

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

*На правах рукописи*

**Дмитриев Артем Михайлович**

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЕМКОСТНОЙ РАЗРЯД И ЕГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПОВЕРХНОСТЬЮ  
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В УСЛОВИЯХ ИТЭР**

Специальность:  
01.04.08 – физика плазмы

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук  
Мухин Е.Е.

Санкт Петербург  
2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЧЕ РАЗРЯДА ДЛЯ ЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТОКАМАКЕ ИТЭР.....</b>	<b>15</b>
1.1 Проблема первого зеркала в термоядерной установке .....	15
1.2 Литературный обзор экспериментов по плазменной очистке оптических поверхностей. Обоснование выбора высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕ), как основного инструмента очистки и анализ условий его применимости .....	26
<b>Глава 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННОГО ПОТОКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ВЧЕ РАЗРЯДА .....</b>	<b>34</b>
2.1 Описание экспериментальной установки для исследования параметров ВЧЕ разряда. ....	34
2.2 Энергоанализатор для диагностики ионного потока на поверхности электрода.....	39
2.3 Исследование зависимости потенциала автосмещения от поглощенной в разряде мощности .....	43
2.4 Экспериментальное исследование характеристик ионного потока в зависимости от сорта рабочего газа и подводимой частоты .....	47
2.5 Измерение параметров плазмы в схеме с заземленным ВЧ электродом .....	57
2.6. Влияние магнитного поля на параметры ВЧЕ разряда.....	64
<b>Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОДНОРОДНОСТИ ТРАВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ОСАЖДЕНИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ НАПЫЛЕНИЕ В ИТЭР.....</b>	<b>72</b>
3.1. Физическое распыление. Коэффициент распыления.....	72
3.2 Методика оценки скорости удаления осадений на основе экспериментальных данных о функции распределения ионов и литературных данных о скорости распыления. Селективность распыления.....	74
3.3 Экспериментальное исследование однородности распыления металлических осадений с использованием плазмы ВЧ разряда.....	80
3.4 Эксперименты по удалению пленочных осадений Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , моделирующих пленочные осадения Be в вакуумном объеме ИТЭР ..	85

3.5 Эксперименты по удалению бериллийсодержащих пленок в плазме ВЧ разряда.....	89
<b>Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МАКЕТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЧИСТКИ, СОВМЕЩЕННОЙ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ УЗЛА ПЕРВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА .....</b>	<b>98</b>
4.1 Конструкция макета узла первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности. ....	98
4.2 Измерение параметров ВЧ разряда в макете узла первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности .....	103
4.3 Демонстрационные эксперименты по ВЧ чистке макета узла охлаждаемого зеркала.....	108
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>113</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЯ.....</b>	<b>115</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы**

Запуск Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР должен продемонстрировать горение дейтериево-тритиевой плазмы в течение длительного времени, что будет являться новым этапом в решении задачи управляемого термоядерного синтеза. Являясь преимущественно экспериментальной установкой, ИТЭР подразумевает проведение испытаний подсистем токамака-реактора, а также изучение физических процессов в плазме с помощью ряда диагностических систем [1].

Отличительной особенностью ИТЭР по сравнению с существующими токамаками является значительная дистанция (5–10 м) от плазмы до границы вакуума [2]. В связи с этим конструкция диагностических систем подразумевает наличие внутривакуумных компонентов [3]. При их проектировании следует учитывать ряд условий, в которых они будут функционировать, таких как сильное магнитное поле, радиационный фон, высокие тепловые нагрузки, а также осаждение распыленных материалов первой стенки.

Диссертация посвящена разработке системы очистки обращенных к плазме внутривакуумных оптических элементов. Прежде всего это первые зеркала оптических диагностик, подверженные осаждению пленок, состоящих преимущественно из бериллия [4 – 7]. Одним из основных требований к системе очистки оптики является эффективное удаление осадений при минимальном воздействии на поверхность оптического элемента.

В качестве инструмента для очистки и восстановления оптических свойств поверхности первых диагностических зеркал и окон в диссертации рассматривается высокочастотный емкостной (ВЧЕ) разряд, в котором очищаемый элемент играет роль одного из электродов. Ионы, ускоренные в приэлектродном слое ВЧЕ разряда, бомбардируют оптическую поверхность,

приводя к физическому распылению или химическому травлению осадений.

