

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

Физический факультет

Выпускная квалификационная бакалаврская работа

Кафедра физика плазмы

Юшкова Кристина Игоревна

Название работы:

Калибровочный протонный источник

Научный руководитель:

д-р физ.-мат. наук Давыденко Владимир Иванович

Новосибирск – 2015 год

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Принцип работы и схема калибровочного протонного источника.....	5
3. Источники плазмы.....	7
4. Источник ионов на основе ионизационной лампы Баярда-Альперта.....	9
5. Экспериментальные испытания источника плазмы.....	12
5.1. Эксперимент с торированным иридием.....	12
5.2. Эксперимент с торированным вольфрамом.....	18
5.3. Сравнительная характеристика торированного иридия и вольфрама.....	20
6. Эксперимент с двойным и плоским зондом.....	21
7. Формирование пучка водородных ионов мелкоструктурной ионно-оптической системой.....	23
7.1 Численное моделирование формирования отдельного пучка кодом PBGuns.....	24
8. Заключение.....	26
Список литературы.....	27

1. Введение

Дипломная работа посвящена разработке калибровочного протонного источника. Современный физический эксперимент осуществляется с помощью высокотехнологичного оборудования, зачастую требующего калибровки, экспериментаторам необходимо правильно начать работу с экспериментальным стендом, начинается она обычно с калибровки измерительных приборов. В результате точной калибровки определяются действительные значения измеряемых приборами величин, поправки к показаниям и оценка погрешности. Основная задача калибровочного процесса - это установить связь между первоначальными данными с приборов с соответствующими величинами.

В экспериментах по измерению радиационных потерь горячей плазмы, потоков нейтральных частиц успешно используют анализаторы нейтральных частиц, болометры нейтральных частиц и пироэлектрические болометры. Однако эти диагностические приборы проходят относительную калибровку, и поэтому желательно разработать калибровочный протонный источник и с его помощью выполнить абсолютную калибровку чувствительности приборов в зависимости от энергии частиц.

Ионный пучок с энергией от 2 кэВ до 60 кэВ и током до 10мкА будет удовлетворять требованиям калибровки вышеперечисленных приборов.

Цель данной работы состояла в разработке надежного калибровочного источника, создании и проверке первых ключевых элементов источника. Важным является надежность и работоспособность составных частей источника, подборка оптимальных параметров для калибровочного протонного источника. После проверки

составных частей источника будет разработан его окончательный вариант.

Пучки протонов хорошо изучены, относительно легко формируются, при регистрации с хорошей точностью известна энергия протонов. Такого рода калибровочные источники являются необходимыми в крупных исследованиях, они универсальны, создаются для различных анализаторов атомов перезарядки (полупроводниковые болометры и детекторы, пироболометры и т.д.) имеют основной компонент - тонкий чувствительный регистрирующий элемент, такие устройства чувствительны ко всему спектру излучения и нуждаются в точной калибровке.

В работе по калибровочному источнику представлены основные принципы работы и схемы источника, подробно рассмотрен источник плазмы (Bayard-Alpert ionization gauge) и приведены первые эксперименты по его работе, представлено моделирование формирования пучка водородных ионов мелкоструктурной сеткой с моделированием хода пучка с помощью программы PBGuns.

Данная работа опирается на несколько отраслей экспериментальной физики и техники. Большая часть дипломной работы уделяет внимание изучению и описанию источника ионов на основе манометра Баярда-Альперта, подробно манометр описан в «Манометры для измерения сверхвысокого вакуума» У.Ланге [2], различные типы источников ионов представлены в технической литературе М.Д.Габовича «Физика и техника плазменных источников ионов»[1]. Также в дипломной работе присутствует раздел о формировании ионного пучка, данная тематика хорошо описана в книге «Физика и техника источников ионов» Я.Браун[4]. Методика зондовых измерений приведена в работе «Экспериментальные методы диагностики плазмы» В.И.Давыденко, А.А.Иванов[5].

2. Принцип работы и схема калибровочного протонного источника

Источник протонов с заданной энергией и небольшим известным током предназначен для калибровки высокочувствительных приборов (анализаторы атомов перезарядки, болометры, пироболометры, полупроводниковые детекторы и т.д.).

На Рис.1 и Рис.2 представлена схема калибровочного протонного источника. Источник плазмы (Series 274 Bayard-Alpert Type Ionization Gauge Tube, Electron Bombardment Degas Nude Ionization Gauge) производит водородную плазму, затем ионно-оптическая система формирует направленный пучок, после чего он попадает в изогнутый, под 90 градусов, магнит, где происходит разделение пучка, ионы остаются в полости магнита, а все протоны, пройдя через него, ускоряются и фокусируются в новый пучок. Для регистрации пучка используется цилиндр Фарадея, где регистрируется ток от протонного пучка, позже на месте цилиндра Фарадея будут находиться диагностические приборы, которые требуют калибровки.

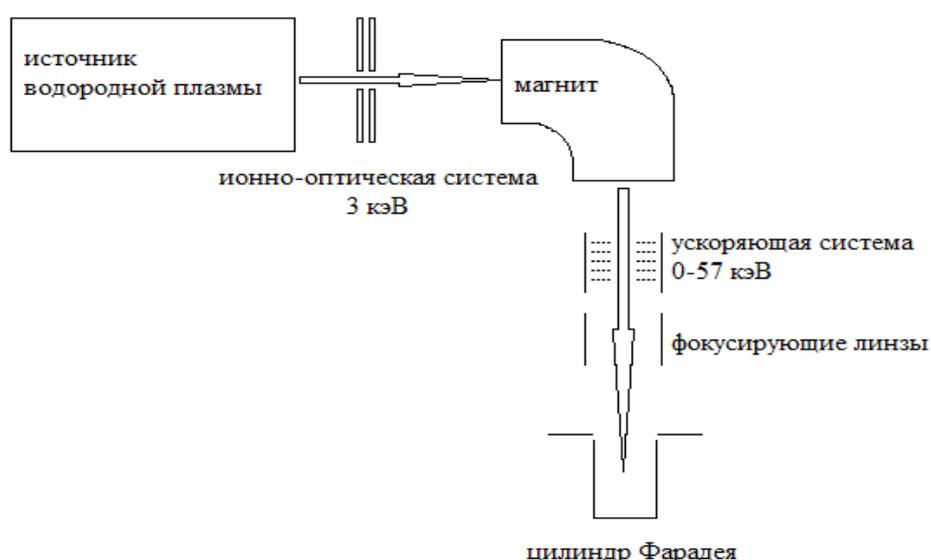


Рис.1: Схема калибровочного протонного источника

Основные параметры пучка:

- Частицы H^+ , D^+
- Энергия частиц 3-60 кэВ
- Ток пучка ≤ 10 мкА
- Угловая расходимость $< 0.5^\circ$
- Размер пучка на мишени 3 мм

