

**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

Кравченко Юрий Владимирович

Название работы

**Разработка высокочастотного плазменного эмиттера для многоамперного
инжектора нейтральных атомов водорода**

Научный руководитель:

И. В. Шиховцев,

**канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН**

Новосибирск – 2007 год

Содержание

Содержание	2
Введение	3
ГЛАВА 1. Общее описание инжектора атомов водорода	5
ГЛАВА 2. ВЧ плазменный эмиттер.....	7
2.1 Физические основы ВЧ разряда	7
2.2 Схема ВЧ эмиттера	9
ГЛАВА 3. Методика измерений.....	11
3.1 Измерения профиля плотности ионного тока.....	11
3.2 Измерение потребляемой разрядом мощности	13
ГЛАВА 4. Экспериментальные результаты.....	15
4.1 Измерение зависимости плотности ионного тока от напряже- ния, подаваемого на антенну.	15
4.2 Измерение мощности, поглощаемой разрядом	18
4.3 Измерение профиля плотности ионного тока в зависимости от наличия в разрядной камере алюминиевого фарадеевского экрана .	21
Заключение.....	23
Литература.....	25

Введение

Инжекторы нейтральных атомов водорода активно используются на плазменных установках как для нагрева плазмы, так и для диагностики ее параметров. Ионный источник инжектора формирует пучок ионов, который после процесса нейтрализации и отклонения ионной компоненты становится пучком нейтральных атомов. Энергия и ток пучка для диагностического инжектора при этом могут иметь значения, например, от 25 до 50 кэВ и от 2 до 6 А (токамак TEXT) и до 200 кэВ и 3,5 А (токамак JT-60) [1], а длительность – до нескольких секунд. Для нагрева плазмы используются инжекторы с более высокими параметрами: ток пучка составляет десятки и сотни Ампер и энергия десятки и сотни кэВ [2].

Одна из основных частей ионного источника – плазменный эмиттер, из которого с помощью ионно-оптической системы извлекается и ускоряется ионный пучок. Плазменный эмиттер может быть основан на разных видах разряда: высокочастотном, дуговом, разряде с накаливаемым катодом и других [3]. Преимуществом высокочастотного (ВЧ) эмиттера по сравнению с другими эмиттерами является более высокая длительность рабочего импульса, что объясняется отсутствием в разряде накаливаемых элементов и электродов. Основные параметры водородного плазменного эмиттера – это плотность ионного тока, неоднородность распределения плотности тока по области вытягивания пучка, массовый состав плазмы.

В ИЯФ СО РАН (Новосибирск) были разработаны диагностические инжекторы на основе ВЧ эмиттера для токамаков TEXTOR (Германия) [4] и TCV (Швейцария) [5] с энергией пучка 50 кэВ, ионным током пучка 2 А и длительностью 4 с для TEXTOR, и ионным током пучка 3 А и длительностью 4 с для TCV. Плотность ион-

ного тока эмиттера при этом составляла 120 мА/см^2 , а область вытягивания пучка диаметром 72 мм для TEXTOR и 95 мм для TCV.

Сейчас в ИЯФ разрабатывается нагревной инжектор на основе ВЧ плазменного эмиттера с энергией пучка $20\div 40 \text{ кэВ}$, ионным током 40 А, длительностью 1 с. Плотность ионного тока эмиттера должна составлять до 350 мА/см^2 в круге диаметром 20 см.

Цель данной работы состояла в предварительных экспериментах по разработке ВЧ плазменного эмиттера с данными параметрами и поиска возможной оптимизации его конструкции.

ГЛАВА 1. Общее описание инжектора атомов водорода

Источником водородного пучка является инжектор нейтральных атомов. На рис.1 изображен принцип работы инжектора. Основной частью инжектора является ионный источник. Ионный источник инжектора состоит из двух функциональных узлов: газоразрядной камеры, где формируется плазменный эмиттер (1) и системы электродов (2), называемых ионно-оптической системой (ИОС). Эмиттером заряженных частиц служит, в частности, плазма ВЧ индукционного газового разряда. Извлечение из плазмы и ускорение положительных ионов может осуществляться с помощью 3-х или 4-х электродной ионно-оптической системы. Геометрия электродов ИОС и зазоры между ними оптимизируются для требуемой плотности ионного тока и энергии пучка.

В нейтрализаторе (4) создается перезарядная мишень на газе, вытекающем из источника и если требуется, напускается дополнительный газ. Пучок заряженных частиц, проходя через газовую мишень, частично нейтрализуется за счет процесса перезарядки. Например, для протонов с энергией 50 кэВ коэффициент нейтрализации в равновесной водородной газовой мишени равен 0.5. Нейтрализатор изготавливается из магнитомягкого материала и служит также магнитным экраном от рассеянных магнитных полей плазменной установки. Ионная компонента пучка отклоняется магнитным сепаратором (5). На выходе сепаратора получается атомарный пучок (6).

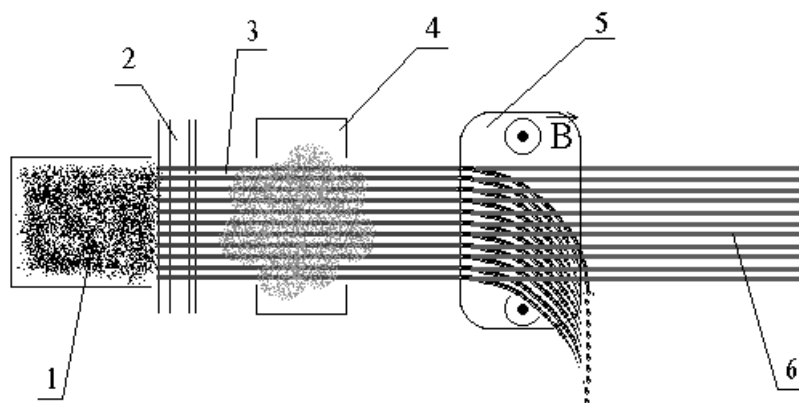


Рис.1. Схема формирования атомарного пучка: 1 – плазменный эмиттер, 2 – ионно-оптическая система, 3 – пучок протонов, 4 – нейтрализатор, 5 – магнитный сепаратор, 6 – атомарный пучок.

