

Измерение распределения плотности ионного тока в высокочастотном плазменном эмиттере

Гаврисенко Даниил Юрьевич

Физический факультет. Практикум электричества и магнетизма. Курсовая работа.

Группа № 18301, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Игорь Владимирович Шиховцев**

Аннотация

Данная работа посвящена измерению радиального и азимутального распределения плотности ионного тока в высокочастотном плазменном эмиттере атомарного инжектора, а также изучению его устройств и принципа работы. Измерения были проведены с помощью сеточного зонда, прикрепленного к штоку шагового двигателя, который передвигал зонд вдоль диаметра плазменного эмиттера. Измерения проводились при повороте магнитопровода с магнитами, установленного на задней стенке плазменной камеры. Были измерены плотность ионного тока при разных углах поворота магнитопровода и разных значениях координаты зонда.

Эта работа может быть полезна в областях физики плазмы и электродинамике.

Ключевые слова: плазма, атомарный инжектор, высокочастотный эмиттер, распределение ионного тока.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Гаврисенко Даниил Юрьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение распределения плотности ионного тока в высокочастотном
плазменном эмиттере**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18301

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Шиховцев И.В.

Оценка научного руководителя

«_____»_____20__г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Судников А.В.

Оценка преподавателя практикума

«_____»_____20__г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____»_____20__г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Данная работа посвящена измерению радиального и азимутального распределения плотности ионного тока в высокочастотном плазменном эмиттере атомарного инжектора, а также изучению его устройств и принципа работы. Измерения были проведены с помощью сеточного зонда, прикрепленного к штоку шагового двигателя, который передвигал зонд вдоль диаметра плазменного эмиттера. Измерения проводились при повороте магнитопровода с магнитами, установленного на задней стенке плазменной камеры. Были измерены плотность ионного тока при разных углах поворота магнитопровода и разных значениях координаты зонда.

Эта работа может быть полезна в областях физики плазмы и электродинамике.

Работа выполнена в Лаборатории 9-0 Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Содержание

Аннотация.....	2
Содержание	3
Введение	4
1. Описание и принцип работы установки.....	5
1.1. Атомарный инжектор.....	5
1.2. Высокочастотный плазменный эмиттер.....	7
1.3. Сеточный детектор частиц.....	9
2. Эксперимент	10
2.1. Методика измерений.....	10
2.2. Вычисление ионного тока.....	11
3. Результаты.....	12
3.1. Обсуждение результатов	14
3.2. Погрешности	14
Вывод.....	14
Приложение	15
Библиографический список.....	15

Введение

Данная работа заинтересовала меня тем, что она затрагивает одну из возможностей получения большого количества энергии, а именно за счет термоядерного синтеза путем нагревания плазмы с помощью атомарного инжектора. В ИЯФ СО РАН разработана серия инжекторов для нагрева плазмы в крупных термоядерных установках [1, 2, 3, 4]. Источником плазмы в инжекторе может являться высокочастотный плазменный эмиттер [4], поэтому для формирования ионного пучка распределение плотности плазмы в камере играет большую роль. Полученное распределение можно использовать для моделирования и изготовления ионно-оптической системы. Работа выполнялась на экспериментальном стенде атомарных инжекторов.

Основной целью данной работы является: измерение радиального и азимутального распределения плотности ионного тока в высокочастотном плазменном эмиттере атомарного инжектора, а также изучение его устройства и принципа работы.

1. Описание и принцип работы установки

1.1. Атомарный инжектор

Атомарный инжектор состоит из ионного источника и вакуумного объема, в котором находятся нейтрализатор, отклоняющий магнит, диафрагма, приемник ионов, калориметр и криогенные насосы. Схема изображена на рис.1.