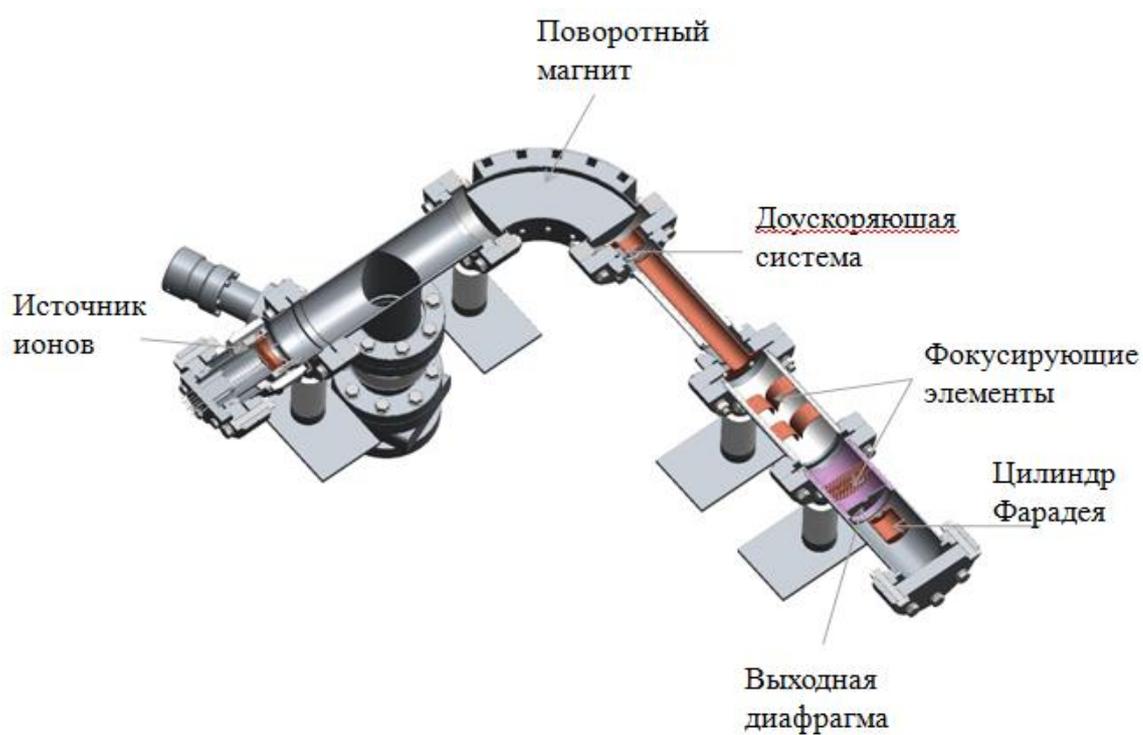


Рис.2: Общий вид калибровочного протонного источника

3. Источники плазмы

Кратко рассмотрим источники плазмы[1,8], которые можно использовать в калибровочном протонном источнике.

На Рис.3 представлен дуоплазматрон, его основные преимущества: высокая рабочая стабильность и газовая эффективность. Главный недостаток в том, что выбиваемые вещества из электродов оседают на поверхности источника, что приводит к изменению исходных параметров.

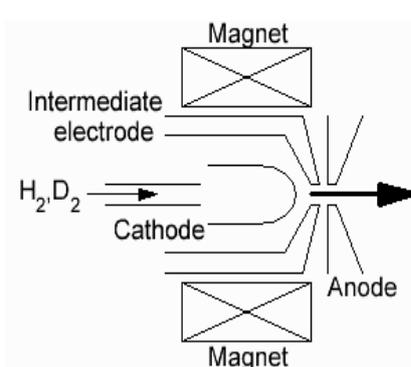


Рис.3: Схема дуоплазматрона

Далее на Рис.4 представлен пеннинговский источник, его основные преимущества: работает в области высоких энергий и газовая эффективность. Основной недостаток: неустойчивая работа источника, это связано с плазменной неустойчивостью (наличие поперечного магнитного поля приводит к расхождению ионов, которые вылетают из объема).

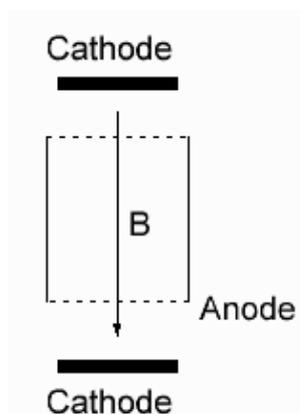


Рис.4: Схема пеннинговского источника

На Рис.5 изображен источник с накаливаемым катодом, основные преимущества: простой, долгий срок службы и высокая рабочая стабильность. Недостаток в низкой энергетической эффективности, так как время жизни электрона внутри разрядной камеры небольшое, происходит мало осцилляций.

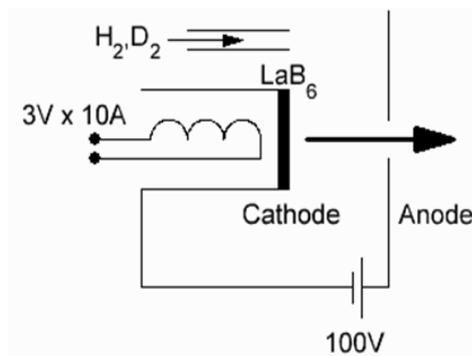


Рис.5: Схема источника с накаливаемым катодом

Выбор был сделан в пользу источника ионов на основе ионизационной лампы Баярда-Альперта, который подробно описан в следующем разделе.

4. Источник ионов на основе ионизационной лампы Баярда-Альперта

Плазменный источник – ключевой элемент в получении пучка, на основе ионизационной лампы Баярда-Альперта (Рис.6 и Рис.7). Лампа Баярда-Альперта является прибором для измерения вакуума[7], для наших целей он был преобразован в источник получения пучка частиц.

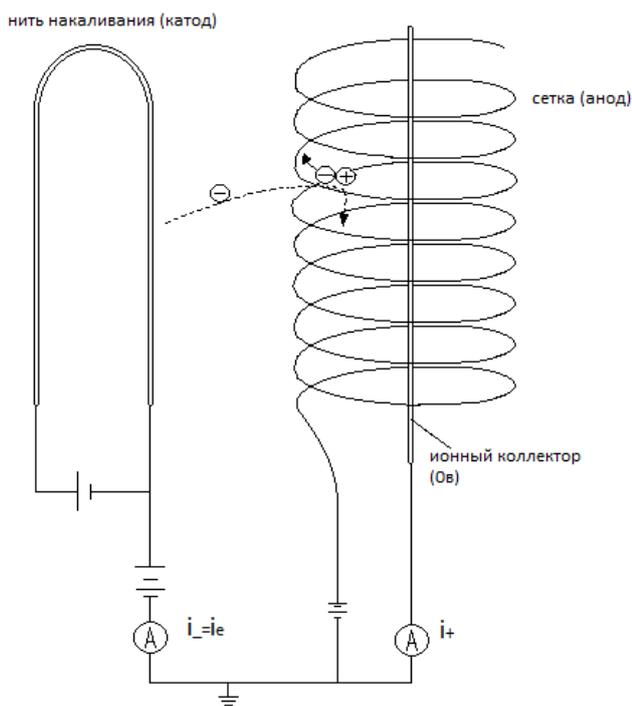


Рис.6: Схема манометра Баярда-Альперта



Рис.7: Внешний вид манометра Баярда-Альперта

Его основные преимущества это:

- Стабильный режим работы при включении на длительное время
- Надежность
- Невысокая стоимость
- Простая конструкция

Характерная длина осцилляций электронов $d \approx 2.5$ см, $\eta=0.1$ – коэффициент прозрачности сетки анода, полная длина пролета $L \sim d/\eta \approx 25$ см.

- Нить – торированный иридий
- Максимальный электронный ток 10 мА (при стационарной работе длительное время)

Для образования потока ионов, ионный коллектор удаляется или к нему не прикладывается напряжение.

Электроны от нити накаливания влетают внутрь сетки и осциллируют там до тех пор, пока не поглотятся сеткой. Рабочий газ - водород. Далее ионы извлекаются в виде пучка ускоряющей системой (две параллельные мелкоструктурные молибденовые сеточки). Прежде чем установить ионно-оптическую систему желательно измерить плотность ионного тока плоским зондом на выходе плазменного источника. Измерение потока ионов водорода ионным коллектором (в начале), плоским зондом в режиме ионного тока насыщения, измерение температуры электронов двойным ленгмюровским зондом.

