

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ (ФИЗИКА ПЛАЗМЫ)**

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(научно-исследовательский формат)**

Воинцев Вадим Александрович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: Разработка высокочастотного плазменного эмиттера с охлаждаемым фарадеевским экраном.

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н.

Зав. лаб. № 10 ИЯФ СО РАН

Сковордин Д. И. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

с. н. с. ИЯФ СО РАН

Шиховцев И. В. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2022

Оглавление

Введение	3
Глава 1. ВЧ плазменный эмиттер	6
1.1. ВЧ разряд.....	6
1.2. Общая схема и принцип работы	7
1.3. Постоянные магниты	8
1.4. Экран Фарадея	9
1.4.1. Виды и проблемы фарадеевских экранов	9
1.4.2. Охлаждаемый экран с z-образными щелями.....	12
Глава 2. Тестирование ВЧ драйвера	14
2.1. Основные задачи тестирования	14
2.2. Схема проведения эксперимента	14
2.2.1. Испытательный стенд	14
2.2.2. Методика измерения плотности ионного тока	15
2.2.3. Калориметрия эмиттера.....	17
2.3. Результаты тестирования	18
2.3.1. Плотность ионного тока	18
2.3.2. Мощность нагрева.....	20
2.4. Вывод из результатов	21
Глава 3. Модернизация ВЧ драйвера	22
3.1. Уменьшение вихревых потерь драйвера	22
3.1.1. Сопротивление потерь антенного контура	22
3.1.2. Нахождение сопротивления элементов эмиттера	23
3.1.3. Уменьшение потерь в уплотняющих кольцах	25
3.2. Увеличение подаваемой мощности.....	26
3.3. Испытание модернизированного эмиттера.....	26
3.3.1. Плотность ионного тока	26
3.3.2. Мощность нагрева.....	28
3.4. Выводы из экспериментов	29
Заключение.....	31
Список литературы.....	32

Введение

Инжекторы атомарных пучков используются во многих сферах науки и техники: в ускорителях, в литографии и в медицине для терапии. Наибольшее применение они находят в физике плазмы: атомарные инжекторы широко применяются как для нагрева плазмы в крупных термоядерных установках, так и для ее диагностики. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН подобные инжекторы (Рис. 1) разрабатываются уже много лет [1].

Процесс формирования атомарного пучка в инжекторах начинается с источника плазмы, где происходит ионизация рабочего газа. Рабочим газом является водород либо дейтерий. В качестве источника плазмы в атомарных инжекторах часто используются высокочастотные (ВЧ) плазменные эмиттеры (или ВЧ-драйверы). Горение плазмы в таких источниках поддерживается за счет индукционного ВЧ газового разряда.

Далее сформированная плазма вытягивается с помощью ионно-оптической системы, представляющей собой систему из нескольких медных сеточных электродов. Пучок ионов попадает в нейтрализатор, где за счет процессов ионизации, диссоциации, перезарядки частично нейтрализуется. После нейтрализатора ионы отклоняются магнитом в специальный приёмник, а полученный пучок нейтральных частиц либо инжектируется дальше экспериментальную установку, либо попадает в калориметр.

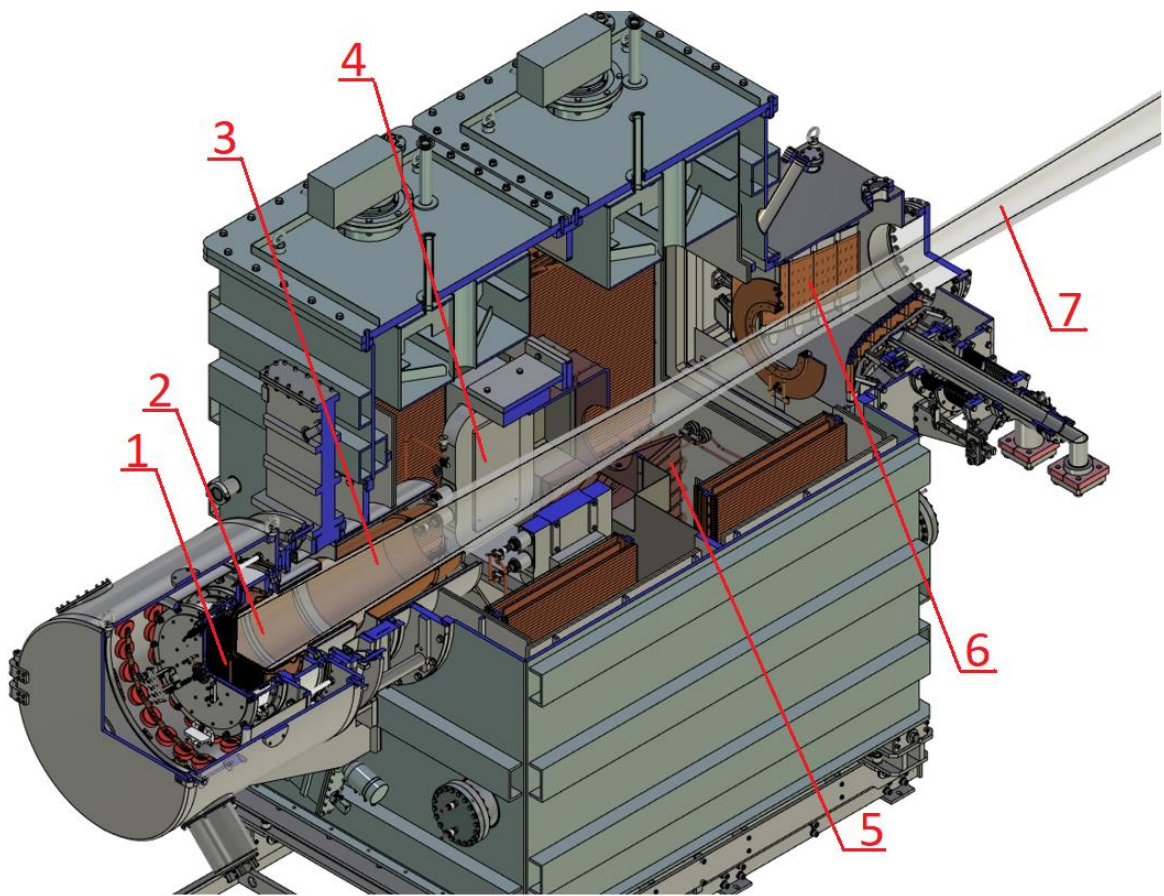


Рис. 1 Общая схема атомарного инжектора: 1 – ВЧ – плазменный эмиттер, 2 – ионно-оптическая система, 3 – нейтрализатор, 4 – отклоняющий магнит, 5 – приемник ионов, 6 – калориметр, 7 – атомарный пучок на выходе.

Для нагрева плазмы во многих современных термоядерных установках требуются инжекторы, способные работать с длительными, многосекундными пучками [2]. Одной из основных проблем, ограничивающих длительность работы инжектора, является нагрев его компонентов. В первую очередь это касается источника ионов. Значительная часть плазмы попадает на стенки плазменной камеры и нагревает ее. Также существенным может быть нагрев металлических элементов эмиттера за счет индуцируемых ВЧ полем вихревых токов [3].

Основной целью данной работы было разработать ВЧ плазменный эмиттер, способный стабильно работать с длительными импульсами (>10 с)

мощностью 40 кВт. Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Изучение принципов работы ВЧ плазменного эмиттера;
- 2) Исследование способов уменьшения нагрева элементов эмиттера;
- 3) Создание испытательного стенда и проведение экспериментов с плазменным эмиттером по измерению его основных параметров: распределения плотности ионного тока, поглощаемой мощности, эффективности передачи мощности в плазму, нагрева элементов.

Глава 1. ВЧ плазменный эмиттер

1.1. ВЧ разряд

Основным механизмом формирования плазмы в эмиттере является газовый разряд, поддерживаемый электромагнитным ВЧ полем [4].

Приложенное переменное электрическое поле наибольшее воздействие оказывает на самые легкие частицы плазмы – электроны. Уравнение движения с электрическим полем для свободных электронов в газе можно записать следующим образом:

$$m\dot{\vec{V}} = -e\vec{E} - m\nu\vec{V}. \quad (1)$$

В данном выражении \vec{V} и m – скорость электронов и их масса, $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t)$ – электрическое поле частоты ω и амплитуды $|\vec{E}_0|$. Второе слагаемое в правой части показывает изменение скорости за счет столкновений с атомами, ν – частота столкновений.

Проинтегрировав выражение (1), можно найти скорость движения электронов:

$$V = -\frac{veE_0}{m\omega(\omega^2 + \nu^2)} \sin(\omega t) + \frac{\omega eE_0}{m(\omega^2 + \nu^2)} \cos(\omega t). \quad (2)$$

Таким образом, движение электронов приобретает колебательный характер. Амплитуда этих колебаний A выражается следующим образом:

$$A = \frac{eE_0}{m\omega\sqrt{\omega^2 + \nu^2}}.$$

При достаточной интенсивности колебаний электроны между столкновениями могут набирать энергию необходимую для ударной ионизации атомов и молекул.

Из формулы скорости (2) можно оценить мощность, поглощаемую разрядом за один период колебаний:

$$P = \frac{1}{2} \frac{nve^2 E_0^2}{m(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (3)$$

где P – мощность в единице объема разряда, а n – концентрация электронов. Кроме напряжения и частоты электрического поля, поглощаемая мощность сильно зависит от давления газа. К примеру, при повышении давления растет частота столкновений, и для поддержки разряда требуется поле большей интенсивности.