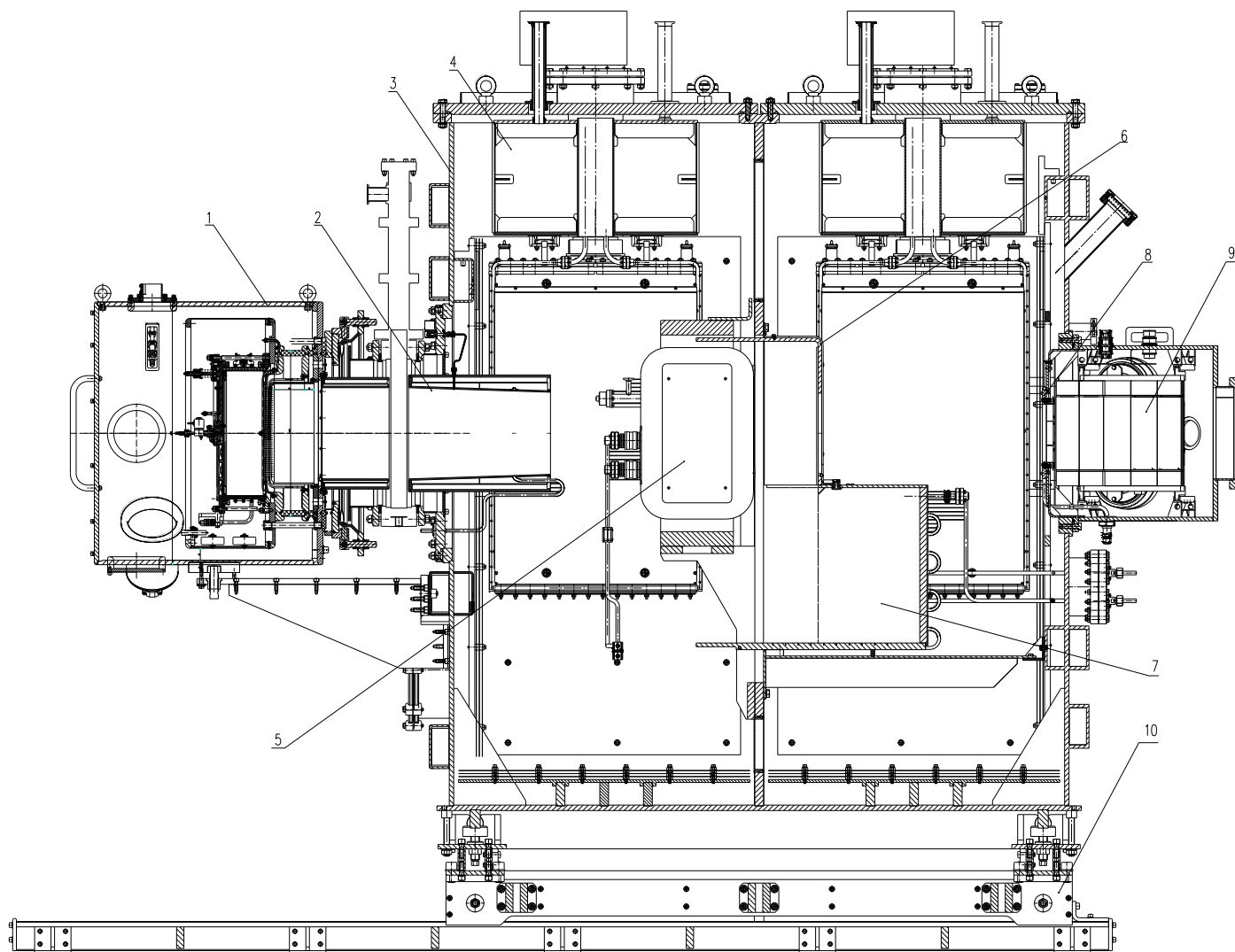


Рис.1. Общая схема инжектора: 1 - ионный источник, 2 - нейтрализатор, 3 - вакуумный объем, 4 - крионасос, 5 - отклоняющий магнит, 6 - диафрагма, 7 - приемник ионов, 8 - прицельное устройство, 9 - калориметр, 10 - подставка.

Основной задачей атомарного инжектора является получение атомарного пучка.

Принцип работы заключается в следующем: в ионном источнике создается плазма, из которой положительно заряженные ионы вытягиваются и ускоряются при помощи ионно-оптической системы. Она представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких бронзовых электродов, имеющих определенной формы отверстия, система изображена на рис.2. Ионно-оптическая система может состоять из 3 или 4 электродов. В 3-х электродной системе первый (плазменный) электрод находится под высоким положительным потенциалом, соответствующим энергии пучка. Второй – под небольшим отрицательным потенциалом для запираия вторичных электродов из нейтрализатора. Третий – заземленный. В 4-х электродной системе есть еще промежуточный электрод под высоким потенциалом – вытягивающий.

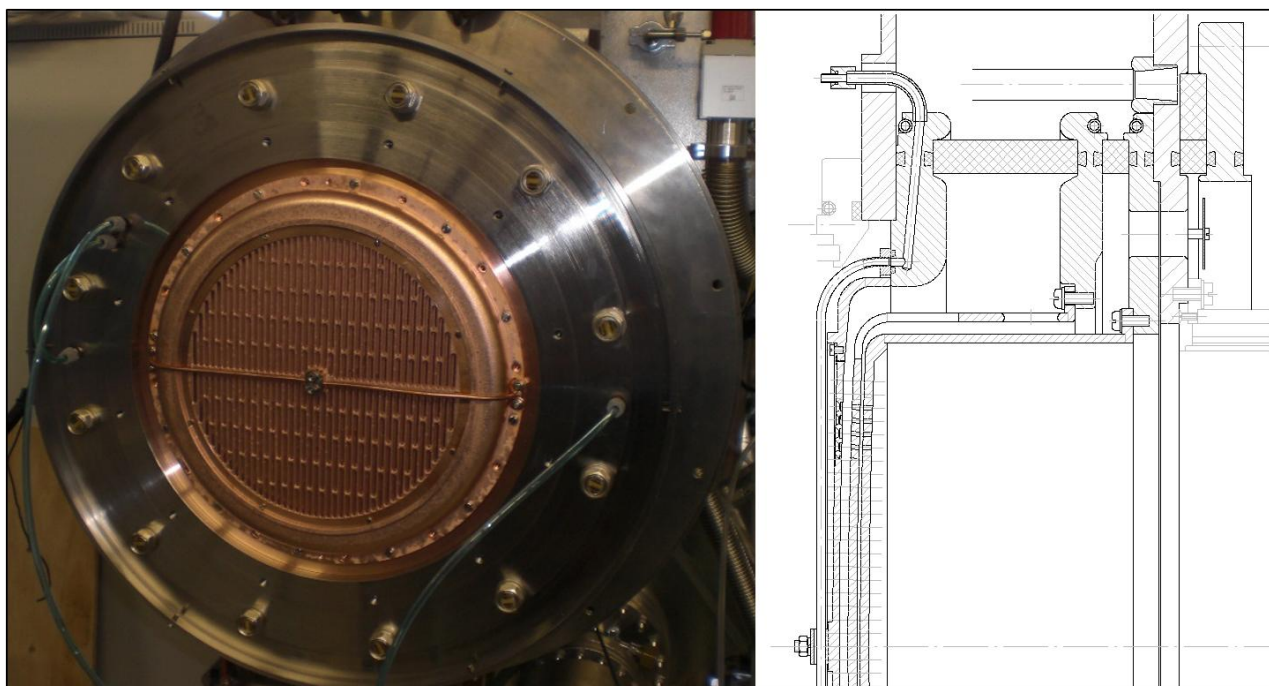


Рис.2. Общий вид ионно-оптической системы.