На Рис.8 показана зависимость сечений ионизации водорода электронным ударом.

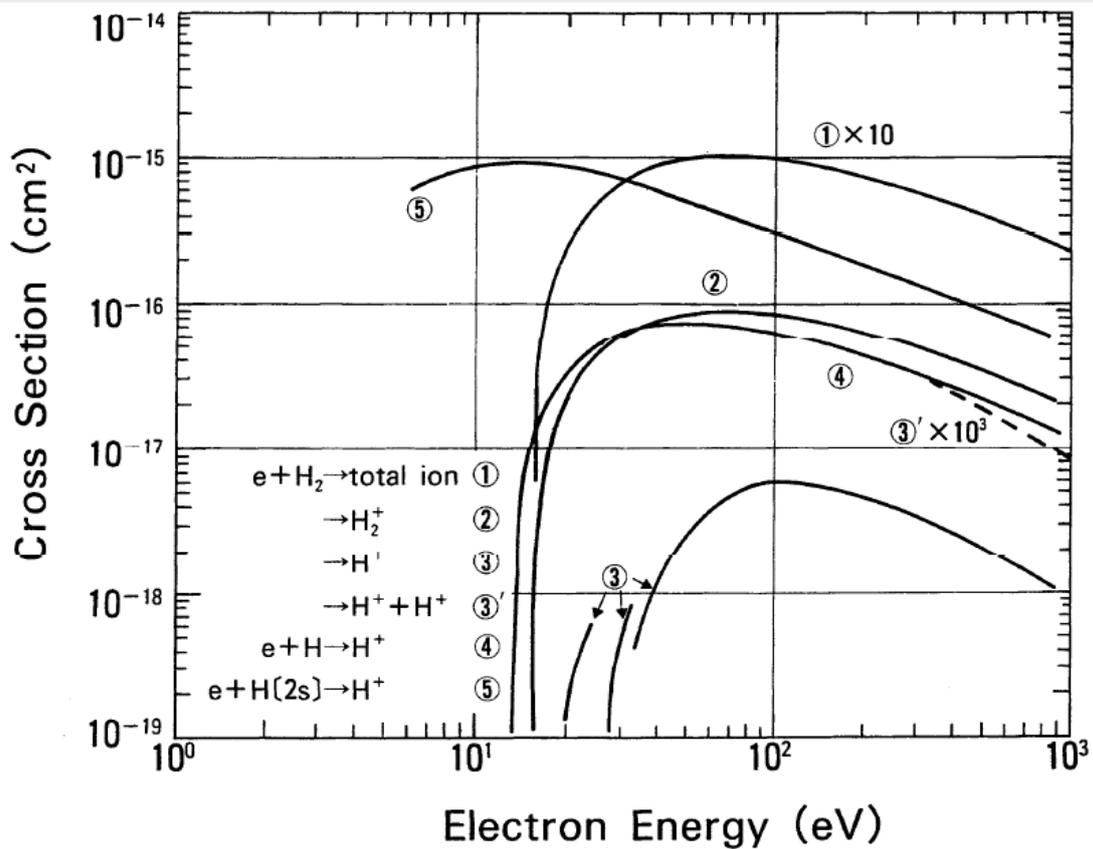


Рис.8: Зависимость сечений ионизации водорода электронным ударом, из статьи Н. Tawara, Y. Itikawa, «Cross section and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions»[3]

Для $H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e$, $\sigma_{iH_2^+} = 6.3 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$,

Для $H_2 + e \rightarrow H^+ + H^0 + 2e$, $\sigma_{iH^+} = 4.2 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$, следовательно,

$$\alpha_p \approx \frac{\sigma_{iH^+}}{\sigma_{iH_2^+}} \approx 0.06 - \text{доля протонов } 6\%$$

Характерная длина полета в одном направлении порядка диаметра сетки 2.5 см. Сечение ионизации для молекулы водорода около 10^{-16} cm^2 , длина цилиндра 5 см, $\sigma \cdot l = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^3$

Оценка тока протонов и процентного содержания протонов в пучке:

$$I_p \approx I_e (1 - e^{-n\sigma_i l}) \Omega \alpha_p$$

$(1 - e^{-n\sigma_i l})$ – вероятность ионизации электроном

С увеличением давления газа количество ионов увеличивается, на Рис.9 показано отношение образовавшихся ионов к эмитируемым электронам в зависимости от давления газа.

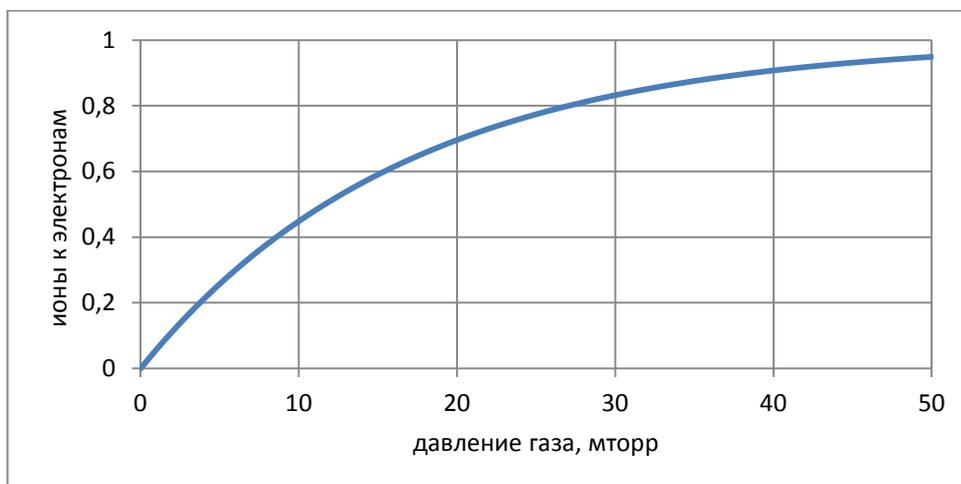


Рис.9: Зависимость количества ионов на один электрон от давления

Ионизация вторичными электронами является незначительной.

При условии, что давление газа будет 10 мторр, $(1 - e^{-n\sigma_i l}) \approx 0.45$

$\Omega = \int_0^L 0.5 \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}}\right) dl$ - общая доля частиц внутри телесного угла, высота ($L=5\text{см}$), радиус ионно-оптической системы ($r=0.5\text{см}$).

$\Omega = 0.24$ - общая доля частиц внутри телесного угла 24%.

