

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра**

Кафедра физики плазмы

Колмогоров Антон Вячеславович

**Формирование сфокусированного пучка нейтральных атомов в
диагностическом инжекторе**

**Научный руководитель:
Доктор физ-мат наук, в.н.с. Давыденко В. И.**

« » _____ 2007 г

Новосибирск – 2007 год

Содержание

1. Введение	3
2. Устройство диагностического инжектора нейтральных атомов	5
2.1. Принципиальная схема диагностического инжектора	5
2.2. Электростатическая фокусировка ионно-оптической системы.....	6
2.3. Геометрическая фокусировка ионно-оптической системы.....	8
3. Расчет ионно-оптической системы	9
4. Схема эксперимента.....	12
4.1. Одноапертурная ионно-оптическая система.....	12
4.2. Многоапертурная ионно-оптическая система	13
5. Заключение.....	15
Список литературы.....	16

1. Введение

В настоящее время пучки высокоэнергетичных атомов широко используются для диагностики плазмы. Они успешно применяются в таких диагностиках, как резерфордовское рассеяние атомов пучка на ионах плазмы с последующим определением их температуры, измерения профиля плотности плазмы при регистрации вторичных ионов. Спектроскопия плазмы с использованием нейтральных пучков позволяет измерять пространственное распределение различных параметров в магнитных ловушках. Широкое распространение получили диагностики CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy) и BES (Beam Emission Spectroscopy), которые позволяют измерять ионную температуру, температуру и плотность примесей в плазме. Одним из немногих методов локального измерения магнитного поля в плазме является использование динамического штарк-эффекта (Motional Stark Effect, MSE) при инжекции нейтрального пучка в плазму. В системе отсчета атома, движущегося в магнитном поле, возникает электрическое поле, пропорциональное скорости атома и величине поля $\vec{E} = \frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{B}]$. В электрическом поле линии излучения атома расщепляются вследствие штарк-эффекта. Регистрация спектра излучения позволяет определять поле \vec{E} и, соответственно, поле \vec{B} . Пучок быстрых атомов инжектируется под углом, близким к 90° к силовым линиям магнитного поля. При столкновении с частицами плазмы атомы пучка возбуждаются и излучают. Наблюдение спектра этого излучения под углом к оси пучка позволяет определить степень расщепления линии, а следовательно и локальную величину поля B .

Для обеспечения локальности измерений необходимо иметь малый поперечный размер пучка и высокую плотность тока в зоне измерений. Ионный источник обычно располагается на расстоянии $2\div 3$ м от плазменной камеры. Для обеспечения достаточного поперечного размера пучка в плазме ~ 10 см необходимо иметь расходимость пучка не хуже 10^{-2} рад и использовать геометрическую фокусировку пучка.

В Институте ядерной физики СО РАН работы по атомарным пучкам для диагностики плазмы ведутся с начала 70-х годов. Была разработана серия импульсных диагностических инжекторов ДИНА для магнитных ловушек средних размеров, инжектор RUDI с длительностью действия до 10 с для больших токамаков. В настоящий момент ведутся работы по отладке и запуску инжекторов ДИНА-5М для установки ГДЛ с энергией атомов 50 кэВ, угловой расходимостью пучка не более 10^{-2} рад, ионным током до 5 А и длительностью импульса до 5 мс; а так же ДИНА-КИ для токамака Т-10,

расположенного в ИЯС имени Курчатова с энергией атомов 40 кэВ, расходимостью пучка не более 10^{-2} рад, ионным током до 5 А и длительностью импульса до 20 мс.

Важным элементом формирования пучка атомов является ионно-оптическая система (ИОС). Она служит для вытягивания ионов из камеры дугового генератора и последующего их ускорения. Геометрия ИОС рассчитана и изготовлена таким образом, чтобы достигалась минимальная расходимость пучка при заданной плотности тока.

Данная работа посвящена расчету и экспериментальному изучению ионно-оптической системы диагностических инжекторов ДИНА-5М и ДИНА-КИ.

2. Устройство диагностического инжектора нейтральных атомов

2.1. Принципиальная схема диагностического инжектора

Основными элементами импульсного инжектора являются источник плазмы, ускоряющая система и нейтрализатор. На рис. 2.1 показана схема ионного источника диагностических инжекторов ДИНА-5М и ДИНА-КИ.

