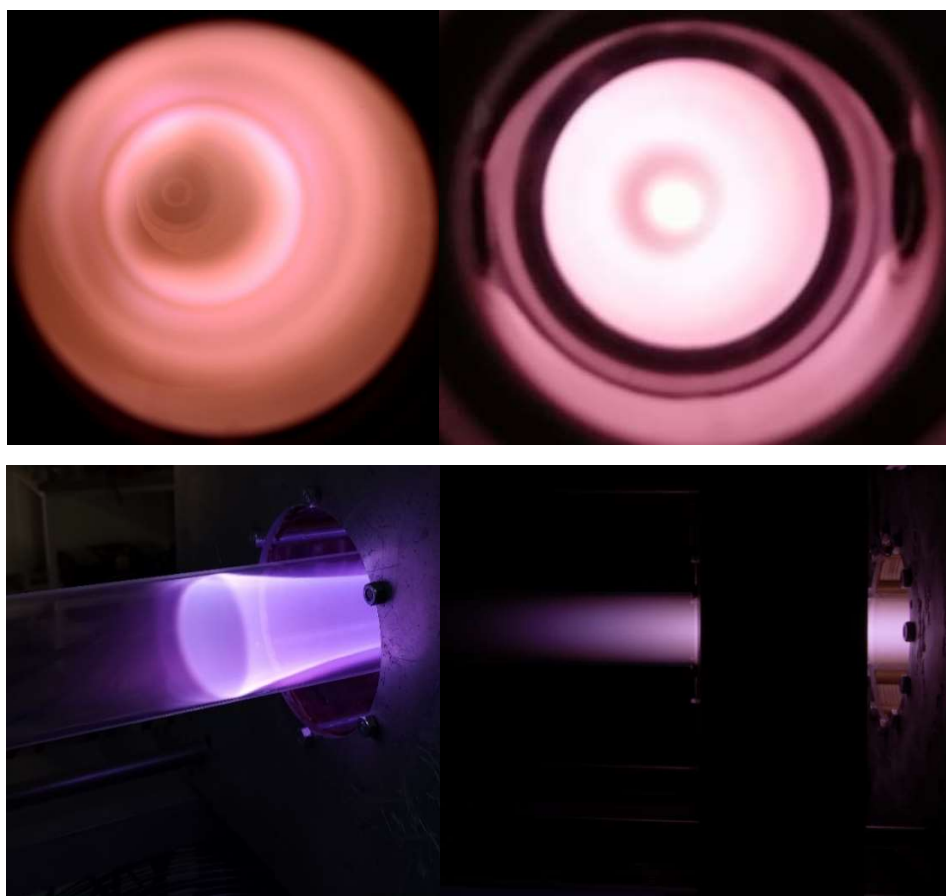
Соответственно полная плотность потока получается суммированием плотности всех интервалов.

Для наблюдения пространственного распределения свечения, по яркости которого можно судить о количестве частиц плазмы в разных областях рабочего объема, применялась цифровая фотосъемка.

Для оценки напряженности поля внутри резонатора применялась штыревая антенна. Для мониторинга излучения в диапазоне от 450-1000 нм из центральной области резонатора TE111 применялся фотодиод, сопряжённый с регулярный световодом.

4. Результаты и их обсуждение.

В ходе работы на экспериментальном стенде фиксируются два режима: кольцевая структура, объемное свечение разряда (рис.21). Переход между режимами зависит от давления и магнитного поля.



а)

б)

Рисунок 21. Режимы горения разряда. а)кольцевая структура, б)объемное свечение.

Переход с одного режима на другой по давлению для различных газов (Xe, Ar, He) разный при остальных равных параметрах. Для Xe - 10^{-5} Торр, для Ar - 10^{-4} Торр, для He - 10^{-3} Торр. Кольцевая структура разряда препятствует транспортировке наработанной плазмы (разряд садиться на стенки) .

Реализованное в рабочем объеме плазмообразующего резонатора магнитное поле, обеспечивает условие электронно-циклотронного нагрева (ЭЦР), что позволило получить стабильный плазменный поток, изолированный от стенок кварцевой трубы. При понижении магнитного поля до уровня соответствующего ~ 580 Гс осевая локализация разряда сохраняется, как видно на рисунке 22, при этом как будет показано далее эффективность транспортировки, т.е. плотность потока в области

ускоряющего резонатора, выше. Эксперимент проводился с полями представленными на рисунке 23.

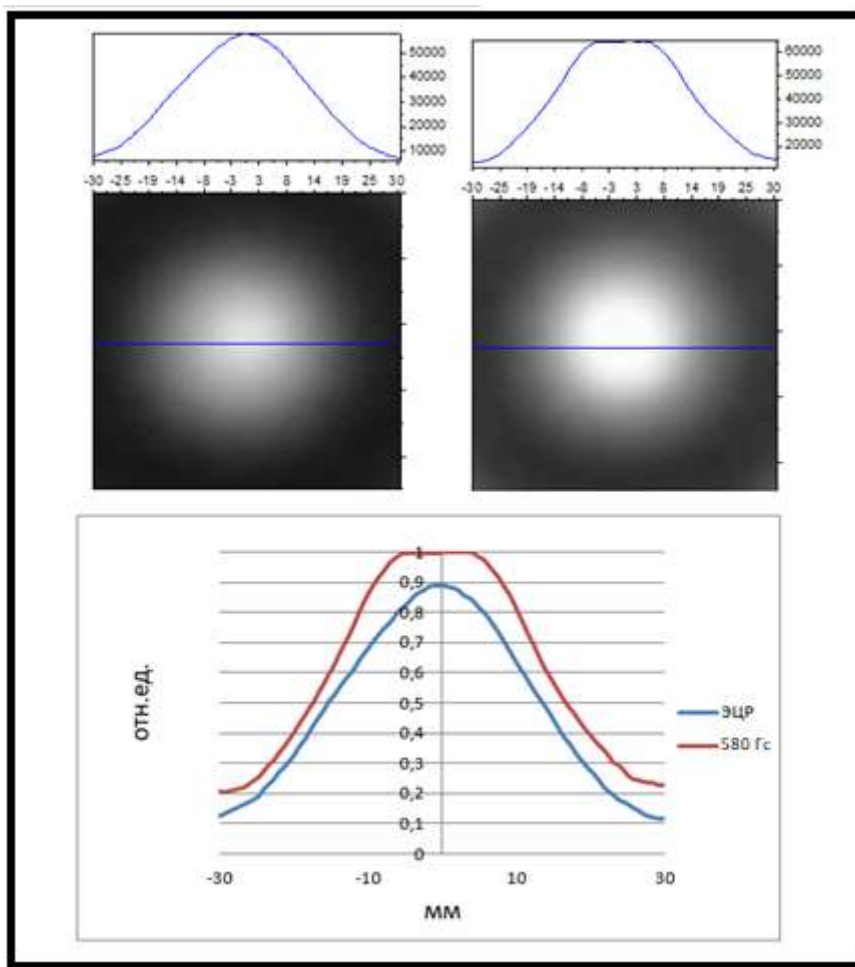


Рисунок 22. Локализация разряда при разных профилях полей вдоль оси.