После ионно-оптической системы пучок попадает в нейтрализатор. Он представляет из себя трубу, в которой создается газовая мишень из того же газа, что подается в ионный источник. Часть газа поступает в нейтрализатор из ионного источника, а часть подается непосредственно с помощью электромагнитного клапана.

Затем нейтрализованные частицы продолжают двигаться по пучковому тракту. Оставшиеся ионы при помощи отклоняющего магнита отводятся от нейтрального пучка в приемник ионов, сделанный из двух медных пластин, соединенных в форме буквы V. На выходе инжектора получается атомарный пучок, профиль которого можно измерить с помощью калориметра, установленного на выходе инжектора. Это приемник, предназначенный для приема пучка в тестовом режиме.

1.2. Высокочастотный плазменный эмиттер

Ионный источник состоит из высокочастотного плазменного эмиттера и ионно-оптической системы (ИОС). Плазменный эмиттер предназначен для создания плазмы, из которой вытягивается ионный пучок. ИОС вытягивает и ускоряет пучок. Также ионный источник имеет внутренний электростатический экран, внешний магнитный экран. Схема ионного источника изображена на рис.3.

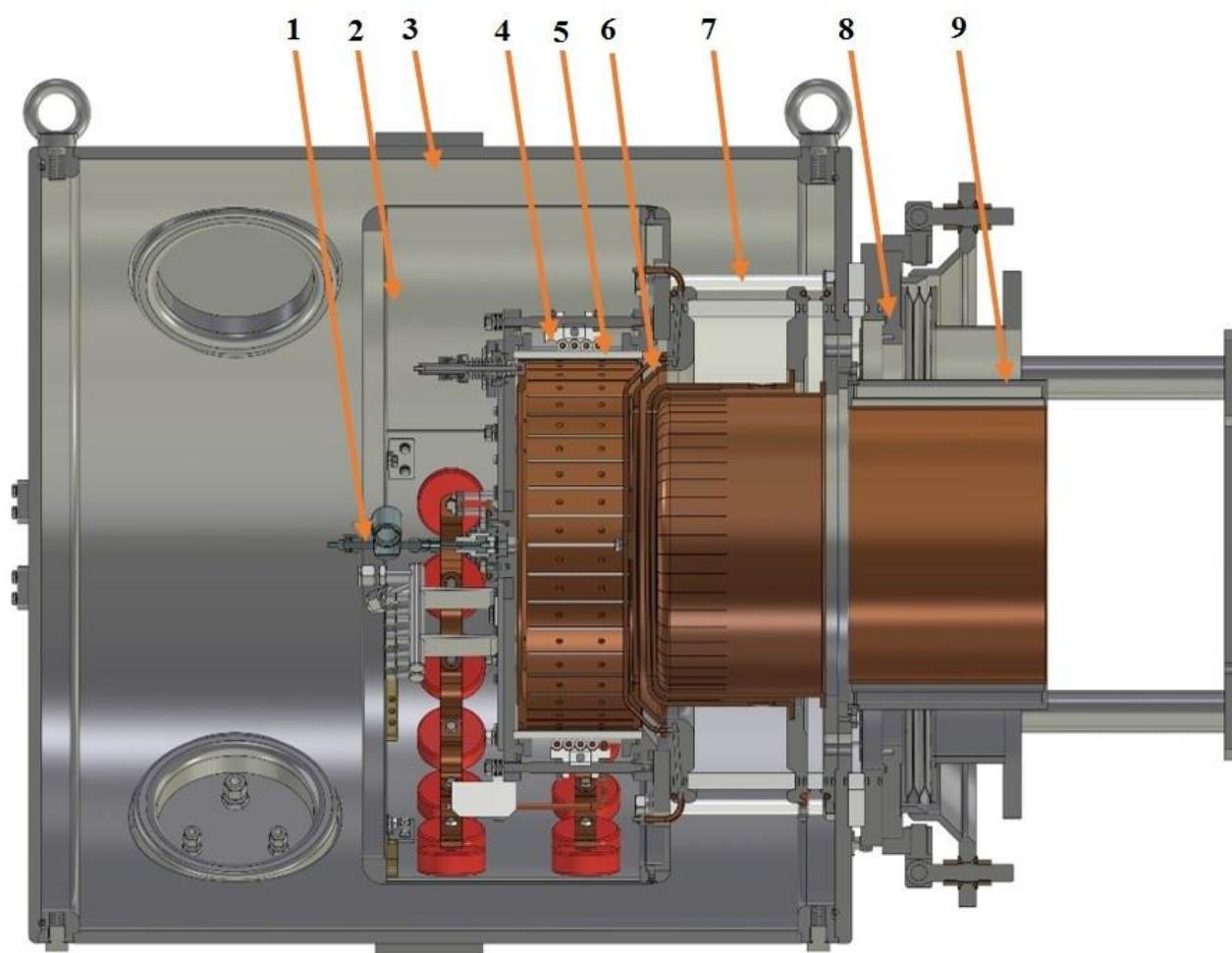


Рис.3. Ионный источник: 1 – газовый клапан, 2 - внутренний электростатический экран, 3 - внешний магнитный экран, 4 – ВЧ антенна, 5 - ВЧ плазменная камера, 6 – сетки ионно-оптической системы, 7 – изоляторный узел, 8 – юстировочное устройство, 9 – патрубков нейтрализатора.