Самым оптимальным по эффективности поглощения ВЧ мощности (3) является разряд, в котором частоты столкновений и поля совпадают. Частота ВЧ поля в эмиттере, используемом в данной работе, составляла около 4 МГц.

1.2. Общая схема и принцип работы

Разрабатываемый в данной ВЧ драйвер состоит из плазменной камеры (Рис. 2), имеющей цилиндрическую боковую поверхность, выполненную из алюминиевой керамики, вокруг которой намотана антенна (три витка медной трубки). Боковая поверхность камеры с помощью витоновых и металлических колец уплотнена на передний и задний кольцевые фланцы. По центру заднего фланца располагается узел поджига, а внутри него имеется магнитопровод с постоянными магнитами. Передний фланец стыкуется к расширительной плазменной камере. Внутри плазменной камеры вставлен фарадеевский экран. Радиус и длина камеры составляет ~100 мм.

ВЧ разряд начинается с пробоя по поверхности трубки-изолятора, в узле поджига, куда с помощью электромагнитного клапана подается водород. Далее происходит подача ВЧ напряжения на концы антенны. В результате горение в плазменной камере поддерживается при помощи азимутального

электрического поля, порождаемого вихревым магнитным полем, которое, в свою очередь, индуцируется током в антенне [5].

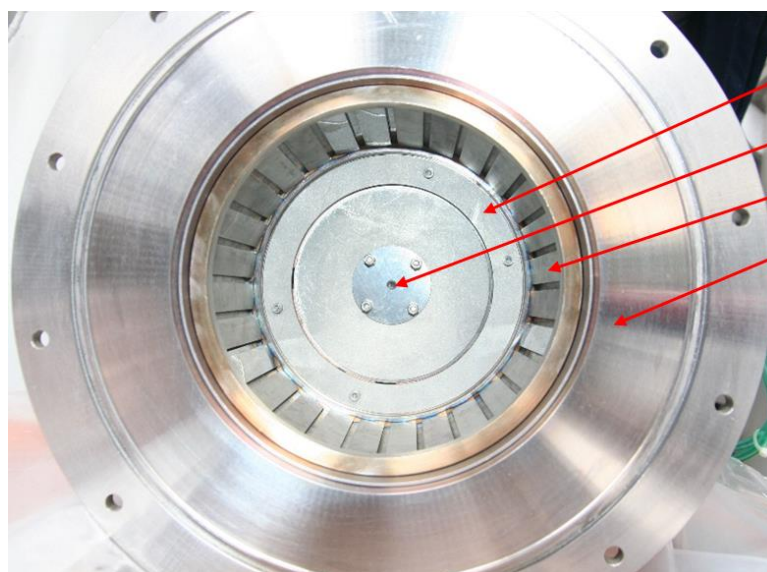
А)



Б)



В)



Задняя крышка ВЧ драйвера

Искровой поджиг

ЭФ

Фланец Расширительной
камеры

Рис. 2 Разрабатываемый ВЧ драйвер. А) – боковая керамика с ВЧ антенной, Б) – задний фланец с узлом поджига по его центру, В) – плазменная камера драйвера.

1.3. Постоянные магниты

Одна из основных проблем эмиттеров – это нагрев элементов плазмой, попадающей на внутренние стенки эмиттера: на заднюю стенку и керамику.

Уменьшению плазменного нагрева задней стенки способствуют

постоянные магниты, установленные в задний фланец эмиттера. Поле, создаваемое магнитами, имеет касповые конфигурации внутри плазменной камеры эмиттера. В результате его воздействия уменьшается диффузия электронов в заднюю стенку, что приводит не только к уменьшению нагрева, но и к увеличению эффективности разряда – использование магнитов значительно увеличивает плотность ионного тока [6]. Конфигурация магнитов, используемая в разрабатываемом эмиттере, показана на Рис. 3. Пары магнитов, стоящие напротив друг друга, ориентированы внутрь камеры север-юг.

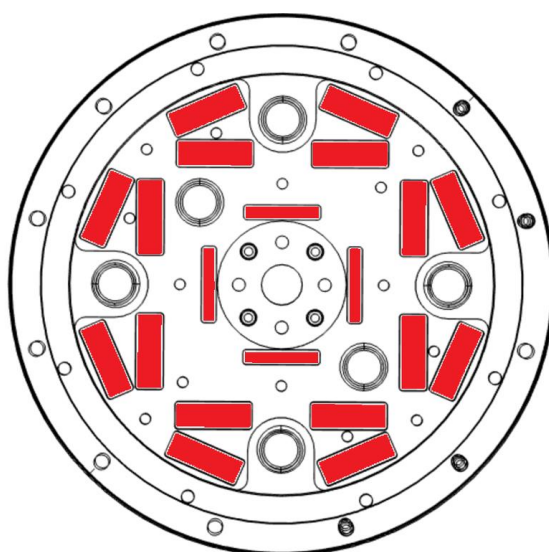


Рис. 3 Схема заднего фланца. Красным цветом выделено расположение постоянных магнитов.

1.4. Экран Фарадея

1.4.1. Виды и проблемы фарадеевских экранов

Для предотвращения возникновения сильных взаимодействий плазмы с боковой стенкой эмиттера и распыления керамики используют установленный внутри камеры драйвера фарадеевский экран – металлический цилиндр, в котором имеются щели продольные для пропускания ВЧ полей.

Эффективность защиты керамики зависит от толщины экрана, а также от формы его щелей. Как правило, более толстые экраны с z-образными щелями лучше защищают керамику. Недостаток экранов с относительно толстыми стенками состоит в их значительном влиянии на проникновение ВЧ полей (Рис. 4).

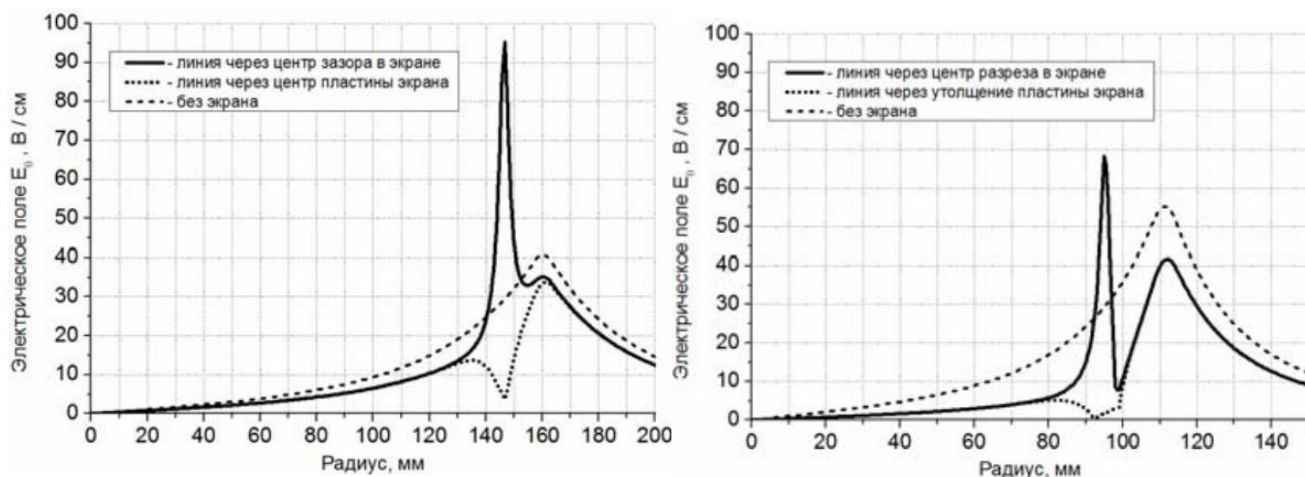


Рис. 4 Зависимость амплитуды электрического поля по радиусу эмиттера. Слева – с экраном толщиной 3 мм. Справа – с 7-миллиметровым экраном [7].

Как правило, чем толще экран, тем труднее в плазму вложить мощность и добиться необходимой плотности тока, так как значительная часть энергии ВЧ поля будет уходить на индуцированные вихревые токи в экране (Рис. 5).

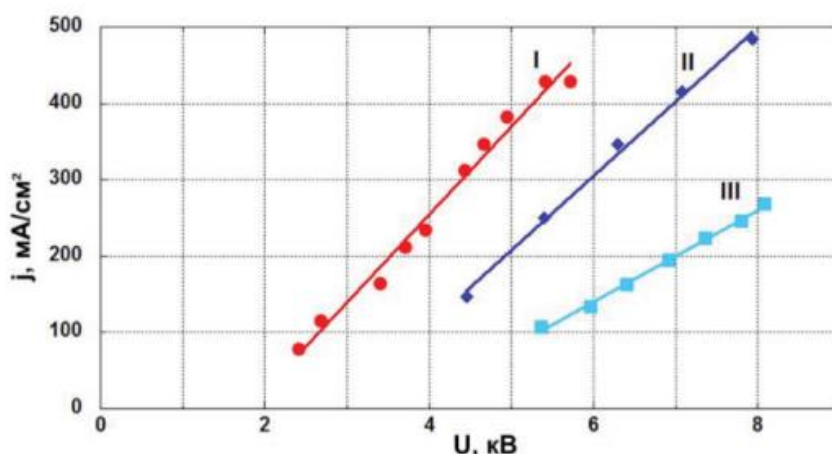


Рис. 5 Зависимости плотности тока ионов j от напряжения на антенне U для разных экранов в ВЧ драйвере для источника отрицательных ионов.

I – без экрана, II – с экраном толщиной 0,5 мм, III – с экраном толщиной 3 мм [8].

