

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет Физический

Кафедра Физики плазмы

Направление подготовки 03.03.02 ФИЗИКА

Образовательная программа: БАКАЛАВРИАТ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Шоколова Александра Дмитриевича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Калибровочный источник ионов

«К защите допущен»

Заведующий кафедрой,

ученая степень, звание

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2016

Оглавление

Введение.....	3
1. Калибровочный источник ионов.....	4
2. Численное моделирование.....	7
3. Экспериментальное изучение.....	10
3.1 Лампа Байарда-Альперта.....	10
3.2 Экспериментальное изучение формирования и транспортировки пучка.....	12
Заключение.....	17
Литература.....	18

Введение

Современные плазменные эксперименты требуют серьёзного контроля над параметрами плазмы. Для этого используются различные методы диагностики плазмы: от зондовых до широкого спектра оптических методов. Всё более широкое распространения получают методы непрямого наблюдения за плазмой, так как температура, при которой проводятся эксперименты, постоянно растёт. Широкое применение приобретает корпускулярная диагностика, основанная на получении информации о плазме по нейтральным частицам, появляющимся в плазме, и покидающим её. Для этой цели было разработано множество приборов, такие как анализаторы нейтральных частиц, болометры и пиро-болометры. Однако подобные диагностики требуют калибровки. Задача данной работы - создать калибровочный источник ионов для такого рода диагностик, с определёнными, точными, параметрами пучка.

В физике плазмы существует много задач, для которых требуется использование источников ионов[1]. Так источник ионов является ключевой частью нагревного инжектора, а также используется в создании пучков, для измерения параметров плазмы. Диагностический пучок взаимодействует с плазмой, результат взаимодействия фиксируется различными диагностическими приборами[2].

1. Калибровочный источник ионов

Калибровочный источник ионов состоит из первичного источника ионов, сепарирующей системы, системы ускорения частиц до требуемой энергии и фокусирующей линзы. Источник должен иметь следующие параметры:

- Частицы: p, D+
- Энергия частиц пучка на выходе 3-60 кэВ.
- Ток пучка на выходе до 10 мкА, в пятно диаметром 3 мм.
- Доля протонов/дейтонов на мишени более 95%.

На рисунке 1 изображена принципиальная схема установки.

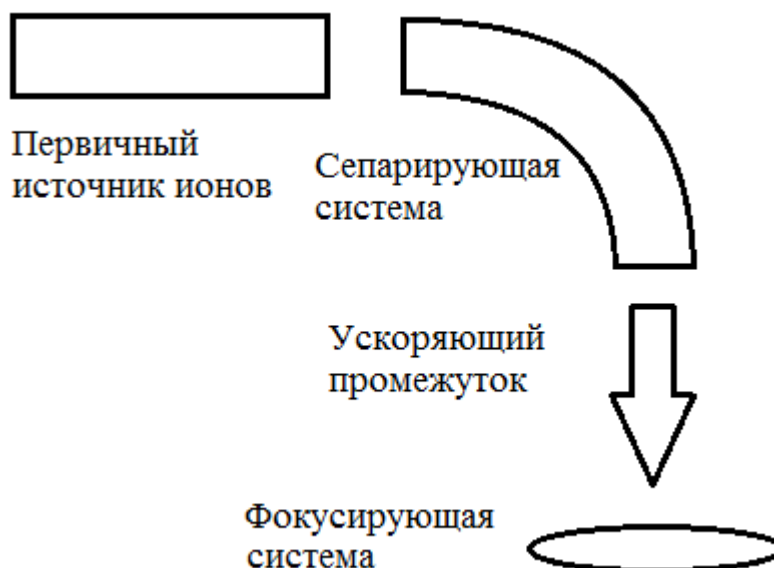


Рисунок 1 - принципиальная схема установки

Частицы, получаемые из первичного источника ионов, проходят сепарирующую систему, для выделения требуемой фракции ионов. После сепарации ионы доускоряются до требуемой в эксперименте энергии и фокусируются. В качестве первичного источника ионов была выбрана ионизационная лампа Байарда-Альперта. Для этого нужно обеспечить подачу газа во внутренний объем лампы и не использовать коллектор ионов.