ГЛАВА 2. ВЧ плазменный эмиттер

2.1 Физические основы ВЧ разряда

Индукционный метод возбуждения ВЧ разряда основан на использовании явления электромагнитной индукции, в результате чего линии индуцированного электрического поля оказываются замкнутыми, а само поле вихревым. Через катушку – соленоид, которая на практике может состоять из нескольких или даже одного витка, пропускают вырабатываемый генератором ВЧ ток. Магнитное поле тока также переменное, внутри катушки направлено вдоль ее оси. Под его действием внутри индуцируется кольцевое электрическое поле, замкнутые линии которого концентричны с первичным ВЧ током. Это электрическое поле может возбуждать и поддерживать разряд в газе. Электрический ток в газовых разрядах, как правило, переносят электроны. В осциллирующем электрическом поле электроны, наряду с хаотическим движением, совершают систематические колебания, и именно это обстоятельство определяет большинство свойств и закономерностей ВЧ разряда.

Рассмотрим физические основы высокочастотных источников. Уравнение движения электронов в переменном электрическом поле имеет вид [3]:

$$m \frac{dV}{dt} + gV = eE_0 \cos(\omega \cdot t + \chi) \quad , \quad (1)$$

где g коэффициент, характеризующий сопротивление среды, т.е. взаимодействие электрона с другими частицами. Если $g = \nu$ (ν – частота соударений электрона с атомами), то величина gV представляет собой среднее изменение импульса электрона за единицу времени вследствие его столкновений с атомами. Интегрируя уравнение движения (1), получаем выражение для скорости электрона:

$$V = \frac{eE_0}{m(\nu^2 + \omega^2)^{1/2}} \cos(\omega \cdot t + \chi - \varphi) - Ce^{-\nu t} \quad , \quad (2)$$

где $\varphi = \text{arctg}(\nu / \omega)$, C – постоянная интегрирования. Таким образом, через очень короткий промежуток времени движение электрона приобретает чисто колебательный характер с частотой ω и сдвигом фазы φ относительно напряженности поля. Из выражения (2) можно получить величину мощности, выделяемой в единице объема; усреднение за период колебаний приводит к выражению

$$\bar{P} = \frac{ne^2}{m\nu} \frac{1}{2} E_0^2 \frac{\nu^2}{\nu^2 + \omega^2} \quad . \quad (3)$$

Следовательно, поглощаемая в высокочастотном разряде мощность пропорциональна концентрации электронов, квадрату напряженности электрического поля и зависит от частоты поля и давления газа. Наилучшее поглощение энергии происходит при близости частоты соударений электронов с атомами ν и частоты поля ω .

При низких плотностях плазмы в основном происходит ионизация невозбужденных атомов электронным ударом. Механизмом потерь электронов служит диффузионный уход зарядов из разрядного объема (в том числе на стенки, где заряды взаимно нейтрализуются) и рекомбинация в объеме.

Наложённое на разряд статическое магнитное поле вызывает ряд эффектов. Экспериментально было показано [3], что увеличение напряженности магнитного поля приводит к росту поглощаемой мощности и концентрации плазмы, что объясняется уменьшением диффузии зарядов из области основной ионизации (объема, ограниченного катушкой, возбуждающей разряд) перпендикулярно магнитному полю. Уменьшение диффузии вызывает увеличение равно-

весной концентрации зарядов и, следовательно, отбираемой разрядом мощности, так как последняя пропорциональна концентрации зарядов.

2.2 Схема ВЧ эмиттера

На рис.2 изображена схема ВЧ плазменного эмиттера. Цилиндрическая часть газоразрядной камеры (1) изготовлена из керамики (Al_2O_3) и имеет толщину стенок 4 мм. Рабочий газ (водород) подается в камеру через отверстие в охлаждаемом водой торцевом медном фланце. Подача газа производится через гибкий диэлектрический капилляр (2) с внутренним диаметром 0.8 мм. Поток газа в плазменную камеру регулируется давлением над электромагнитным клапаном (на рисунке не показан) и диафрагмой с диаметром отверстия 0.05 мм на конце диэлектрической трубочки.

Высокочастотный разряд возбуждается при помощи внешней антенны (3), которая представляет собой медную трубку, намотанную на камеру в 4 витка. Изоляция между витками осуществляется с помощью термоусаживаемой трубки. Высокочастотная мощность подается к антенне через масляный разделительный трансформатор. Разряд зажигается в камере при подаче ВЧ напряжения на антенну и срабатывании поджига (4) и поддерживается электромагнитным полем антенны. Поджиговое устройство располагается на заднем фланце и состоит из двух коаксиальных электродов, разделенных керамическим изолятором. Для надежного инициирования ВЧ – разряда в широкой области давлений и напряжений на антенне между ними прикладывается напряжение около 6 кВ, что приводит к пробою по поверхности изолятора. На заднем фланце газоразрядной камеры установлен набор постоянных магнитов (5). Их роль состоит, с одной стороны, в рассеивании потока обратных электронов, посту-

пающих из ИОС и, тем самым, в уменьшении плотности тепловых нагрузок на задний фланец. Кроме того, поле этих магнитов снижает поток плазмы на него, увеличивая энергетическую эффективность разряда.

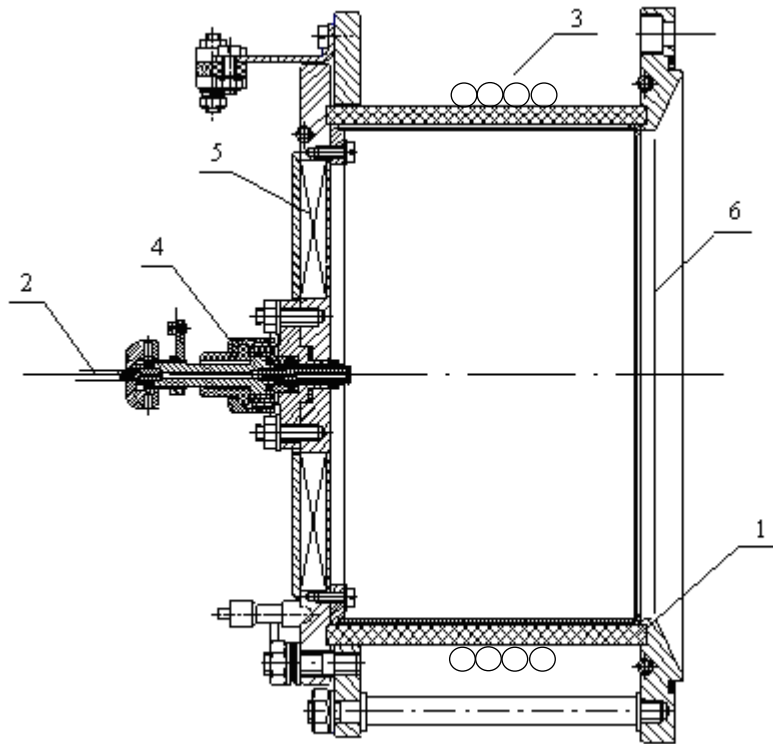


Рис.2. ВЧ плазменный эмиттер: 1 – керамическая разрядная камера, 2 – трубка для напуска газа, 3 – ВЧ антенна, 4 – устройство поджига и напуска газа, 5 – постоянные магниты, 6 – плоскость вытягивания ионов ИОС.