Основной частью эмиттера является плазменная камера, которая состоит из цилиндрической керамической трубы с задним фланцем и Фарадеевским экраном. Экран установлен вдоль внутренней цилиндрической поверхности для

защиты керамики от тепловой нагрузки плазмы, распыления и металлизации. В камеру подается газ водород через электромагнитный импульсный клапан, расположенный в узле поджига на задней стенке плазменной камеры. Внутри поджига находится керамическая трубка со вставленным внутри катодом – электродом. Анод находится на краю трубки вблизи внутреннего объема. Газ подается в зазор между электродом поджига и керамической трубкой. Разряд инициируется подачей импульса высокого напряжения в несколько микросекунд между корпусом клапана, соединенным с электродом поджига и корпусом поджига. Генерируемая вдоль внутренней поверхности керамической трубки короткая искра попадает в плазменную камеру. ВЧ разряд зажигается и поддержания приложенным ВЧ напряжением на антенну, которое создает в антенне ток. Ток создает вихревое магнитное поле, индуцирующие азимутальное электрическое поле. ВЧ-антенна с тремя витками намотана снаружи на керамику плазменной камеры.

На задней стенке плазменной камеры установлен набор постоянных магнитов NdFeB, которые уменьшают взаимодействие плазмы с задней стенкой плазменной камеры и повышают эффективности разряда. Схема расположения магнитов представлена на рис.4.

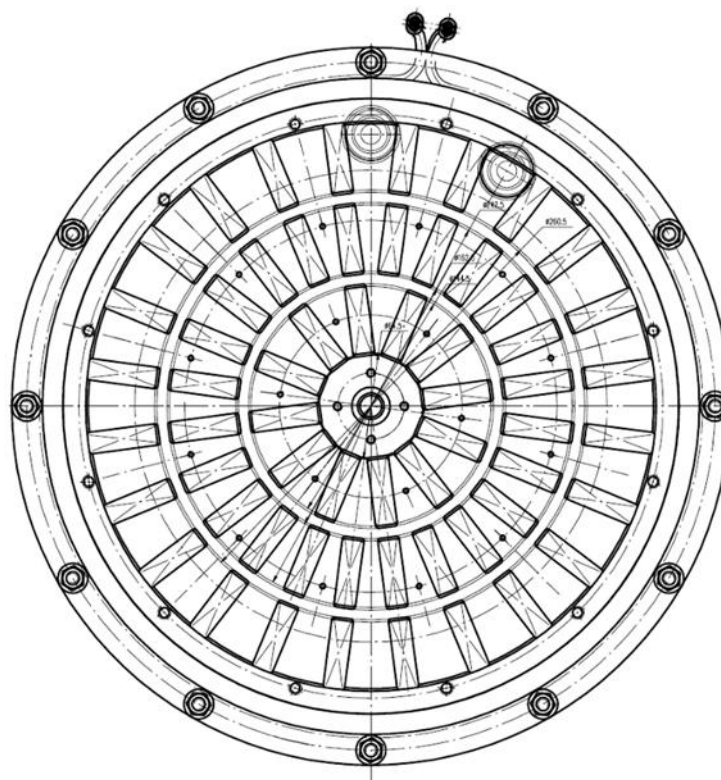


Рис.4. Схема расположения магнитов на задней крышке камеры.

Для лучшего проникания магнитного поля в объем камеры магниты, стоящие радиально по двое, были убраны.

1.3. Сеточный детектор частиц

Для измерения распределения плотности потока ионов используется сеточный детектор, который прикреплен к штоку шагового двигателя и находится на выходе плазменного эмиттера.

Данный детектор имеет два электрода сеточного типа и коллектор, принимающий ионы. Коллектор, находится под напряжением -2.7 кВ. Тем самым он извлекает ионы из газоразрядной камеры. Установленная перед коллектором сетка, на которую подается напряжение -3 кВ, является запирающей – она не позволяет покинуть коллектор электронам, образовавшимся в нем в результате вторичной эмиссии при падении на него частиц. Схема изображена на рис.5.

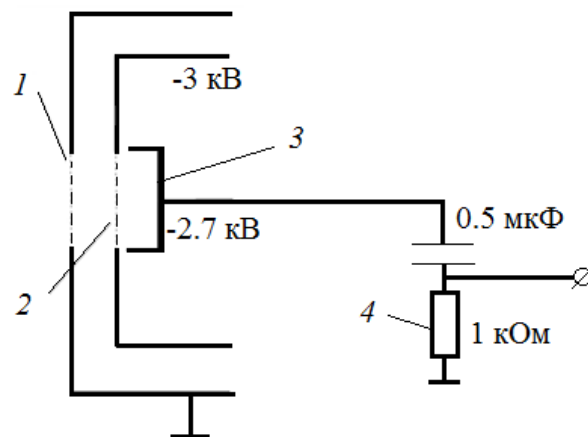


Рис.5. Схема сеточного детектора заряженных частиц: 1 - входное отверстие, 2-запирающий электрод, 3 - коллектор, 4 - шунтовое сопротивление.

