

**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 физики плазмы**

Винокуров Иван Александрович

**Название работы:**

**Исследование влияния фарадеевского экрана на генерацию плазмы в  
высокочастотном драйвере**

**Научный руководитель:**

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

**Новосибирск 2015 год**

## **Оглавление**

Введение.....	3
1. Принцип образования плазмы в высокочастотном разряде .....	5
2. Схема высокочастотного плазменного эмиттера .....	10
3. Измерения параметров плазмы зондовым методом .....	13
4. Анализ влияния конструкции плазменного эмиттера на его параметры ....	15
Запланированные исследования .....	19
Выводы и заключение.....	21
Список литературы .....	22

## **Введение**

Плазменные источники широко используются в современной науке, промышленности, и даже в быту. В зависимости от целей, к плазме предъявляются определенные требования, которые определяют характеристики и конструктивные особенности плазменного источника. В исследованиях термоядерных систем источники плазмы используются в составе инжекторов нейтральных частиц для нагрева и поддержания плотности плазмы, а также в качестве устройств активной корпускулярной диагностики. Основными параметрами инжекторных систем являются мощность, размер и состав пучка, угловая расходимость, длительность импульса. От мощности инжектируемого пучка зависит степень его воздействия на плазму. Маломощный пучок не оказывает значительного влияния на плазму, однако позволяет получить информацию о её свойствах. Данная особенность маломощных пучков применяется в диагностических инжекторах, так как они не должны нагревать плазму. С другой стороны, воздействие мощного пучка нагревает плазму, что используется в нагревных инжекторах. В современных установках, где поперечный размер плазмы достигает 1 м, размер диагностического пучка должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить локальность измерений. Характеристики инжектируемых пучков для каждой установки индивидуальны, вследствие чего возникает необходимость в применении инновационных решений при создании каждой инжекционной системы [1].

Деятельность лаборатории 9-0 ИЯФ СО РАН направлена на разработку и создание инжекторов атомов водорода для различных термоядерных исследований. В данный момент ведется разработка нагревного инжектора с мощностью более 1 МВт, энергией до 1МэВ. Основной частью инжектора является водородный плазменный эмиттер на основе отрицательных ионов водорода, которые извлекаются и ускоряются ионно-оптической системой, а затем перезаряжаются в нейтралы. В данном случае, в качестве источника плазмы выступает высокочастотный плазменный эмиттер. Данный тип

источника выбран, исходя из его возможности генерировать плазму в течение относительно длительного времени (десятков секунд). Большая длительность разряда приводит к высокой тепловой нагрузке всех элементов эмиттера. Больше всего нагреву подвержены стенки газоразрядной камеры. Для её защиты используется охлаждаемый фарадеевский экран. В то же время, экран ослабляет электромагнитное поле внутри камеры, что негативно влияет на плотность генерируемого ионного пучка. Однако, ослабление поля зависит от конфигурации фарадеевского экрана. Для того, чтобы выбрать наиболее оптимальную конфигурацию, необходимо провести испытания различных экранов и проверить, как они влияют на плотность ионов.

Цель данной работы – разработка фарадеевского экрана для высокочастотного драйвера ионов, входящего в состав нагревного инжектора. В работе исследуется влияние экрана на генерацию плазмы. С помощью многосеточного зонда измерен профиль плотности ионного тока насыщения, измерены зависимости плотности ионного тока от напряжения на антенне. Данное исследование необходимо для разработки итогового варианта охлаждаемого фарадеевского экрана.

## 1. Принцип образования плазмы в высокочастотном разряде

Ионизация газа (водорода) в рабочем объеме происходит благодаря воздействию переменного электрического поля. В возбуждении ВЧ разряда применяется индукционный метод. Его суть состоит в следующем: на газовую камеру намотана катушка, к которой подводится ВЧ напряжение, варьируемое в области нескольких киловольт, тем самым создавая ВЧ контур. Ток, порядка сотни ампер, бегущий по катушке, создает переменное вихревое магнитное поле, индуцирующее переменное электрическое поле. Его силовые линии описывают концентрические окружности в объеме камеры. Это электрическое поле заставляет электроны колебаться и сталкиваться с молекулами газа, что приводит к ионизации и поддержанию газового разряда в камере.

Механизм поглощения мощности в плазме высокочастотного разряда в общем случае достаточно сложен. В нашем случае в разряде образуется слабоионизованная плазма, в которой проводимость определяется упругими столкновениями электронов с молекулами газа. Разряд возбуждается на частоте  $f = \omega/2\pi = 4$  МГц, которая много меньше электронной плазменной частоты

$$\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 \cdot \frac{n}{m_e}} \sim 5,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$$

(при  $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) и немного больше частоты столкновений электронов  $v_{eo} \sim n_o \cdot \sigma_{eo} \cdot V_e \sim 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ , где  $V_e = \sqrt{2 \cdot kT_e / m_e} = 1,3 \cdot 10^8 \text{ см/с}$  – тепловая скорость электронов,  $\sigma_{eo} \sim 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  – сечение упругого столкновения электронов с молекулами водорода. Возбуждаемое антенной электромагнитное поле экранируется токами, текущими в плазме. Ток в плазме скинирован на размере  $\delta$ , где сосредоточены ВЧ–поля и энерговыделение. Размер скин–слоя, который принято называть аномальным [2], в нашем случае составляет

$$\delta_{an} = \left( \frac{c^2 \cdot V_e}{\omega \cdot \omega_p^2} \right)^{1/3} \sim 1 \text{ см.}$$

Эта величина меньше длины пробега электронов до столкновения с частицами газа  $\lambda_0 \approx V_e/v_{e0} \sim 7$  см. При этом эффективная высокочастотная проводимость плазмы

$$\sigma_{эфф} = \sigma \cdot \left( \frac{v_e}{\omega} \right)^2 \cdot \frac{\omega \cdot \delta_{ан}}{V_e} \sim 1,6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1},$$

где  $\sigma = \frac{n \cdot e^2}{m_e \cdot v_{e0}}$  – столкновительная проводимость плазмы.

В плазменном эмиттере выделяется мощность около 40 кВт. При его работе в квазистационарном режиме (единицы – десятки секунд) тепловые нагрузки на стенки камеры очень большие. Для защиты керамических стенок плазменной камеры от тепловых потоков плазмы в нее устанавливается водоохлаждаемый фарадеевский экран, представляющий собой цилиндр с продольными щелями. Экран существенно ослабляет электромагнитное поле внутри плазменной камеры. Анализ влияния экрана на поле внутри камеры был проведен М.А.Тиуновым с помощью разработанной им программы MAGEL3D. Результаты расчетов электромагнитного поля для источника с фарадеевским экраном методом граничных интегральных уравнений приведены в статье [3]. В статье представлены результаты численного решения системы уравнений Максвелла в проводящей изотропной среде в отсутствии дисперсии, учитывая вихревые токи во всех проводящих частях источника. Длина волны ВЧ разряда много выше размера установки, что позволяет воспользоваться квазистатическим приближением при расчете электромагнитных полей. Результаты моделирования электромагнитного поля с однослойным экраном приведены на рис.1.