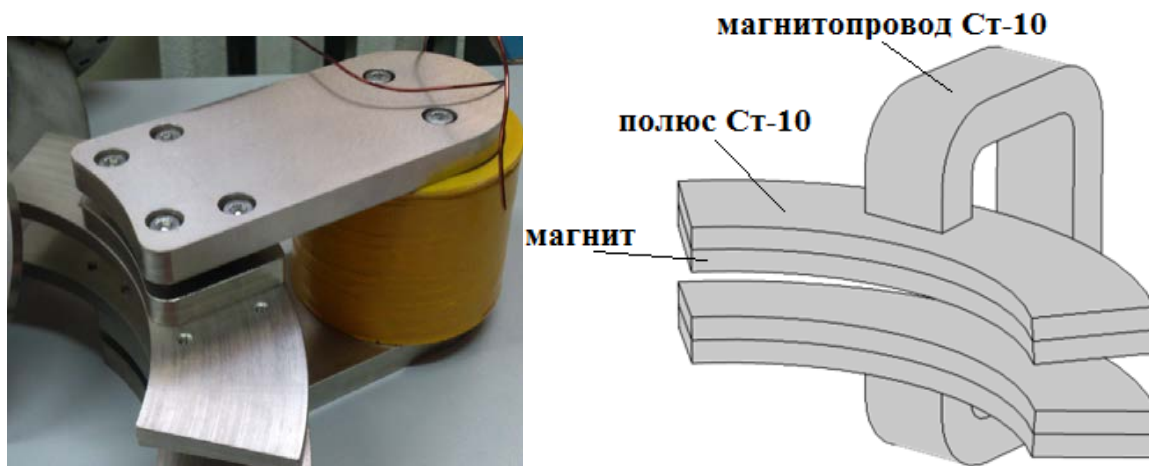
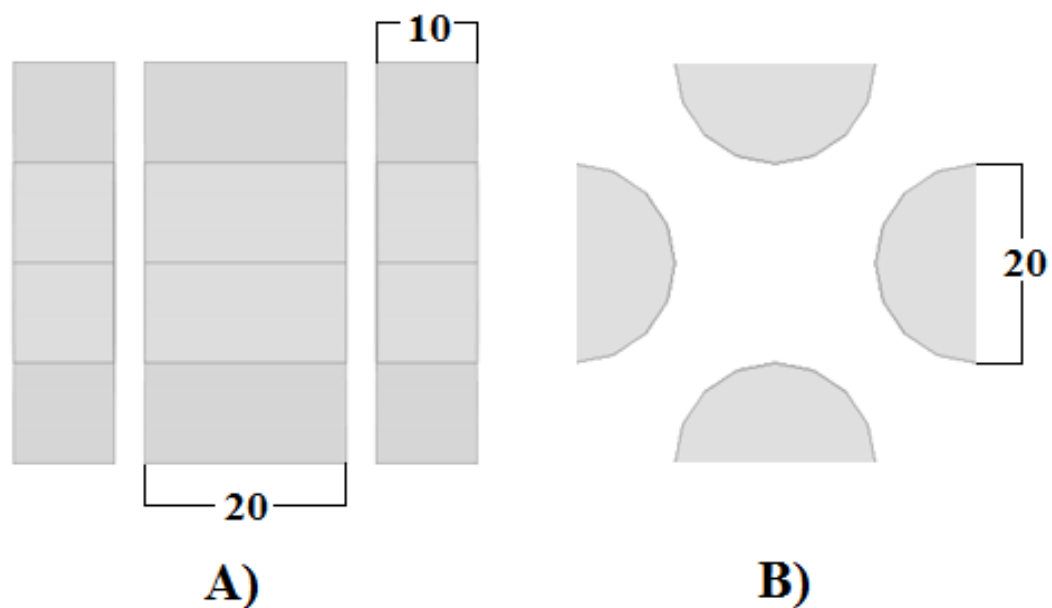


Рисунок 2 - поворотный магнит

Сепарация необходимой фракции производится с помощью поворотного магнита. Поворотный магнит состоит из постоянных магнитов, и соленоида, используемого для точной подстройки магнитной индукции в зазоре. Полюса постоянных магнитов представляют собой сектор кольца в 90° , прикрепляемые на полюса из стали-10, из которых выводится магнитопровод. катушка расположена вокруг магнитопровода.

После сепарации частицы доускоряются в зазоре 10 мм. Далее пучок попадает в фокусирующую систему, которая представляет собой электростатическую квадрупольную линзу. Она состоит из трёх, расположенных друг за другом, квадруполей. Её преимуществами перед магнитной линзой являются компактность, малое потребление мощности и, как следствие, отсутствие дополнительных систем охлаждения. Отличием от квадрупольных дублетов и синглетов является возможность фокусировать пучок симметрично.



Электростатическая квадрупольная линза, вид сбоку (А) и спереди (В).

Диаметры ячеек равны 20 мм, а длины крайних и центральных: 10 мм и 20 мм соответственно. Настройка положительно и отрицательно заряженных элементов производится независимо, в следствие чего есть возможность изменять величину и форму пятна на выходе.

2. Численное моделирование

Для определения оптимальных параметров системы и распределения магнитных и электрических полей, в среде COMSOL был проведен расчёт основных параметров и произведено моделирование пролёта частиц в тракте. На рисунке 3 изображена расчётная модель источника.



Рисунок 3 - расчётная модель источника. Подписи: система с первичным источником ионов(1), поворотный магнит(2), доускоряющий промежуток(3), электростатическая квадрупольная линза(4).

Принцип работы:

Рождаясь в первичном источнике ионов, частицы ускоряются до энергии 3 кэВ, пролетают всю систему (1). Далее они проходят поворотный магнит (2), настроенный на определённый сорт частиц (протоны или D+), доускоряются в промежутке (3) до требуемой энергии (3-60 кэВ) и фокусируются линзой (4).