Для формирования пучка используются многоапертурные ИОС с круглыми отверстиями. Первый (плазменный) электрод ИОС расположен в плоскости (6), где и начинается вытягивание ионов. Для примера, ИОС источника инжектора для TEXTOR имеет 4-х электродную ионно-оптическую систему диаметром 72 мм с 163 отверстиями диаметром 4 мм. Геометрия электродов ИОС и зазоры между ними были оптимизированы для плотности тока $120 \pm 10\%$ mA/cm^2 [6].

ГЛАВА 3. Методика измерений

В ходе данной работы измерялись распределение плотности ионного тока эмиттера и поглощаемая в разряде мощность.

3.1 Измерения профиля плотности ионного тока

В плоскости вытягивания ионов (рис.2) была установлена плазменная сетка с пазом по диаметру, в котором с помощью подвижки с шаговым двигателем перемещался сеточный зонд (рис.3) для измерения распределения по радиусу плотности ионного тока.

Принцип работы зонда следующий. Коллектор зонда (1) находится под отрицательным потенциалом -2.7 кВ, вытягивающим положительные ионы плазмы. Для подавления эффекта вторичной эмиссии перед коллектором установлен электрод в виде сетки (2) под потенциалом -3 кВ. Эта сетка называется запирающей, она возвращает на коллектор электроны, выбитые с коллектора ионами. Ионы проходят через сетку входного отверстия корпуса (3), далее через запирающую сетку (рис.4) и затем попадают на коллектор. Ток коллектора измерялся с помощью шунтового сопротивления осциллографом. Плотность ионного тока равна:

$$j = \frac{I}{S_{эфф}} = \frac{U_{ш}}{S_{эфф} \cdot R_{ш}},$$

где I – ток коллектора, $U_{ш}$ – напряжение, измеряемое осциллографом, $R_{ш}$ – шунтовое сопротивление, а $S_{эфф}$ – площадь входного отверстия зонда, с учетом его прозрачности. Зная $S_{эфф} = 1.28 \text{ мм}^2$ и $R_{ш} = 1000 \text{ Ом}$ получаем рабочую формулу $j = 78 \cdot U[B] \left(\frac{\text{mA}}{\text{см}^2} \right)$, (где $U[B]$ – сигнал с осциллографа) по которой и рассчитывалась плотность ионного тока.

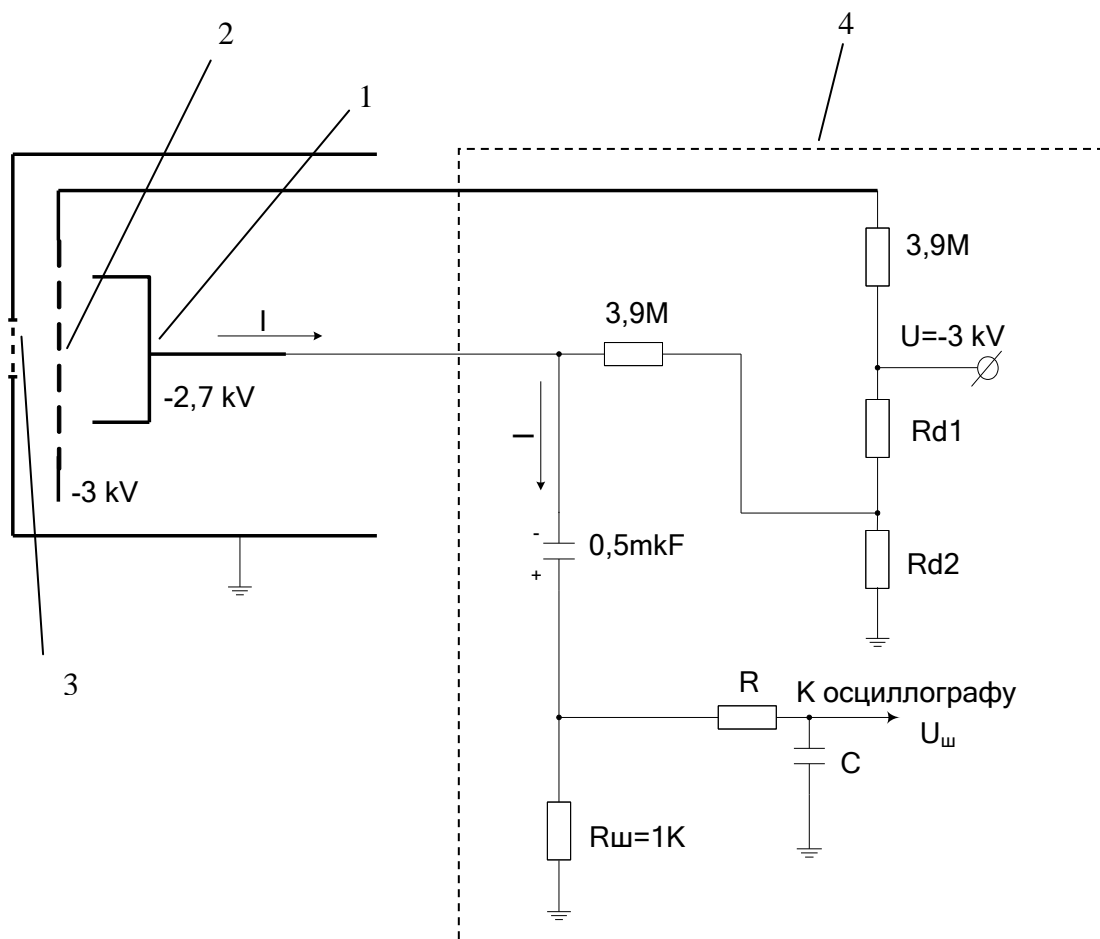


Рис.3. Сеточный зонд и схема измерений: 1 – коллектор, 2 – запирающая сетка под потенциалом -3кВ, 3 – входное отверстие, 4 – схема измерений.