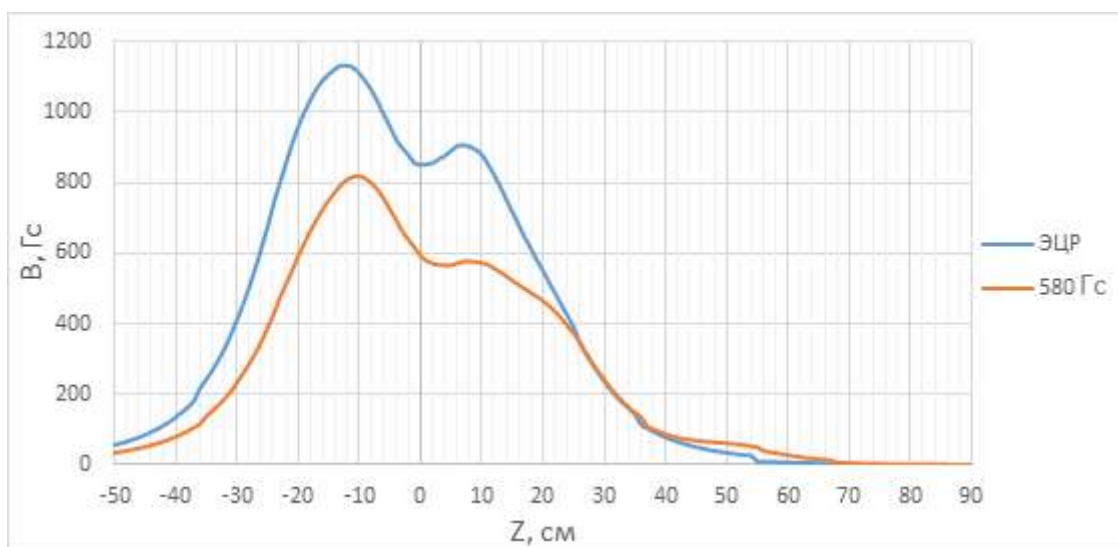


Рисунок 23. Профили магнитных полей вдоль оси.

Для подтверждения более эффективной транспортировки плазмы в область ускоряющего резонатора был проведен ряд экспериментов для получения распределения энергии ионной компоненты вдоль оси магнитной системы. Исследование проводилось с различной топологией магнитного поля внутри плазмообразующего резонатора, при размещении анализатора на расстоянии 40 см от его центра, т.е. в объеме E010 резонатора. В проводимых экспериментах давление поддерживалось на постоянном уровне и составляло $3 \cdot 10^{-4}$ Торр, плазмообразующий газ – He.

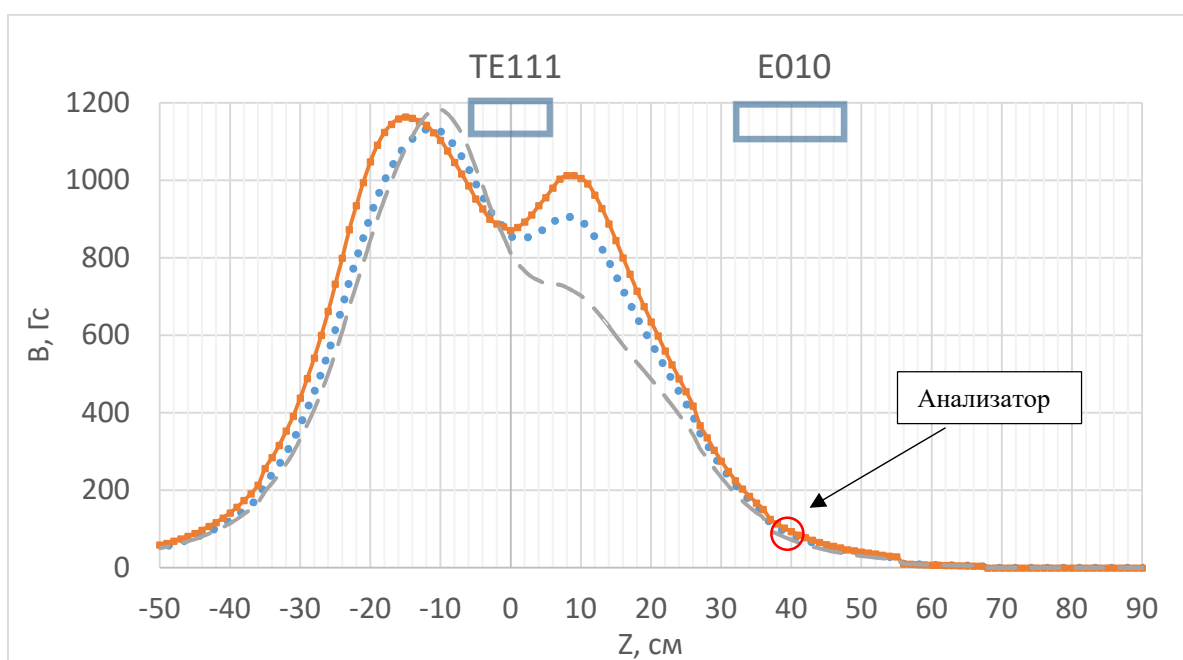


Рисунок 24. Различные топологии магнитного поля внутри плазмообразующего резонатора, соответствующие ЭЦР взаимодействию.