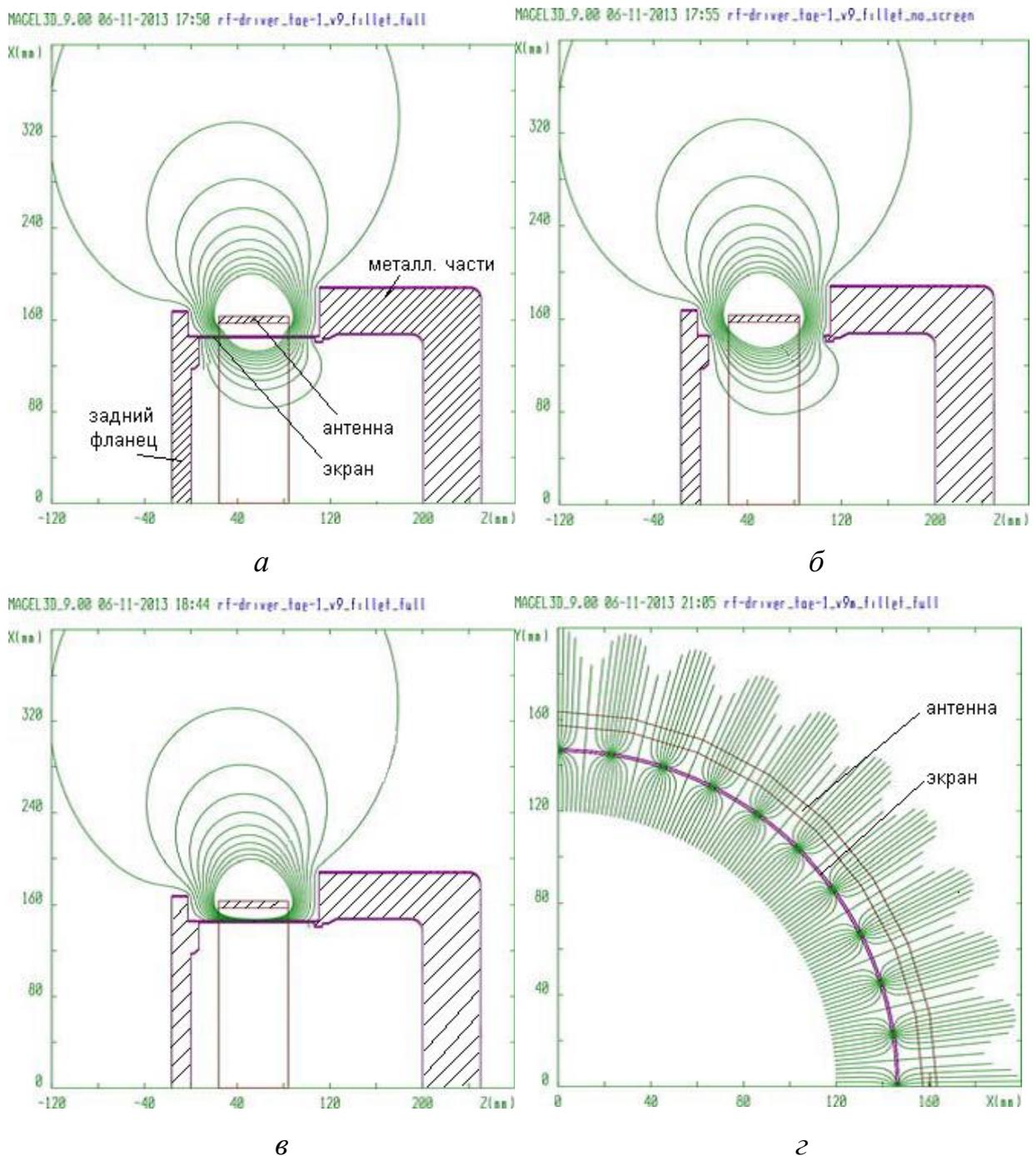
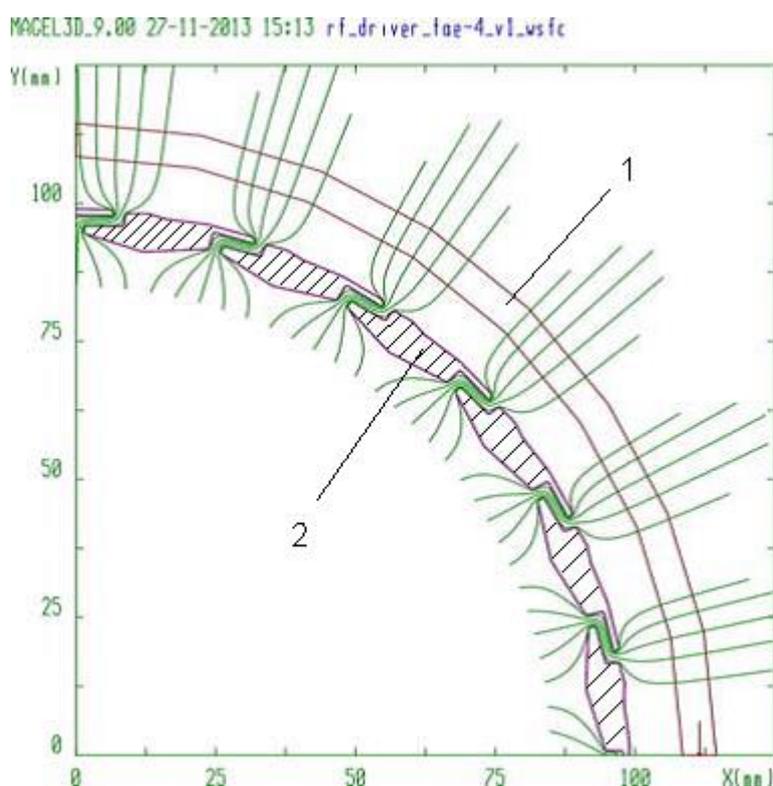


Рис.1. Результаты расчетов силовых линий квазистационарного магнитного поля ВЧ источника плазмы без экрана (а) и с тонким экраном Фарадея (б – г): б – ZX проекция линий, расположенных в плоскости RZ, проходящей через центр разреза в экране; в – ZX проекция линий, расположенных в плоскости RZ, проходящей через центр пластины экрана; г – XY проекция линий, стартующих с радиуса 120 мм в центральной плоскости антенны.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов силовых линий квазистационарного магнитного поля ВЧ источника плазмы.