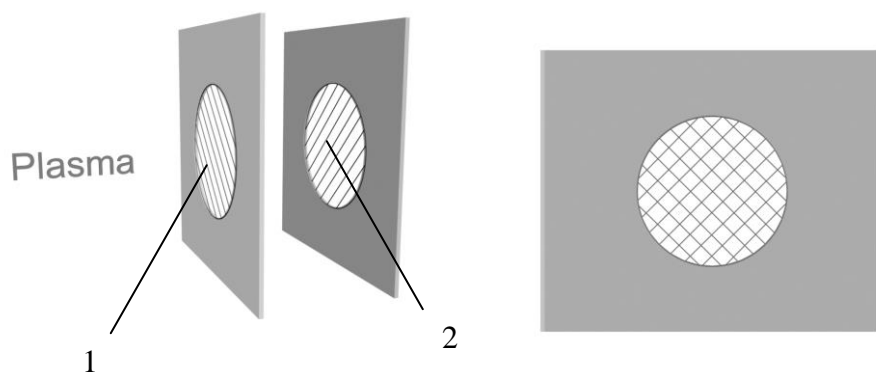


Рис.4 Взаимное расположение сетки входного отверстия (1) и запирающей сетки (2).

3.2 Измерение потребляемой разрядом мощности

На рис.5 представлена схема подвода ВЧ–мощности к антенне, индуктивность которой составляла примерно $L_a = 5$ мкГн. Плазменная нагрузка для ВЧ–генератора может быть представлена эквивалентными активным сопротивлением $R_{\text{экв}}$ и индуктивностью $L_{\text{пл}}$ (здесь $R_{\text{экв}}$ и $L_{\text{пл}}$ пересчитаны к подводам антенны). Согласно измерениям, нагрузка представляла собой в основном активное сопротивление, так как в режиме холостого хода генератора и с ВЧ–разрядом резонансная частота анодного контура изменялась незначительно. К примеру, на частоте 4.5 МГц она изменялась на 0.1 – 0.2 МГц, а на частоте 1 МГц – на 0.02 МГц. При работе на частоте 4.5 МГц характерное значение $R_p \sim 1 \div 2$ кОм. Активное сопротивление зависит от конструкции антенны: количества витков, ширины антенны, наличия в антенне ферритовых полуколец, охватывающих витки (об этом будет рассказано ниже). В определенной конструкции эмиттера и антенны эквивалентное сопротивление плазмы не зависит от потребляемой разрядом мощности и давления в разряде.

Потребляемая разрядом ВЧ–мощность определялась по напряжению на антенне и эквивалентному сопротивлению плазмы по формуле $P = U_a^2 / 2R_{\text{экв}}$, где U_a – амплитуда напряжения на антенне, $R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление плазмы. Эквивалентное сопротивление плазмы определялось в два этапа. Настройка антенного контура в резонанс с частотой возбуждения устанавливалась по максимальному значению тока эмиттера. Первоначально измерялись ВЧ–напряжение на антенне U_a с плазменной нагрузкой и амплитуда ВЧ–напряжения U_c на первой (возбуждающей) сетке лампы. После этого, в режиме без плазмы параллельно антенне подключалось активное сопротивление такой величины, при котором напряжение на

антенне равнялось измеренному в режиме с плазмой. При этом амплитуда ВЧ-напряжения U_c на первой сетке лампы поддерживалась равной ранее измеренной, а частота возбуждения генератора устанавливалась равной резонансной частоте антенного контура. Настройка в резонанс определялась по максимальному значению ВЧ-напряжения на антенне при заданном напряжении U_c . Подобранным таким образом сопротивление соответствовало эквивалентному сопротивлению плазмы.

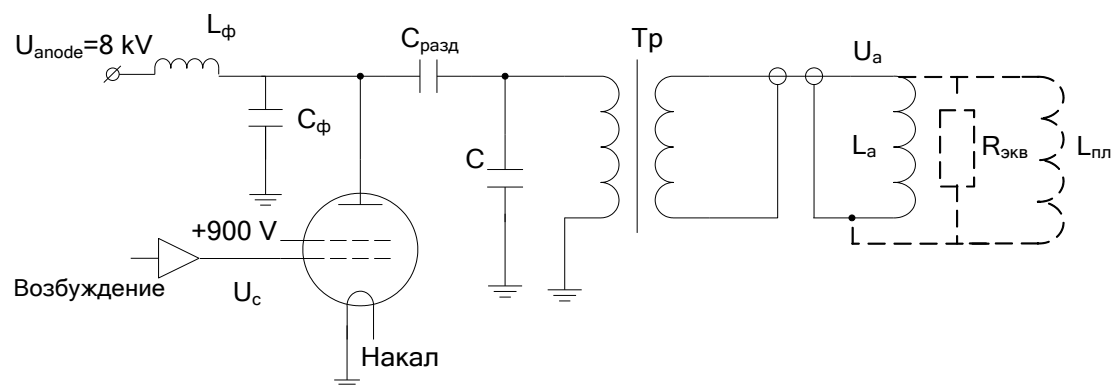


Рис.5. Схема ВЧ-генератора.

ГЛАВА 4. Экспериментальные результаты

Первоначальные эксперименты проводились на эмиттере с камерой диаметром 145 мм.

4.1 Измерение зависимости плотности ионного тока от напряжения, подаваемого на антенну.

На разрабатываемом плазменном эмиттере с камерой диаметром 300 мм для требуемой плотности ионного тока 350 mA/cm^2 напряжение на антенне будет достигать более 10 кВ. Высокое высокочастотное напряжение, подаваемое на антенну, влечет за собой ряд электротехнических проблем, связанных с надежностью в работе. Высокое напряжение может приводить к электрическим пробоям в антенне. Данный эксперимент проводился с целью уменьшить напряжение необходимое для данной плотности ионного тока. Плотность ионного тока определяется величиной электромагнитного поля, создаваемого антенной, т.е. ампер-витками в антенне. При данном количестве витков в антенне увеличить ток в антенне можно при уменьшении частоты. Индуктивное сопротивление антенны ωL уменьшается при уменьшении ω , тем самым уменьшается напряжение на антенне U .

На рис.6 приведена зависимость плотности ионного тока в центре апертуры эмиттера от подаваемого на антенну ВЧ напряжения на различных частотах от 1.4 МГц до 4.6 МГц. Для примера, напряжение, необходимое для плотности тока 220 mA/cm^2 на частоте 4.6 МГц – 5.7 кВ, а на частоте 1.4 МГц равно 4.2 кВ, т.е. примерно в 1.3 раза меньше. Таким образом, в некоторых случаях снижение возбуждающей частоты можно использовать для уменьшения напряжения на ВЧ антенне при одном и том же значении плотности

ионного тока. Однако, со снижением частоты возрастают потери в антенне. Например, для камеры с алюминиевым фарадеевским экраном (конструкция экрана будет показана в разделе 4.3) было измерено, что сопротивление потерь за счет скин-эффекта на частоте 1 МГц примерно равно эквивалентному сопротивлению плазмы. Поэтому выбор возбуждающей частоты в некоторой степени компромиссом между меньшим напряжением на антенне и большими потерями в антенне, экране и прилегающих фланцах.