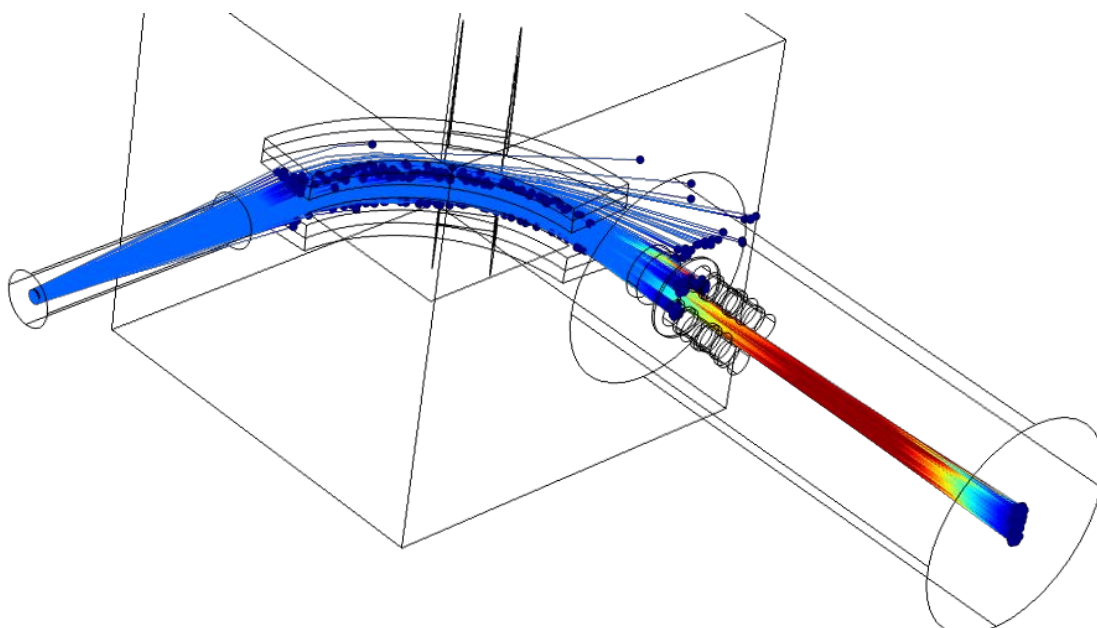


Рисунок 4 - расчётная траектория пролёта частиц

В модели рассматривалось движение 1000 частиц, с угловым разбросом 20 мрад. Полюса магнитов расположены под углом $\approx 3^\circ$ для частичной компенсации эффекта магнитной фокусировки. Поле в зазоре поворотного магнита, для эффективного поворота частиц, должно составлять ≈ 530 Гс для протонов, и ≈ 720 Гс для дейтонов.

Для фокусировки пучка используется электростатическая квадрупольная линза. На рисунке 5 представлена зависимость размера пучка от напряжения на квадрупольях.

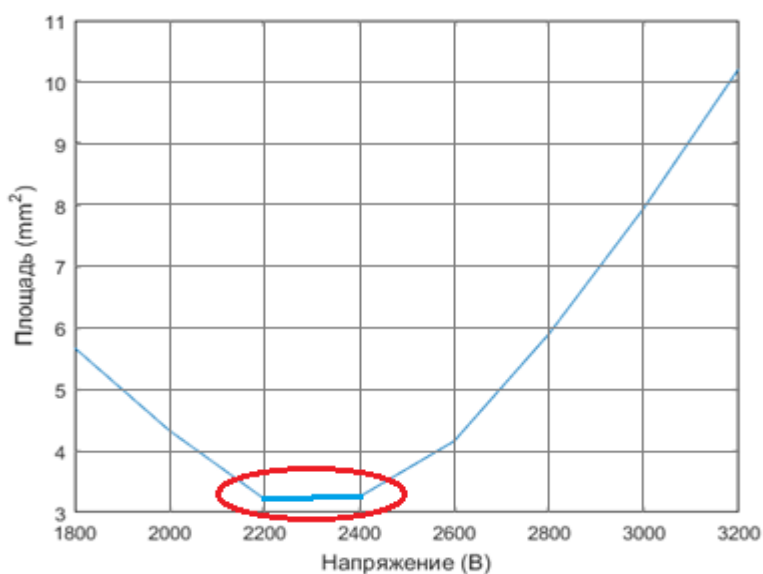


Рисунок 5 - площадь пучка в зависимости от напряжения на квадрупольях

При моделировании был вычислен оптимальный диапазон напряжения квадруполей для эффективной фокусировки пучка, с энергией 60 кэВ (выделенная область на рисунке 5). Определена величина напряжения, при котором наблюдается наилучшая фокусировка частиц. при этом, отношение напряжения на квадруполях к энергии частиц $\approx 0,04e$, где e – заряд электрона. Площадь пучка оценивается по формуле:

$$S = \sigma_x * \sigma_y,$$

где σ_x и σ_y – стандартные отклонения частиц по оси x и y соответственно.

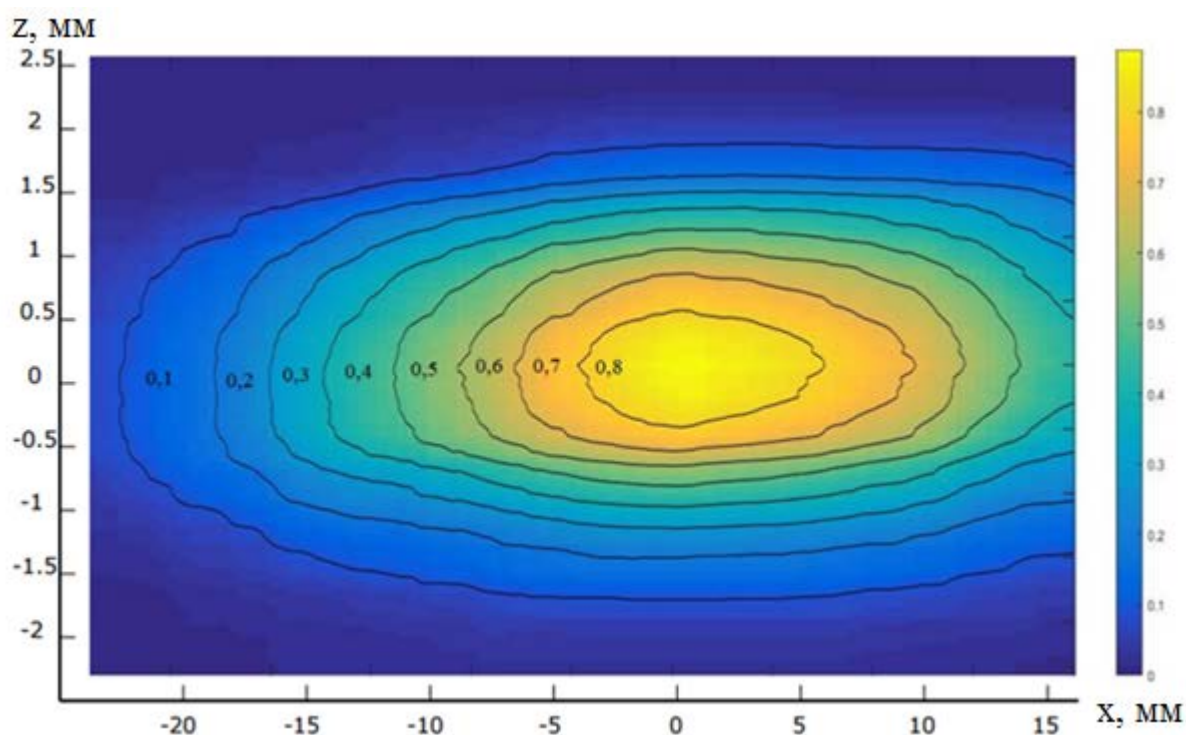


Рисунок 6 – распределение плотности частиц после фокусировки

На рисунке 5 представлено рассчитанное нормированное распределение плотности тока пучка после фокусировки электростатической линзой.