«Из рис. 1, а – г можно видеть, что наличие экрана Фарадея приводит к выталкиванию силовых линий магнитного поля в зазор между пластинами экрана и в пространство между экраном и катушкой индуктивности» [3].

На рис.2 представлены результаты моделирования полей с толстым экраном, где происходит Z перекрытие:



*Рис. 2. Результат расчетов магнитных силовых линий при наличии толстого экрана Фарадея: 1 – антенна, 2 – фарадеевский экран.*

«Сравнение магнитного потока снаружи экрана на рис. 1, г и 2 хорошо показывает, что толстый экран Фарадея сильнее выталкивает силовые линии магнитного поля в зазор между пластинами экрана и в пространство между экраном и катушкой индуктивности по сравнению с тонким экраном» [3].

Анализ моделирования дает основания рассчитывать на ослабление электромагнитного поля при прохождении фарадеевского экрана. Кроме того, видна локальная неоднородность силовых линий в области, прилегающей к

стенке экрана. Необходимо проанализировать, влияет ли данная неоднородность на форму профиля ионного тока насыщения и на эффективность генерации плазмы.

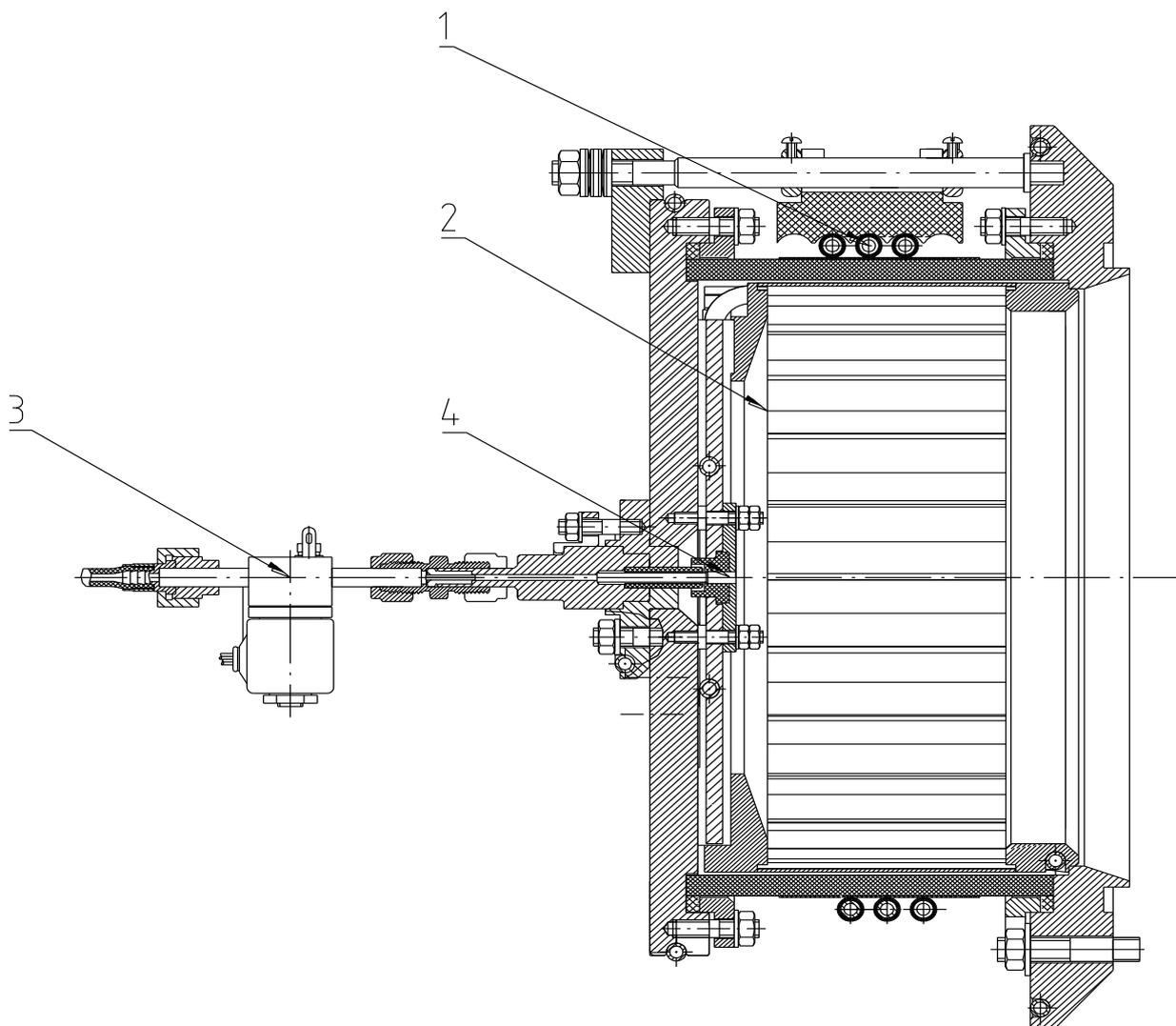
## 2. Схема высокочастотного плазменного эмиттера

Основной частью высокочастотного плазменного эмиттера, подробная схема которого представлена на рисунке 3, является цилиндрическая керамическая ( $Al_2O_3$ ) камера: внутренний диаметр – 180 мм, высота камеры – 100 мм, толщина керамики – 6 мм.

Газ (водород) подается через клапан с диафрагмой и узел поджига (на заднем фланце в центре). Поток газа в источник регулируется давлением водорода перед клапаном и размером диафрагмы в клапане.

На камеру в три витка намотана антенна, изготовленная из медной трубки диаметром 6 мм. Витки изолированы друг от друга термоусаживающейся трубкой. Толщина изоляции – 1,5 мм. Диаметр трубки с изоляцией – 9 мм. В начальной постановке эксперимента витки плотно прилегали друг к другу. В ходе эксперимента было предложено раздвинуть витки катушки и оценить изменения. Толщина антенны с плотной намоткой – 30 мм. Длина антенны с широкой намоткой составляет 55 мм. Высокочастотное напряжение подводится к антенне через масляный разделительный и согласующий трансформатор [4]. Разряд в камере инициируется поджигом и поддерживается электромагнитным полем антенны. Устройство поджига находится на заднем фланце и состоит из двух электродов, разделенных керамическим изолятором. Напряжение между ними приводит к пробое изолятора.

В керамическую камеру вставлен молибденовый фарадеевский экран, состоящий из двух цилиндров, толщиной 0,5 мм каждый, с продольными прорезями, через которые проходит ВЧ поле. Зазор между цилиндрами 2 мм. Экран принимает тепловые нагрузки из разряда и поглощает поток частиц на стенку камеры, предотвращает металлизацию керамики в результате распыления металлических элементов (задний фланец и др.), но в то же время ослабляет эффективность проникновения ВЧ поля, так как оно проникает в камеру только через прорези экрана. Внешний вид экрана представлен на рисунке 4.