Свойства экранов также значительно зависят и от материала изготовления. На Рис. 6 показаны экраны, изготовленные из меди и молибдена.



Рис. 6 Фарадеевские экраны, установленные в эмиттеры.

Слева – медный тонкий экран, используемый в нагревных инжекторах.

Справа – толстый молибденовый экран с z – образными щелями, исследуемый в данной работе.

К примеру, к преимуществам меди можно отнести ее высокую теплопроводность и хорошую проводимость. Существенными недостатками меди являются ее низкая, относительно тугоплавких металлов, температура плавления, а также высокое распыление, что важно при длительной работе драйвера: во время горения плазмы материал экрана может распыляться и накапливаться в виде осадений на керамике, ухудшая проникновение ВЧ поля.

При этом вне зависимости от материала и конструкции любой экран на длительных импульсах может нагреваться до температур, при которых становится существенным их энергетическая светимость, и за счет теплового излучения нагревать керамику. Поэтому при работе с длительными импульсами для экрана необходимо хорошее иметь охлаждение.

1.4.2. Охлаждаемый экран с z-образными щелями

В данной работе используется 6-миллиметровой экран, пластины которого образуют z-образные щели. Пластины припаяны к трубкам из нержавеющей стали, по которым течет вода (Рис. 7). В качестве материала для пластин был выбран молибден, так как он является более тугоплавким: его температура плавления в 2,5 раза больше, чем у меди, – и потому что молибден имеет низкое, по сравнению с медью, распыление.

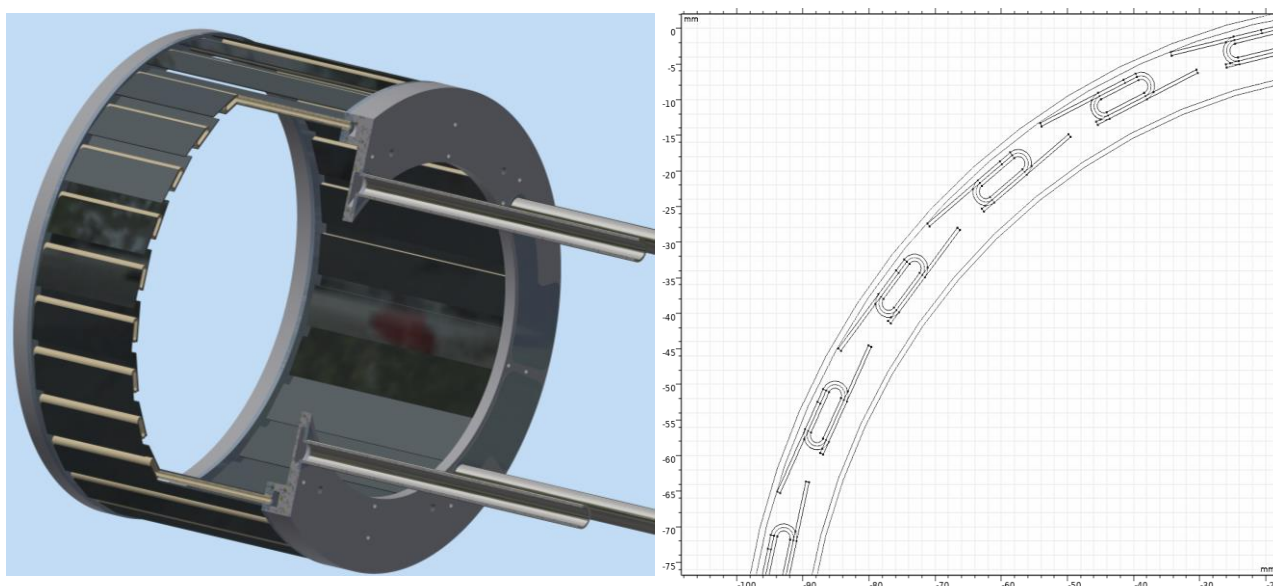


Рис. 7 Молибденовый экран с z-образными щелями и трубками охлаждения из нержавеющей стали: а) – модель ЭФ; б) – структура щелей.

С охлаждением такой экран способен длительное время защищать керамику от плазмы (Рис. 8). По результатам моделирования при нагрузке на экран 20 кВт в стационаре (время горения > 30 сек.) максимальная температура экрана локально не превышает 144 °С, а средняя составляет около 47 °С. Моделирование было выполнено в программе COMSOL.

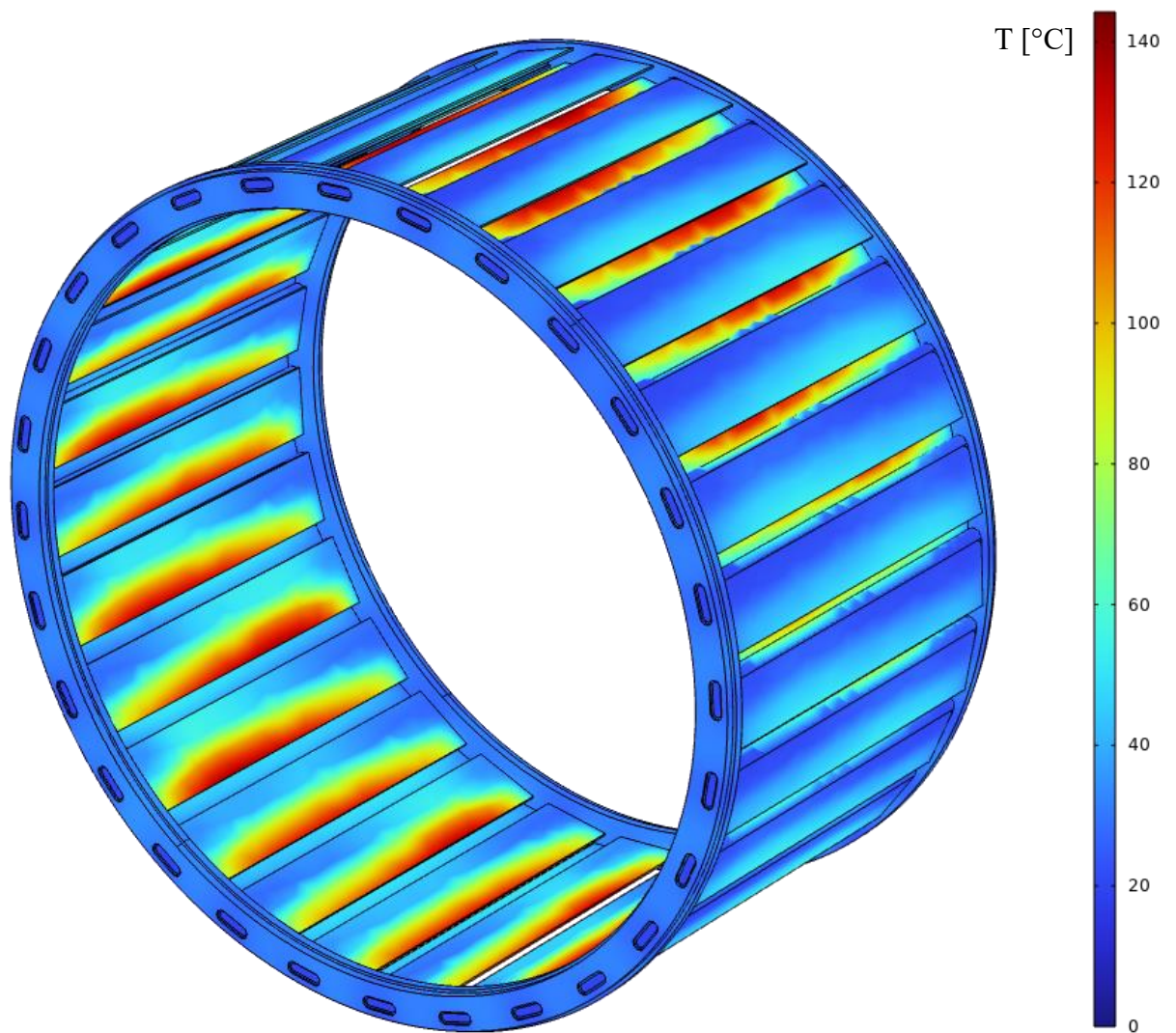


Рис. 8 Распределение температуры экрана с z-образными щелями при нагреве мощностью 20 кВт в стационаре с охлаждением (поток воды составляет 11,5 л/мин, а начальная температура воды составляет 23 °С). $T_{\text{макс.}} = 144$ °С, $T_{\text{средн.}} = 47$ °С.

Глава 2. Тестирование ВЧ драйвера

2.1. Основные задачи тестирования

Главной целью тестирования эмиттера является достижение стабильного горения плазмы при мощностях 40 кВт с длительными импульсами. Однако это может быть затруднительно, так как используемый в данной работе экран может значительно препятствовать проникновению ВЧ поля в плазму и поглощать значительную долю подаваемой мощности. Поэтому первостепенными задачами является исследование нагрева элементов эмиттера, особенно экрана, на который приходится большая часть нагрузки, и оценка мощности, поглощаемой плазмой.

Также, не менее важным является измерение основных параметров ВЧ драйвера: плотности ионного тока на выходе эмиттера и его профиль по диаметру.

2.2. Схема проведения эксперимента

2.2.1. Испытательный стенд

Для проведения экспериментов с плазменным эмиттером был собран испытательный стенд (Рис. 9). Драйвер был присоединен к объему, в котором с помощью системы из форвакуумного и турбомолекулярного насосов поддерживался вакуум. К самому эмиттеру, помимо систем питания и подачи газа, было подсоединено охлаждение отдельно для экрана, катушки, задней стенки и фланцев.