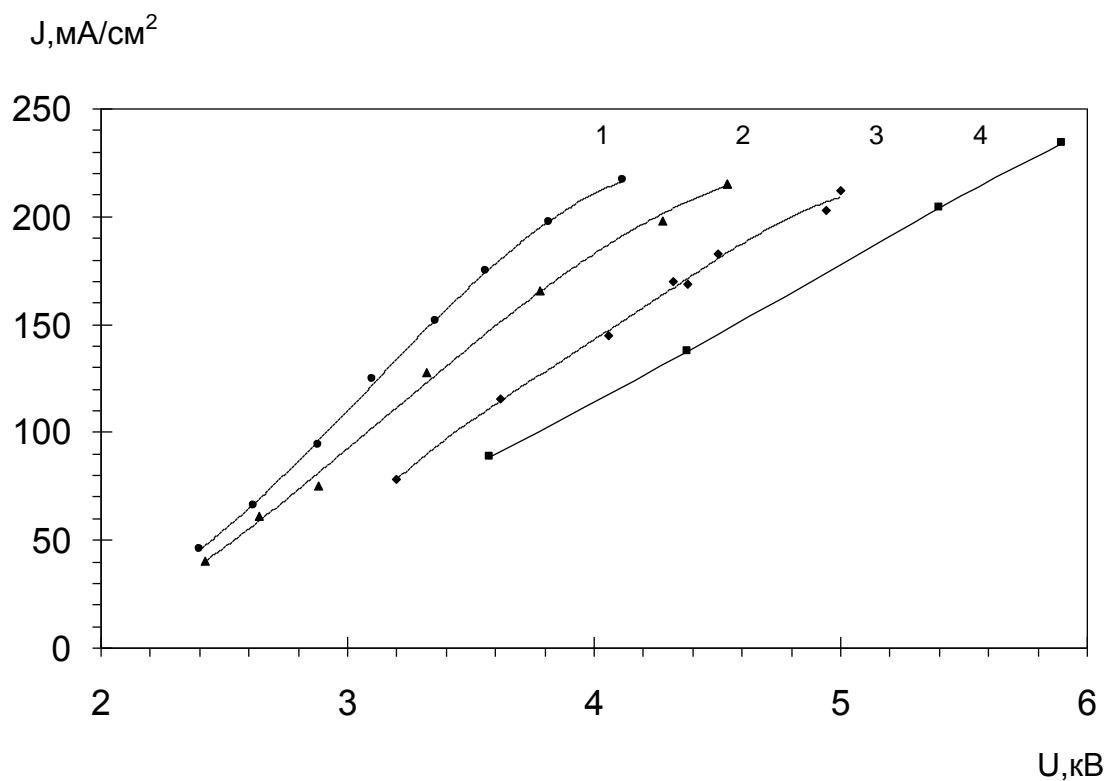


Рис.6. Зависимость плотности ионного тока в центре апертуры эмиттера от напряжения на антенне: 1 – на частоте 1.4 МГц; 2 – на частоте 2.1 МГц; 3 – на частоте 3.1 МГц; 4 – на частоте 4.6 МГц

Профили плотности ионного тока на различных частотах показаны на рис.7. Цель этих измерений была выяснить, оказывает ли снижение возбуждающей частоты какое-либо воздействие на неоднородность профиля плотности ионного тока. Здесь необходимо отметить, что для формирования пучка с малой угловой расходимо-

стью неоднородность профиля эмиттера должна быть $\leq \pm 10\%$. Например, для профиля ионного тока, приведенного на рис.7, область вытягивания пучка будет иметь радиус 50 мм. Из рисунка видно, что снижение возбуждающей частоты не ухудшает профиль. Статистическая ошибка этих измерений составляла менее 5% и поэтому не оказывала заметного влияния на результаты.

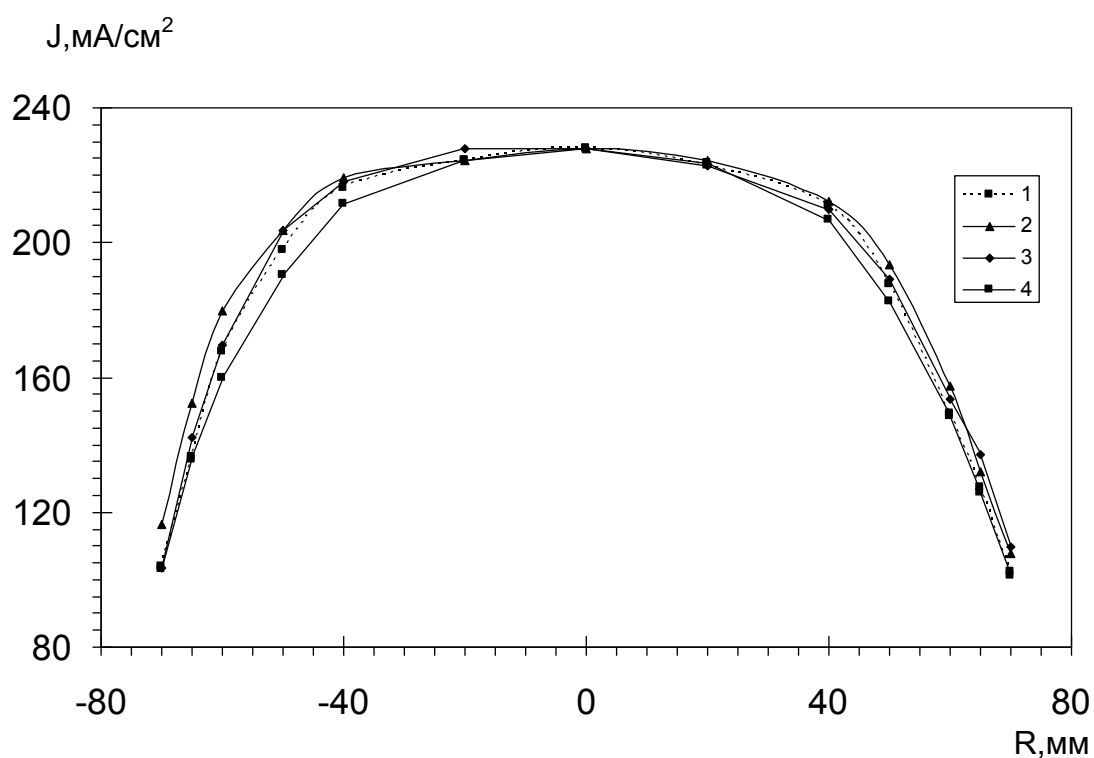


Рис.7. Профиль плотности ионного тока эмиттера: 1 – на частоте 3.1 МГц; 2 – на частоте 2.1 МГц; 3 – на частоте 1.4 МГц; 4 – на частоте 4.6 МГц

4.2 Измерение поглощаемой разрядом мощности.