3. Экспериментальное изучение

3.1 Лампа Байарда-Альперта

В качестве источника плазмы в установке используется лампа Байарда-Альперта (рисунок 7). Было проведено измерение зависимости тока на коллектор от мощности накала нити в импульсном режиме (рисунок 7).

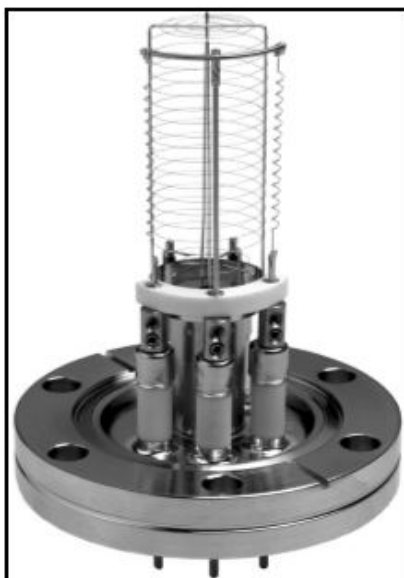


Рисунок 7 - лампа Байарда - Альперта

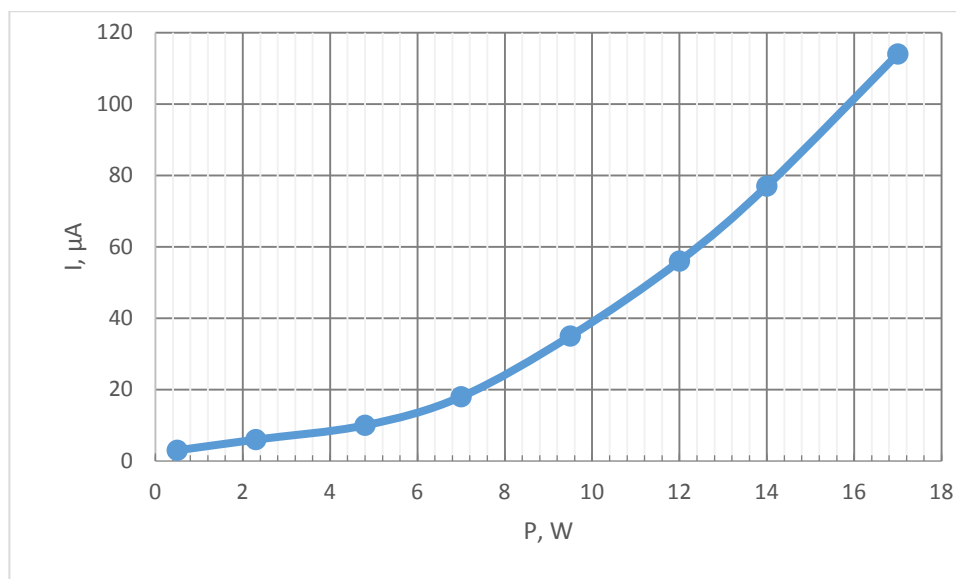


Рисунок 8 - зависимость тока на коллекторе от мощности накала вольфрамовых нитей

Для использования лампы в качестве источника плазмы в установке есть специальное отверстие, куда вводится трубка, подающая газ лампе. Объем, вместе с установленной лампой, находится под потенциалом 3 кВ. Это сделано для первичного ускорения частиц. Газ, попадая во внутренний

объём лампы, частично ионизуется электронным ударом, а после, полученные ионы вытягиваются внешней сеткой под нулевым потенциалом.