В качестве источника питания использовался ВЧ генератор на основе электронной лампы тетрода. Выходная мощность вычислялась по коэффициентам Бергса [9], по измерениям катодного тока и напряжения на аноде лампы.

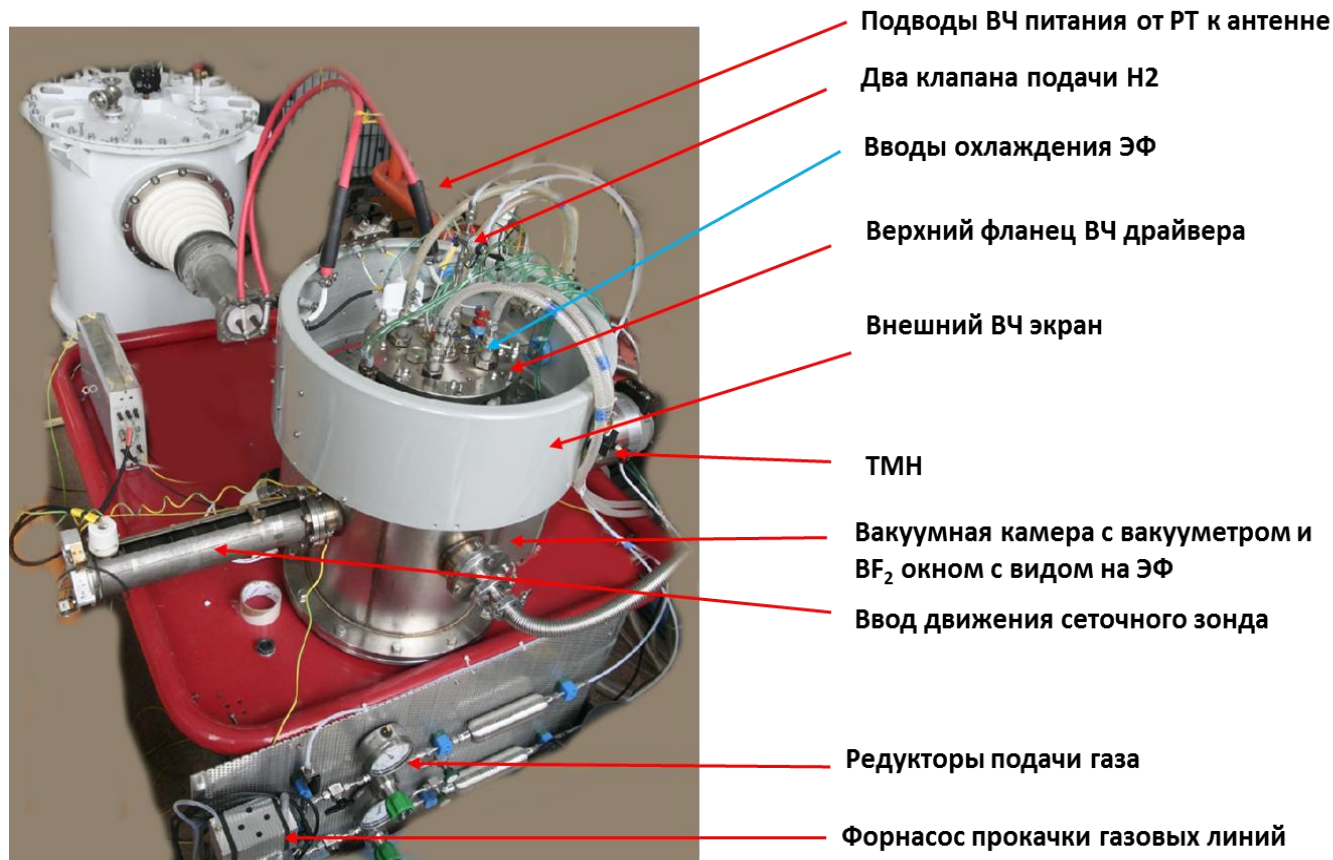


Рис. 9 Испытательный стенд, собранный для тестирования ВЧ драйвера.

2.2.2. Методика измерения плотности ионного тока

Для измерения плотности ионного тока внутрь вакуумного объема на кронштейне шагового двигателя перед эмиттером был вставлен сеточный зонд. Данный прибор состоит из коллектора ионов и двух сеточных электродов: заземленного и запирающего, не позволяющего вылетать электронам вторичной эмиссии, образовавшимся у коллектора (Рис. 10).

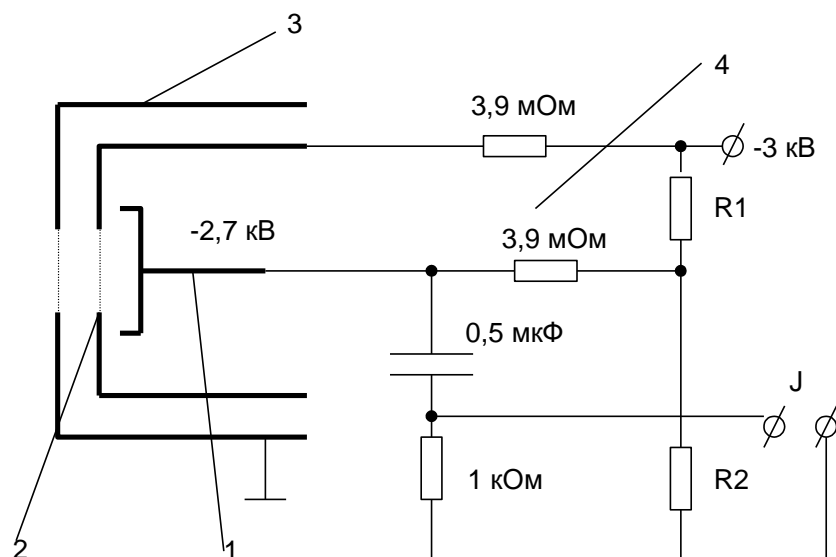


Рис. 10 Сеточный зонд и схема измерений: 1 – коллектор, 2 – запирающая сетка под потенциалом -3 кВ , 3 – заземленная сетка, 4 – схема измерений.

Между зондом и эмиттером была вставлена имитирующая первую сетку ионно-оптической системы инжекторов пластина из нержавеющей стали со щелью по диаметру (Рис. 11).

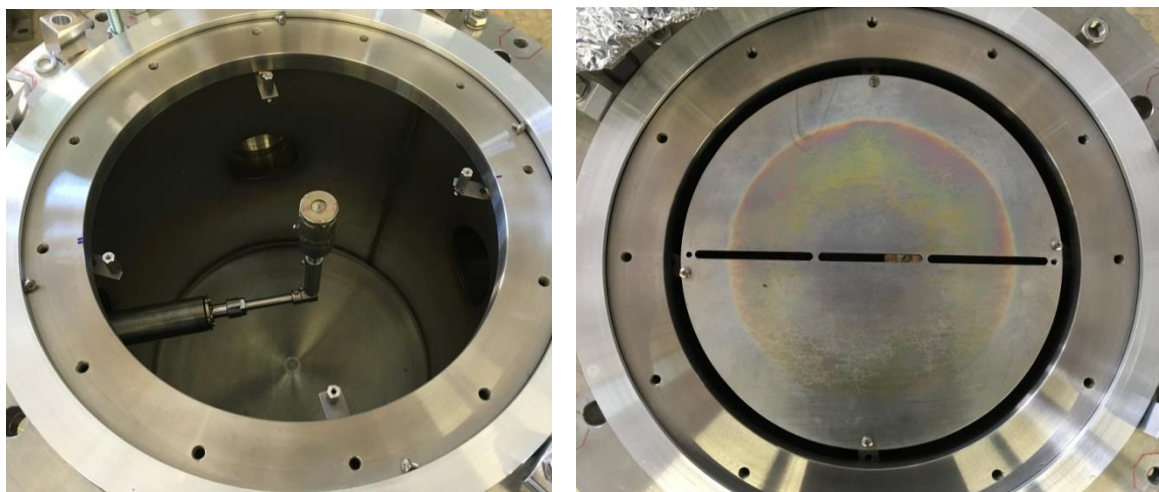


Рис. 11 Сеточный зонд в вакуумной камере с и без металлической пластины.

Сигнал измерялся с шунтового сопротивления осциллографом (Рис. 12).

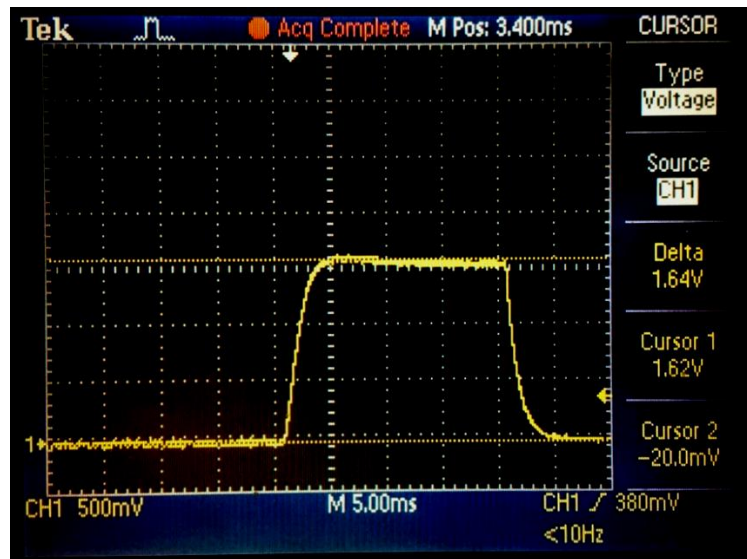


Рис. 12 Пример сигнала, регистрируемого осциллографом.