В результате:

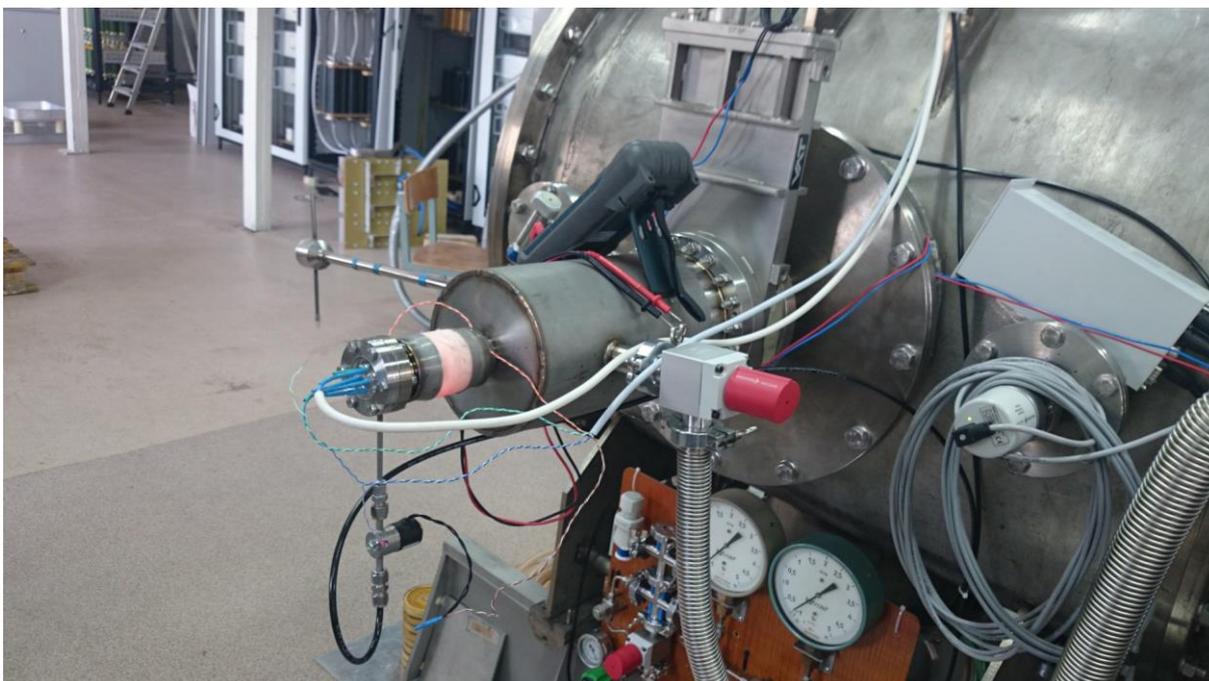
$$I_p = 10\text{mA} \cdot 0.45 \cdot 0.24 \cdot 0.066 = 71\text{мкА} \text{ - ток протонов.}$$

Полный ток водородных ионов составляет: $I_i = 1.2\text{mA}$.

5. Экспериментальные испытания источника плазмы

В настоящее время выполнены начальные эксперименты, проверены параметры источника плазмы, зафиксирован необходимый ток

- Мощность нагрева катодов составляла от 20 до 40 Вт (паспортные данные)



Внешний вид установки по исследованию параметров лампы

5.1. Эксперимент с торированным иридием

Первая серия экспериментов проводилась с катодными нитями из торированного иридия.

Вначале была определена зависимость тока на заземленный коллектор от мощности, подаваемой на две торированные нити (Рис.10, Таблица 1).

При повышении мощности произошло разрушение торированного покрытия нитей. Затем была измерена зависимость тока на заземленный коллектор от мощности накала одной нити без покрытия (Рис.11, Таблица 2).

Зависимость тока на заземленный коллектор от давления газа на клапане, при фиксированной мощности $P=28.5$ Вт (Рис.12, Таблица 3).

Далее на Рис.13, Таблица 4 показана зависимость тока на коллектор от напряжения на анодной сетке, $P=27$ Вт, давление газа на клапане 0.2 атм.

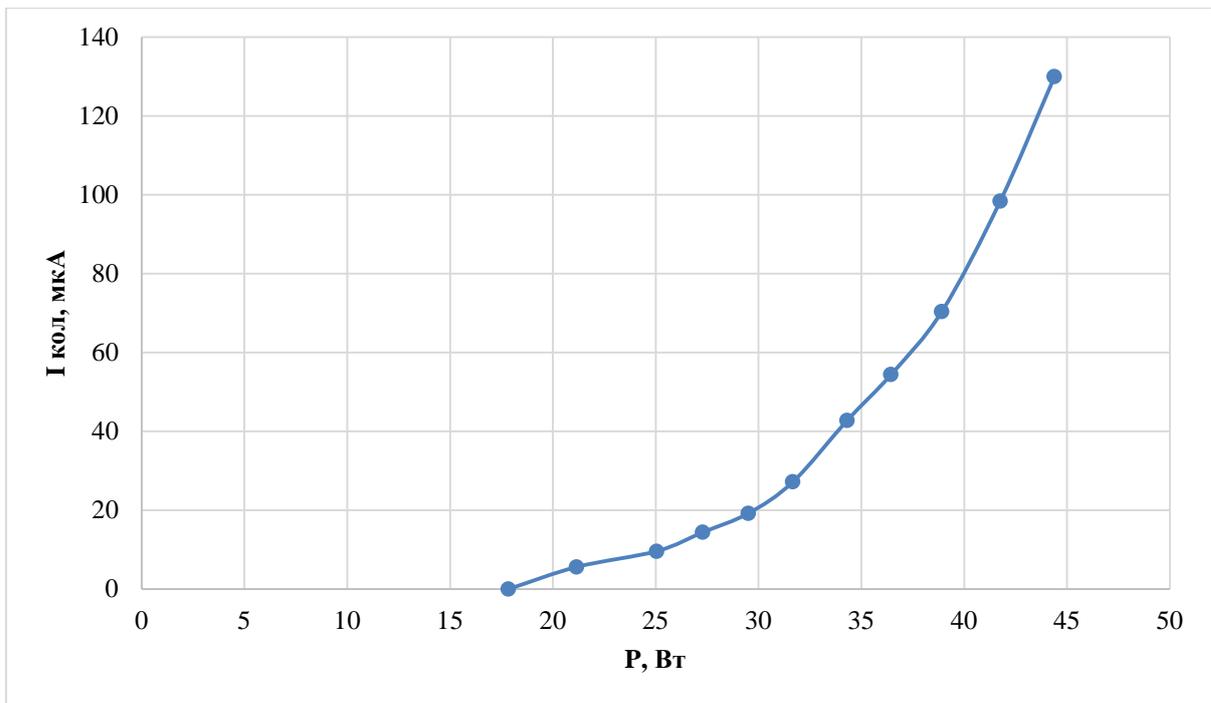


Рис.10: Зависимость тока на заземленный коллектор от мощности накала, две торированные нити.

Таблица 1

Р, Вт	I колл,мкА
21,168	5,6
25,059	9,6
27,3	14,4
29,512	19,2
31,68	27,2
34,32	42,8
36,448	54,4
38,92	70,4
41,76	98,4
44,4	130

На графике видно, что ток на заземленный коллектор, в зависимости от поданной мощности, возрастает экспоненциально.