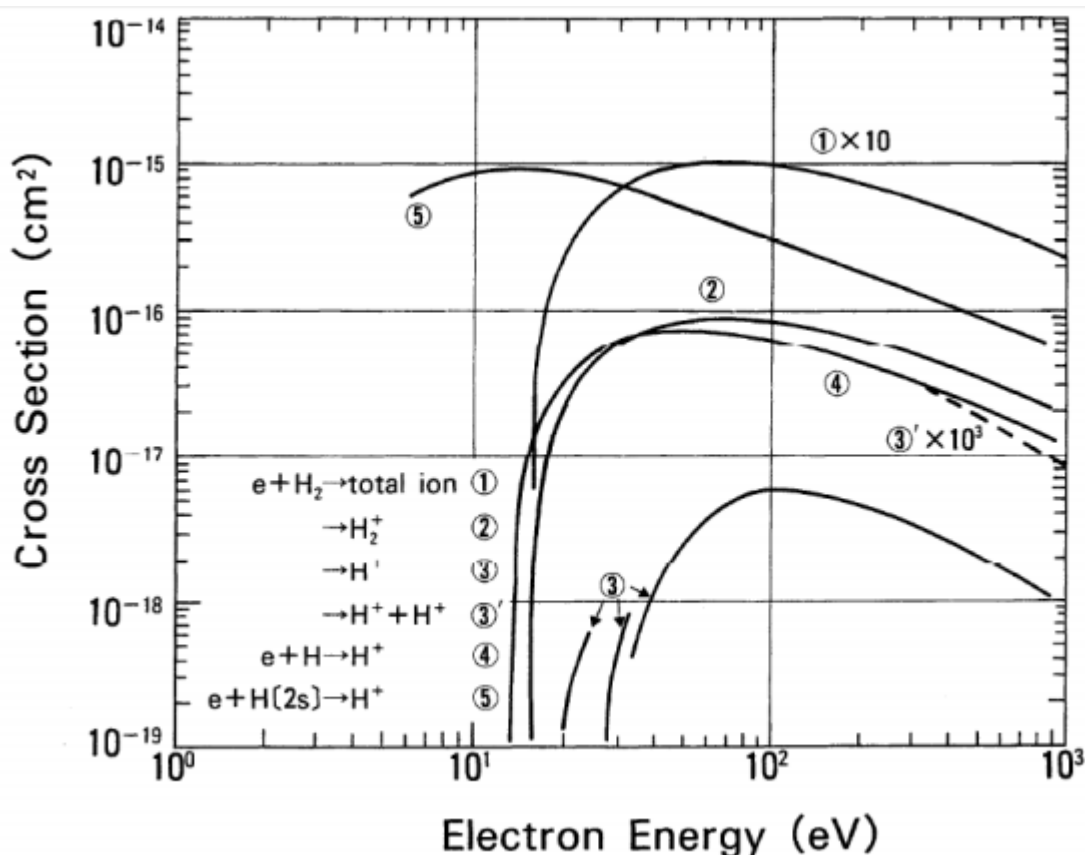


Рисунок 9 - зависимость сечений ионизации водорода электронным ударом от энергии электронов [3]

В лампе БА длина пути, проходимого электроном, зависит от отношения тощины нити к шагу спирали, и составляет в среднем величину, в 10 раз больше диаметра. Вследствие конструктивных особенностей лампы, энергия электронов в большей части объема, ограниченного сеткой, практически однородна [4].

На рисунке 9 представлены зависимости сечений ионизации электронным ударом для водорода. Исходя из данных зависимостей, для ускорения электронов до энергии, при которой ионизация эффективна, на сетку лампы подаётся напряжение 180 В, так электроны эффективно ионизуют газ, и погибают, падая на сетку.

3.2 Экспериментальное изучение формирования и транспортировки пучка

Проведено экспериментальное изучение формирования и транспортировки пучка в установке. Получены величины и распределения тока до и после поворотного магнита.

На рисунке 10 изображена экспериментальная установка

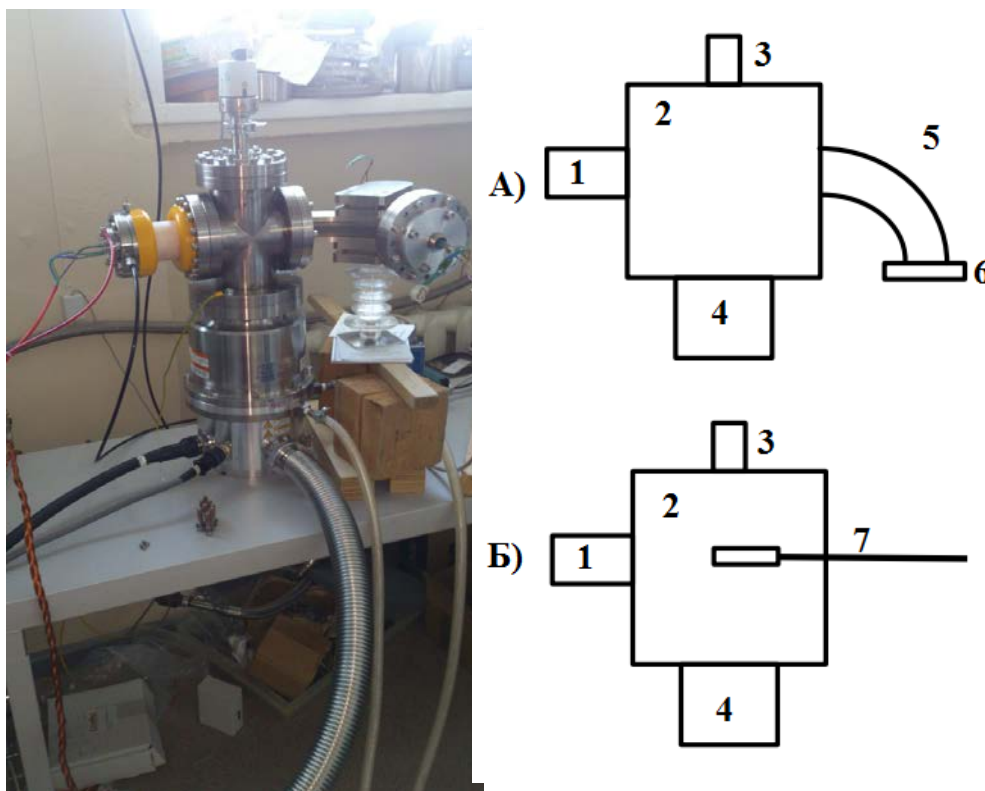


Рисунок 10 - экспериментальная установка. Подписи: ионизационная лампа Байарда – Альперта (1), рабочий объём (2), вакуумметр (3), турбомолекулярный насос (4), поворотный магнит (5), сегментированный цилиндр Фарадея (6), цилиндр Фарадея с вводом Вильсона(7).

Газ, поступающий в объём с лампой (1), частично ионизируется и ускоряется установленной перед основным объёмом сеткой до 3 кэВ. После, ионы доходят до поворотного магнита (5), где отсеиваются ненужные фракции ионов, и попадает на диагностическую систему, где измеряется профиль пучка. Турбомолекулярный насос (4) поддерживает низкое давление системы. Для измерения давления внутри объёма используется вакуумная лампа (3).