Плотность ионного тока перед зондом высчитывалась следующим образом:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \cdot S},$$

где $S \approx 1,3 \text{ мм}^2$ – эффективная площадь отверстия датчика с учетом прозрачности сеток, а U – измеряемое осциллографом напряжение, I – ток через шунтовое сопротивление R .

2.2.3. Калориметрия эмиттера

Для измерения нагрева охлаждаемых элементов эмиттера использовались платиновые терморезисторы сопротивлением 1000 Ом, установленные внутри датчиков потока воды. По данным температуры, получаемой с терморезисторов, высчитывалась мощность нагрева воды P :

$$P = C_p \rho l (T_t - T_0),$$

где $C_p \approx 4,2 \text{ [кДж/кг} \cdot \text{°C]}$ – удельная теплоемкость воды при 20 °С, ρ – плотность воды, $l = 11,5 \text{ л/мин}$ – скорость потока воды в данной установке, $T_0 = 23 \text{ °С}$ – температура воды на входе драйвера, T_t – температура воды на

выходе.

В данной задаче основными источниками нагрева являются потоки плазмы на экран, заднюю стенку и вакуумную камеру (Рис. 13), а также вихревые потери ВЧ поля в металлических элементах эмиттера.

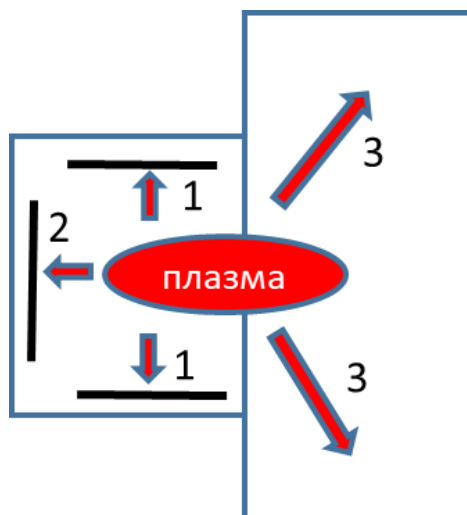


Рис. 13 Потоки плазмы на элементы экспериментальной установки: 1 – на фарадеевский экран, 2 – на заднюю стенку эмиттера, 3 – на вакуумный объем.

Чтобы разделить влияние данных источников нагрева и оценить, какая мощность идет в плазму, а какая на вихревые потери, калориметрические измерения были проведены как с плазмой, так и без нее с подачей напряжения на антенну без газа и поджига. Оценка мощности, поглощаемой плазмой, производилась путем нахождения разности подаваемой с генератора мощности с плазмой и без нее.

2.3. Результаты тестирования

2.3.1. Плотность ионного тока

С помощью перемещаемого сеточного зонда были проведены измерения распределения плотности ионного тока насыщения вдоль диаметра эмиттера (Рис. 14). Статистическая погрешность составляла не более 5%.

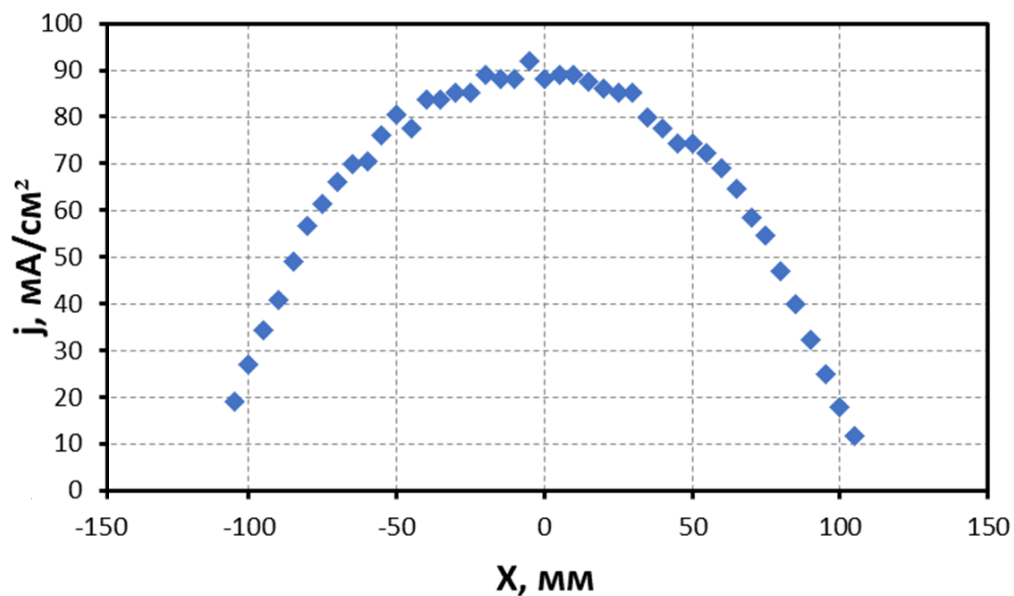


Рис. 14 Распределение плотности ионного тока насыщения эмиттера j по его диаметру, X - расстояние от центра эмиттера.

Также было произведено измерение зависимости плотности ионного тока от ВЧ напряжения на аноде лампы, которое примерно равно напряжению на антенне (Рис. 15).

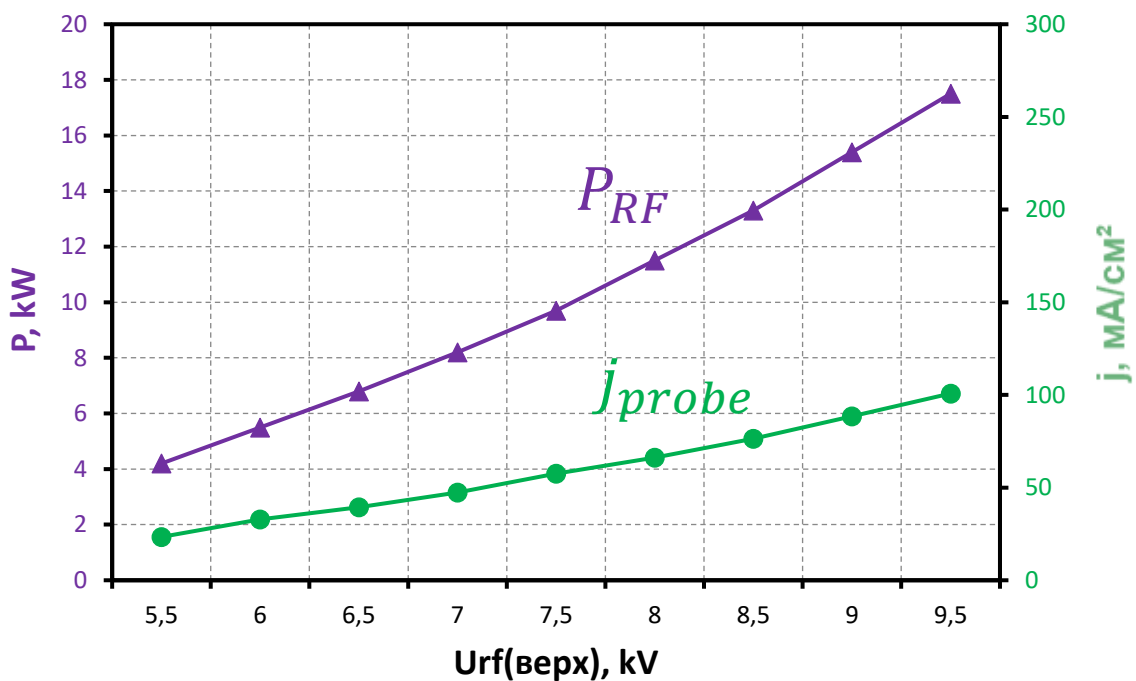


Рис. 15 Зависимость подаваемой от источника питания мощности P_{RF} и плотности ионного тока эмиттера j_{probe} от ВЧ напряжения U_{RF} .

Зонд находился в центре по радиусу. Максимальный достигнутый ток составил около 100 мА/см². Максимальная выходная мощность ВЧ составила 17,5 кВт, что значительно меньше требуемой мощности 40 кВт. Основным фактором, не позволяющим достичь необходимой мощности при данной нагрузке, является ограничение ВЧ генератора по выходному напряжению, которое составляет 10 кВ.

2.3.2. Мощность нагрева

Основные результаты измерений мощности нагрева различных элементов установки (Рис. *) представлены в Таблице 1.

Таблица. 1 Распределение подаваемой от ВЧ генератора мощности: поглощаемая плазмой и нагрев элементов эмиттера плазмой и ВЧ полей при одинаковых ВЧ напряжениях. В скобках указан метод оценки.

Источник нагрева	Элемент	Мощность (кВт)
ВЧ + плазма	Мощность с ВЧ генератора	11
	Экран (по воде)	6,3
	Задняя стенка, катушка и фланцы (по воде)	1,3
	Вакуумный объем (по закону сохранения энергии)	1,6
Только ВЧ	Мощность с ВЧ генератора	7,6
	Экран (по воде)	4,0
	Задняя стенка, катушка и фланцы (по воде)	1,3
	Внешние ВЧ потери + потери на трассе (сохранение энергии)	2,4
	Итого в плазму	3,4

По полученным данным мы оценили, что в вакуумный объем уходит 1,6 кВт, а мощность, вкладываемая в плазму равна 3,4 кВт, что при подаче с генератора 11 кВт составляет около 1/3. Таким образом, в данной конфигурации при относительно небольших мощностях большая часть энергии уходит на вихревой нагрев элементов эмиттера.