На рис.8 представлена зависимость плотности ионного тока от поглощаемой в разряде мощности. Измерения показали, что в интервале от 5 до 13 кВт полученная зависимость является линейной. В предположении, что с увеличением мощности эта зависимость будет линейной, можно сделать оценку мощности для большей плотности тока. Для 350 мА/см^2 потребуется мощность 18 кВт.

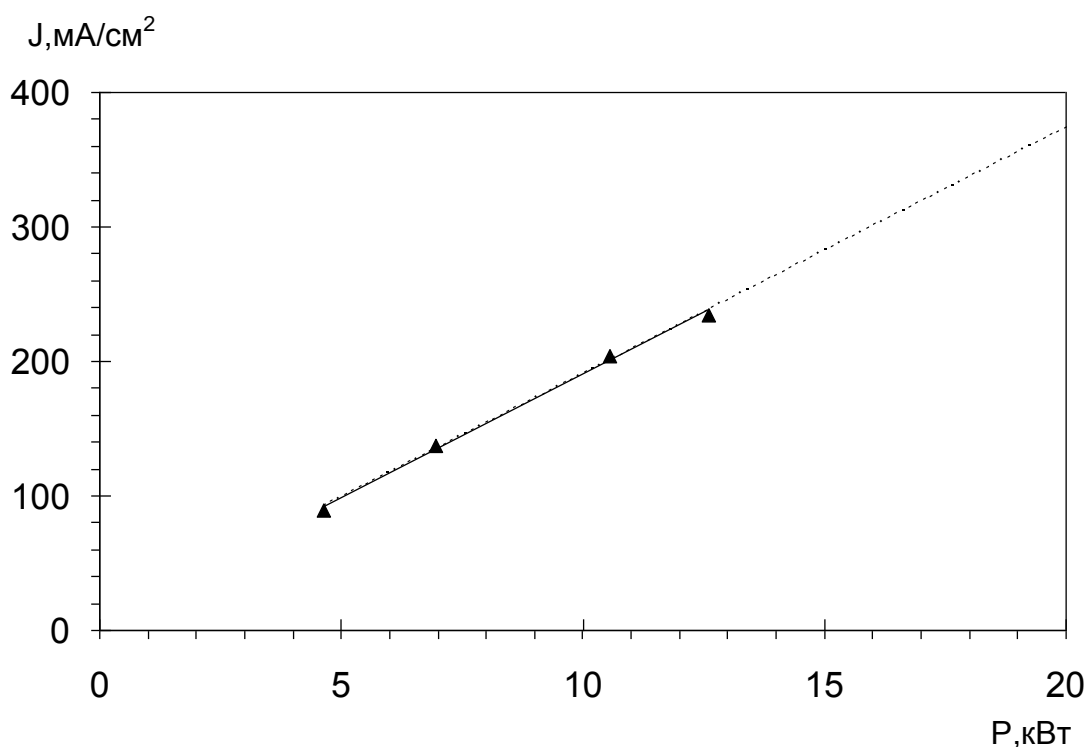


Рис.8. Плотность ионного тока в центре в зависимости от поглощаемой в разряде мощности. Измерения проводились на частоте 4.45 МГц.

Величина поглощаемой разрядом мощности существенно зависит от установки на антенну ферритовых полуколец (рис.9). Они концентрируют ВЧ поле и увеличивают плотность поглощаемой разрядом мощности [7]. На рис.10 – 11 представлены зависимости плотности ионного тока от поглощаемой разрядом мощности. Измерения проводились на частотах 2 и 4.6 и МГц в двух режимах – с

ферритами на антенне и без них. Видно, что на частоте 4.6 МГц при плотности тока 220 мА/см^2 поглощается мощность 17.5 кВт в варианте антенны без ферритов и 12 кВт, т.е. в полтора раза меньшая мощность, с ферритами. В то же время на частоте 2 МГц особых различий между этими зависимостями нет.

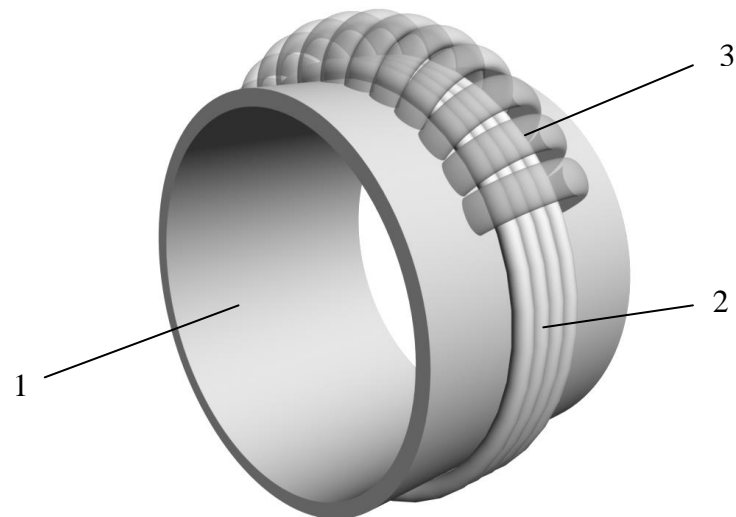


Рис.9. Антенна с ферритами: 1 – керамическая камера; 2 – антенна; 3 – ферритовые полукольца.