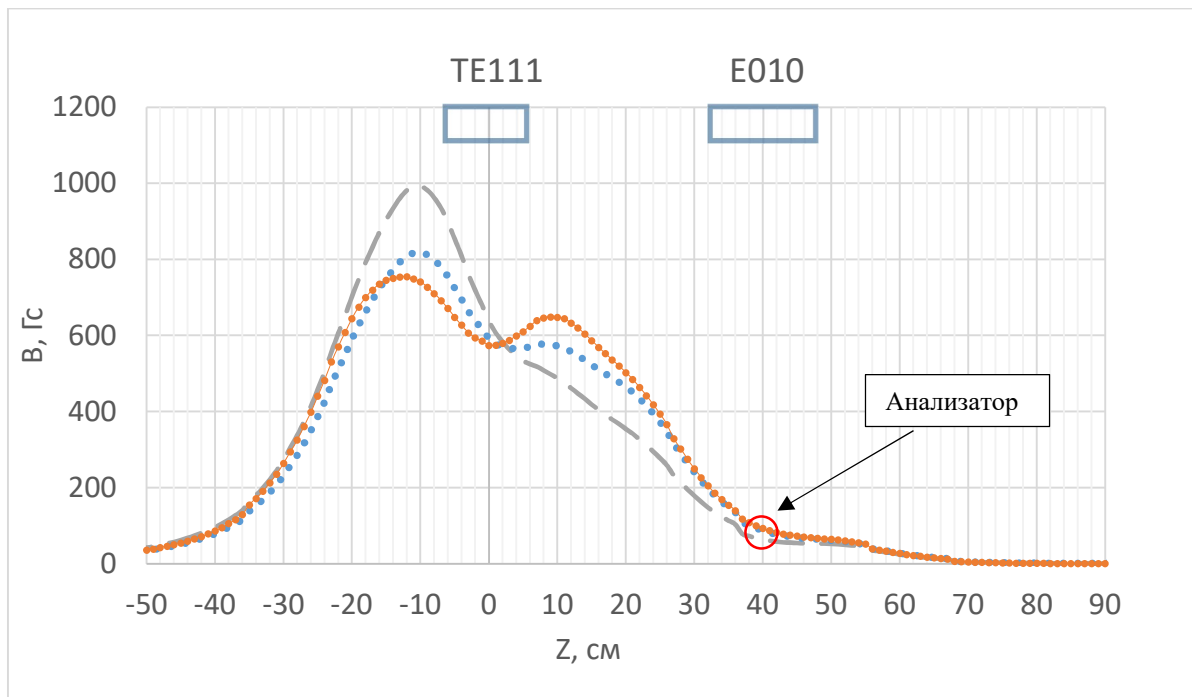


Рисунок 25. Различные топологии магнитного поля внутри плазмообразующего резонатора, пониженного поля (~580 Гс).

Результаты экспериментов представлены на рисунке 26. Цвет столбцов соответствует цвету распределения магнитного поля на рисунках 24, 25. Распределение поля 1 соответствуют большей пробки внутри плазмообразующего резонатора, распределение поля 2 соответствуют меньшей пробки внутри плазмообразующего резонатора, распределение поля 3 соответствуют спадающему полю внутри плазмообразующего резонатора.

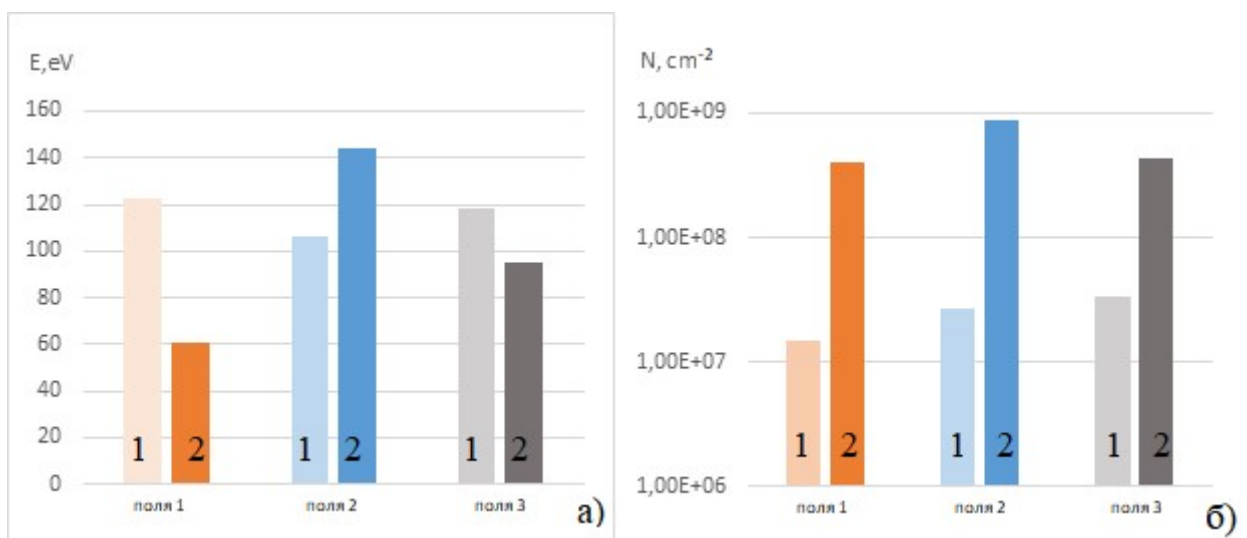


Рисунок 26. Результаты эксперимента. а) средняя энергия ионов, б) плотность потока ионов на коллектор анализатора.

Столбцы «1», представленные на рис.26, показывают результаты полученные при полях представленных на рисунке 24 (ЭЦР область), столбцы «2» показывают результаты проводимые при полях представленных на рисунке 25 (~580 Гс). Сравнение результатов (рис. 26) показывает, что плотность потока ионов при пониженном магнитном поле (~580 Гс) отличается от ЭЦР поля на порядок (в большую сторону). Это свидетельствует в пользу использования поля ~580 Гс.

Исследования зависимости плотности потока ионов и их средней энергии от координаты анализатора вдоль оси магнитного поля, позволили получить результаты (рис. 27) из которых видно, что распределение плазмы вдоль магнитной оси неоднородно. Это может быть связано с неоднородным распределением магнитного поля. Эксперименты проводились при полях, представленных на рисунке 25, при фиксированном давлении $3,6 \cdot 10^{-4}$ Торр, газ – He.

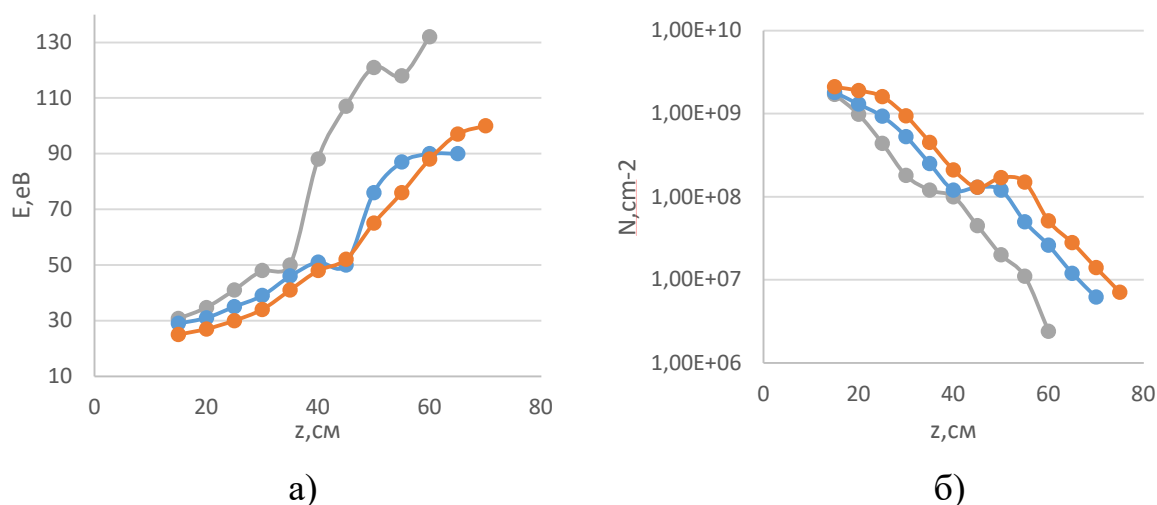


Рисунок 27. Результаты эксперимента. а) зависимость средней энергии ионов от координаты анализатора, б) зависимость плотности потока ионов на коллектор от координаты анализатора.