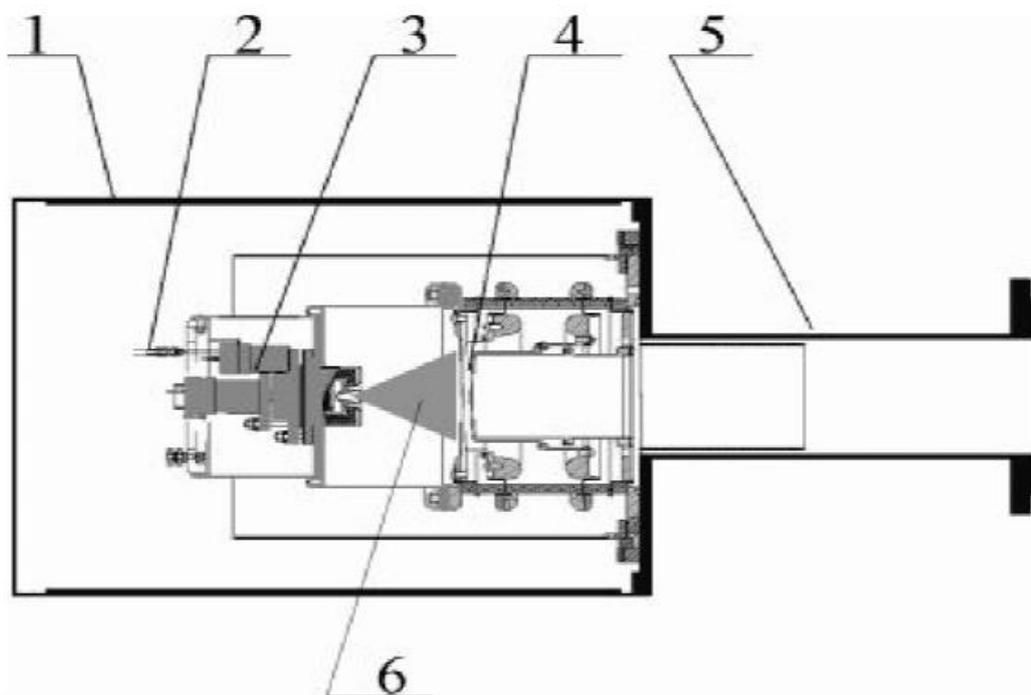


Рис. 2.1: Схема ионного источника. 1 – магнитный экран; 2 – подача газа; 3 – источник плазмы; 4 – ИОС; 5 – нейтрализатор; 6 – плазма.

Источником плазмы является генератор плазмы на дуговом разряде с холодным катодом в газе. Ток разряда до 500 А при напряжении разряда 60-80 В. Перед началом рабочего импульса со стороны катода в течение нескольких сот микросекунд осуществляется импульсный напуск газа для инициализации дуги, основной напуск рабочего газа производится в прианодную область в течение всего импульса. Для увеличения выхода плазмы на разряд накладывается продольное магнитное поле, которое создается катушкой, расположенной вблизи анода. Плазма вытекает в анодное отверстие и расширяется до размера ИОС. Плотность плазмы вблизи анодного отверстия достигает $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в плоскости плазменной сетки плотность падает до требуемой величины $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Особенностью выбранного плазменного эмиттера на основе дугового разряда является применение периферийного мультипольного магнитного поля. Вследствие отражения периферийной части плазменной струи от мультипольного магнитного поля в области плазменной сетки формируется плазменный эмиттер с достаточной пространственной однородностью. Использование периферийного магнитного поля обычно повышает эмиссионную плотность тока примерно вдвое, позволяя использовать дуговой генератор плазмы с умеренным потоком плазмы. Периферийное магнитное поле создается набором из 16 постоянных магнитов из $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ длиной 80 мм и сечением 9×12 мм, расположенных на внешней стенке экспандерной камеры.

С помощью ИОС из плазменного эмиттера вытягивается и формируется пучок ионов. Далее ионный пучок попадает в нейтрализатор, в который напускается газ с помощью импульсного клапана.

2.2. Электростатическая фокусировка ионно-оптической системы

Формирование ионных пучков с токами в несколько ампер и энергией десятки килоэлектронвольт производится с помощью многоапертурных систем вытягивания электронов. Невозможность использования одноапертурной ИОС связана с ограничением тока для одноапертурной системы с круглым эмиттером. Предельный ток в ионном пучке в этом случае с хорошей точностью может быть определен из закона Чайльда-Ленгмюра:

$$I = \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U^{\frac{3}{2}} D^2}{36d^2} \quad (2.1)$$

где D – диаметр эмиттера, d – расстояние между плазменным и вытягивающим ионный пучок электродом, e и M заряд и масса иона, U – разность потенциалов между плазменным и вытягивающим электродами.

Поскольку для формирования направленного пучка необходимо, чтобы $d \geq D$, ток ионного пучка, сформированного ячейкой с круглыми апертурами, не может превзойти величины 0.52А для протонов с энергией 50кэВ. Поэтому используются многоапертурные системы, при этом каждая ячейка формирует независимый элементарный пучок.