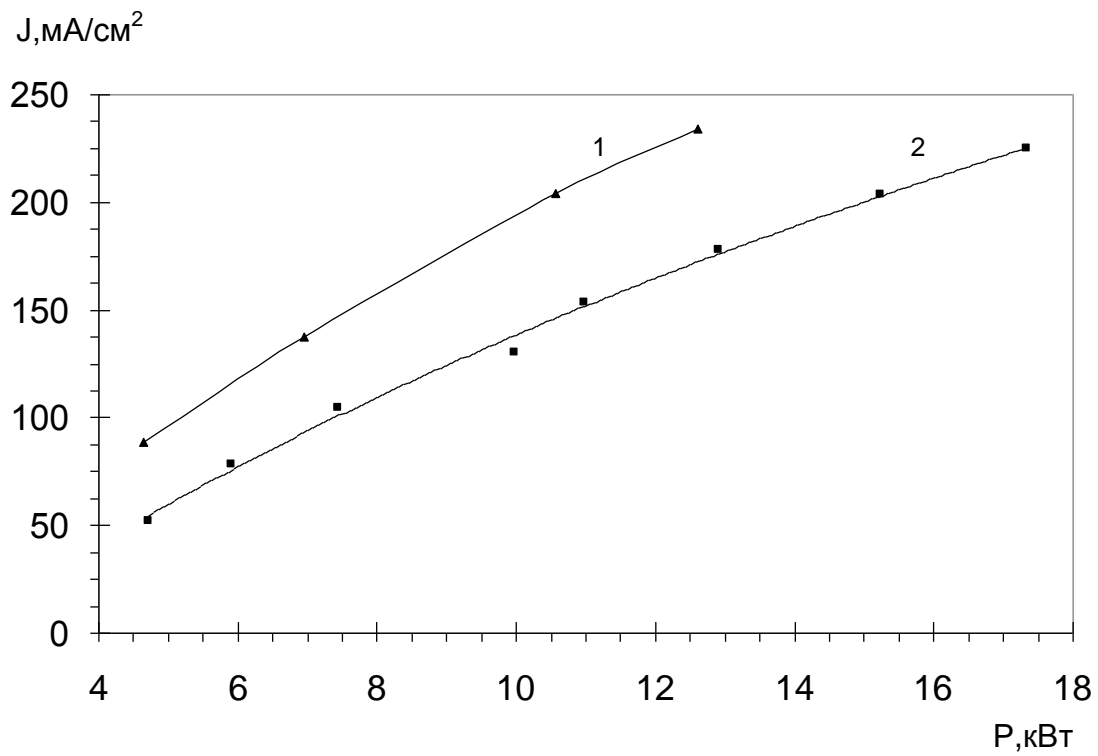


Рис.10. Плотность ионного тока эмиттера на частоте 4.6 МГц: 1 – с установленными на антенну ферритами; 2 – без ферритов.

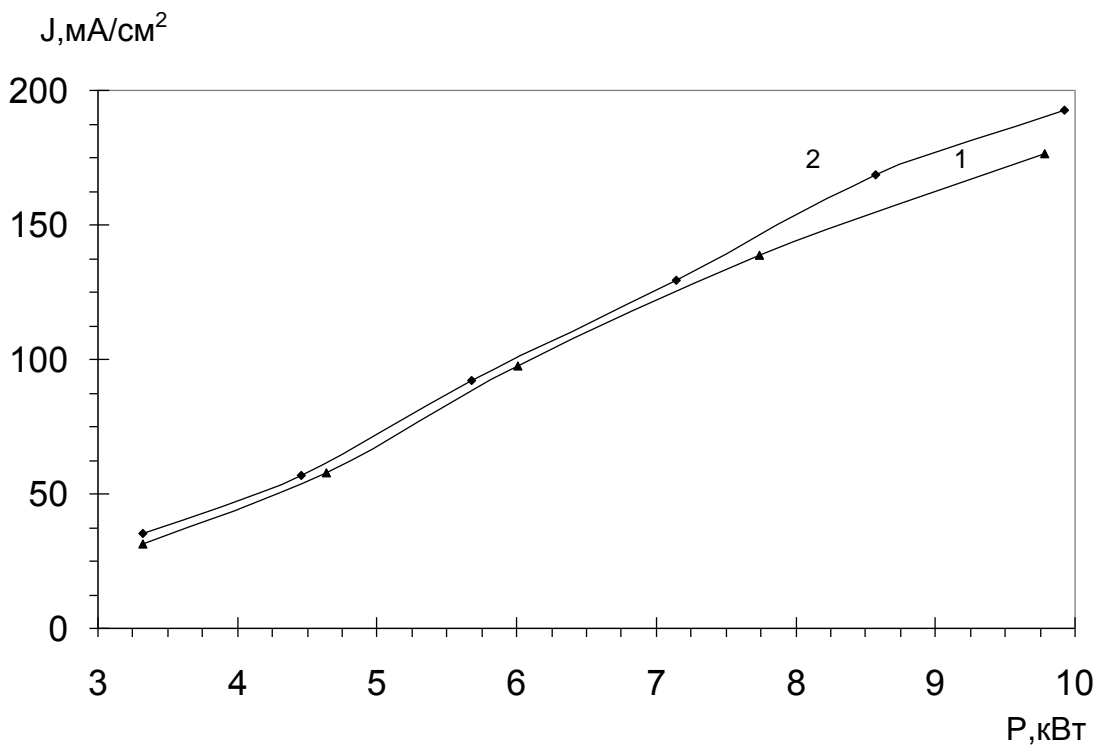


Рис.11. Плотность ионного тока эмиттера на частоте 2 МГц: 1 – с установленными на антенну ферритами; 2 – без ферритов.

4.3 Измерение профиля плотности ионного тока в зависимости от наличия в разрядной камере алюминиевого фарадеевского экрана.

В первоначальном варианте источника (для токамака TEXTOR) после примерно года работы, когда полная длительность работы эмиттера составила несколько тысяч секунд, произошла заметная модификация керамической поверхности плазменной камеры – металлизация поверхности керамики. Частично она связана с восстановлением металлического алюминия, частично с распылением заднего фланца и держателя плазменной сетки, сделанных из меди. Это существенно влияло на характеристики пучка. Протонная компонента пучка уменьшилась примерно на 10% [8]. Следовательно, для мощных ВЧ-источников, разрабатываемых на десятки киловатт мощности и длительностью работы несколько секунд, необходима защита внутренней керамической поверхности камеры от модификации.

Для решения этой проблемы, в камеру был вставлен фарадеевский экран, представляющий собой алюминиевый цилиндр с продольными разрезами, диаметром чуть меньшим внутреннего диаметра керамической камеры (с зазором 1 мм), как показано на рис.12.

На рис.13 представлены профили в вариантах камеры с экраном и без него. Измерения проводились на камере диаметром 234 мм с целью выяснить, ухудшает ли экран профиль плотности ионного тока. Как видно из рисунка наличие экрана практически не ухудшает профиль.

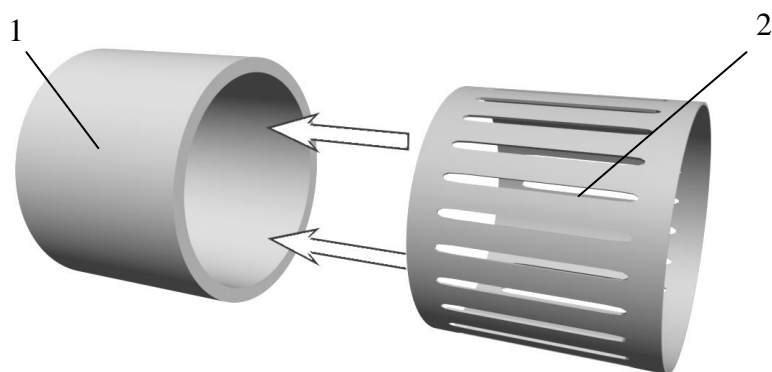


Рис.12. Конструкция камеры с алюминиевым экраном: 1 – керамическая камера; 2 – алюминиевый фарадеевский экран.