Напуск газа производился с использованием контроллера массового расхода, для создания постоянного потока. В экспериментах использовались различные диагностики: цилиндр Фарадея (рисунок 11) и сегментированный цилиндр Фарадея (рисунок 12). Сегментированный цилиндр Фарадея крепится на отдельный фланец, и используется для измерения профиля пучка. Он состоит из пяти каналов, с которых собирается информация о токе пучка (величина и распределение), запирающей сетки, под напряжением 50 В для подавления вторичной эмиссии, и ограничивающей диафрагмы. Каналы имеют ширину 5 мм, длину 20 мм, а расстояние между ними 2 мм, и закреплены на специальном фланце при помощи вакуумного диэлектрика. Цилиндр Фарадея имеет внутри диэлектрические элементы (2), кольцо (3), при помощи которого подавляется вторичная эмиссия, коллектора (4). ЦФ вводится в объем с помощью ввода Вильсона вдоль оси системы.

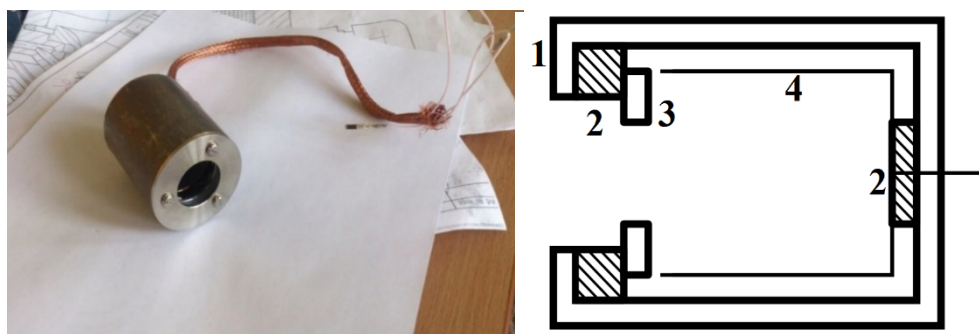


Рисунок 11 - цилиндр Фарадея

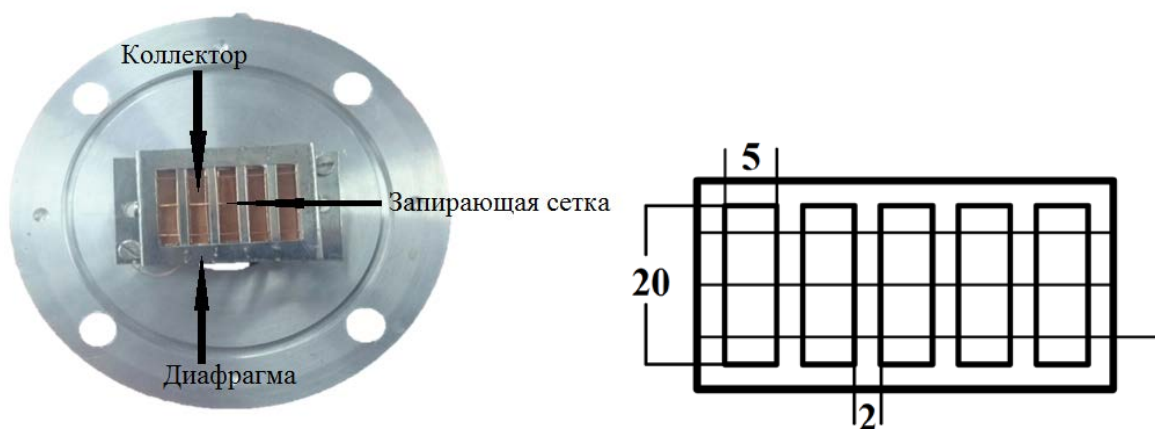


Рисунок 12 – сегментированный цилиндр Фарадея

С помощью сегментированного цилиндра Фарадея был измерен профиль тока пучка. На рисунке 13 представлен профиль пучка до поворотного магнита, а на рисунках 14-15 профиль пучка, прошедшего через магнит. При этом на рисунке 14 представлены измерения профиля тока пучка с запирающим напряжением на сетке -40 В.