Эксперименты проводились с импульсами длительностью 20 с. При этом ВЧ генератор работал стабильно, деформаций экрана и осаждения на керамике после испытаний не наблюдалось.

2.4. Вывод из результатов экспериментов

Из проведенных измерений мощности нагрева и плотности ионного тока выяснилось, что с такой конфигурацией достичь 40 кВт невозможно, при этом из получаемой мощности до плазмы доходит меньше половины. Поэтому следующими задачами стало модернизация установки в целях:

- 1) Уменьшения вихревых потерь в элементах ВЧ драйвера;
- 2) Увеличения поглощаемой мощности ВЧ драйвером.

Глава 3. Модернизация ВЧ драйвера

3.1. Уменьшение вихревых потерь в элементах ВЧ драйвера

3.1.1. Сопротивление потерь антенного контура

Измерения показали, что большая часть мощности за счет вихревых токов поглощается в фарадеевском экране. Однако, помимо него, есть и другие металлические элементы, в которых возникают вихревые токи. Для того чтобы понять в каких из элементов эмиттера, помимо самого экрана и фланцев, вихревые потери существенны, были проведены измерения шунтового сопротивления антенного контура

Без плазмы антенный контур в упрощенном виде можно представить как простой параллельный колебательный RLC контур (Рис. 16), в сопротивление которого входят элементы ВЧ-драйвера. Активное сопротивление R в таком контуре связано с добротностью Q следующим образом:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{R}{\rho},$$

где f – резонансная частота контура, Δf – ширина резонансной кривой по уровню 0,707, $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

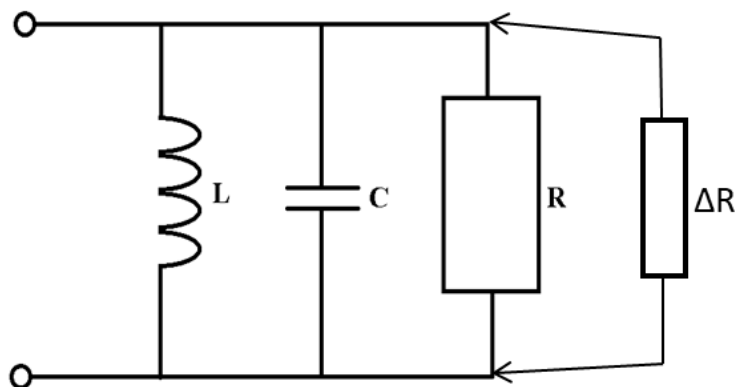


Рис. 16 Параллельный колебательный контур с добавочной нагрузкой ΔR .
 R – активное сопротивление контура, L – индуктивность, C – емкость.

Потери в таком контуре P_{loss} составляют:

$$P_{loss} = \frac{U^2}{2R}, \quad (4)$$

где U – амплитуда напряжения на контуре. Если к данному контуру параллельно добавить нагрузку ΔR , то его добротность изменится:

$$Q^* = \frac{R \cdot \Delta R}{(R + \Delta R)\rho},$$

где Q^* – добротность с дополнительным сопротивлением. Оценив изменение добротности, сопротивление потерь можно высчитать по следующей формуле:

$$R = \Delta R \left(\frac{Q}{Q^*} - 1 \right). \quad (5)$$

3.1.2. Нахождение сопротивления элементов ВЧ драйвера

Для определения, в каких элементах драйвера ВЧ нагрев существенен, он был разобран. Вышеописанным способом (5) проводилось измерение сопротивления антенного контура при удалении металлических элементов. Таким образом мы получали информацию о том, какой вклад в сопротивление контура дают его различные элементы.

Сигнал для возбуждения резонансного контура подавался с генератора ВЧ сигнала напряжением 20 В, который был соединен с контуром через резистор 100 кОм. Напряжение на контуре измерялось с помощью осциллографа. В качестве ёмкостей использовались параллельно соединенные два конденсатора емкостью 100 пФ и один 470 пФ. При индуктивности антенны 3-4 мкГн, резонансная частота составляла 3-4 МГц. В качестве добавочной нагрузки использовались резисторы 16,3 и 12,1 кОм.

Результаты предоставлены в Таблице 2. Погрешность измерений определялась шумами ВЧ напряжения и в среднем составляла около 10%.

Таблица. 2 Влияние элементов эмиттера на сопротивление контура. Плюсами отмечены присутствующие в составе эмиттера компоненты.

Компоненты	1	2	3	4	5	6
Катушка	+	+	+	+	+	+
Нижний фланец		+	+	+	+	+
Уплотняющие кольца		+	+	+	+	
Верхний фланец			+	+	+	+
Молибденовая пластина				+	+	+
Шпильки					+	+
R [кОм]	21,3	11,0	6,7	6,8	6,5	10,2

Как выяснилось, помимо самого экрана и фланцев, большой вклад также дают уплотняющие керамику кольца, что можно объяснить их относительно близким расположением к крайним виткам антенны (Рис. 17).

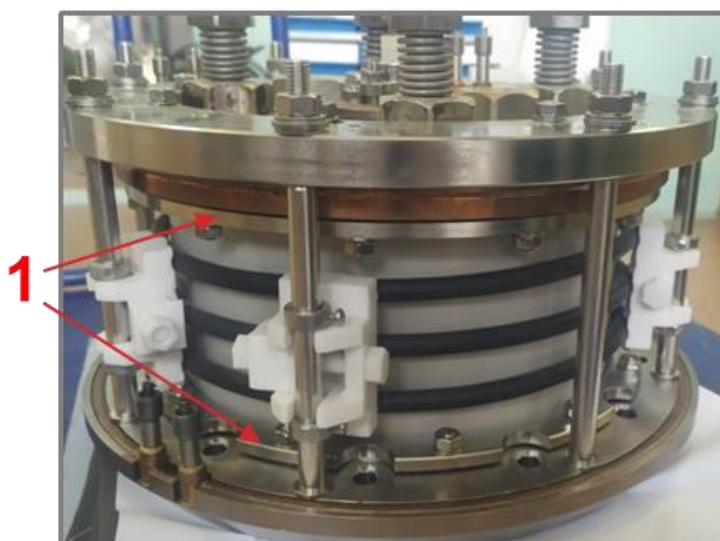


Рис. 17 Внешний вид эмиттера; 1 – уплотняющие керамику кольца.

3.1.3. Уменьшение потерь в уплотняющих кольцах

Чтобы понизить потери в кольцах, они были покрыты тонким слоем меди (Рис. 18). Медь была нанесена электролитическим способом. Толщина медного покрытия больше, чем толщина скин-слоя меди при частоте 4 МГц (30 мкм), т.е. индуцированный в кольце ток в таком случае идет по покрытию и сопротивление для него меньше.

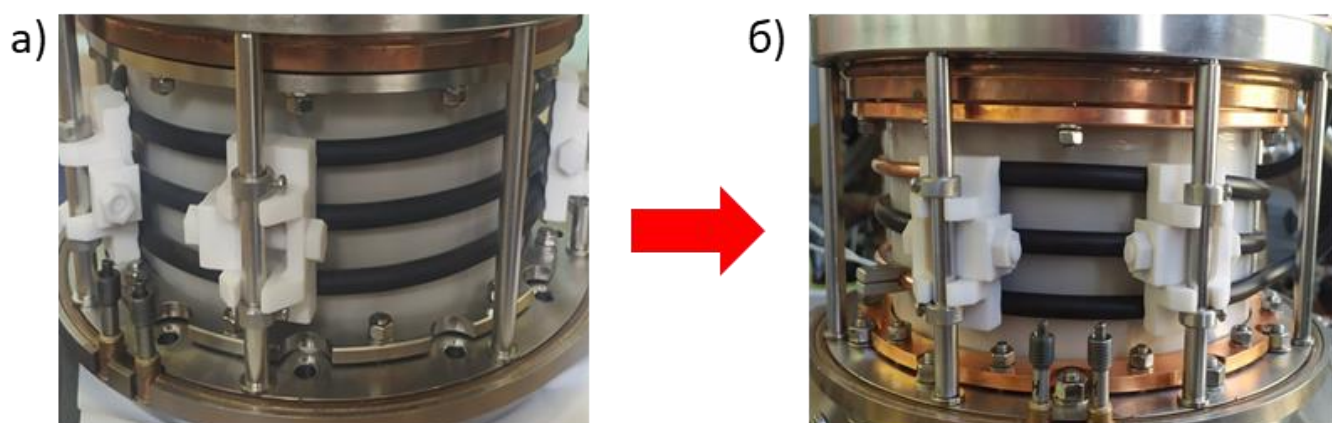


Рис. 18 Уплотняющие керамику кольца до (а) и после (б) омеднения.

После омеднения колец мы повторили вышеописанные эксперименты и обнаружили, что вклад этих колец в сопротивление действительно заметно уменьшился – сопротивления контура с омедненными кольцами и без колец отличаются на ~10% (Таблица 3).

Таблица 3. Влияние колец на сопротивление контура.

Компоненты	1	2	3
Все, кроме экрана	+	+	+
Уплотняющие кольца		+	
Уплотняющие кольца (омедненные)			+
R [кОм]	10,2	6,5	9,4

После проведения измерения сопротивлений эмиттер был полностью собран и установлен обратно на испытательный стенд.