В источниках ионов диагностических инжекторов ДИНА-5М и ДИНА-КИ применяется четырехэлектродная ионно-оптическая система. На рис. 2.2 показана схематично элементарная ячейка такой системы. Поперечный импульс, приобретаемый ионами в поле пространственного заряда и поперечном электрическом поле вблизи ускоряющего электрода, компенсируется при движении в поперечном поле вытягивающего электрода. Такая схема оказывается менее зависимой от формы

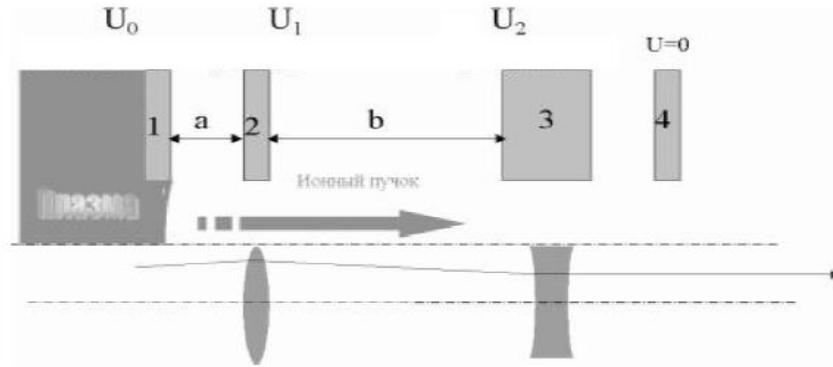


Рис. 2.2: Элементарная ячейка ИОС. 1 – плазменный электрод; 2 – вытягивающий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – заземляющий электрод.

плазменного эмиттера в сравнении с трехэлектродной ИОС, где отсутствует электрод с промежуточным потенциалом. Кроме того, распределение полного напряжения на два зазора позволяет повысить надежность работы ИОС при больших ускоряющих напряжениях.

В теоретических расчетах трудно учесть температуру ионов и абберации ИОС. Более полное исследование ИОС возможно при численном моделировании условий формирования пучка методом трубок тока. При этом решается уравнение Пуассона для нахождения поля потенциала:

$$\Delta\phi = e(N - n) \quad (2.2)$$

где n – плотность ионов

$$n = \int f d\vec{V} \quad (2.3)$$

\vec{V} и f – скорость ионов и функция распределения соответственно. Для определения f необходимо решить уравнение Власова:

$$\vec{V} \cdot \nabla f - (e/M)\nabla\phi \cdot \nabla_v f = 0 \quad (2.4)$$

Плотность электронов в эмиттере имеет больцмановское распределение

$$N = N_0 \cdot \exp(-e(\phi_0 - \phi)/T_e) \quad (2.5)$$

где ϕ_0 – потенциал плазмы, N_0 , T_e – плотность и температура электронов в плазме.

Решение уравнений (2.2) и (2.4) позволяет найти поля в зазорах ИОС и определить расходимость сформированного пучка. Для решения таких задач используются такие программы как AXCEL, PBGUNS, SAM.

2.3. Геометрическая фокусировка ионно-оптической системы

Для повышения плотности тока пучка в области измерений в плазме используют фокусировку пучка. В диагностических инжекторах ДИНА-5М и ДИНА-КИ применяется геометрическая фокусировка. Electroды ИОС являются вложенными друг в друга сферическими сегментами. При этом шаг отверстий у всех сеток должен быть разным, чтобы обеспечить сходимость осей всех каналов в точку фокуса. Фокусное расстояние в этом случае равно радиусу кривизны электродов. Схематично геометрическая фокусировка представлена на рис. 2.3.