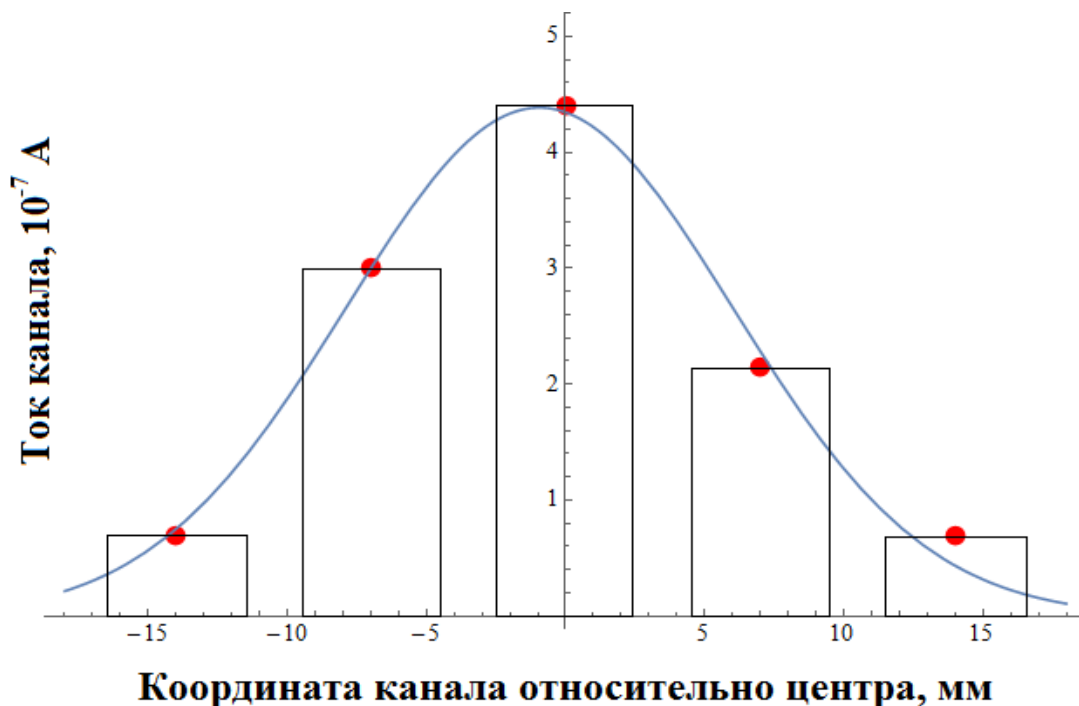


Рисунок 13 - распределение плотности пучка до поворотного магнита

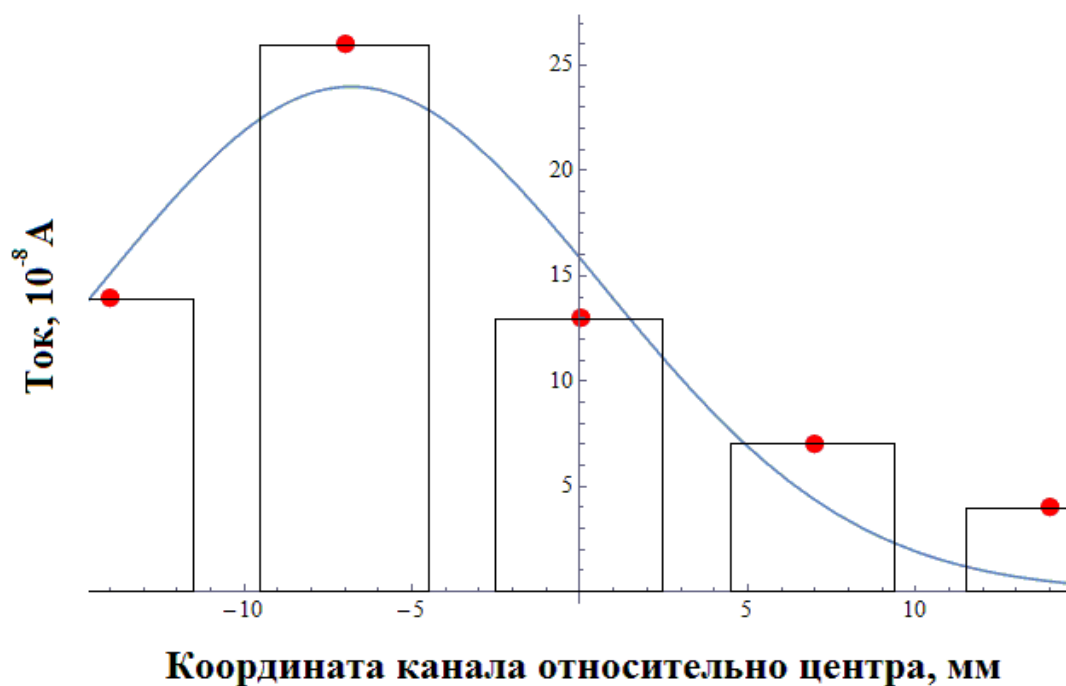


Рисунок 14 - ток на сегментированный ЦФ без смещения

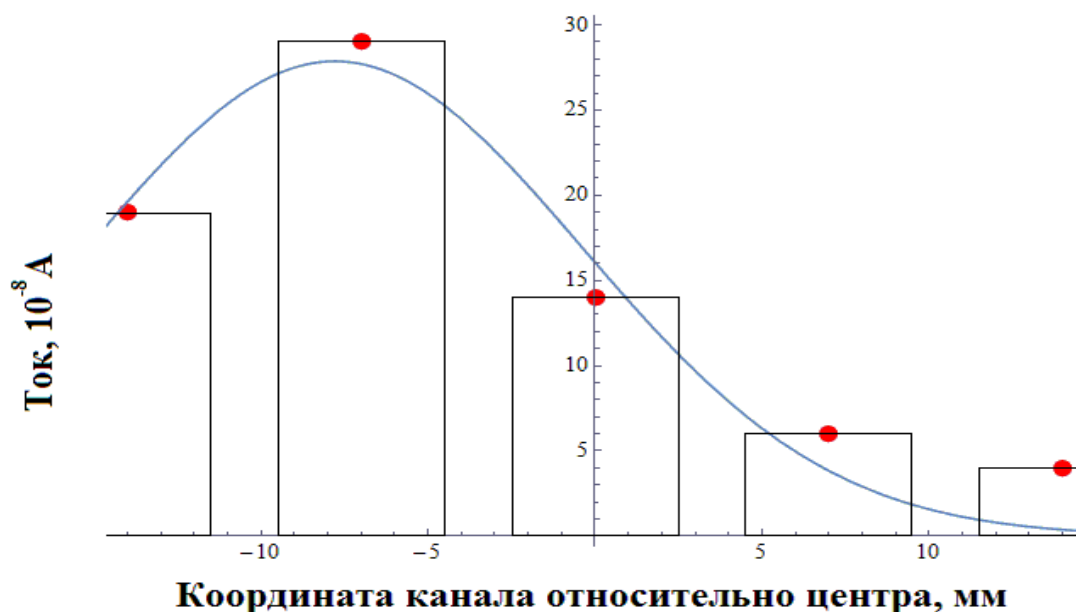


Рисунок 15 - ток на сегментированный ЦФ со смещением

Из графиков видно, что максимальное значение тока не совпадает с осью системы. Это связано с тем, что поворот пучка происходит на угол, отличный от 90 градусов.