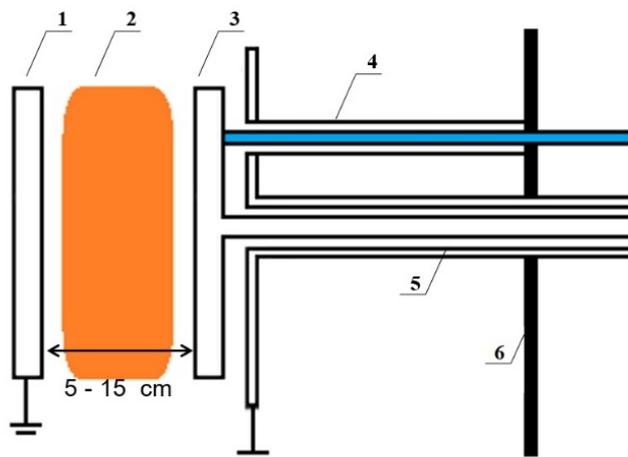


Рисунок 1 Принципиальная схема системы очистки первого диагностического зеркала в токамаке ИТЭР. 1 – заземленный электрод (заслонка-шаттер), 2 – плазменный столб ВЧЕ разряда, 3 – нагруженный электрод, 4 – система охлаждения зеркала, 5 – ВЧ-фидер, 6 – граница вакуума

На рисунке 1 приведена принципиальная схема системы очистки первого диагностического зеркала в токамаке ИТЭР. Плазма ВЧЕ разряда является источником ионов, которые, ускоряясь в приэлектродных слоях, падают на зеркало, приводя к распылению продуктов эрозии первой стенки токамака. В связи с этим основной проблемой реализации системы очистки зеркал является оптимизация параметров ионных потоков в условиях токамака. Для предотвращения перегрева, вызванного как внешними источниками тепла (нейтронное и гамма-излучение), так и нагревом, возникающим в процессе очистки, зеркало должно быть оборудовано системой охлаждения. В диссертации сделан акцент на активной системе водяного охлаждения, выполненной по принципу короткозамкнутого четвертьволнового фильтра, имеющего бесконечный входной импеданс и не влияющего на S-параметры зеркала, как элемента ВЧ-фидерного тракта

### **Цели и задачи исследования**

**Целью** диссертационной работы является исследование и оптимизация параметров плазмы высокочастотного емкостного разряда и его воздействия

на пленочные осаждения, а также на оптические свойства и морфологию поверхностей диагностических зеркал в вакуумном объеме токамака ИТЭР.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи:**

- 1) Анализ факторов, воздействующих на внутривакуумную диагностическую оптику (тепловые потоки, скорости осаждения пленок, и т.д.) в существующих токамаках и ожидаемых в ИТЭР.
- 2) Исследование параметров ВЧЕ чистящего разряда в условиях токамака ИТЭР.
- 3) Оптимизация параметров ВЧЕ чистящего разряда (питающая мощность, давление и сорт газа, частота и т.д.) для обеспечения приемлемых скоростей чистки с минимальным воздействием на очищаемый оптический элемент.
- 4) Исследование влияния чистящего разряда на оптические свойства и морфологию поверхности металлических зеркал.
- 5) Исследование применимости системы охлаждения зеркала с системой ВЧ чистки, выполненной по принципу короткозамкнутого четвертьволнового фильтра.
- 6) Апробация выработанных подходов к плазменной чистке на экспериментальных стендах.

#### **Научная новизна работы:**

Исходя из предполагаемых условий эксплуатации первых диагностических зеркал, выбран диапазон оптимальных параметров ВЧЕ разряда, обеспечивающих приемлемую скорость очистки металлических осадений при минимальном воздействии на поверхность оптических компонентов. Предложена методика учета формы функции распределения ионов по энергиям при оценке эффективности чистки металлических и диэлектрических осадений в приближении объемного материала. Сформулированы требования к выбору сорта рабочего газа для различных

сценариев чистки зеркал на стенке токамака и в его диверторе. Экспериментально подтверждена применимость системы охлаждения, выполненной на основе короткозамкнутой четвертьволновой коаксиальной линии. Исследовано влияние продолжительной экспозиции в плазме ВЧЕ разряда на морфологию поверхности металлических зеркал, обнаружено различие модификации морфологии в разрядах дейтерия и неона. Проведены эксперименты по удалению бериллийсодержащих осадков в плазме ВЧЕ разряда. Выполнена апробация предлагаемых решений на масштабированном макете охлаждаемого первого диагностического зеркала активной спектроскопической диагностики краевой плазмы токамака ИТЭР.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