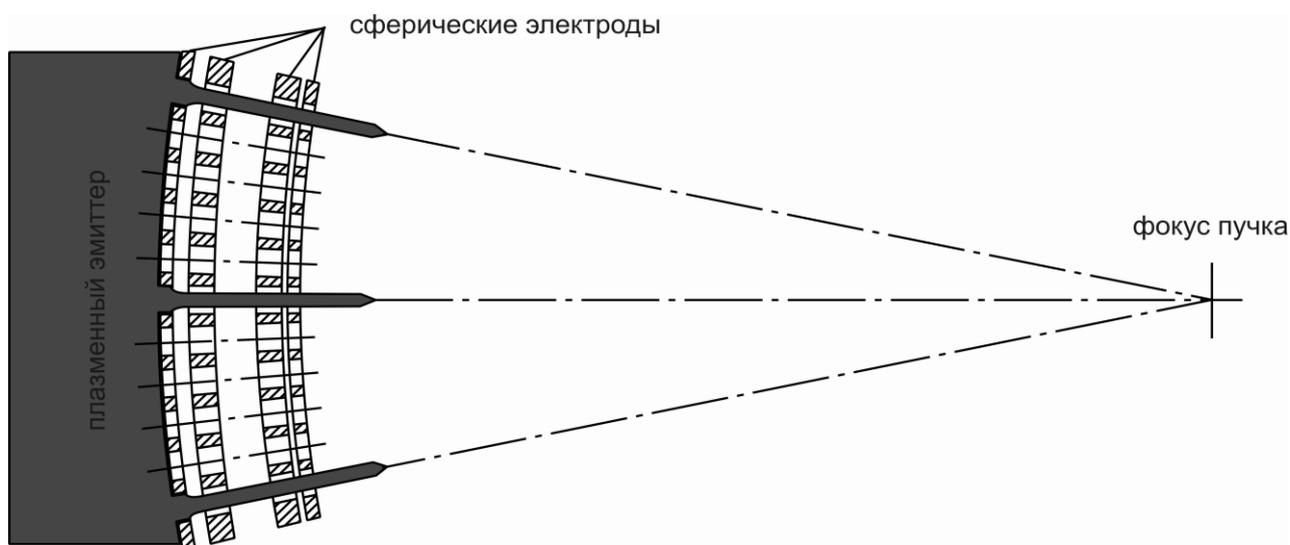


Рис. 2.3: Геометрическая фокусировка ИОС.

Величина плотности тока в фокусе определяется формулой:

$$j(r, F) = \frac{I_b e^{-r^2 / (\delta\alpha F)^2}}{\pi^2 F^2 \delta\alpha^2} \quad (2.6)$$

где I_b – ток элементарного пучка, $\delta\alpha$ – угловая расходимость, F – фокусное расстояние.

3. Расчет ионно-оптической системы

С помощью имеющейся в ИЯФ СО РАН программы PBGUNS численно смоделировано формирование пучка в элементарной ячейке ионно-оптической системы. Была оптимизирована геометрия ИОС для полного ускоряющего напряжения 40 кВ и полного ионного тока 5 А. На рис 3.1 показаны траектории частиц водородного пучка с плотностью тока 125 mA/cm^2 .

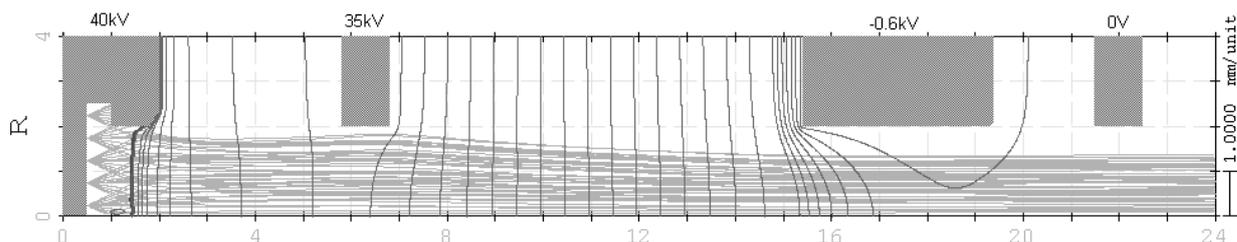


Рис. 3.1: Формирование пучка в элементарной ячейке ИОС инжектора ДИНА-КИ.

Исследовалась зависимость расходимости пучка от длины вытягивающего и ускоряющего зазоров. В расчетах были приняты следующие величины параметров: электронная температура $T_e = 8.0 \text{ эВ}$, ионная температура $T_i = 2.0 \text{ эВ}$. В результате расчетов были получены диаграммы траекторий частиц водородного пучка (рис. 3.1), диаграммы эмиттанса (рис. 3.2), форма плазменной границы (рис. 3.3). Полученные численные результаты обрабатывались с помощью программы MathCAD. Определялся угол, в котором происходит падение плотности в e раз относительно максимальной, и именно им определялась угловая расходимость атомного пучка. На рис. 3.4 приведена