Исследования зависимости плотности потока ионов и их средней энергии от давления в рабочем объеме, позволили получить результаты (рис. 28), которые свидетельствуют о росте энергетических характеристик ионной

компоненты плазмы при уменьшении давления. Эксперименты проводились при полях, представленных на рисунке 25, при положении анализатора (40 см от центра плазмообразующего резонатора (область ускоряющего резонатора)), газ – He.

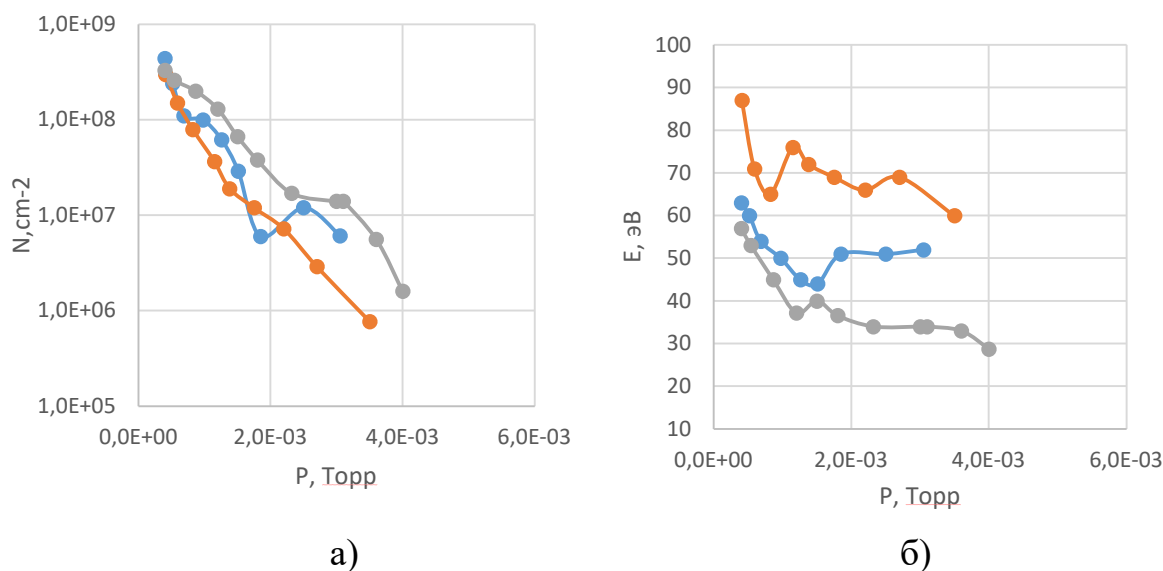


Рисунок 28. Результаты эксперимента. а) Зависимость средней энергии ионов от давления, б) зависимость плотности потока от давления.

С помощью полученных данных (рис. 27, 28) можно подобрать оптимальные параметры рабочего стенда для наиболее эффективной наработки и транспортировки плазмы. Хотелось бы отметить, что вероятнее всего концентрация плазмы внутри плазмообразующего резонатора гораздо выше, но ее измерение не представляется возможным, из-за ограничений наложенных размерами ячейки сеток и расстоянием между сетками. Максимально возможная измеряемая концентрация 10^9 см^{-3} при температуре электронов несколько сотен эВ.

Следующий эксперимент проводился при распределении магнитного поля вдоль оси представленного на рисунке 29, рабочий газ - Хе. В ходе данного эксперимента снималась зависимость сигнала штыревой антенны (напряженность поля) в резонаторе от энергии ионной компоненты при различных давлениях.

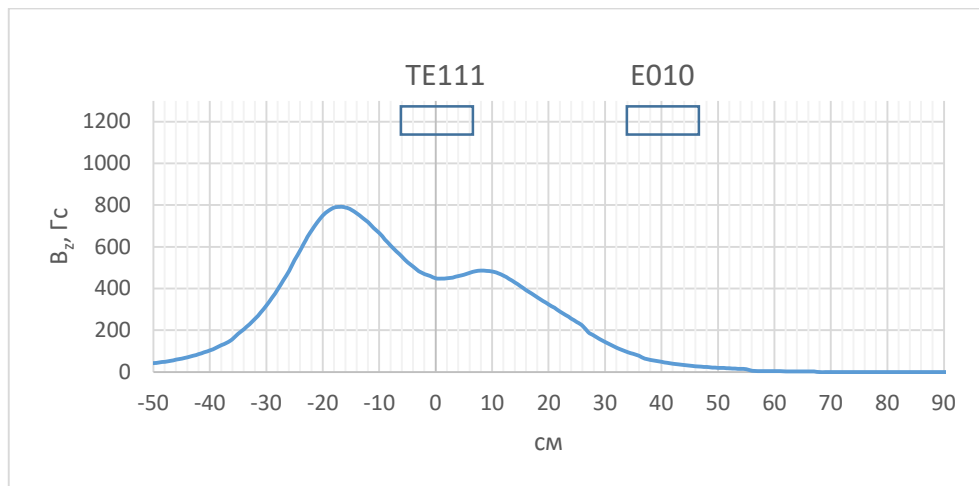


Рисунок 29. Распределение магнитного поля вдоль оси.

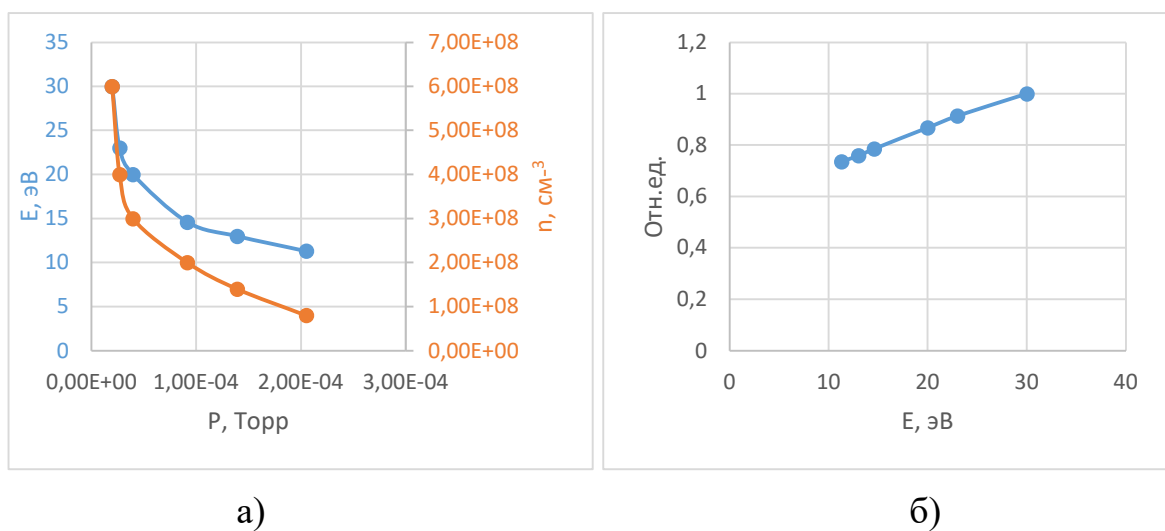


Рисунок 30. Результаты эксперимента. а) зависимость средней энергии и плотности потока ионов от давления, б) зависимость сигнала штыревой антенны в резонаторе от энергии ионной компоненты.