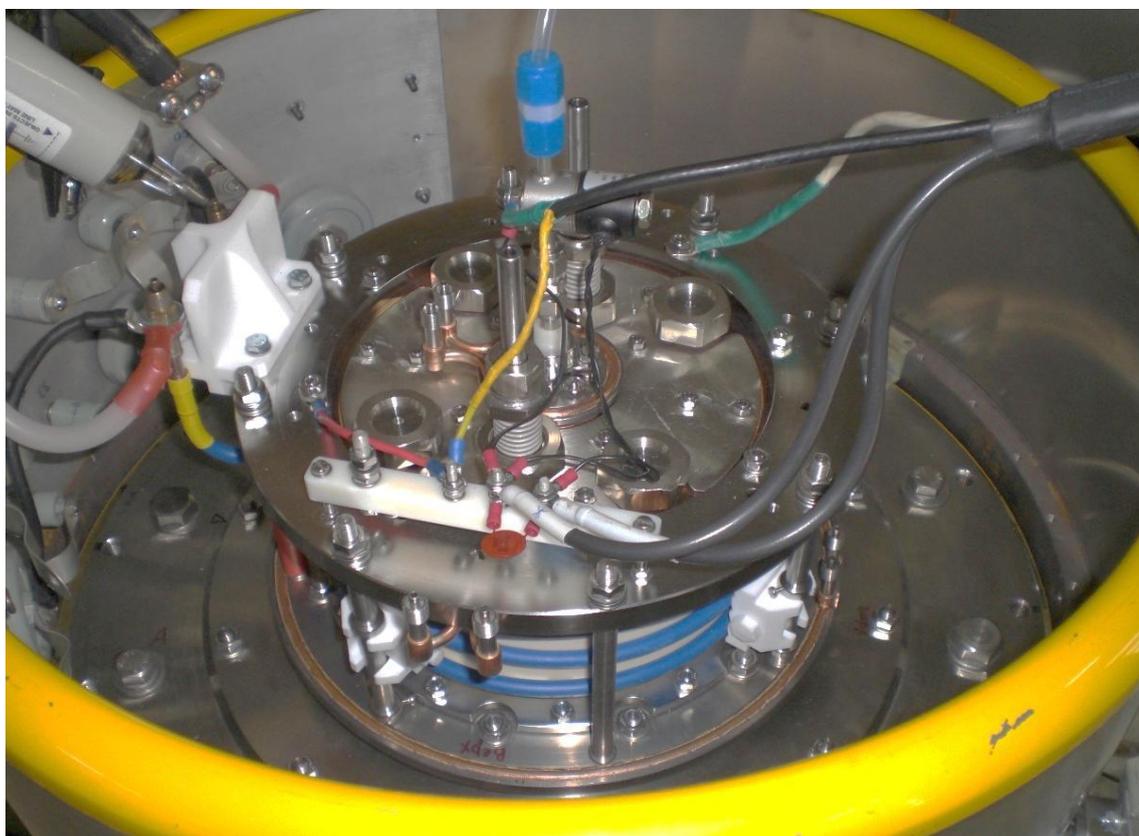


*Рис. 3. Схема ВЧ эмиттера: 1 – антенна, 2 – фарадеевский экран, 3 – клапан напуска газа, 4 – устройство поджига.*



*Рис.4. Фото двухслойного молибденового фарадеевского экрана.*

Внешний вид ВЧ эмиттера представлен на рисунке 5.

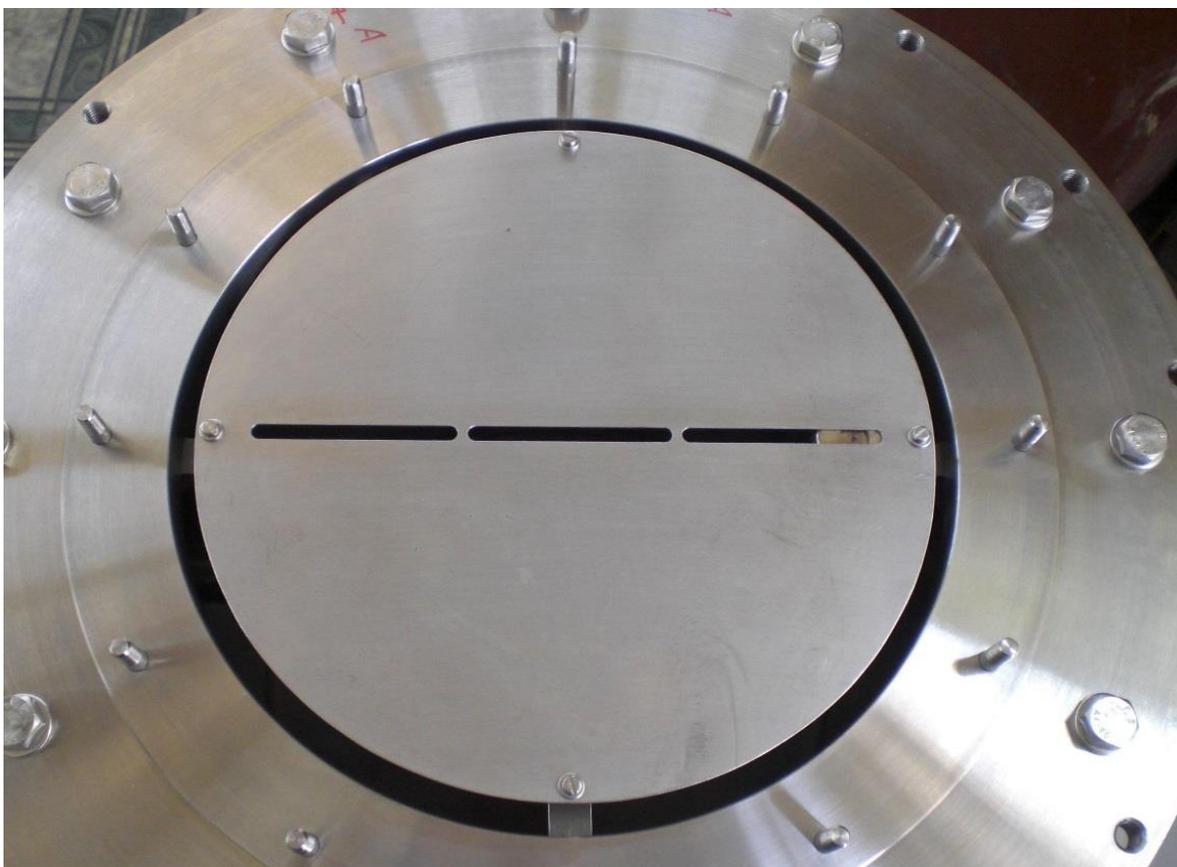


*Рис.5. Фото ВЧ эмиттера.*

### 3. Измерения параметров плазмы зондовым методом

В ходе данной работы измерены профили плотности ионного тока насыщения, а также зависимости плотности ионного тока от напряжения на антенне. Регистрировались положительные ионы водорода, преимущественно протоны и небольшая часть молекулярных ионов  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ . Отрицательные ионы, которые ускоряются ионно-оптической системой (ИОС), формируются вблизи плазменной сетки ИОС при наличии цезия. Изучение их формирования не является предметом данной работы. Известно, что их количество напрямую зависит от плотности ионного тока эмиттера.