- Экспериментальные и численные исследования, выполненные в рамках контракта с центральной командой ИТЭР Ю/17/СТ/4300001626, позволяют перейти к стадии разработки предварительного дизайна системы очистки первого диагностического зеркала.
- Предложена методика оценки влияния формы функции распределения ионов по энергиям на отношение скоростей распыления металлических осадков и очищаемой оптической поверхности. Выработаны рекомендации по выбору сорта рабочего газа и оптимального диапазона управляющих разрядом параметров для различных сценариев чистки первых оптических элементов.
- Проведенные исследования по взаимодействию ВЧЕ плазмы с поверхностью позволяют выработать рекомендации по выбору материалов металлических зеркал, предназначенных для длительной экспозиции в плазме.
- Результаты исследования неоднородности чистки могут быть использованы для дальнейшей модификации конструкции первого зеркала с целью ослабления влияния неоднородности чистки.

- В экспериментах по очистке масштабированного макета узла первого зеркала активной спектроскопической диагностики показана применимость активной системы охлаждения, выполненной по схеме короткозамкнутого четвертьволнового кабеля.

#### **Личное участие автора:**

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором выполнены эксперименты по измерению и подбору оптимальных параметров ВЧЕ разряда, сформулированы основные требования к системе очистки первого зеркала, проведены эксперименты по демонстрации травления тонкопленочных металлических (Al и Au) осадений в ВЧЕ разряде, проведены эксперименты по очистке макетов зеркал от бериллийсодержащих осадений, выполнено исследование влияния процесса чистки на морфологию поверхности металлических зеркал, создан экспериментальный стенд по исследованию параметров ВЧЕ разряда в условиях, близких к условиям токамака ИТЭР, проведено прототипирование диагностического зеркала ИТЭР, играющего роль заземленного по постоянному току ВЧ-электрода, оборудованного системой водяного охлаждения. Автор принимал непосредственное участие: в разработке трехсеточного анализатора частиц и в расчете параметров разряда в численных кодах.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимость энергии и плотности тока ионов на электродах ВЧЕ разряда от величины внешнего магнитного поля, типа инертного газа, ВЧ частоты и поглощенной мощности.
2. Симметризация ВЧЕ разрядов в магнитном поле с изолированным и заземлённым ВЧ-электродами, вследствие замагниченности ионной и электронной компонент плазмы.

3. Методика оптимизации ВЧЕ разряда по скорости удаления бериллиевых и вольфрамовых напылений с поверхности молибдена на основании результатов измерений параметров ионного потока и табличных значений коэффициентов распыления.
4. Модификация морфологии поверхности поликристаллического молибдена в ВЧЕ разрядах дейтерия и неона. Доминирующие механизмы нарушения поверхности: селективное травление различно ориентированных кристаллитов под действием плазмы неона и блистерообразование в плазме дейтерия.
5. Способ включения ВЧ электрода электрическую цепь (изолированный по постоянному току, заземленный) и его влияние на пространственную неоднородность распыления в наличии и отсутствии магнитного поля.
6. Демонстрация травления тонкопленочных металлических осадений (Au, Al, Be) в ВЧЕ разряде. Прототипирование диагностического зеркала ИТЭР, играющего роль заземленного по постоянному току ВЧ-электрода, оборудованного системой водяного охлаждения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 122 страницы, включая 8 таблиц и 76 рисунков. Список литературы включает 73 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность исследования и приводится краткое содержание работы.

В **главе 1** приведен краткий обзор экспериментальных исследований модификации оптических поверхностей, экспонированных в современных токамаках и модельных экспериментах. Осаждение металлических и оксидных пленок сложной конфигурации и морфологии, в состав которых входят распыленные материалы первой стенки, приводит к существенному ослаблению коэффициента отражения зеркал. Особенно сильно этот эффект проявляется в области дивертора, где скорость осаждения пленок на порядок

и более превышает скорость их осаждения в основном объеме токамака. Эрозия поверхности зеркала за счет физического распыления энергичными атомами перезарядки или вследствие травления ионами в чистящем разряде также может привести к ухудшению параметров первого зеркала. На основании сравнительного анализа различных типов газовых разрядов в главе 1 приведено обоснование выбора высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда, как основного инструмента очистки оптических поверхностей в токамаке ИТЭР.