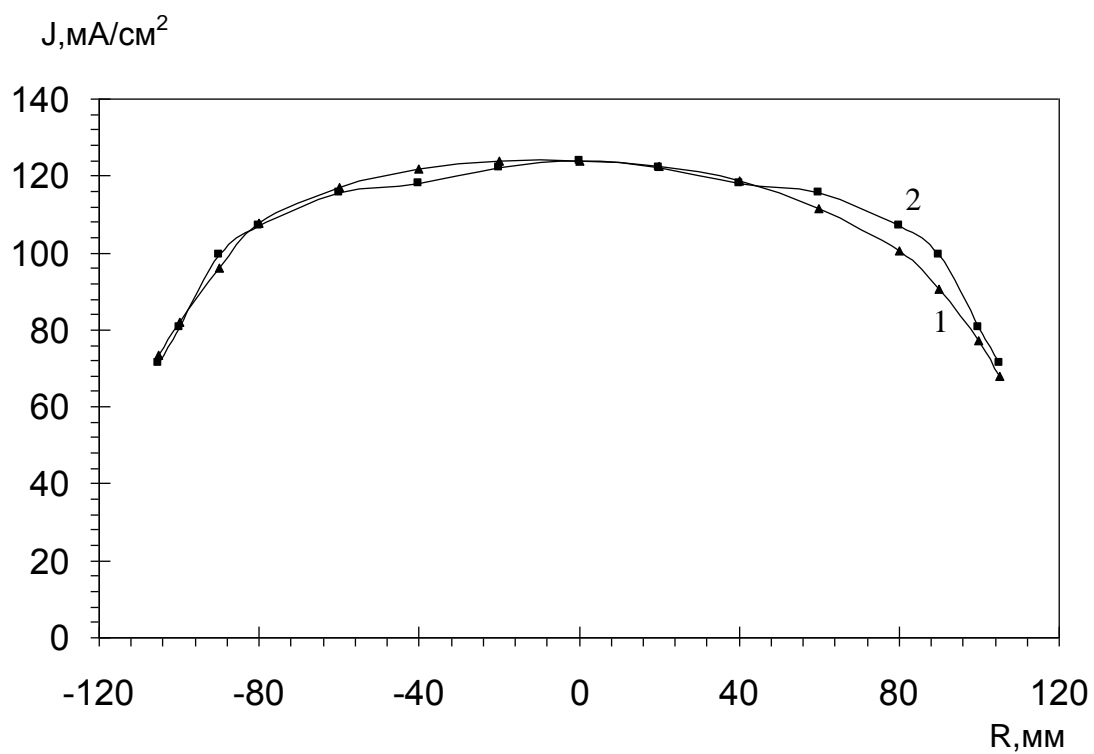


Рис.13. Профиль плотности ионного тока эмиттера: 1 – с экраном; 2 – без экрана.

Заключение

В рамках разработки и возможной оптимизации конструкции ВЧ плазменного эмиттера с областью вытягивания пучка диаметром 20 см и плотностью ионного тока до 350 мА/см^2 проведены предварительные эксперименты на ВЧ плазменных эмиттерах диаметром камеры 145 мм и 234 мм. Результаты этих экспериментов показали, что:

- При уменьшении частоты ВЧ-разряда с 4.6 МГц до 1.4 МГц напряжение на антенне уменьшилось примерно в 1.3 раза при одинаковой плотности ионного тока. При этом изменение частоты ВЧ-разряда незначительно влияет на неоднородность профиля плотности ионного тока.
- При установке ферритовых полуколец на антенну наблюдалось уменьшение поглощаемой разрядом мощности в 1.4 раза при работе на частоте 4.6 МГц
- Алюминиевый фарадеевский экран, установленный для защиты керамической поверхности плазменной камеры от модификации, не влияет на неоднородность профиля плотности ионного тока.

Для плотности тока 120 мА/см^2 на эмиттере диаметром 145 мм поглощаемая разрядом мощность равна 6 кВт, а на эмиттере диаметром 234 мм – 11 кВт. На основе этого можно сделать предположение, что поглощаемая разрядом мощность практически линейно зависит от диаметра камеры ($\frac{234}{11} \approx \frac{145}{6} \approx 22$). Это позволяет оценить мощность, которая нужна для значения плотности ионного тока равного 350 мА/см^2 на эмиттере диаметром 300 мм. Зная значения отношений диаметров к мощностям камер 145 мм и 234 мм для плотности тока равной 120 мА/см^2 и зная о том, что мощность линейно зависит от плотности ионного тока, получаем оценку $P = 40 \text{ кВт}$.

В настоящее время изготавливаются ВЧ генератор мощностью 50 кВт и плазменный эмиттер с камерой диаметром 300 мм, на котором планируется вести дальнейшие эксперименты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крупник Л.И., Терёшин В.И. Методы активной корпускулярной диагностики плазмы (обзор). -Физика плазмы, 1994, т.20, № 2, с.157-170.
2. Initial beam operation of 500 keV negative-ion based NBI system for JT-60U / М.Kuriyama, N.Akino, Т.Аoyagi a. o. -In: 19th Symposium on fusion technology, Lisbon, Portugal, 1996, p.693-696.
3. М.Д.Габович. Физика и техника плазменных источников ионов. -М, Атомиздат, 1972
4. Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P.P. et al, Rev. Sci. Instrum., 2000, vol.71, No 10, p.3728–3735.
5. Alexander N. Karpushov et al, Fusion Engineering and Design, 2003, vol. 66-68, p.899-904, Proceedings of 22nd Symposium on Fusion Technology (Finland, 2002).
6. Optimization of an ion-optics system with “thick” electrodes for the diagnostic neutral beam injector for TEXTOR tokamak / V.I.Davydenko, A.A.Ivanov, A.I.Rogozin et al, Rev. Sci. Instrum., 1997, vol.68, No 3, p.1418-1422.
7. А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В.Шиховцев, Высококачественный ионный источник с повышенным содержанием протонов в пучке, Журнал технической физики, 2007, том.77, вып.1, стр.104-108.
8. А.А.Ivanov, P.P.Deichuli, A.Kreter et al, Characterization of ion species mix of the TEXTOR diagnostic hydrogen beam injector with a rf and arc-discharge plasma box, Rev. Sci. Instr., 2004, v.75, №5, pp. 1822-1825.