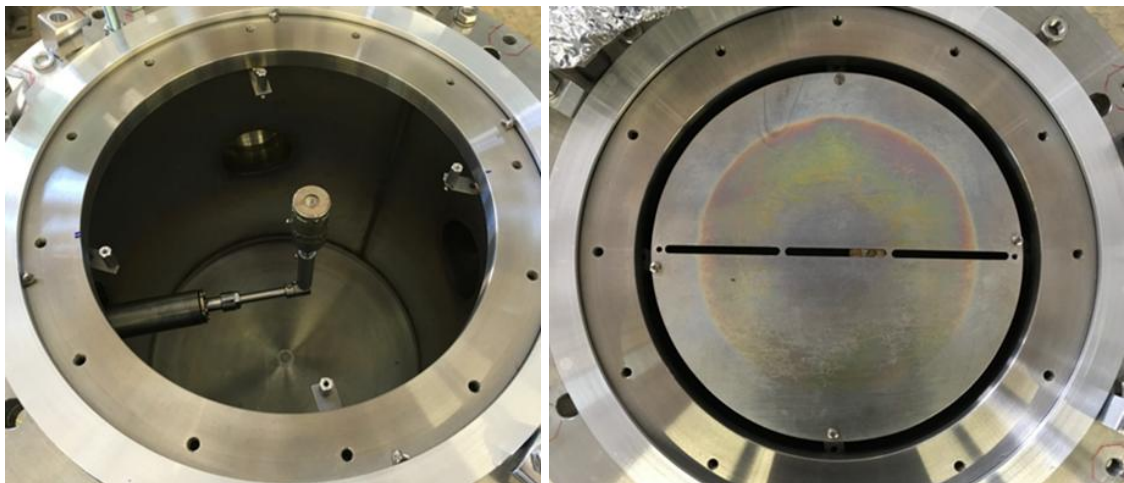


Рис.6. Общий вид детектора, прикрепленного к штоку шагового двигателя, и пластины, имитирующей ИОС.

2. Эксперимент

2.1. Методика измерений

Управление атомарным инжектором осуществляется с помощью системы управления. Изображение представлено на рис.7

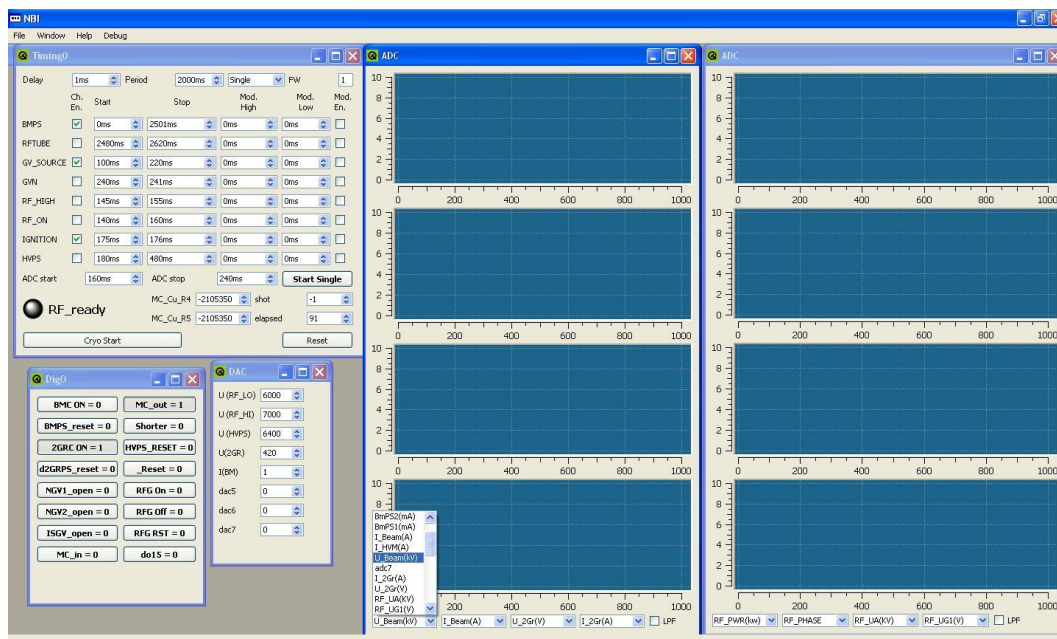


Рис.7. Вид программного обеспечения для управления атомарным инжектором.

С помощью данной программы устанавливается длительность импульсов, амплитуда ВЧ напряжения, подаваемого на антенну, и время подачи газа в камеру, а также выводятся различные измерения. Давление устанавливается на специальном стенде, представленном на рис.8. Вид всей установки представлен в приложении.

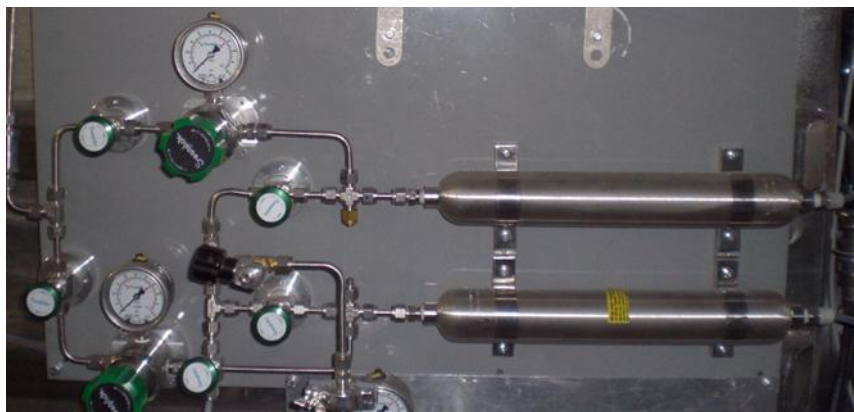


Рис.8. Система подачи газа.

Как было показано выше, на рис.6, для имитации ИОС используется металлическая пластина, имеющая по диаметру щель с двумя перемычками. За пластиной располагается детектор. Сигнал с детектора, напряжение на шунтовом сопротивлении, измеряется с помощью осциллографа. Вид сигнала изображен на рис.9.