Результаты (рис.30) могут объяснять рост энергии ионной компоненты при уменьшении давления (при уменьшении давления напряженность поля в резонаторе растет, вероятнее всего из-за уменьшения потерь на поддержание разряда и уменьшения расстройки резонатора).

Проведены эксперименты с магнитными полями, соответствующими трамплинному магнитному полю (магнитное сопло) (рис. 31).

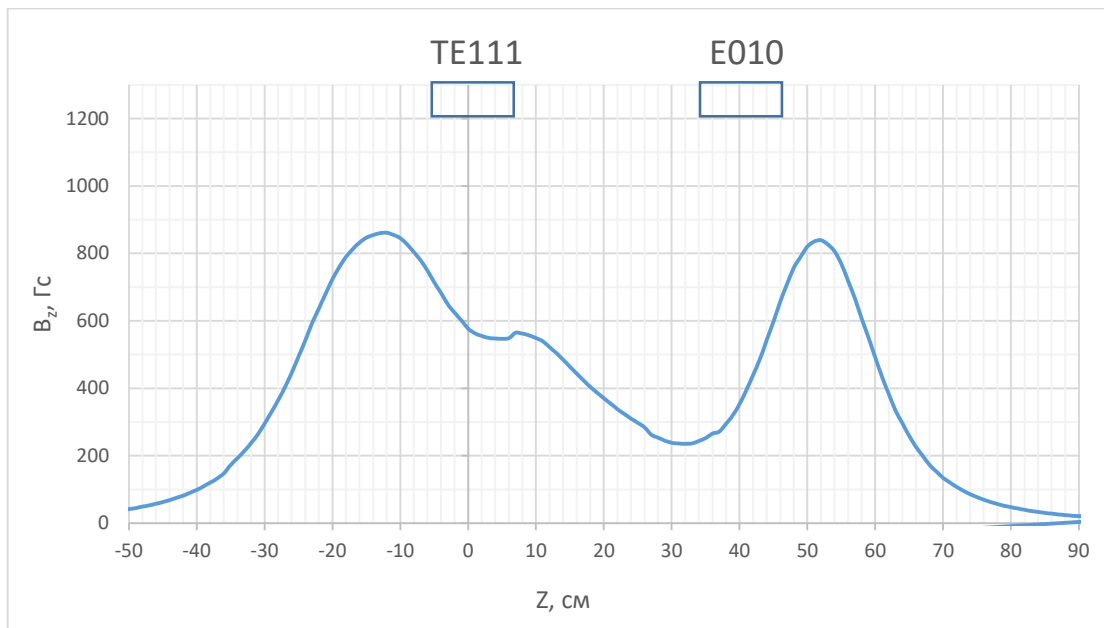


Рисунок 31. Распределение магнитного поля вдоль оси.

Получены распределения по энергиям ионной компоненты (рис. 32) при перемещении анализатора вдоль оси магнитной системы при фиксированном давлении $8,8 \cdot 10^{-4}$ Торр, рабочий газ - He.

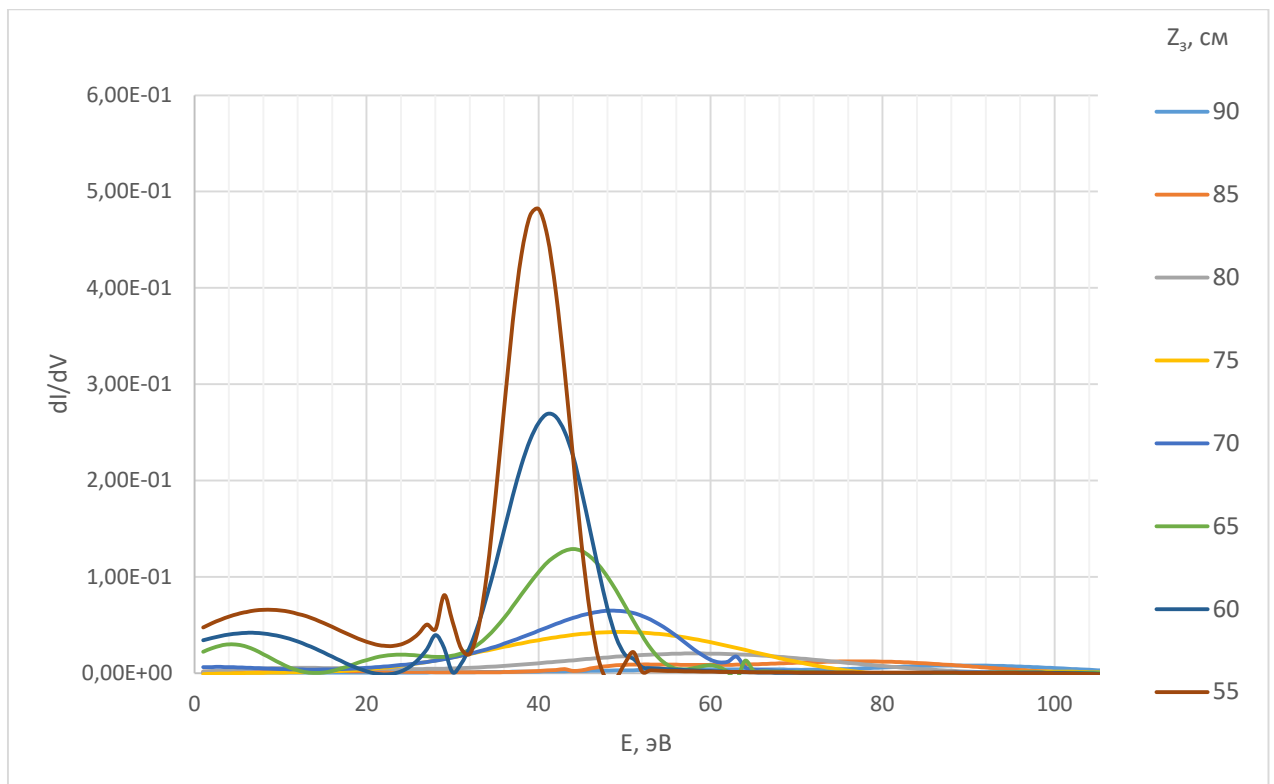


Рисунок 32. Распределения по энергиям ионной компоненты при перемещении анализатора вдоль оси магнитной системы