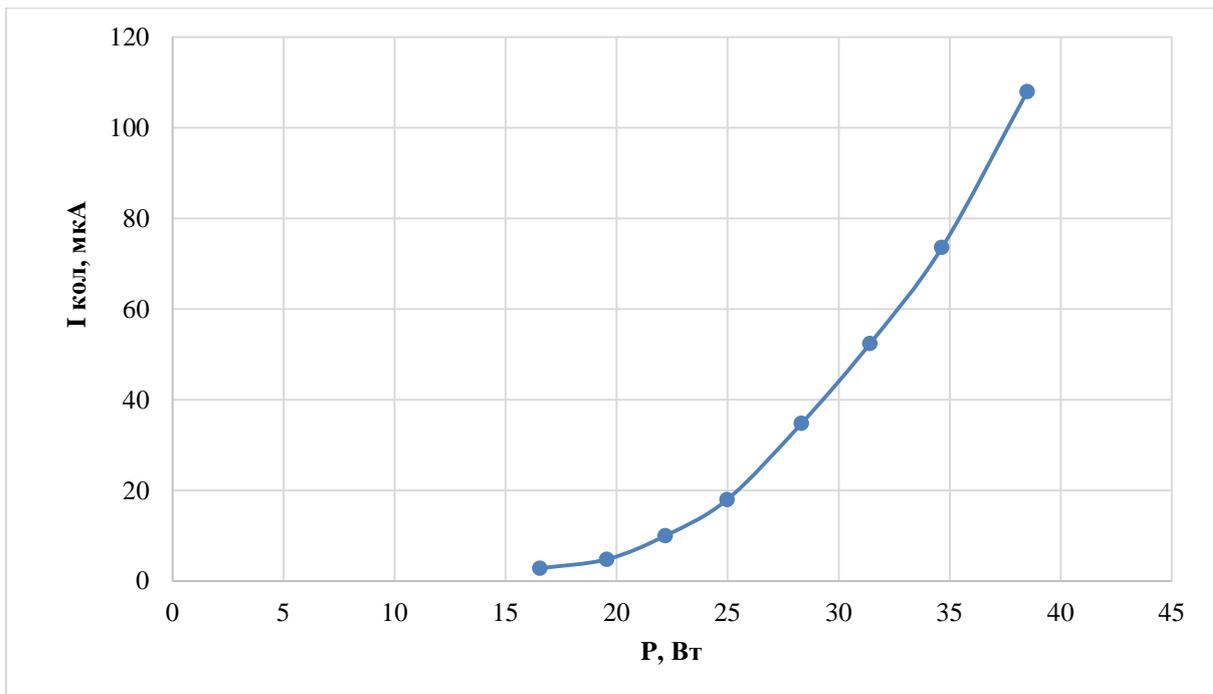


Рис. 11: Зависимость тока на заземленный коллектор от мощности накала, одна нить накала без покрытия.

Таблица 2

P, Вт	I кол,мкА
16,56	2,8
19,57	4,8
22,2	10
24,99	18
28,336	34,8
31,418	52,4
34,656	73,6
38,5	108

Также как и на предыдущем графике, наблюдается экспоненциальная зависимость тока на заземленный коллектор от поданной мощности. Использовалась нить без покрытия, следовательно, ток на коллектор немного ниже предыдущего при той же мощности.

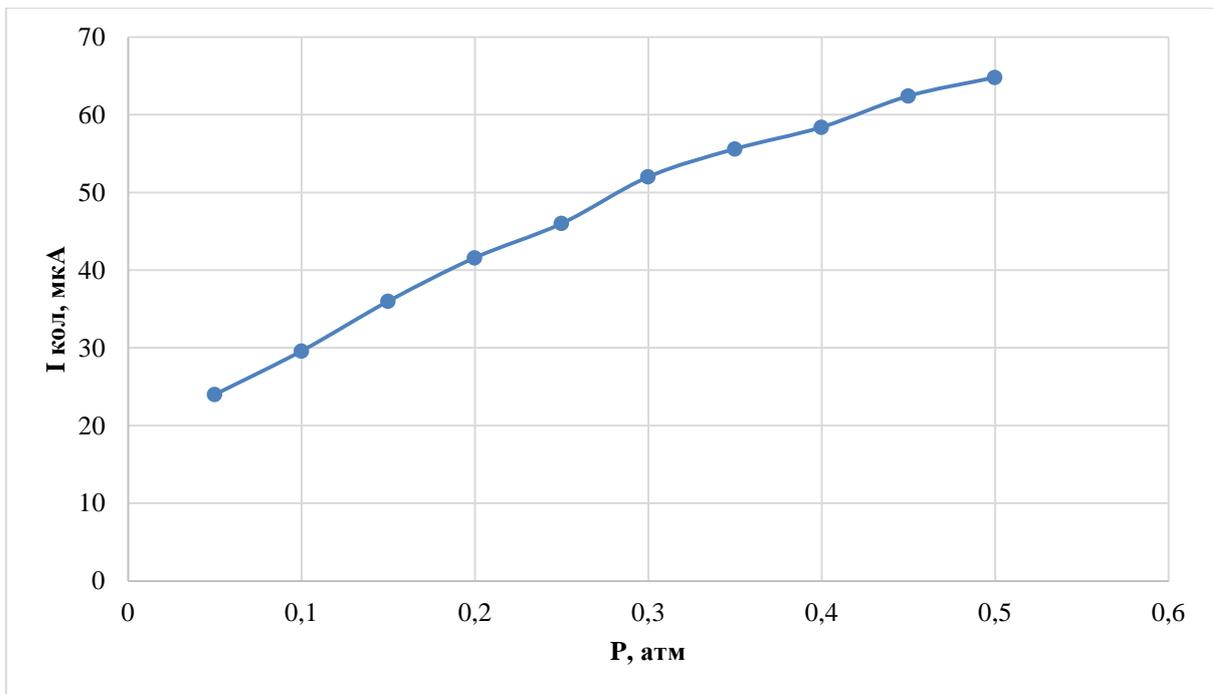


Рис. 12: Зависимость тока на заземленный коллектор от давления газа на клапане. $P = 28.5 \text{ Вт}$.

Таблица 3

P, атм	I кол,мкА
0,05	24
0,1	29,6
0,15	36
0,2	41,6
0,25	46
0,3	52
0,35	55,6
0,4	58,4
0,45	62,4
0,5	64,8

При увеличении подачи газа ток увеличивался (при фиксированной мощности), большее количество электронов могли ионизировать молекулу водорода до того, как попадут на анодную сетку, наблюдалась насыщение, свыше 0,5атм все электроны успевали произвести осцилляцию и далее не имело значение продолжать увеличивать напуск газа, значение тока на коллектор не изменялось.

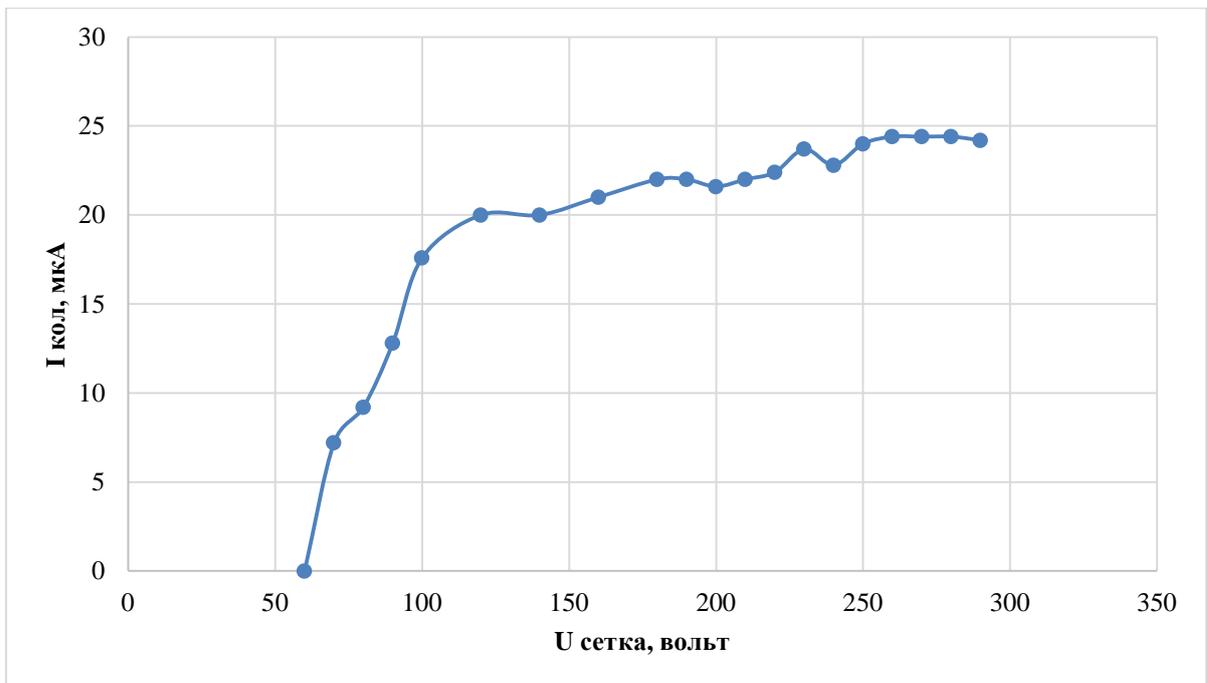


Рис.13: Зависимость тока на коллектор от напряжения на анодной сетке.