3.2. Увеличение подаваемой мощности

Основным фактором, ограничивающим повышение подаваемой в плазму мощности, является ограничение генератора по выходному напряжению – 10 кВ. Чтобы обойти это ограничение и повысить подачу мощности, было решено принципиально поменять схему подключения ВЧ питания к антенне (Рис. 19): места подключения питания были сдвинуты на $1/3$ витка с каждой стороны с концов катушки.

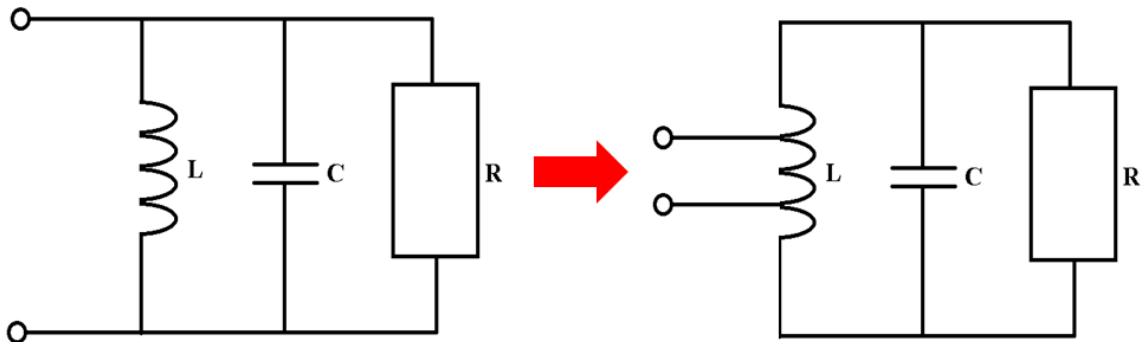


Рис. 19 Общая схема, иллюстрирующая изменение подключения питания к антенне.

Таким образом, был получен повышающий автотрансформатор [10]: на концах антенны напряжение получается больше, чем подаваемое от ВЧ генератора:

$$\frac{U_A}{U_{RF}} = \frac{N_1}{N_2} \sim 1.3 ,$$

где U_{RF} – напряжение ВЧ генератора, U_A – напряжение на всей антенне, $N_1 = 3$ – количество витков на всей антенне, N_2 – количество витков на части антенны, к которой подключили питание. С такой схемой можно передать больше мощности от ВЧ генератора в нагрузку.

3.3. Испытание модернизированного эмиттера

3.3.1. Плотность ионного тока

В ВЧ драйвер были установлены омедненные кольца и изменено подключение антенны. После согласования системы ВЧ питания были

проведены эксперименты по измерению ионного тока. Для измерения плотности тока использовался сеточный зонд, расположенный в центре эмиттера. Эксперименты проводились как на коротких (~ 100 мс), так и на длинных (20 с) импульсах. Статистическая погрешность составляла не более 5%.

При работе с длинными импульсами удалось добиться стабильной работы при мощности 38 кВт в течении 20 с. На коротких импульсах с частичным включением удалось достичь значений, заметно превышающих 40 кВт – максимальная полученная мощность составляет 55 кВт. При этом плотность тока удалось увеличить в 2,5 раза по сравнению с предыдущими результатами (Рис. 20).

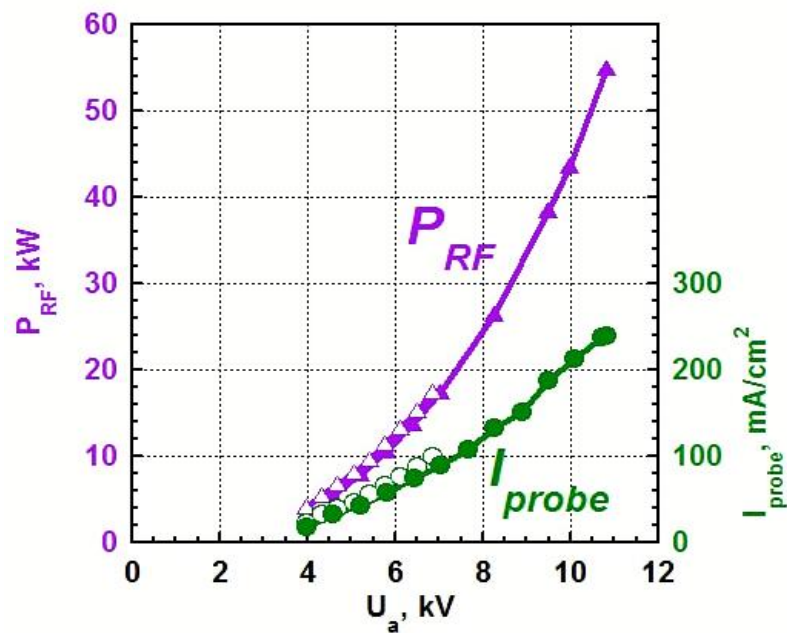


Рис. 20 Зависимость мощности и плотности ионного тока от напряжения на антенне U_A . Белые символы показывают результаты предыдущих экспериментов, окрашенные – при частичном включении антенны.

Как видно, при относительно низких напряжениях на антенне значения полученных мощностей и плотностей токов почти совпадают со значениями, полученными в предыдущих экспериментах: зависимости от напряжения старых и новых экспериментов имеют тот же характер, но чуть меньший наклон.

3.3.2. Мощность нагрева

На длинных импульсах была проведена серия calorиметрических измерений при различных значениях ВЧ напряжения (Рис. 21).

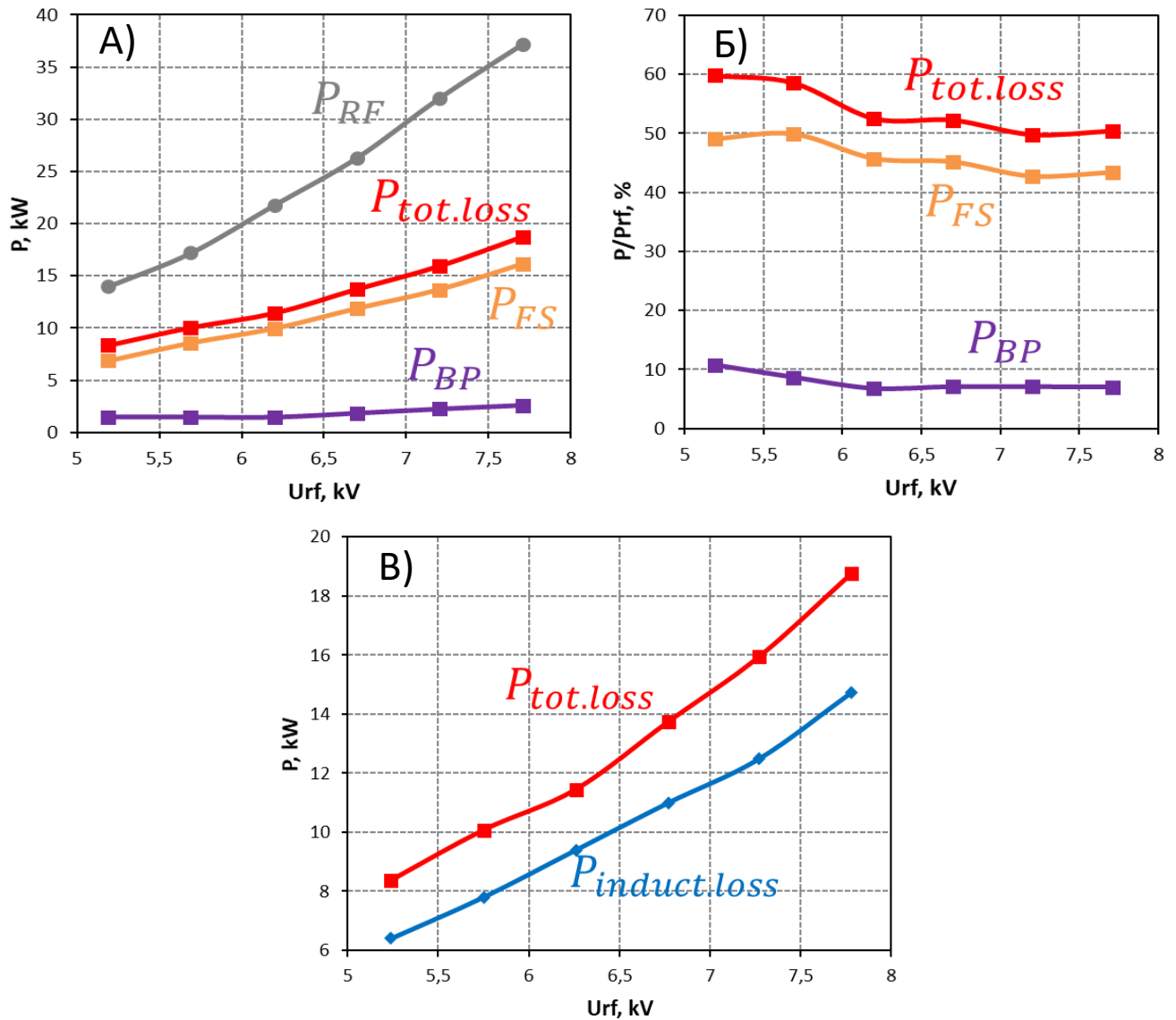


Рис. 21 Результаты измерения мощности нагрева эмиттера от подаваемого напряжения ВЧ

U_{RF} . А) Выходная мощность ВЧ генератора P_{RF} , нагрев задней пластины P_{BP} и фарадеевского экрана P_{FS} , полные потери $P_{tot.loss} = P_{BP} + P_{FS}$ от U_{RF} . Б) Отношение потерь $P_{tot.loss}$ к выходной мощности ВЧ генератора от U_{RF} . В) Сравнение потерь в эмиттере с плазмой $P_{tot.loss}$ и без плазмы $P_{induct.loss}$ от ВЧ напряжения.