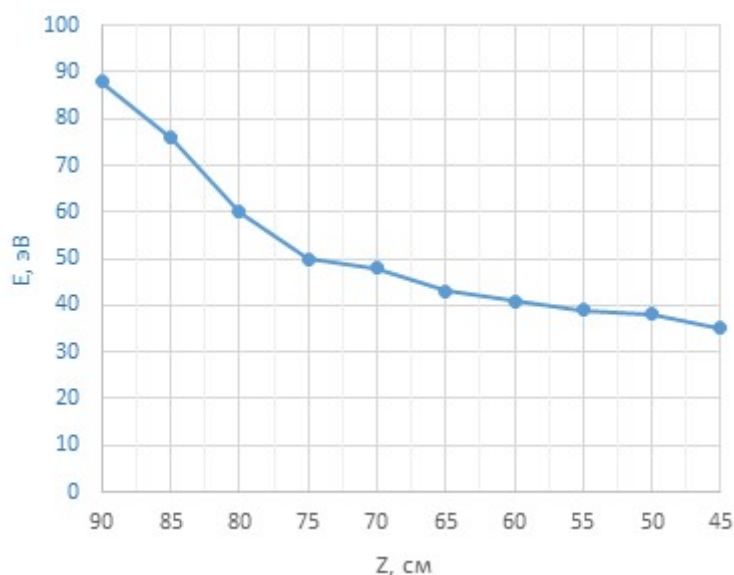


Рисунок 33. Зависимость средней энергии ионной компоненты плазмы, фиксируемые анализатором, от координаты анализатора.

Получены распределения по энергиям ионной компоненты (рис. 34) при изменении давления при фиксированной координате анализатора 90 см от центра плазмообразующего резонатора, рабочий газ - He.

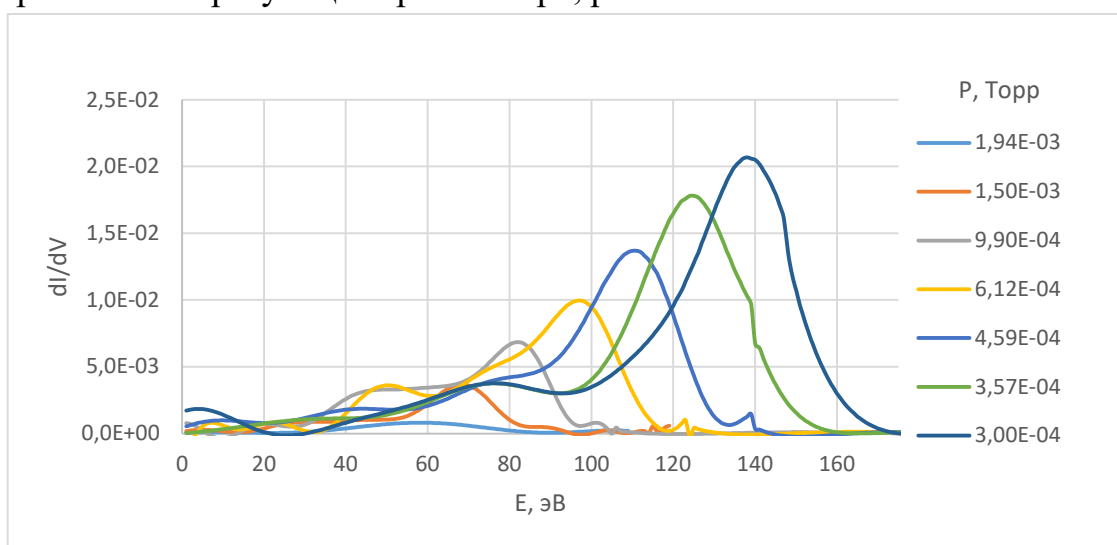


Рисунок 34. Распределения по энергиям ионной компоненты при изменении давления.

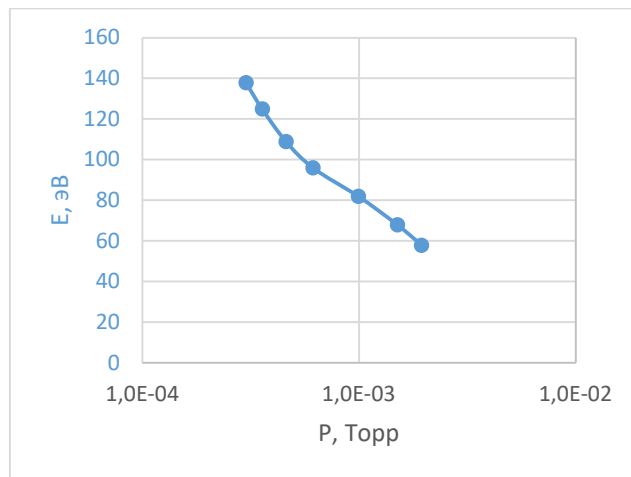


Рисунок 35. Зависимость средней энергии ионной компоненты плазмы, фиксируемые анализатором, от давления.

При анализе результатов (рис. 34) можно обнаружить появление дополнительных «пиков», что свидетельствует о наличии еще одной группы ионов, но истинность данных результатов под вопросом. Вероятно искажение ВАХ, вызванное различными факторами, приводит к появлению ложных пиков.

Исследовано изменение параметров ионной компоненты от мощности излучения магнетрона (тока накала анода, по паспорту 0,4А ~ 600 Вт), координата анализатора 80 см, давление $1,6 \cdot 10^{-3}$ Торр, рабочий газ – Не.

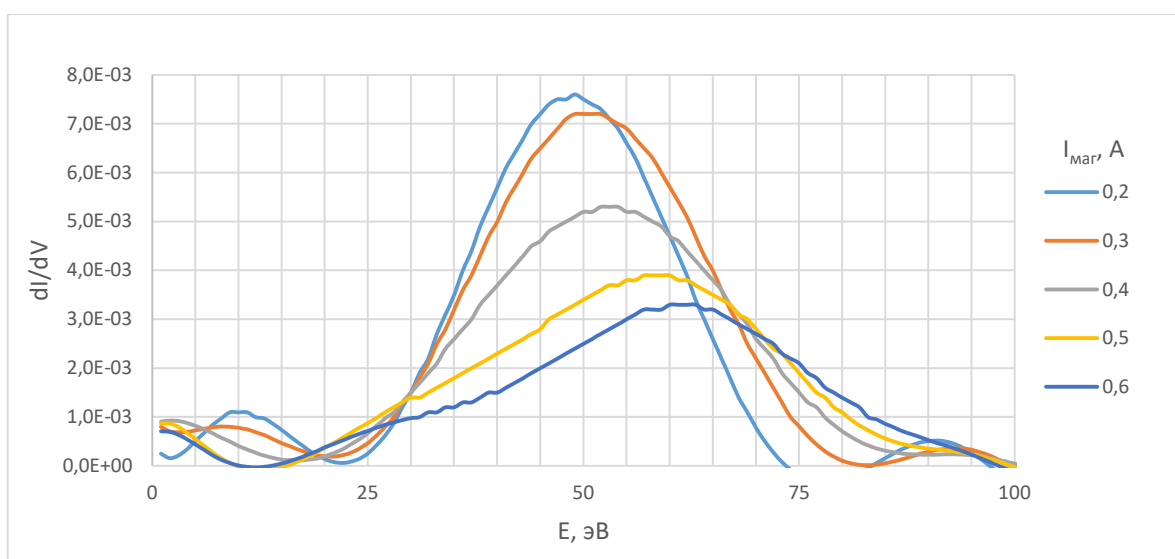


Рисунок 36. Распределения по энергиям ионной компоненты при изменении анодного тока магнетрона.