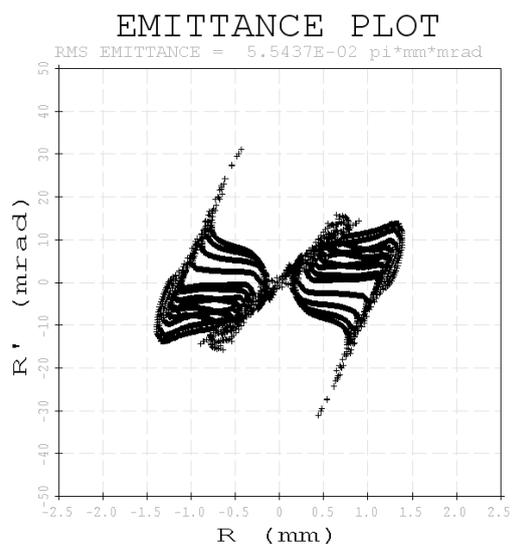


Рис. 3.2: Эмиттанс пучка

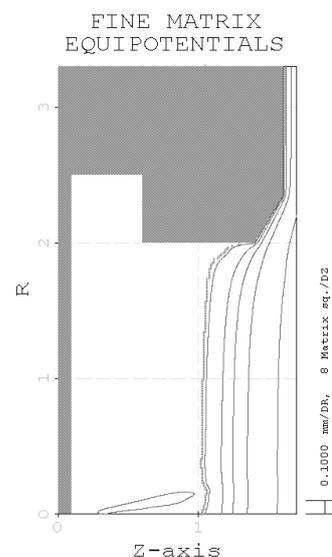


Рис 3.3: Плазменная граница

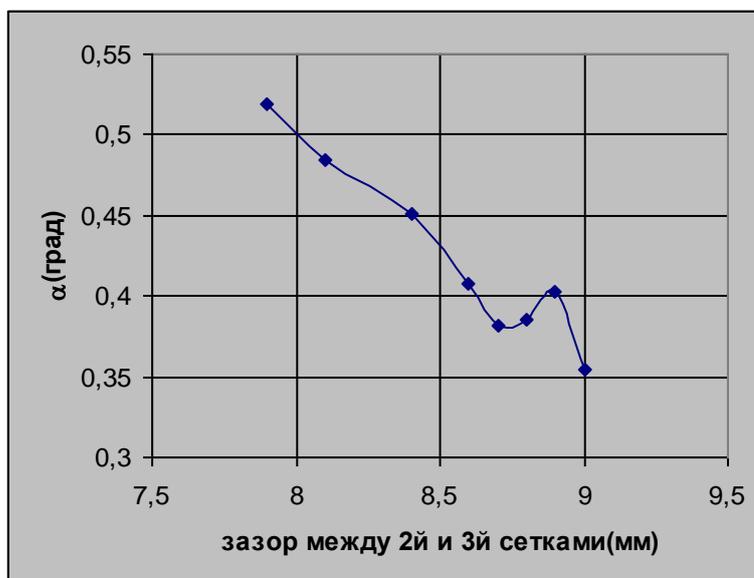


Рис. 3.4: Распределение угловой расходимости от длины ускоряющего зазора.

зависимость угла от длины ускоряющего зазора. Как видно из этого рисунка, существует минимум при длине, равной 8.7 мм, и величина его составляет 0.38 град. Следующий минимум, при 9 мм обусловлен утечкой плазмы на вытягивающую сетку, и фактически это означает возникновение пробоя, что недопустимо.

В результате была выбрана следующая геометрия, удовлетворяющая требованию минимальности угла расходимости: плазменный-вытягивающий - 3.3 мм; вытягивающий-ускоряющий - 8.7 мм и ускоряющий-заземляющий - 2.1 мм. Потенциалы, приложенные к сеткам: плазменная – 40 кВ, вытягивающая – 35 кВ, ускоряющая - -600 В, заземляющая - 0 В.

Отрицательный потенциал на третьей сетке необходим для подавления обратного

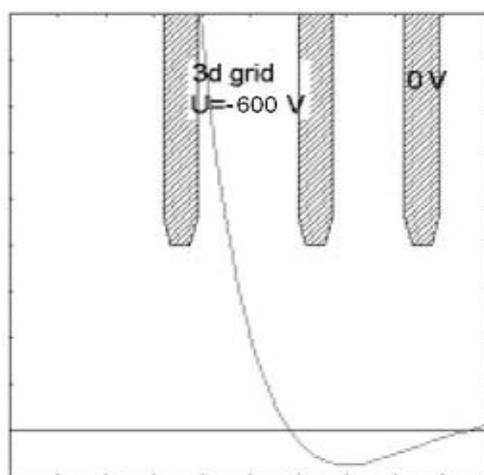


Рис. 3.5: Профиль потенциала на оси ячейки вблизи третьей сетки.

электронного тока. Минимальный необходимый потенциал третьей сетки соответствует появлению потенциального барьера для электрона в ускоряющем канале. Расчеты потенциального барьера, проведенные с помощью программного пакета USAM, приведены на рис 3.5. На рисунке показана выходная часть ускоряющего канала: ускоряющий (3й) электрод и заземленный. По оси абсцисс отложена координата вдоль оси канала, по оси ординат потенциал оси канала. Видно, что для появления барьера в несколько десятков вольт для данной геометрии сеток необходимо подать потенциал не менее -600В, без учета пространственного заряда пучка.

Для данной геометрии была рассчитана зависимость угла расходимости от плотности тока в элементарной ячейке. Эта зависимость представлена на рис. 3.6. Как видно из диаграммы, рабочая плотность пучка расположена вблизи оптимума по расходимости. При повышении плотности тока в пределах 10% расходимость остается вблизи минимума. Толстой линией выделен диапазон плотностей токов, в котором расходимость остается в пределах допустимых значений.