Также с помощью цилиндра Фарадея была получена зависимость значений полного тока ионов от расстояния до отверстия (рисунок 16) и полного тока от количества газа (рисунок 17).

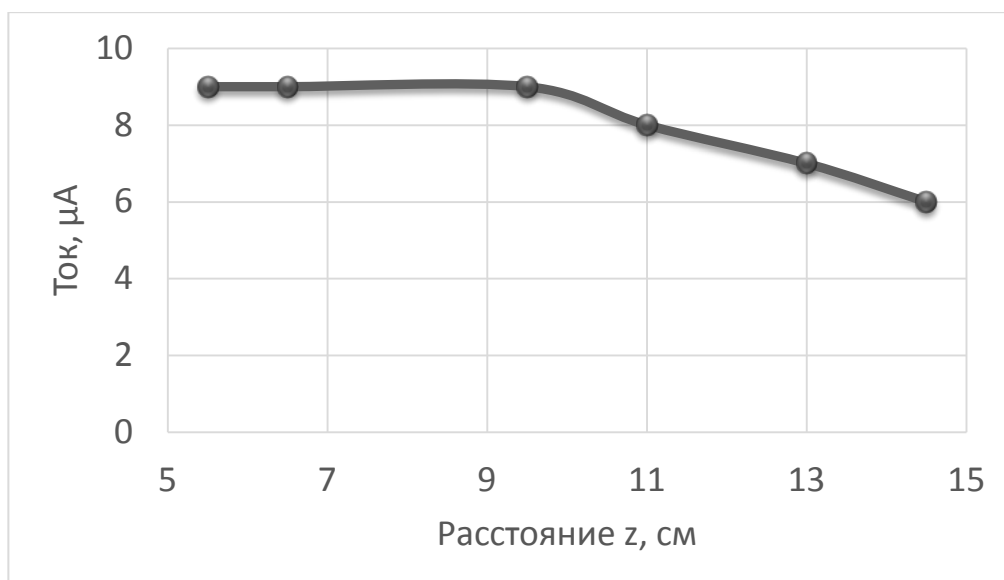


Рисунок 16 – Ток, измеряемый цилиндром Фарадея, в зависимости от расстояния до отверстия

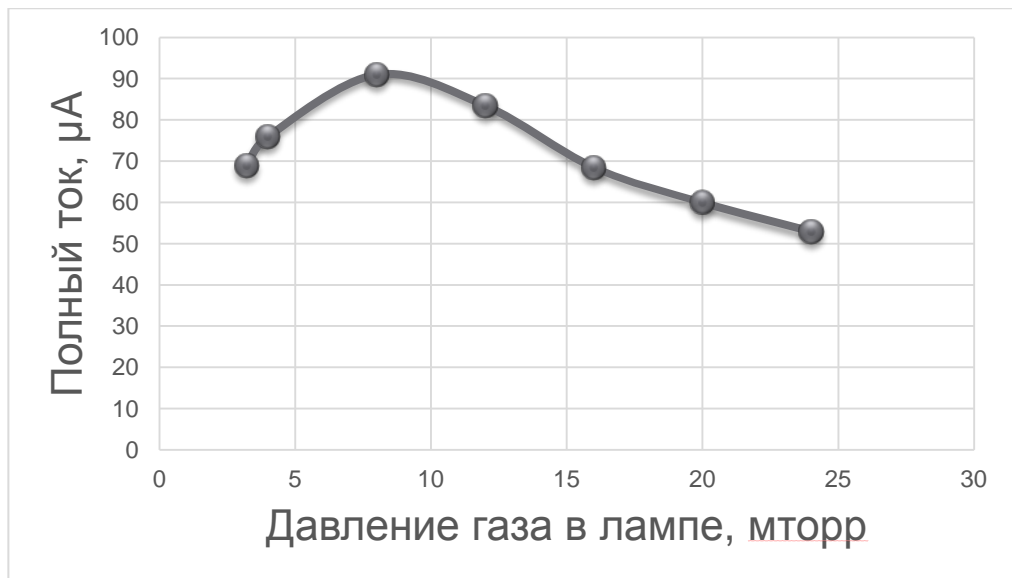


Рисунок 17 - Полный ток в зависимости от количества газа

На графике (рисунок 15) видно, что, сначала увеличение потока газа увеличивает полный ток, за счёт увеличения эффективной толщины газовой мишени внутри лампы. В дальнейшем, увеличение потока газа более эффективно нейтрализует пучок после ускорения до 3 кэВ, так как происходит увеличение толщины газовой мишени.

Заключение

В ходе работы были получены следующие результаты:

- Проведено численное моделирование транспортировки пучка в тракте установки.
- Экспериментально изучена лампа Байарда-Альперта в качестве источника ионов водорода. Проведены эксперименты в импульсном и стационарном режимах.
- Экспериментально изучена транспортировка пучка в тракте установки.
- Численно изучена работа электростатической линзы, выбрана оптимальная величина фокусирующего потенциала.

Литература

1. М.Д.Габович, Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
2. В.И. Давыденко, А.А Иванов., Г. Вайсен Экспериментальные методы диагностики плазмы. лекции для студентов физического факультета. часть 1. - Новосибирск: НГУ, 1999.
3. H. Tawara, Y. Itikawa. Cross section and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions.// J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol.19, No.3, 1990.
4. У.Ланге. Манометры для измерения сверхвысокого вакуума.// Phys. Today 26(8), 40(1972), стр.160.
5. Я.Браун. Физика и технология источников ионов. Мир, 1998.
6. С.Я.Явор Фокусировка заряженных частиц квадрупольными линзами. М. Атомиздат, 1968.
7. А.Н.Лебедев, А.В.Шальнов, Основы физики и техники ускорителей. М. Энергоатомиздат, 1991.
8. Б.З.Персов, Расчет и проектирование экспериментальных установок. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006.