$P = 27 \text{ Вт}$, давление 0.2 атм .

Таблица 4

U сетка, вольт	I кол,мкА
70	7,2
80	9,2
90	12,8
100	17,6
120	20
140	20
160	21
180	22
200	21,6
210	22,4
230	23,7
260	24,4
290	24,2

На графике пороговая зависимость тока на коллектор от напряжения на анодной сетке. При увеличении напряжения на анодной сетке, электроны внутри получают дополнительную энергию на ионизацию. Учтем, что, увеличивая анодное напряжение, ток возрастает до некоторого максимального значения, это значит, что почти все электроны с катода достигают анода.

5.2. Эксперимент с торированным вольфрамом

После ряда экспериментов иридиевые нити вышли из строя, было решено поставить на их место торированный вольфрам. На Рис.14 и Таблице 5 показана зависимость тока эмиссии от поданной мощности, давление газа на клапане $P=0,1$ атм.

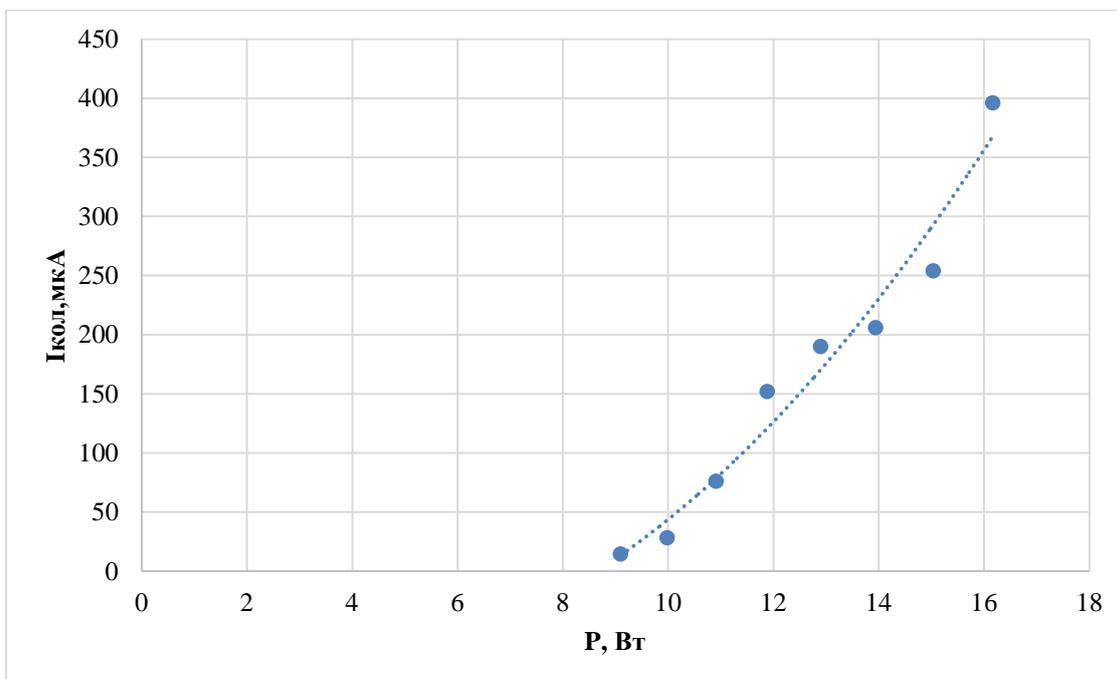


Рис.14: Зависимость тока на коллектор от напряжения, $P=0,1$ атм.

Таблица 5

Iкол, мкА	P, Вт
14,4	9,1
28,4	9,99
76	10,92
152	11,89
190	12,9
206	13,95
254	15,04
396	16,17

В начальных экспериментах с вольфрамом удалось получить ток выше, чем у иридия, зависимость экспоненциальная по формуле Ричардсона – Дешмана: $j = (1 - \langle R \rangle) AT^2 e^{-q\phi/kT}$.

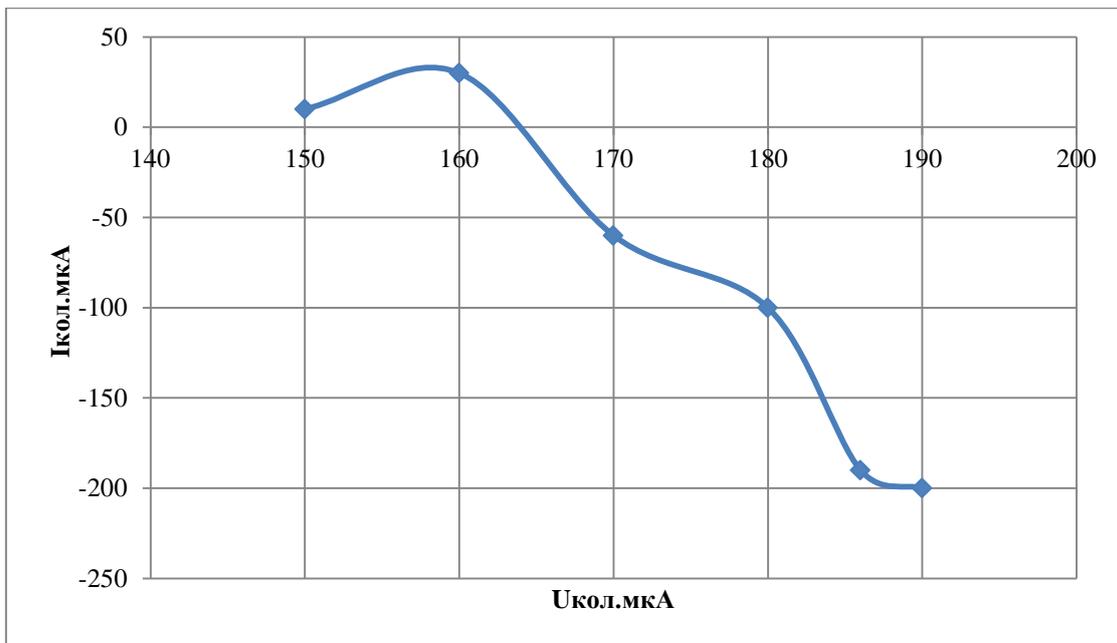


Рис.15: Зависимость тока на коллектор от поданного на него напряжения, $P=0,1 \text{ атм}, t=10 \text{ мс}$.

Таблица 6

Uкол, вольт	Iкол, мкА
150	10
160	30
170	-60
180	-100
186	-190
190	-200

Когда на коллектор подается высокое положительное напряжение, вокруг собирающей поверхности коллектора скапливается большое количество электронов, создающих отрицательный пространственный заряд, некоторая часть ионов притягивается. При положительном напряжении на коллектор свыше 170В наблюдается отрицательный ток, что свидетельствует о наличии электронов внутри сетки.

5.3. Сравнительная характеристика торированного иридия и вольфрама

Активное использование (выстрелы):

Иридий: 1000и более

Вольфрам: 100 и менее

При выборе катодных нитей в приоритете - срок службы, так как постоянная замена нитей подразумевает разбор установки, вакуумной системы, системы питания, что очень неэффективно по времени.