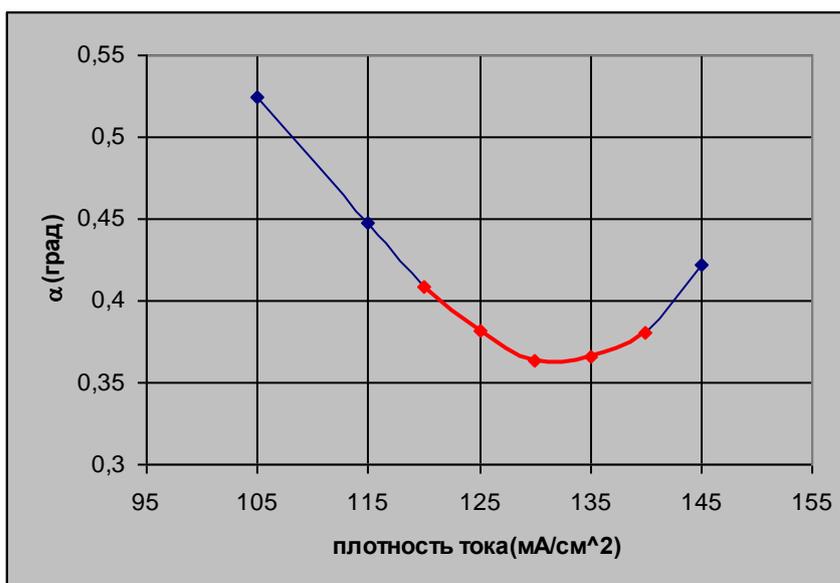


Рис. 3.6: Распределение угловой расходимости от плотности тока

4. Схема эксперимента

4.1. Однопертурная ионно-оптическая система

Первым этапом исследования ИОС является испытание однопертуррной системы. Ее схема приведена на рис. 4.1. Дуговым генератором плазмы создается плазма с ионной

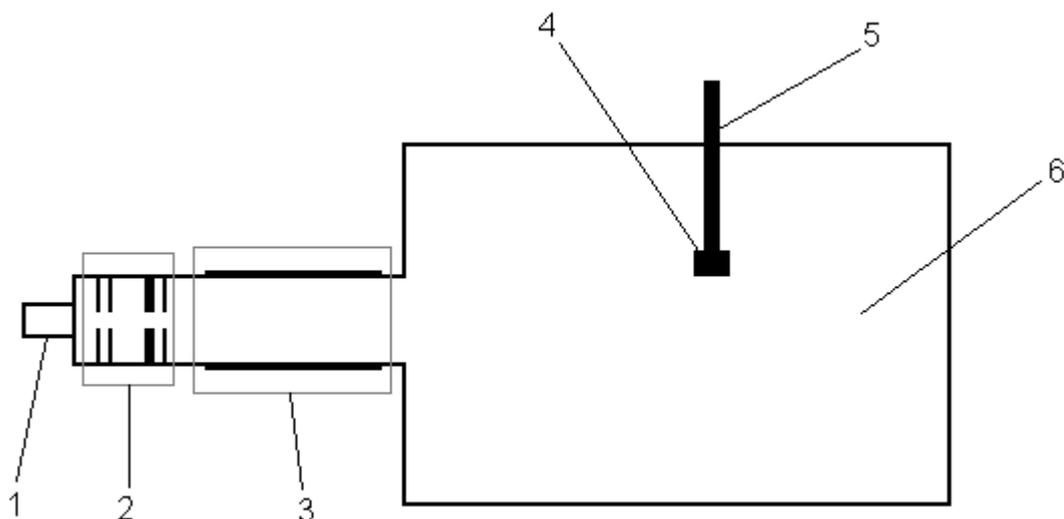


Рис. 4.1: Схема экспериментального стенда для испытания однопертуррной ИОС. 1 – дуговой генератор плазмы; 2 – однопертуррная ИОС; 3 – нейтрализатор; 4 - датчик; 5 – ввод движения; 6 – вакуумный объем.