Результаты измерений показали, что с увеличением подаваемой мощности доля потерь заметно уменьшаются, и уже при мощностях больше 30 кВт только половина мощности тратится на нагрев эмиттера, а остальная часть вместе с плазмой уходит в вакуумный объем. Если при этом учесть

плазму, падающую на фарадеевский экран, то эффективность передачи ВЧ мощности плазме составляет около 60%. Основной причиной роста эффективности при увеличении мощности является рост концентрации плазмы: чем больше плазмы, тем больше ВЧ мощности она поглощает.

Полученная зависимость потерь имеет квадратичную зависимость, что соответствует зависимости вихревых потерь от напряжения в антенном контуре (4).

Длительность импульсов составляла 20 с, а максимальная достигнутая мощность – 37,7 кВт. Характеристики ВЧ генератора стабильны в течение импульса (Рис. 22). Наличия видимых деформаций экрана или осаджений на керамике не наблюдалось.

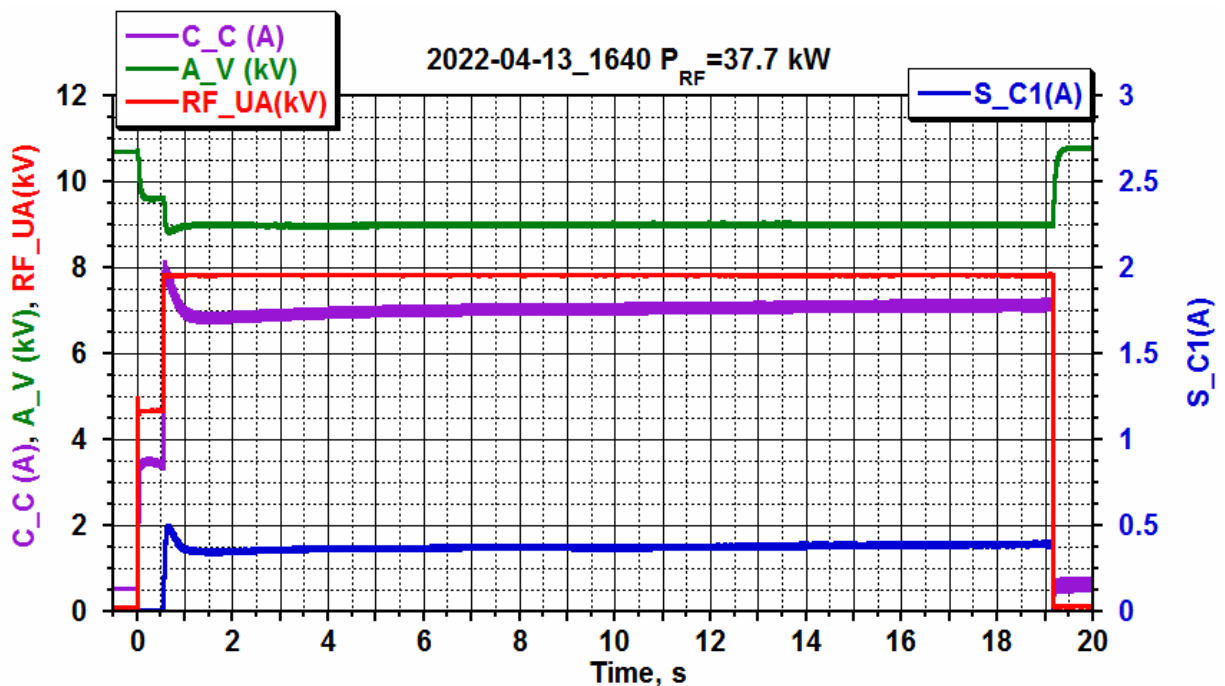


Рис. 22 Характеристики ВЧ генератора во время выстрела длительностью 20 с и мощностью 37,7 кВт. C_C(A) – катодный ток, A_V – анодное напряжение, RF_UA – напряжение, выдаваемое ВЧ генератором.

3.4. Выводы из экспериментов

Проведенные измерения плотности ионного тока и нагрева элементов эмиттера показали увеличение передаваемой с генератора мощности и

эффективности поглощения мощности плазмой.

Хотя за счет омеднения колец удалось понизить потери в антенном конуре, большинство потерь: как вихревых, так и плазменных – как показала калориметрия, возникает в фарадеевском экране: на них уходит не менее 30% всей мощности. Поэтому наиболее оптимальным вариантом дальнейшего уменьшения потерь является замена экрана.

В качестве замены планируется провести испытания с охлаждаемым 6-миллиметровым экраном (Рис. 23). От используемого экрана он отличается большим количеством щелей, а также материалом изготовления: он полностью изготовлен из меди. На поверхность напылен тонкий слой молибдена для уменьшения распыления.

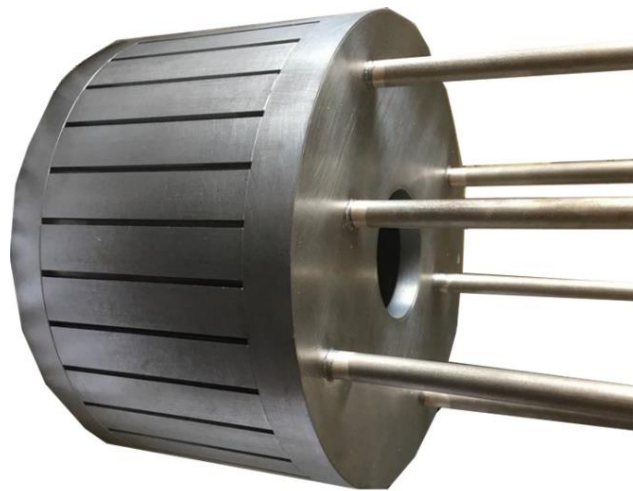


Рис. 23 Общий вид медного экрана, покрытого тонким слоем молибдена.

Тем не менее, исследованный экран способен стабильно работать в ВЧ драйвере с подводимой мощностью 40 кВт при длительных импульсах.

Заключение

В данной работе были проведены серии испытаний разработанного ВЧ плазменного эмиттера с охлаждаемым фарадеевским экраном, целью которых было достижение стабильной работы с длительными, многосекундными (>10 с) импульсами мощностью 40 кВт. Для проведения тестирования был собран стенд, на котором сеточным зондом измерялась плотность тока, а по калориметрии воды была проведена оценка нагрева элементов эмиттера.

В первоначальных экспериментах достичь необходимых значений мощности не получилось: большая часть выходной мощности ВЧ генератора уходила на вихревые потери ВЧ поля в металлических элементах эмиттера. Однако, после модернизации ВЧ драйвера: омеднения уплотняющих колец и изменения схемы подключения системы питания – удалось увеличить вкладываемую мощность и плотность тока, а также заметно уменьшить потери в эмиттере.

В результате работы с короткими импульсами длительностью 100 мс максимальная достигнутая мощность составила 55 кВт, а плотность тока – 250 мА/см. В импульсах длительностью 20 с были достигнуты значения мощности 37,7 кВт. При этом во время длительных импульсов ВЧ генератор работал стабильно, а охлаждение фарадеевского экрана было достаточным эффективным. Осаждений на керамике или деформаций экрана не наблюдалось. Основными факторами, ограничивающими вкладываемую в плазму мощность, являлись ограничения используемого ВЧ генератора по выходному напряжению, а также экран, на который приходится достаточно большие потери.

В целом, проведенные испытания показали, что разработанный эмиттер с охлаждаемым фарадеевским экраном способен стабильно работать с длительными, многосекундными импульсами мощностью 40 кВт.

Список литературы

- 1) A. A. Ivanov et al. Radio frequency ion source for plasma diagnostics in magnetic fusion experiments. *Rev. Sci. Instruments* 71, p. 3728-3735 (2000)
- 2) Chundong HU et al. Achievement of 1000 s plasma generation of RF source for neutral beam injector. *Plasma Sci. Technol.* 21 022001 (2019)
- 3) D. Zielke et al J. RF power transfer efficiency and plasma parameters of low pressure high power ICPs. *Phys. D: Appl. Phys.* 54 155202 (2021)
- 4) Н.Н. Семашко et al. Инжекторы быстрых атомов водорода. Москва: Энергоиздат. (1981)
- 5) Ian G. Brown. *The Physics and Technology of Ion Sources, Second, Revised and Extended Edition.* Lawrence Berkeley National Laboratory. California: Wiley-VCH. p. 30 (2004)
- 6) А.Ф. Александров et al. Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова. *Физика плазмы.* Том 30. С. 434-449 (2004)
- 7) М. А. Тиунов. Полный расчет трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в приближении сильного скин-эффекта методом граничных интегральных уравнений. *Вестник НГУ. Серия: Физика.* Том 9, выпуск 2. (2014)
- 8) G. Abrashitov et al. Operation of RF driven negative ion source in a pure-hydrogen mode. *AIP Conference Proceedings* 1655, 040009 (2015)
- 9) Радиопередающие устройства. Учебник для вузов. Под редакцией В.В. Шахгильдяна. 3-е издание, переработанное и дополненное. Москва: Радио и Связь. С. 44-48 (2003)

- 10) Sen, P. C. Principles of electric machines and power electronics. John Wiley & Sons. p. 64. (1997)