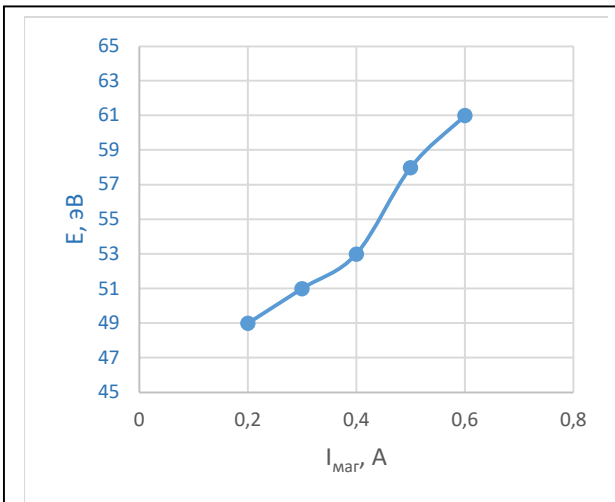


Рисунок 37. Зависимость средней энергии ионной компоненты плазмы, фиксируемые анализатором, от анодного тока магнетрона.

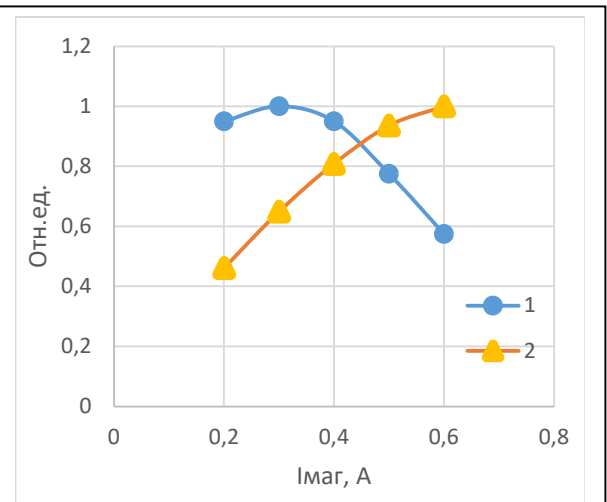


Рисунок 38. Зависимость сигнала «1» штыревой антенны в резонаторе и сигнала «2» фотодиода от анодного тока магнетрона.

Как видно из рисунка 38 наблюдается падение сигнала в резонаторе при увеличении мощности, при этом сигнал с фотодиода растет. Вероятнее всего происходит растрейка резонатора и увеличение потерь на поддержание разряда.

Проведены эксперименты в которых изучалось влияние продольного СВЧ электрического поля ускоряющего резонатора на энергетические характеристики ионной компоненты. Результаты данных исследований представлены на рисунке 39.

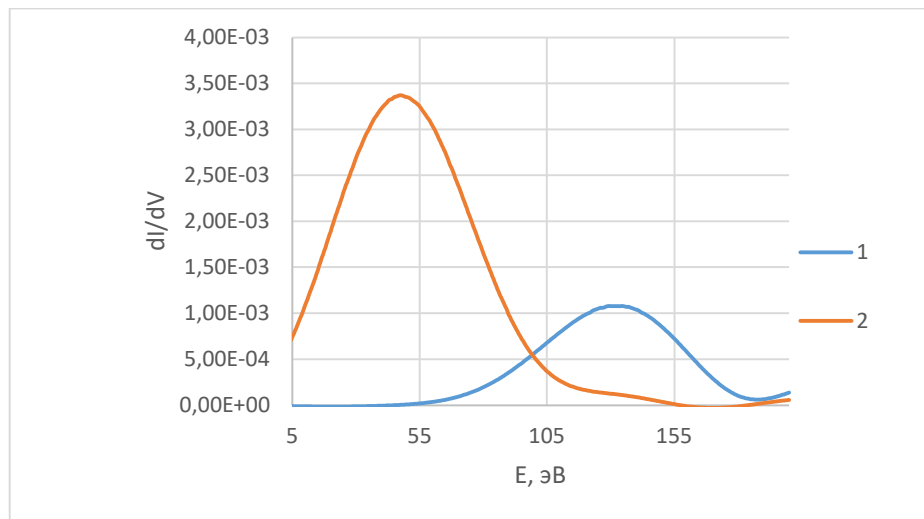


Рисунок 39. Влияние продольного СВЧ электрического поля ускоряющего резонатора на энергетические характеристики ионной компоненты. «1» - данные без подачи мощности в ускоряющий резонатор. «2» - данные с подачей мощности в ускоряющий резонатор.

Эксперименты демонстрируют увеличение сигнала на коллекторе, при этом средняя энергия ионной компоненты падает в несколько раз (125 - 45 эВ). Вероятнее всего причиной такого результата является перераспределение электромагнитных полей внутри ускоряющего резонатора (возникновение поперечного СВЧ электрического поля), при наличии в нем проводящей среды (плазмы). Об этом свидетельствует разряд, заполняющий весь объем кварцевой трубки (не локализован), который продолжает гореть при прекращении подачи мощности в плазмообразующий резонатор. Изучение такого поведения разряда не входило в текущие планы проведения исследований. По этой причине эти исследования были отложены.

Наличие выделенной группы ионов с энергиями несколько десяткой эВ регистрируется в работах [16-21]. Механизм ускорения ионной компоненты плазмы как показано в этих работах связан с распределением потенциала плазмы вдоль магнитного поля (сопла). Следовательно, для понимания механизма образования энергичной ионной компоненты в наших условиях необходимо провести эксперименты позволяющие определить возможное распределение потенциала. Для этих целей необходимо оснастить установку

дополнительными системами диагностики, одной из которых может являться двойной зонд Ленгмюра, способный перемещаться вдоль магнитной оси системы. Измерение вольт-амперных характеристик зонда позволит определить температуру электронной компоненты. Потенциал плазмы возможно оценить путем модернизации данного зонда в эмиссионный зонд.

Представленные выше результаты свидетельствуют о необходимости изменить линейные размеры ускоряющего резонатора, для возбуждения необходимой моды колебаний в его объеме. Параллельно рассматривается вариант возбуждения дополнительной СВЧ моды в плазмообразующем резонаторе с продольной относительно магнитной оси электрической компонентой СВЧ поля.

Заключение

В ходе данной работы был изучен корпускулярный метод анализа компонент плазмы в условиях плазмодинамической системы на основе ЭЦР. Для реализации данного метода был разработан и реализован многосеточный анализатор, с помощью которого были получены энергии распределения ионной компоненты вдоль оси магнитной системы, при различных вариациях рабочих параметров тандемной плазмодинамической установки, что позволило на данном этапе определить оптимальные рабочие параметры стенда.