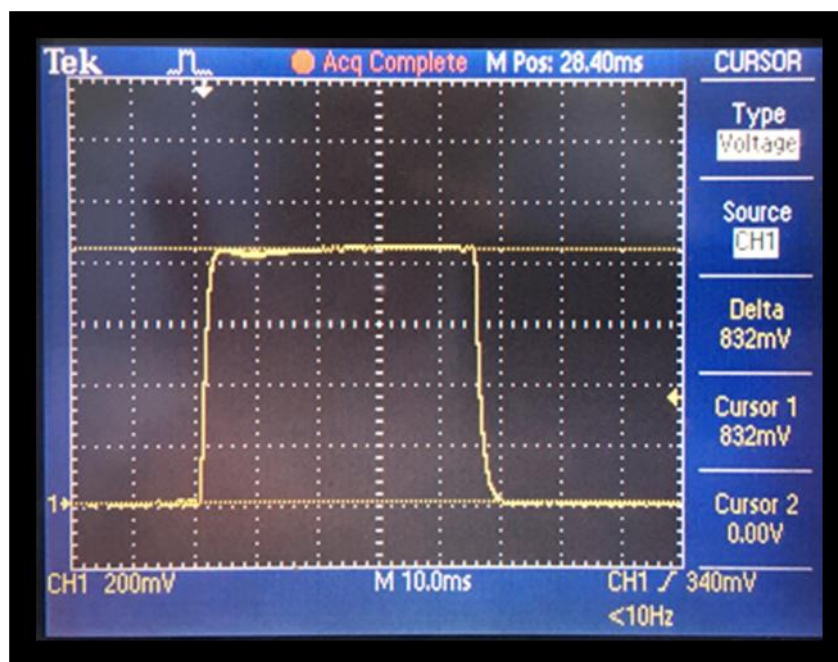


Рис.9. Вид осциллограммы при измерении напряжения на шунтовом сопротивлении.

2.2. Вычисление ионного тока

Ток с коллектора протекает через шунтовое сопротивление, развязанное по потенциалу от коллектора с помощью конденсатора. Плотность ионного тока перед зондом высчитывалась следующим образом:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \cdot S} \quad (1)$$

где I и U – ток и напряжение на шунте сопротивлением $R = 1$ кОм, $S \approx 1.3$ мм² - эффективная площадь отверстия датчика с учетом прозрачности.

3. Результаты

Производилось измерение при одном положении зонда. Затем положение зонда изменялось радиально. После чего поворачивался магнитопровод и измерения повторялись. Измерения проводились при начальном давлении газа 50кПа и подаваемым напряжением 7,5кВ. Значения представлены в таблице.1.

J, мА/см²	Угол поворота магнитопровода, °									
R, мм	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
-120	74,9	73,6	65,5	70,5	71,1	69,3	68,0	73,0	74,3	73,0
-110	76,8	75,5	68,6	72,4	73,0	71,8	73,0	74,3	76,8	74,9
-100	77,4	76,8	69,9	73,0	73,6	73,0	74,9	75,5	78,0	76,1
-80	76,1	76,1	71,1	73,6	73,0	73,0	74,9	74,9	76,8	75,5
-60	72,4	73,0	68,0	70,5	69,9	71,1	73,0	72,4	73,6	73,0
-50	68,6	69,3	64,9	67,4	68,6	66,8	69,3	68,6	69,9	69,3
-35	66,1	67,4	63,0	66,1	66,1	66,1	67,4	66,8	68,0	67,4
-20	65,5	66,1	63,0	66,8	65,5	66,1	67,4	67,4	68,0	67,4
0	62,4	63,6	61,2	64,3	63,0	64,3	65,5	65,5	66,1	66,1
20	64,3	64,9	60,5	63,0	62,4	63,0	63,0	64,3	65,5	64,9
30	62,4	62,4	59,3	62,4	61,2	61,8	61,8	63,0	64,3	63,6
45	60,5	60,5	57,4	59,9	58,7	59,3	58,7	60,5	58,7	61,8
50	63,6	63,6	60,5	62,4	61,8	62,4	62,4	63,6	64,9	64,3
60	64,3	63,6	61,2	63,0	62,4	62,4	63,0	64,3	64,9	64,9
80	64,9	64,3	61,8	63,6	62,4	63,0	61,8	64,3	64,9	64,3
100	66,1	65,5	61,2	63,6	63,6	63,6	61,2	64,3	65,5	64,3
110	66,1	63,6	59,9	63,0	62,4	61,8	59,3	61,8	64,3	63,0
120	59,9	61,2	55,5	58,0	59,3	58,0	62,1	58,0	61,2	59,9

Таблица.1. Результаты измерений плотности ионного тока.