Профили плотности ионного тока измерялись сеточным зондом, установленным в плоскости, где эмиттер подсоединяется к расширительной камере, в которой формируются отрицательные ионы и из которой они вытягиваются и ускоряются ИОС. Зонд установлен за пластиной с тремя прорезями по диаметру шириной 7 мм, изображенной на рисунке 6, вдоль которой движется зонд, измеряя плотность ионного тока с шагом 10 мм.



*Рис.6. Фото пластины зонда.*

Схема сеточного зонда представлена на рис. 7. Коллектор зонда находится под отрицательным потенциалом -2,2 кВ, вытягивающим положительные ионы плазмы. Для подавления эффекта вторичной эмиссии перед коллектором установлен электрод в виде сетки под потенциалом -2.4 кВ. Эта сетка возвращает на коллектор электроны, выбитые ионами из коллектора. Ионы проходят через запирающую сетку, затем попадают в коллектор. Ток коллектора измеряется осциллографом. Формула расчета плотности ионного тока с учетом диаметра входного отверстия и прозрачности сеток имеет вид  $j = \frac{I}{S_{эфф}} = \frac{U_{и}}{S_{эфф} \cdot R_{и}} = 78 \cdot U [B] \left( \frac{mA}{cm^2} \right)$ .

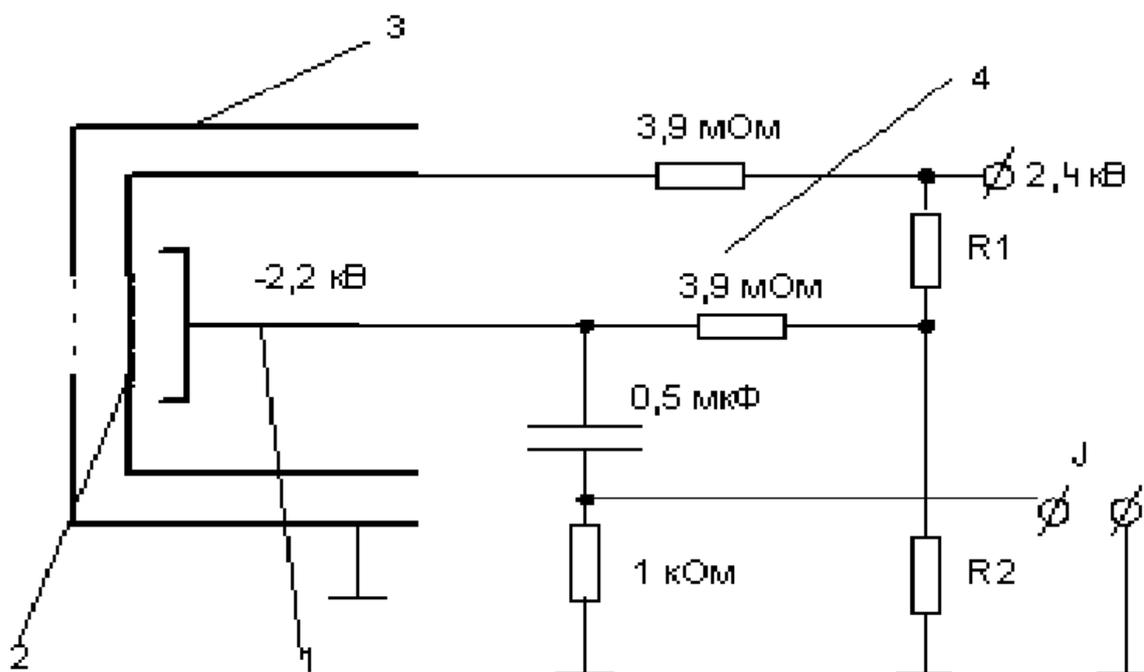
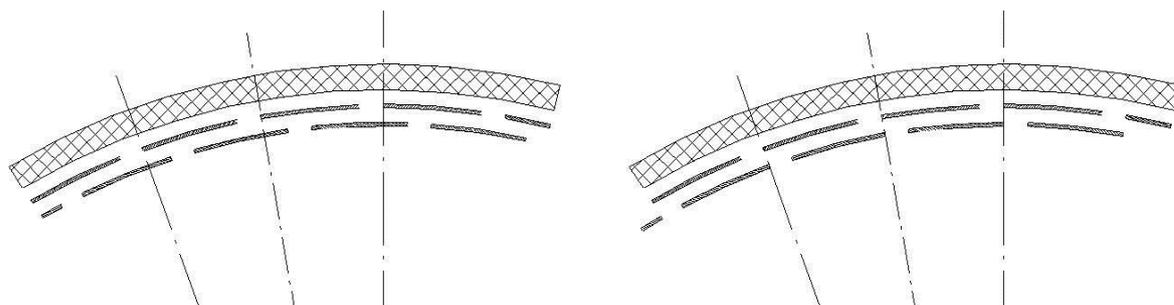


Рис.7. Сеточный зонд (схема): 1 – коллектор, 2 – запирающая сетка под потенциалом -2.4 кВ, 3 – корпус зонда с входным отверстием, 4 – схема измерений.

Во время измерения зависимости от напряжения на антенне зонд находился в центре камеры, изменялось напряжение на антенне.