Также был разработан и реализован программно-аппаратный комплекс позволяющий контролировать рабочие параметры установки, производить сбор и анализ данных.

Изучено влияние магнитного сопла на энергетическую составляющую ионной компоненты плазмы.

Анализ полученных результатов свидетельствует о необходимости дополнительной диагностики плазменного потока, включающей в себя получение энергетического распределения электронной компоненты (концентрация, температура) вдоль магнитной оси системы. Особенно хочется выделить необходимость получения информации о распределении потенциала плазмы, который исходя из анализа литературы, играет одну из ключевых ролей в механизме ускорения ионного потока.

Использование второй ступени (ускоряющего резонатора) в качестве ускоряющей структуры, транспортируемого в него потока плазмы, в текущем варианте реализации не целесообразно. Необходимо внести конструктивные изменения в размерах и способе возбуждения резонатора с учетом влияния плазмы на распределение электромагнитных полей в его объеме.

Благодарность

Хотелось бы выразить благодарность моему научному руководителю Андрееву Виктору Викторовичу за возможность участвовать в реализации проекта двухступенчатого ускорителя, за помощь в редактировании диссертации, за багаж знаний, полученных благодаря ему!

Отдельную благодарность хотелось бы выразить Калашникову Андрею Владимировичу за помощь, оказанную на всех этапах выполнения диссертации, за умения и навыки, полученные благодаря ему, за моральную поддержку и мотивацию!

Список литературы

- [1] Новиков Л.С., Черник В.Н. «Применение плазменных ускорителей в космическом материаловедении», Москва Университетская книга, 2008
- [2] А.В. Аржанников, А.Д. Беклемишев «Электрореактивный двигатель высокой тяги с горффрированным винтовым магнитным полем». Вестник НГУ Том 11, №1, 2016
- [3]. David A. Kaufman «Investigation of an ECR Plasma Thruster and Plasma Beam Interaction with a Magnetic Nozzle» *California institute of Technology Pasadena, California 1995*
- [4] S. N. Bathgate, M. M. M. Bilek, D. R. Mckenzie «Electrodeless plasma thrusters for spacecraft: a review» *Plasma Sci. Technol. 19, 2017*
- [5]. Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Félix Cannat, Denis Packan «Performance Comparison of an ECR Plasma Thruster using Argon and Xenon as Propellant Gas» *The George Washington University, Washington, D.C. USA October 6 – 10, 2013*
- [6] A. Ganguli, R. D. Tarey, R. Narayanan and A. Verma «Evaluation of Compact ECR Plasma Source for Thruster Applications » Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, New Delhi, 110016, India.
- [7] E. Rosati Azevedo, K. Swar, D. Staab, E. Longhi, A. Garbayo, B. Karadag, J. Stubbing, R. Moloney, A. Lucca Fabris, T. le Toux, O. Tarvainen, D. Faircloth «Xjet: design upgrade and preliminary characterization for an electrodeless ECR thruster» *SPACE PROPULSION 2020 Estoril, Portugal / 08 – 12 February 2021.*
- [8] В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин «ТЕРМОЯД И КОСМОС», НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
- [9] Е.А. Шевцов, дипломная работа «Моделирование магнитостатического поля плазмодинамического устройства и его экспериментальная верификация», *Российский университет дружбы народов, Москва 2016.*
- [10] Л.В. Литовченко, «Методы исследования параметров плазменных образований», *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2009 г.*

- [11] Bolton Ferda, «Retarding Potential Analyzer Theory and Design», *Princeton University 24 September 2015*.
- [12] George-Cristian Potrivitu, «Low-voltage External Discharge Plasma Thruster and Hollow Cathodes Plasma Plume Diagnostics Utilising Electrostatic Probes and Retarding Potential Analyser», *Luleå University of Technology Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, 2016*
- [13] S. Mazouffre, T. Hallouin¹, M. Inchingolo , A. Gurciullo , P. Lascombes , J.-L. Maria, «Characterization of miniature Hall thruster plume in the 50 - 200 W power range » *8 th european conference for aeronautics and space sciences (EUCASS)*.
- [14] Peng Hu, Hui Liu, Yuanyuan Gao, and Daren Yu, « Study on the structure and transition of the hollow plume in a multi-cusped field thruster », *Physics of Plasmas* 23, 103517 (2016)
- [15] Франк-Каменецкий Д.А. «Лекции по физике плазмы», Москва, Атомиздат, 1968г
- [16] Pavel Smirnov, Ruslan Kozakov and Jochen Schein «Experimental Characterization of the Capacitively Coupled RF-Plasma Thruster» *Institute for Plasma Technology and Basics of Electrical Engineering*
- [17] Antonella Caldarelli, Félicien Filleul, Christine Charles, Nicholas Rattenbury, John Cater «Preliminary Measurements of a Magnetic Steering System for RF Plasma Thruster Applications» *Te Punaha Atea - Auckland Space Institute, The University of Auckland, Auckland, New Zealand*.
- [18] Jian-quan Li, Qing-he Zhang, Zan-yang Xing, et al. «Comparative studies of cold/hot probe techniques for accurate plasma measurements» *Cite as: J. Vac. Sci. Technol. A* 40, 033001 (2022);
- [19] N. Plihon, P. Chabert, and C. S. Corr «Experimental investigation of double layers in expanding plasmas», *Physics of Plasmas* 14, 013506 (2007)
- [20] Nicolas Plihon , Pascal Chabert , Jean-Luc Raimbault, «Experimental Studies of Helicon Double Layers for Future High Power Plasma Propulsion», *American Institute of Aeronautics and Astronautics*

- [21] Alfio Vinci, Stéphane Mazouffre, «Direct experimental comparison of krypton and xenon discharge properties in the magnetic nozzle of a helicon plasma source» *Physics of Plasmas*, American Institute of Physics, 2021
- [22] Eric Vincent Heubel and Luis Fernando, «Microfabricated Retarding Potential Analyzers With Enforced Aperture Alignment for Improved Ion Energy Measurements in Plasmas», *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 24, no. 5, october 2015
- [23] L. Conde,¹ J. L. Domenech-Garret, J. M. Donoso, J. Damba, S. P. Tierno, E. Alamillo-Gamboa, and M. A. Castillo «Supersonic plasma beams with controlled speed generated by the alternative low power hybrid ion engine (ALPHIE) for space propulsion», *Physics of Plasmas* 24, 2017
- [24] А. А. Шаталин, А. Е. Калинычев «Электростатические анализаторы. Диагностика плазмы в магнитном поле» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров.
- [25] Frans H. Ebersohn, Sharath S. Girimaji, David Staack, John V. Shebalin, Benjamin Longmier, Chris Olsen «Magnetic Nozzle Plasma Plume: Review of Crucial Physical Phenomena» *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
- [26] Matt Wiebold, Yung-Ta Sung, and John E. Scharer « Experimental observation of ion beams in the Madison Helicon eXperiment» *Physics of Plasmas* 18, 2011