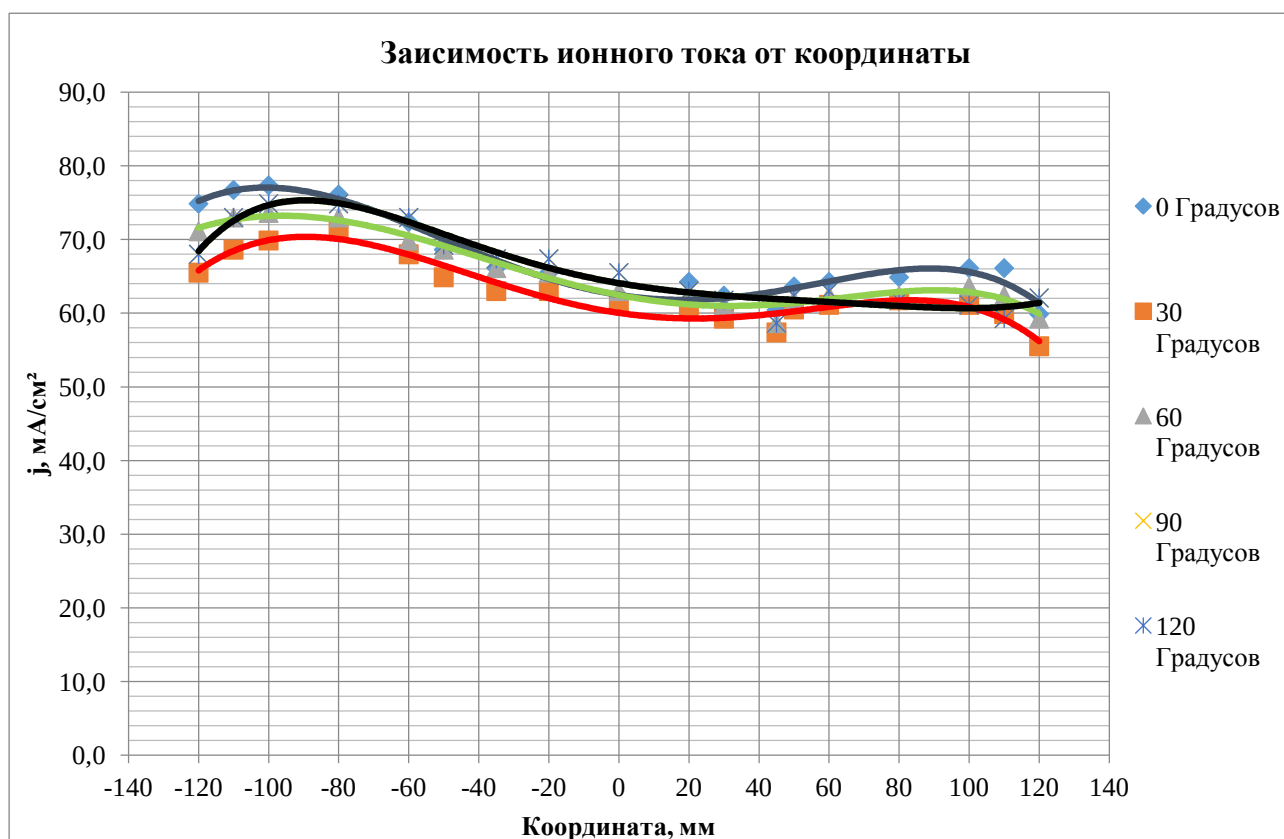


Рис.10. Распределение плотности ионного тока по радиусу.

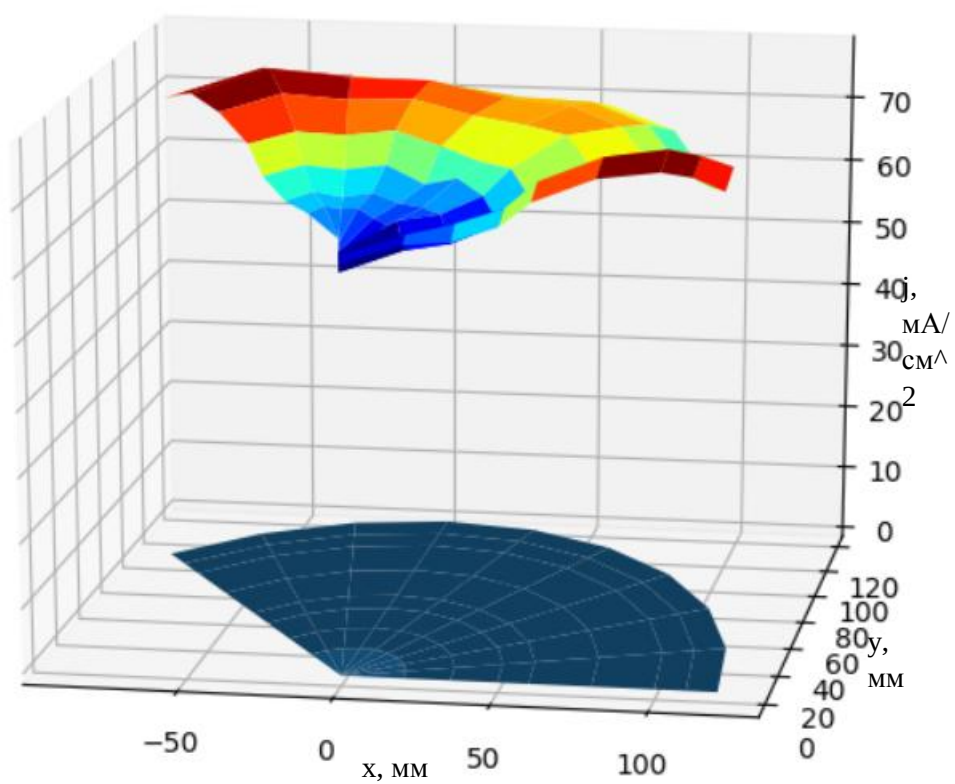


Рис.11. Поверхность зависимости плотности ионного тока от координаты.

3.1. Обсуждение результатов

Анализируя зависимость, представленную на рис.11, можно заметить, что распределение по азимуту достаточно однородное. Поэтому дополнительных магнитов ставить не надо. Радиальное распределение имеет одинаковый наклон при разных углах поворота магнитопровода. Это говорит о том, что присутствует систематическая ошибка. Наиболее вероятной причиной является неравномерность зазора между зондом и пластиной, имитирующей ИОС. После эксперимента было измерено, что расстояние между пластиной и зондом в положениях на противоположных концах диаметра, отличается на 1 мм. Для более точных результатов следует внести изменения в конструкцию измерительной части эмиттера (расстояние должно быть одинаковым при движении зонда по диаметру) и повторить измерения. Общая неоднородность составляет $\pm 10\%$. Это допустимо для работы ИОС.