температурой порядка нескольких электрон-вольт. Далее плазма попадает в ИОС, где ускоряется и фокусируется. Питание плазменного и вытягивающего электрода осуществляется с помощью высоковольтной системы питания. Напряжение на вытягивающий электрод подается с источника постоянного напряжения. Газ в камеру нейтрализации либо подается специально, через отдельный клапан, либо используется газ,

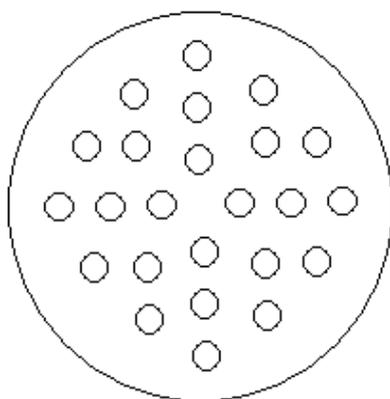


Рис. 4.2: Сборка вторично-эмиссионных зондов

напускаемый в генератор плазмы. Пучок, прошедший камеру нейтрализации попадает в вакуумный объем. В объеме на некотором удалении от входной диафрагмы источника расположен ввод движения с шаговым двигателем, на котором закреплен датчик. Датчик изображен на рис. 4.2 и представляет собой сборку вторично-эмиссионных зондов, обозначенных на рисунке небольшими окружностями. С помощью этой сборки измеряется профиль попадающей на него части пучка. Юстировочным узлом устанавливается положение подвижки по горизонтали так, чтобы центр пучка лежал на ее оси. Шаговым двигателем изменяется положение датчика по вертикали. Таким образом измеряется распределение плотности пучка по радиусу. Считая систему аксиально-симметричной, можно восстановить полное распределение плотности. Распределение плотности позволяет определить угловую расходимость пучка, а так же собственно плотность тока в пучке.

4.2. Многоапертурная ионно-оптическая система

На следующем этапе создания инжектора нейтральных атомов исследуется многоапертурная ИОС. При формировании пучка многоапертурной системой расходимость оказывается несколько больше расчетной. Одна из причин этого – неточность при изготовлении сеток. Кривизна электродов отличается от расчетной, и это влияет на фокусное расстояние пучка. Другая причина – радиальная неоднородность потока плазмы, поступающей на плазменный электрод. В эксперименте измеряется реальная расходимость и сравнивается с расчетной.

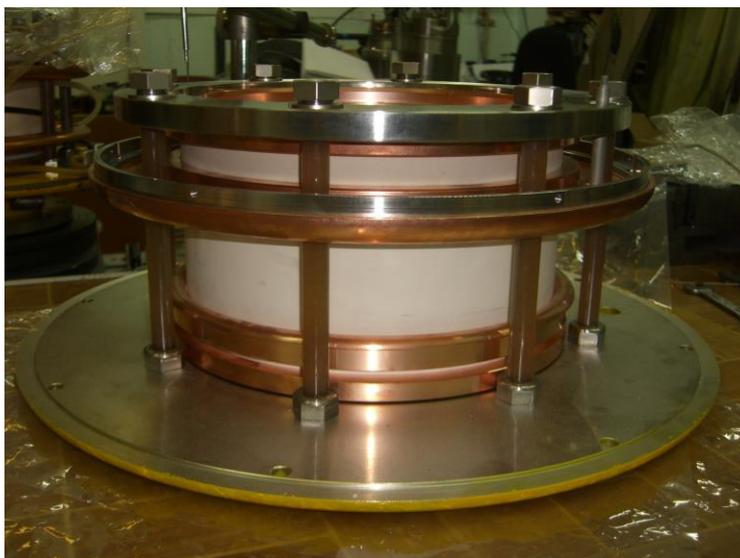


Рис. 4.3: Собранная ионно-оптическая система диагностического инжектора ДИНА-5М для ГДЛ

В настоящее время идет подготовка к проведению экспериментов на импульсном диагностическом инжекторе ДИНА-5М для установки ГДЛ. Ионный источник формирует пучок протонов с энергией 50 кэВ, током до 5 А, фокусным расстоянием 180 см и длительностью импульса до 5 мс. На рис. 4.3 показана собранная ионно-оптическая система для инжектора ДИНА-5М, на рис. 4.4 и 4.5 представлен внешний вид ионного источника, находящегося в процессе наладки.