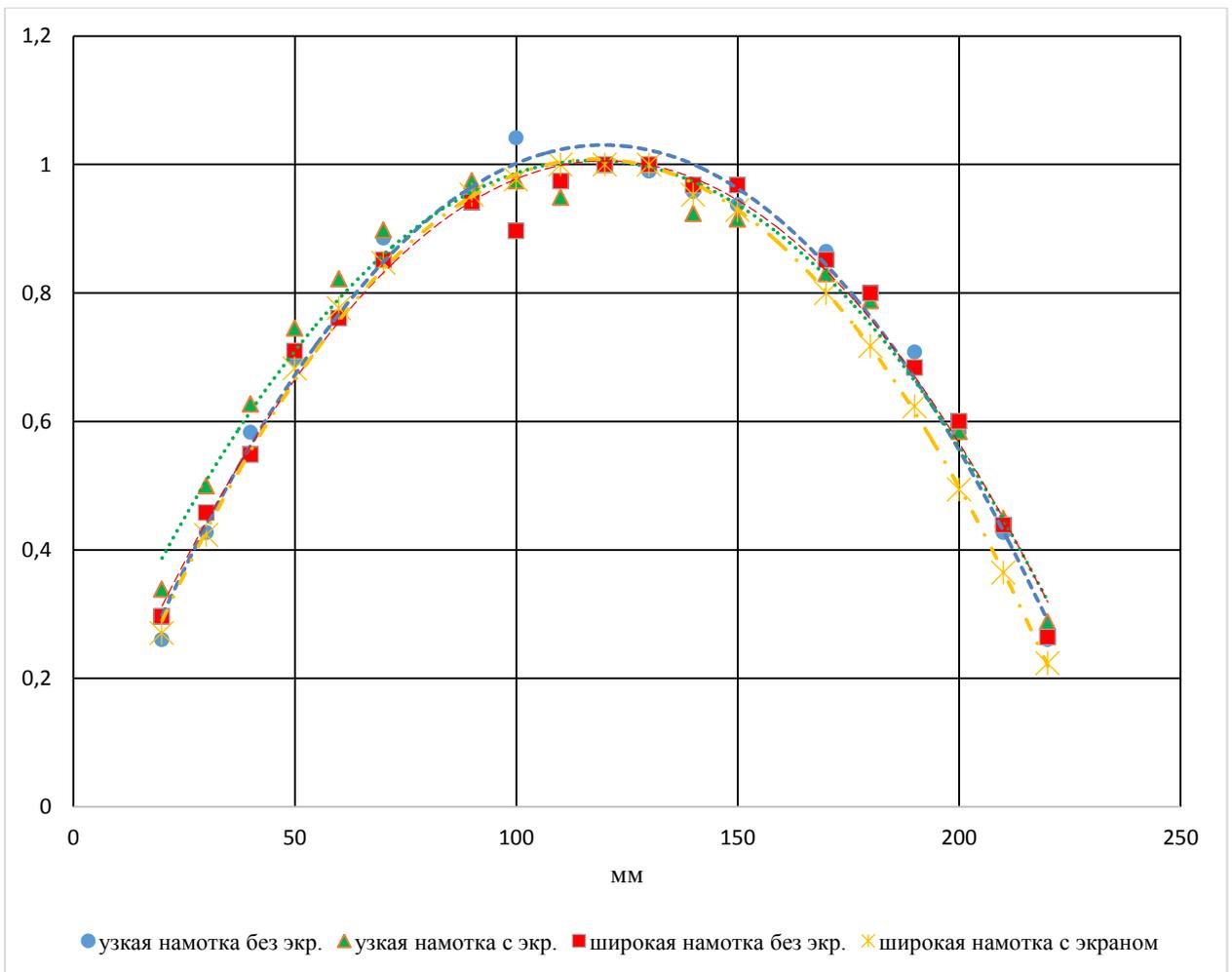
#### 4. Анализ влияния конструкции плазменного эмиттера на его параметры

Получено четыре профиля плотности ионного тока, которые соответствуют экспериментам с разными конфигурациями установки. Два эксперимента проведены без экрана. В одном из них антенна была намотана на газоразрядную камеру с расстоянием между витками  $\sim 4$  мм. В другом эксперименте витки антенны были раздвинуты на расстояние  $\sim 7$  мм. На рисунке 5 изображен вариант эмиттера с широкой намоткой антенны, в то время как на схеме 3 намотка антенны плотная. На этой же схеме видны дополнительные пазы, дающие возможность раздвинуть витки. В следующих экспериментах был задействован молибденовый фарадеевский экран. Проанализировано два варианта взаиморасположения слоев экрана, представленных на рисунке 8.



*Рис.8. Схема взаиморасположения слоев фарадеевского экрана*

Данные эксперименты также отличались и намоткой антенны. Сигналы с зонда были сведены в таблицу. По данным таблицы сформирован сводный график, представленный на рис.9. Значения нормированы на единицу, сглажены полиномиальным сплайном и сведены вместе. Это было сделано, чтобы понять, в какой конфигурации профиль плотности ионного тока имеет менее крутой спад по радиусу. По графикам видно, что распределения плотности ионного тока в разных экспериментах с точностью около 10% совпадают.



*Рис.9 Сравнительный график профилей плотности ионного тока*

Кроме профилей плотности ионного тока были получены графики зависимости плотности ионного тока от напряжения на антенне. Графики экспериментов сгруппированы и выделены цветом. Синяя группа графиков описывает плотность тока без экрана. Зеленая группа отличается наличием двойного молибденового экрана. Отдельными цветами выделены эксперименты, отличающиеся от других конфигурациями экрана.

Сводный график зависимости плотности ионного потока от напряжения на антенне, представленный на рис.10, позволяет сделать выводы об эффективности того или иного варианта установки. Эксперименты без фарадеевского экрана показали максимальную плотность тока ионов. Рост плотности тока ионов насыщения в этом случае прямо пропорционален напряжению, приложенному к антенне.