3.2. Погрешности

В данной работе есть следующие погрешности: систематическая - из-за неравномерности зазора между зондом и пластиной, систематическая - точность вычисления площади, сопротивление и др. 10%, остальные - статистические – по экспериментальным данным – 5%.

Вывод

В данной работе были получены измерения радиального и азимутального распределения плотности ионного тока в высокочастотном плазменном эмиттере атомарного инжектора. При данном расположении постоянных магнитов на задней стенке эмиттера, магнитное поле практически не влияет на однородность распределения ионного тока по азимуту. Также был выявлен недостаток измерительной части эмиттера.

Приложение

1. Общее изображение атомарного инжектора:

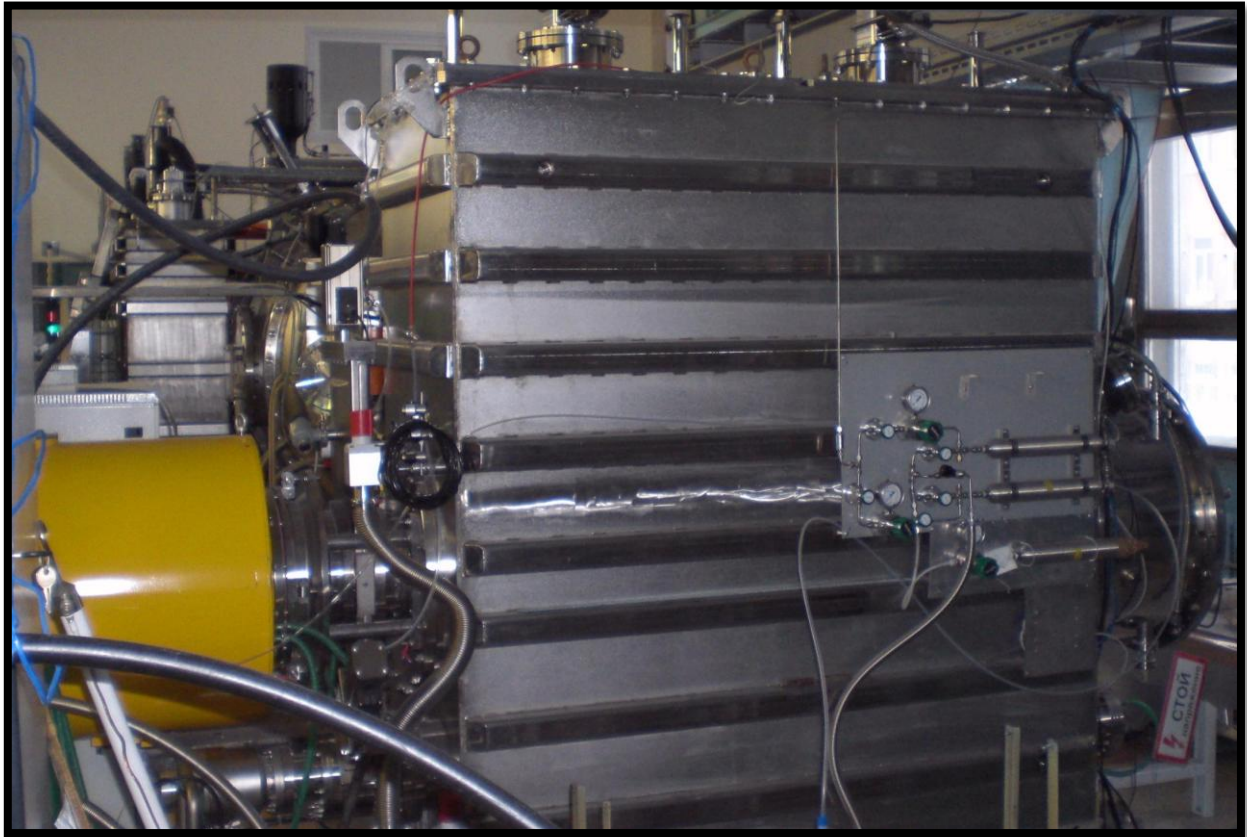


Рис.12. Общий вид атомарного инжектора.

Библиографический список

1. A. A. Ivanov, V. I. Davydenko, P. P. Deichuli, A. Kreter, V. V. Mishagin, A. A. Podyminogin, I. V. Shikhovtsev, B. Schweer, R. Uhlemann, Rev. Sci. Instruments **71**, 3728-3735 (2000).
2. A. Sorokin, V. Belov, V. Davydenko, P. Deichuli, A. Ivanov, A. Podyminogin, I. Shikhovtsev, G. Shulzhenko, N. Stupishin, and M. Tiunov, Rev. Sci. Instrum. **81**, 02B108 (2010).
3. P. Deichuli, V. Davydenko, V. Belov, A. Gorbovsky, A. Dranichnikov, A. Ivanov, A. Sorokin, V. Mishagin, A. Abdrashitov, V. Kolmogorov and A. Kondakov, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02B114-1-02B114-3 (2012).
4. D. Fasel, Y. Andrebe, J. Dubray, A. Karpushov, V. Kolmogorov, B. Marletaz, P. Marmillod, L. Muehle, A. Perez, I. Shikhovtsev, U. Siravo, Fusion Engineering and Design **123**, 331-335 (2017).
5. Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP
AIP Conference Proceedings 2052, 040016 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5083750>
I. V. Shikhovtsev^{1,2,a}, G. F. Abdrashitov¹, Yu. I. Belchenko¹, V. P. Belov¹, V. I. Davydenko¹, A. I. Gorbovsky¹, A. A. Ivanov^{1,2}, V. A. Kapitonov¹, A. A. Kondakov¹, V. V. Mishagin¹, A. L. Sanin¹, O. Z. Sotnikov¹, and E. I. Shubin¹