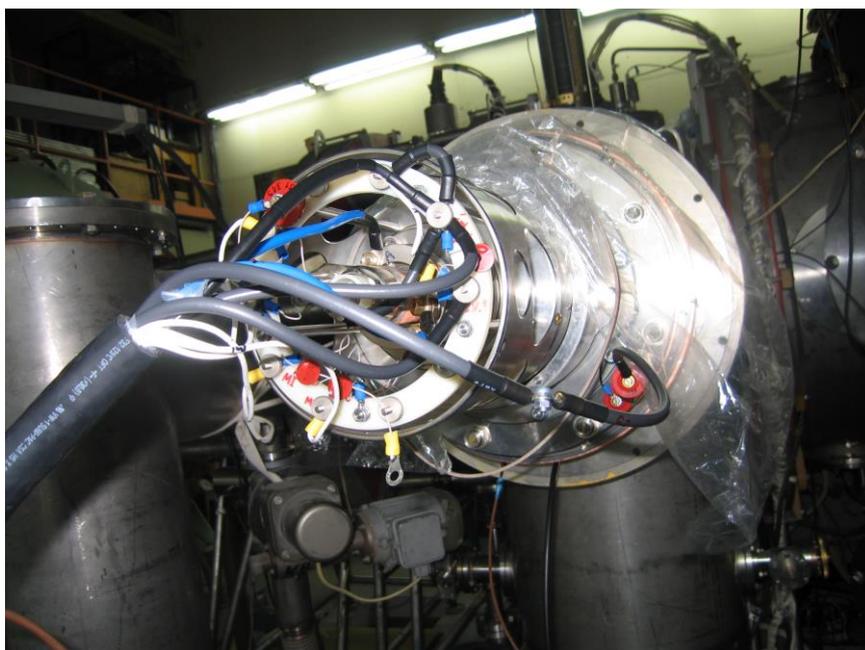


Рис. 4.4: Внешний вид источника инжектора ДИНА-5М. Вид сбоку.

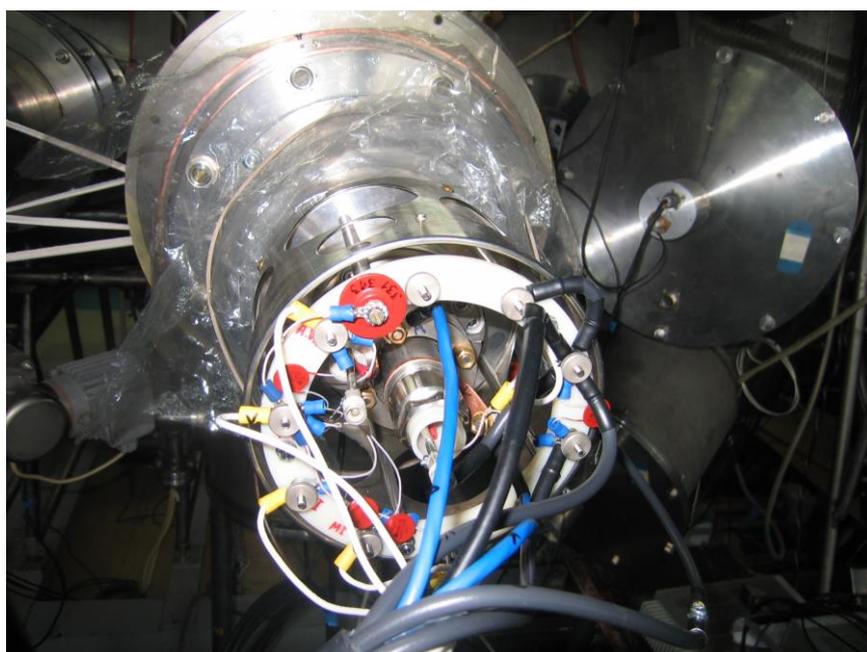


Рис. 4.5: Внешний вид источника инжектора ДИНА-5М. Вид сверху.

5. Заключение

В работе изучалось формирование слаборасходящихся сфокусированных пучков для диагностических инжекторов. Расчитана и оптимизирована геометрия многоапертурной четырехсеточной ионно-оптической системы диагностического инжектора нейтральных атомов ДИНА-КИ для токамака Т-10. Получены зависимости угловой расходимости сформированного ионного пучка от величин зазоров между электродами, и плотности тока в пучке. Подготовлен эксперимент по исследованию одноапертурной ИОС для данной геометрии. В настоящее время готовятся испытания диагностического инжектора для установки ГДЛ.

Список литературы

1. Браун Я. «Физика и технология источников ионов», М.: Мир, 1998.
2. Корепанов С. А. «Инжекторы атомарных пучков для активной штарковской спектроскопии плазмы», Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф-м. наук. Новосибирск, 2004, ИЯФ СО РАН.
3. А. Г. Барсуков, А. В. Волков, В. И. Давыденко, В. Ф. Королев, А. А. Медведев, В. А. Никулин, В. Я. Савкин, Г. И. Шульженко, Г. Н. Тилинин. «Диагностический инжектор ДИНА-6 для активного зондирования плазмы в установке ТОКАМАК-10», Москва, 2004, РНЦ «Курчатовский институт».
4. П. П. Дейчули, С. А. Корепанов, А. А. Иванов, В. И. Давыденко, В. В. Мишагин, Р. Улеманн, Н. В. Ступишин, Г. И. Шульженко. «Инжектор атомов водорода для активной штарковской спектроскопии плазмы», Новосибирск, 2003, ИЯФ СО РАН.
5. Н. В. Ступишин, П. П. Дейчули, А. А. Иванов, В. В. Мишагин. «Квазистационарный дуговой генератор плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов», Новосибирск, 2004, ИЯФ СО РАН.