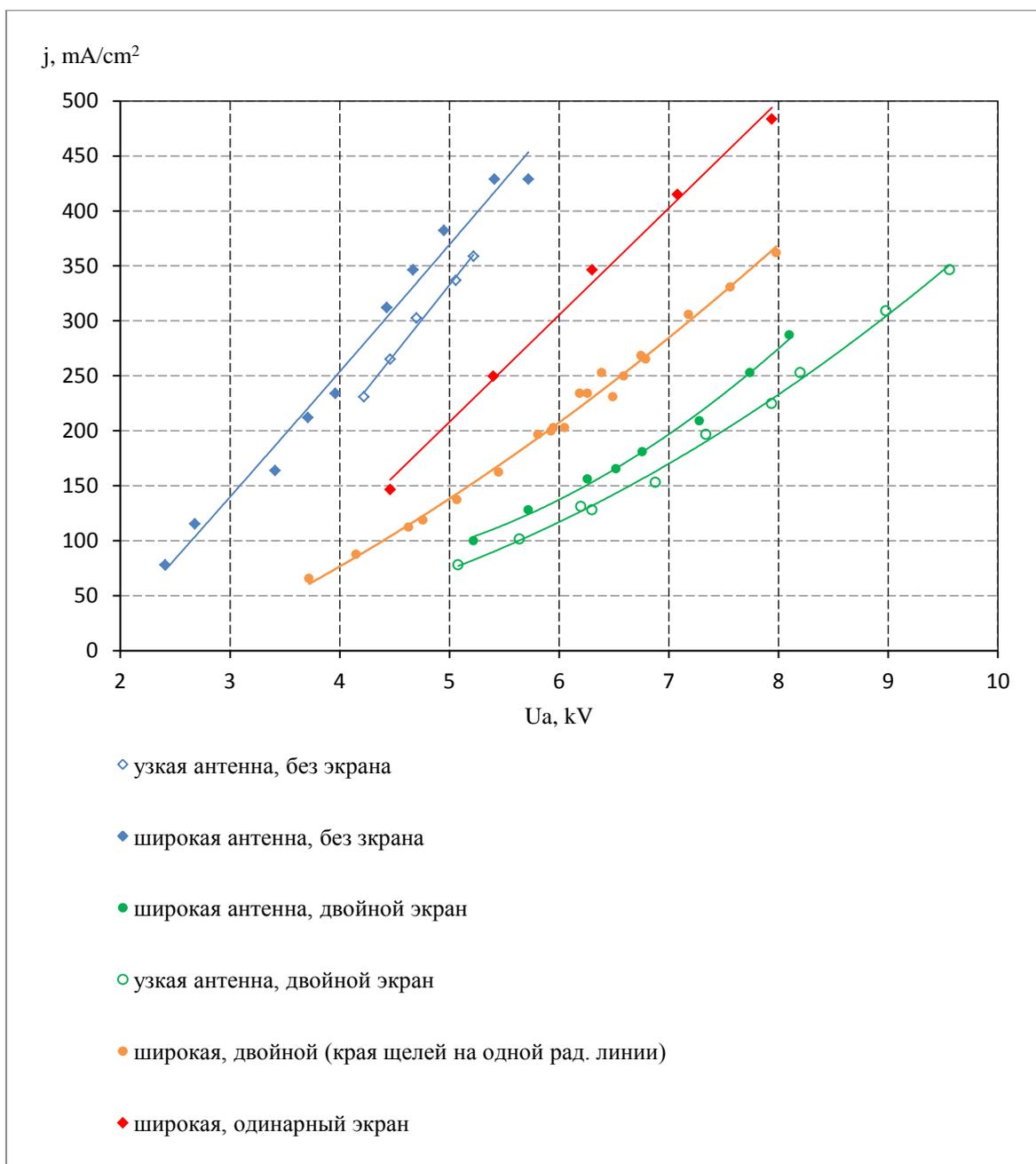


Рис.10 Сводный график зависимости ионного тока насыщения от напряжения антенны.

Согласно экспериментальным данным, конфигурация антенны с раздвинутыми витками увеличивает генерацию ионов при заданном напряжении на антенне. Расширение витков уменьшает ее индуктивность. Таким образом, при прежнем напряжении на антенне ток в антенне увеличивается. Это приводит к увеличению плотности ионного тока. Это

видно в группах экспериментов как с экраном, так и без экрана. Поэтому в дальнейших экспериментах решено использовать антенну только с раздвинутыми витками.

Увеличение просвета между слоями двойного экрана облегчает проникновение электромагнитного поля внутрь камеры и увеличивает плотность ионов.

Одиночный слой молибденового экрана требует повышения напряжения для поддержания разряда на 2 кВ. Экран одинаково ослабляет проходящее электромагнитное поле при любом напряжении антенны.

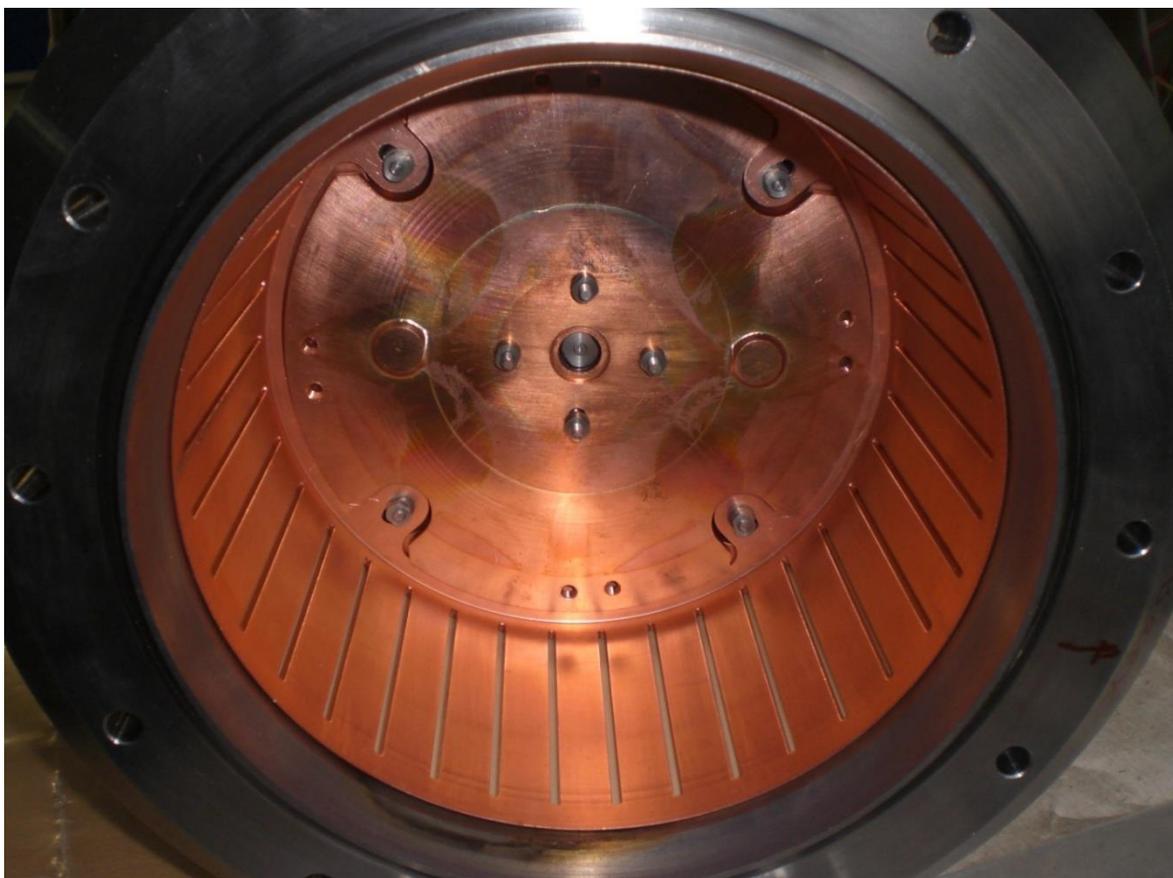
Упомянутый однослойный фарадеевский экран используется в экспериментах по формированию пучка отрицательных ионов водорода. Получен пучок с током  $\sim 1$  А при энергии 90 кэВ. Источник стабильно работает с длительностью формирования пучка 7 с. В отдельных импульсах на пониженной ВЧ мощности пучок формировался около  $\sim 25$  сек, но при этом видно было даже через керамику, что фарадеевский экран сильно разогревается.