Работа выхода[10]:

Иридий: 2,98эВ

Вольфрам: 2,63эВ

Чем меньше работа выхода, тем больше эмиссия, но в данной работе наличие высокой эмиссии не является необходимым условием.

Допустимая рабочая температура[10]:

Иридий: до 2200К

Вольфрам: до 1900К

Лучше использовать нити из торированного иридия в качестве катодов, но такие нити дороже и не всегда под рукой, поэтому временно можно использовать катоды из вольфрама, которые намного проще изготовить. В эксперименте с торированным вольфрамом наблюдалось разрушение слоя тория под воздействием «паразитных» ионов и при большой подаче газа остывает сильнее, чем иридий. После каждого выстрела нитям из вольфрама требовалось время, чтоб восстановиться (процесс диссоциации происходит быстрее под воздействием высоких температур, что сильно снижает срок службы).

6. Эксперимент с двойным и плоским зондом

Для определения температуры электронов внутри ионизационной лампы выбран и подготовлен двойной ленгмюровский зонд, на Рис.16 схема экспериментального стенда, на Рис.17 схема подключения зонда.

Для определения параметров плазмы в торце лампы, откуда она вытягивается, ставится плоский зонд (Рис.16).

Работа с двойным зондом:

Один из способов определить температуру электронов, подать на двойной зонд напряжение, к примеру, от 1в до 50в, составить вольтамперную характеристику, и на графике, в точке $U=0$:

$$T_e = \frac{e \cdot j \cdot S_{\text{зонда}}}{2 \frac{dJ_{\text{зонда}}}{dU}(0)}$$

$$I = j \cdot S_{\text{зонда}} - \text{полный ток}$$

$$S_{\text{зонда}} = l \cdot 2\pi r \approx 4\text{мм} \cdot 6.28 \cdot 0.19\text{мм} \approx 0.48\text{см}^2.$$

Также будет подготовлен один плоский зонд.

Работа с одиночным зондом:

На плоский зонд подаются различные напряжения, составляется вольтамперная характеристика, по которой, известны значения в собирающем слое зонда:

- Потенциал пространства
- Плавающий потенциал

$U_{\text{пл}}[\text{В}] \approx -3.3kT_e[\text{эВ}]/e$ – плавающий потенциал для водородной плазмы, можно выразить температуру электронов

- Ток ионного насыщения

$$j \approx 0.6 \cdot e \cdot n_0 \sqrt{\frac{T_e}{M_i}} - \text{оценка величины ионного тока на зонд}$$

$$n_0 = 10^8 \text{см}^{-3} - \text{концентрация ионов}$$

Из формулы выражается температура оставшихся в лампе электронов, на выходе из нее.

- Ток электронов (важный параметр при работе с ионно-оптической системой, зная его, можно оценить, насколько сильно будет проваливаться потенциал в лампу)

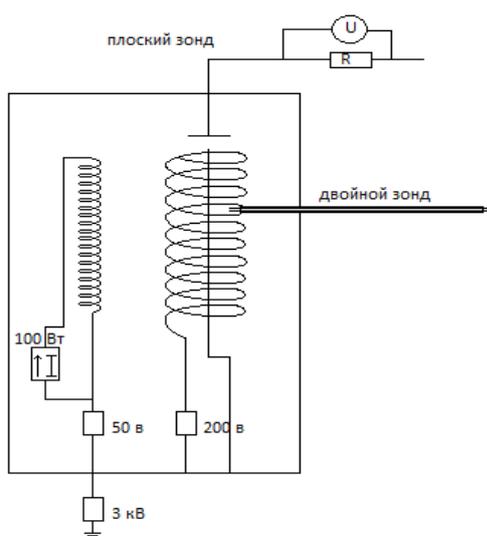


Рис.16: Электрическая схема экспериментального стенда по изучению источника протонов на основе ионизационной лампы Баярда-Альперта

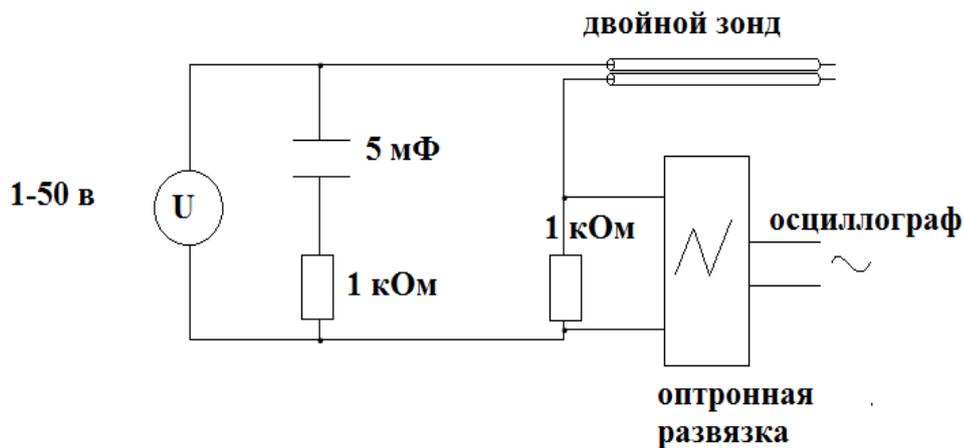


Рис.17: Схема подключения двойного зонда

7. Формирование пучка водородных ионов мелкоструктурной ионно-оптической системой

Ионно-оптическая система представляет собой диод из мелкоструктурной молибденовой сетки (Рис.18 и Рис.19), шаг сетки $d=0.23\text{мм}$, расстояние между электродами $S=1\text{см}$, ускоряющее напряжение 3кВ . маленький шаг сетки выберем для уменьшения aberrаций, угловая расходимость при начальной температуре ионов 2эВ составляет:

$$\delta\alpha_T \approx \sqrt{\frac{T_i}{eU}} \approx 27\text{мрад}$$

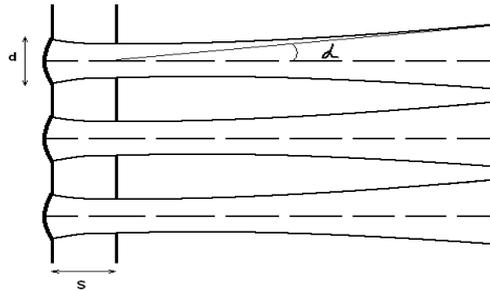


Рис.18: часть ионно-оптической системы



Рис.19: Мелкоструктурная молибденовая сеточка

7.1. Численное моделирование формирования отдельного пучка кодом PBGuns

Было проведено моделирование кодом PBGuns[9] для зазоров между сетками в 8мм (Рис.20) и в 10мм (Рис.21).