В экспериментах с двойным молибденовым экраном для поджига плазмы требовалось напряжение не менее 5 кВ. Кроме того, для увеличения плотности ионного тока насыщения необходимо большее напряжение на антенне, по сравнению с экспериментами без экрана.

По графикам видно, что поджиг и поддержание разряда плазмы происходит при плотности ионного тока около  $70 \text{ mA/cm}^2$ . Без экрана такая плотность достигается при напряжении 2,5 кВ. В то же время, для того чтобы получить такую плотность ионов с экраном, необходимо увеличить напряжение до 5 кВ.

## Запланированные исследования

Для дальнейшего изучения влияния фарадеевского экрана на генерацию ионов будет проведен ряд экспериментов с новым экраном, изображенным на рисунке 11.

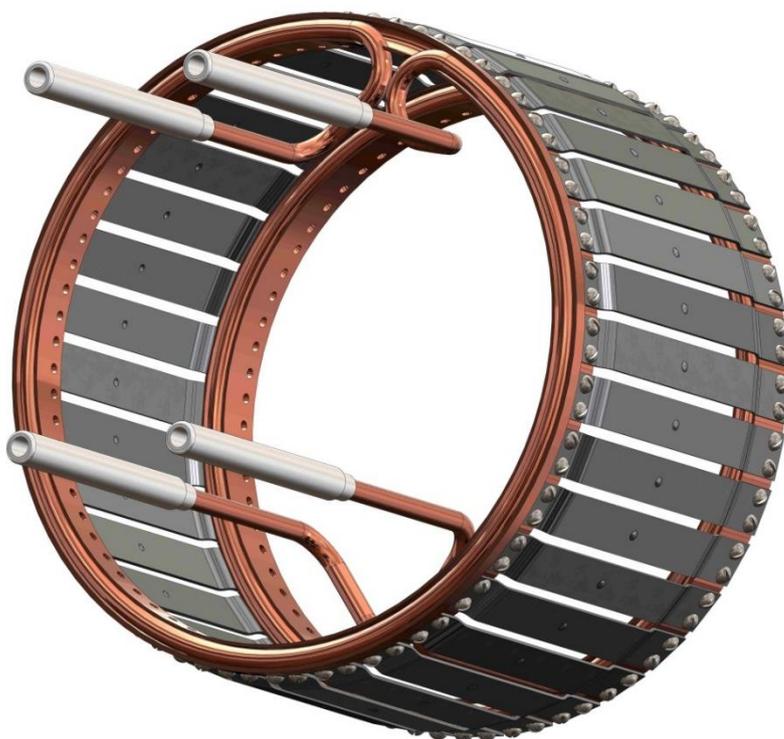


*Рис. 11. Фото однослойного медного экрана*

Новый экран отличается от предыдущего материалом и конструкцией. Экран однослойный, изготовлен из меди толщиной 3 мм, ширина прорезей составляет 3 мм. Преимущество двойной стенки заключается в отсутствии просвета между областью ионизации и керамической стенкой. Необходимо протестировать экран с толстой стенкой, так как в будущем планируется создать экран с внутренними водяными каналами охлаждения. При разработке ВЧ ионного источника нагревного инжектора для токамака ITER используется медный фарадеевский экран толщиной 3 мм с каналами водяного охлаждения в стенках, созданных методом электролитического осаждения [5]. Медная

стенка покрыта изнутри слоем молибдена толщиной  $\sim 3\mu\text{m}$  для предотвращения распыления [6].

Описанные выше экраны без водяного охлаждения используются в режимах работы длительностью нескольких секунд. Водяное охлаждение позволит заметно увеличить время работы. Спроектирован и находится в производстве вариант экрана с периферийным охлаждением. Объемная модель экрана показана на рисунке 12.



*Рис. 12. Фарадеевский экран с периферийным охлаждением*

Особенность данного экрана в том, что он не монолитный, как экраны рассмотренные ранее, а составной. Молибденовые пластины толщиной 1 мм прикручены к водохлаждаемым кольцам из бронзы. Использование этого экрана позволит увеличить время непрерывной работы источника по сравнению с неохлаждаемыми экранами. Конечной целью разработки экрана является увеличение времени его работы до 100 секунд. Анализ работы различных вариантов фарадеевского экрана позволяет приблизиться к выполнению данной задачи.

## **Выводы и заключение**

Проведены эксперименты по исследованию влияния фарадеевского экрана на эффективность генерации плазмы в ВЧ плазменном эмиттере.

Измерены распределения плотности ионного тока насыщения в различных вариантах конструкции экрана и антенны. Принимая во внимание методические и инструментальные погрешности, сделан вывод, что плотность намотки антенны, наличие или отсутствие фарадеевского экрана и его конструкция не имеют значительного влияния на форму профиля плотности ионного тока насыщения.

Измерены зависимости плотности ионного тока насыщения от напряжения на антенне в различных вариантах конструкции экрана и антенны. Результаты экспериментов показали, что фарадеевский экран значительно ослабляет электромагнитное поле внутри камеры, что приводит к значительному уменьшению плотности ионного тока по сравнению с вариантом без экрана.

Ионный источник с однослойным молибденовым фарадеевским экраном успешно работает и формирует пучок отрицательных ионов.

Подготовлен эксперимент для изучения влияния толстого (3мм) экрана.

Спроектирован и изготавливается фарадеевский экран с периферийным охлаждением.

## Список литературы

1. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г., Экспериментальные методы диагностики плазмы, Новосибирск, 1999.
2. Гинзбург В. Л. Рухадзе А. А.. - М. Наука, 1970, с.95. Волны в магнитоактивной плазме. Наука, 1970, стр. 95.
3. М. А. Тиунов, Полный расчет трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в приближении сильного скин-эффекта методом граничных интегральных уравнений, Вестник НГУ, Новосибирск, 2014 г., №2, Т. 9.
4. А.А. Иванов, И.В. Шиховцев, А.А. Подыминогин, И.И. Авербух, Т.Д. Ахметов, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, Плазменный эмиттер на основе высокочастотного разряда. Препринт ИЯФ 2001-40, 2001.
5. V.Heinemann et al, Design of the “half-size” ITER neutral beam source for the test facility ELISE, Fusion Engineering and Design, Elsevier, 2008 г., vol. 84.
6. D. Marcuzzi P., Agostinetti, M. Dalla Palma, H.D. Falter, Design of the RF ion source for the ITER NBI, Fusion engineering and design, Pavoda, Garching, Elsevier, 2006 г. vol.82.
7. V.A. Kadetov, Diagnostics and modeling of an inductively coupled radio frequency discharge in hydrogen, Bochum, University, Diss., 2004.