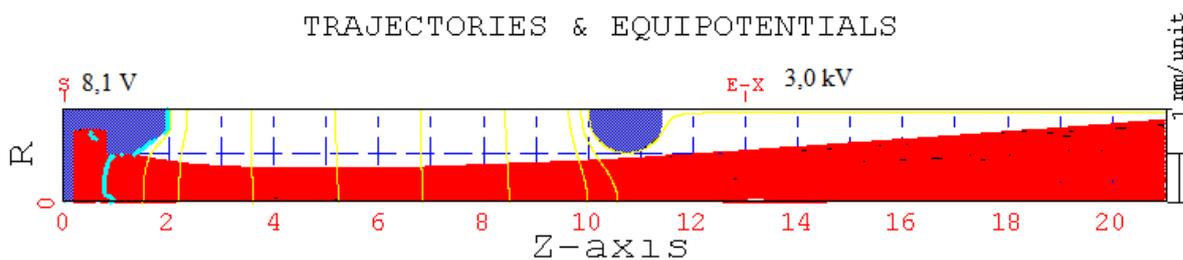
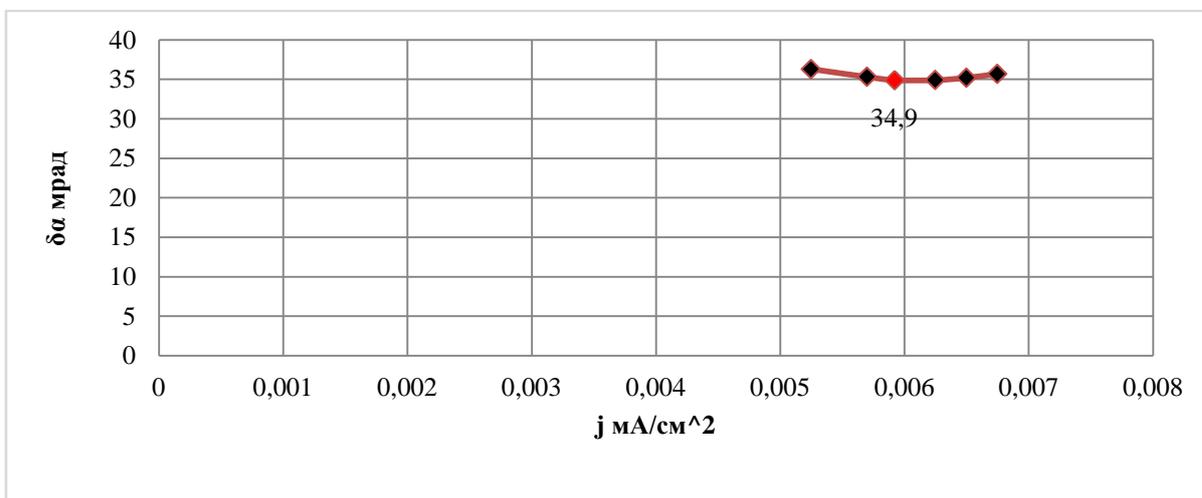
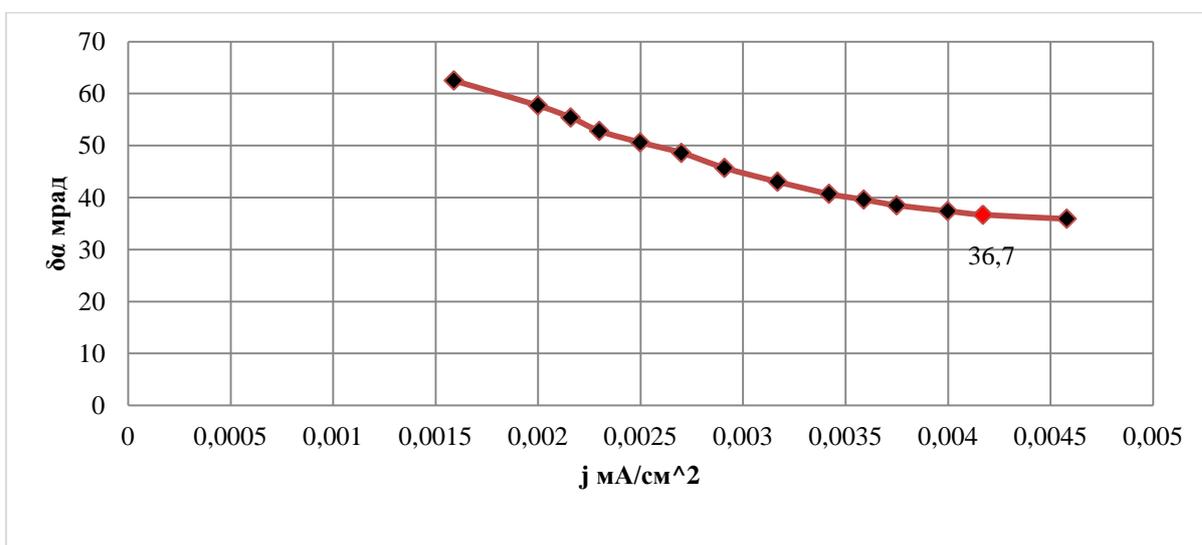


Рис.20: Зазор 8мм, зависимость угла расходимости пучка от плотности тока, красная точка на графике соответствует изображению ниже, выбранной траектории расходимости.



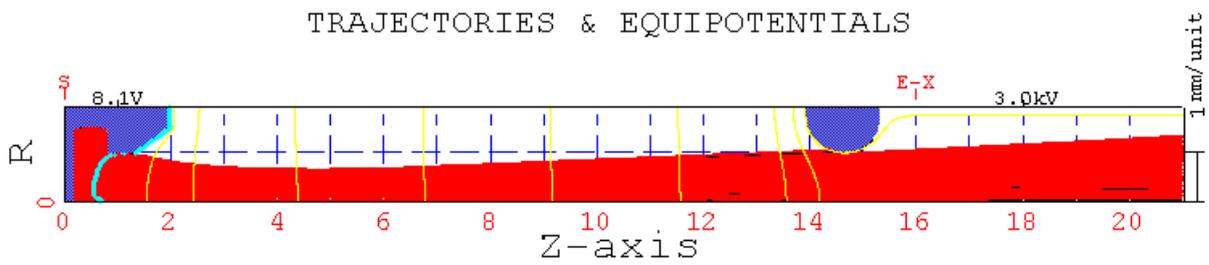


Рис.21: Зазор 10мм, зависимость угла расходимости пучка от плотности тока, выбрана не наименьшая расходимость, а та, где пучок не попадает на второй электрод и не вызывает встречный поток электронов на пучок.

Полученные значения угловой расходимости несколько выше тепловой. Это, видимо, связано с тем, что расчет проводился с достаточно большими эмиссионными отверстиями.

8. Заключение

В заключении кратко представлю результаты по проделанной работе: подготовлен экспериментальный стенд для изучения источника ионов с возможностью установки на него ионно-оптической системы; сняты первые экспериментальные зависимости источника водородных ионов, описывающие его рабочие возможности при различных условиях; сконструирован двойной ленгмюровский зонд; для испытаний с формированием пучка ионно-оптической системой произведено численное моделирование; приведены оценки основных параметров калибровочного источника.

В дальнейшем запланировано включение одиночного и двойного зонда, выполнить установку на стенд ионно-оптической системы и сформировать с ее помощью направленный пучок ионов, собрать оставшиеся элементы и завершить разработку калибровочного протонного источника.

Список литературы

1. М.Д.Габович. Физика и техника плазменных источников ионов. Атомиздат, 1972.
2. У.Ланге. Манометры для измерения сверхвысокого вакуума. Phys. Today 26(8), 40(1972), стр.158.
3. Н. Tawara, Y. Itikawa. Cross section and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions.
4. Я.Браун. Физика и технология источников ионов. Мир, 1998.
5. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Лекции для студентов физического факультета. Часть 1. - Новосибирск: НГУ, 1999.
6. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. Атомиздат, 1969.
7. R.T.Bayard, D.Alpert, Rev. Sci. Instr.21, 571.
8. Гасанов И.С. Плазменная и пучковая технология. Баку: Элм, 2007.
9. J.E.Boers, Proceeding of the IEEE Particle Accelerator Conference (American Physical Society, New York, 1995), p 2312.
10. Выдержка из книги Линч П.Н. «Задачи по физической электронике (с решениями и комментариями)». Термоэлектронная эмиссия, стр.47.