В **главе 2** приведено описание экспериментальных установок для исследования параметров ВЧЕ разряда, а также комплекса оборудования для измерения параметров ионного потока на очищаемую поверхность. Одними из основных элементов измерительного оборудования являются анализаторы задерживающего поля, предназначенные для измерения энергии ионов, бомбардирующих оптические поверхности при наличии и отсутствии внешнего магнитного поля. Приводятся результаты комплексного исследования характеристик ионного потока на поверхность зеркала, играющего роль нагруженного электрода в ВЧЕ разряде в зависимости от управляющих параметров. Обсуждаются результаты экспериментального исследования параметров ВЧЕ разряда от таких управляющих параметров как: подводимая к разряду ВЧ мощность, рабочая частота разряда, сорт и давление фонового газа, величина внешнего магнитного поля и наличие электрического аналога системы охлаждения зеркала, выполненной в виде замкнутого четвертьволнового кабеля. Показана нецелесообразность использования зеркала, как заземленного электрода, ввиду низкой энергии и плотности тока ионов, бомбардирующих заземленный электрод в случае асимметричного разряда в отсутствие магнитного поля. При этом анализ функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) в слое нагруженного электрода показал, что в низкоэнергичном «хвосте» функции распределения содержится значительная доля частиц, энергия которых находится вблизи порога распыления. Проведено экспериментальное исследование параметров

ВЧЕ разряда с изолированным электродом и с электродом, заземленным через четвертьволновую линию в присутствии магнитного поля. Показано, что с увеличением сонаправленного с осью разряда магнитного поля, асимметрия разряда уменьшается, а наличие наклона электрода по отношению к магнитному полю, наоборот, усиливает неоднородность ионного потока на электрод

В **главе 3** приведено краткое описание процесса физического распыления под действием ионных потоков. На основании экспериментального исследования параметров разряда предложена методика оценки скорости удаления осадений в приближении сплошного материала, использующая экспериментальные данные о функции распределения ионов и литературные данные о скорости распыления. Приведен анализ ожидаемой эффективности применения различных фоновых газов и функций распределения ионов в приэлектродном слое ВЧЕ разряда в зависимости от химического состава пленочных осадений. Так, на основании оценки селективности травления показано, что ВЧЕ разряд в гелии на частоте ~81 МГц является оптимальным для удаления бериллия с поверхности молибденовых зеркал. Для удаления вольфрамовых осадений предпочтительно использование разряда в неоне на частотах 40 – 60 МГц. Проведена оценка неоднородности чистки по площади зеркала. Для оценки неоднородности измерялась толщина золотой пленки, нанесенной на поверхность зеркала до и после распыления. Продемонстрировано уменьшение краевой неоднородности травления при включении внешнего аксиального магнитного поля. Приведены результаты экспериментов по удалению пленочных осадений Al, моделирующих сформированные в вакуумном объеме ИТЭР пленки Ве. Приведены результаты длительной обработки поликристаллических молибденовых зеркал в плазме ВЧ разряда. Показано, что такая обработка приводит к существенному ухудшению их оптических характеристик. Проведена апробация ВЧ чистки бериллиевых осадений, полученных на установке КСПУ-Ве. Проведена отработка

режима напыления бериллийсодержащих осадений путем облучения бериллиевой мишени направленным потоком гелиевой плазмы. Приведены результаты исследований морфологии и состава полученных осадений. Подобранный режим очистки обеспечил скорости распыления бериллиевых осадений  $\sim 0,5$  нм/мин в гелиевом разряде, и –  $\sim 0,8$  нм/мин в плазме дейтериевого разряда.

В главе 4 приведены результаты макетирования узла охлаждаемого первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности. Параметры плазмы ВЧЕ разряда были измерены для ряда управляющих параметров в геометрии макета узла первого зеркала. Проведены эксперименты по исследованию параметров чистящего ВЧЕ разряда в условиях разработанной геометрии. Экспериментально показано, что для достижения энергии 100 эВ в схеме с заземленным электродом необходима в 4 раза большая ВЧ мощность, чем в схеме с изолированным электродом. В демонстрационных экспериментах по распылению пленки золота с поверхности охлаждаемого зеркала в схеме с заземленным электродом обнаружен седловидный профиль распыления, качественно совпадающий с профилем плотности плазмы, полученном в численном эксперименте, проведенном с использованием 3D Монте-Карло кода Fraunhofer. В результате 14-часовой экспозиции в плазме чистящего разряда пленка  $Al/Al_2O_3$  была удалена с поверхности охлаждаемого зеркала, выполненного из нержавеющей стали, в результате чего спектральный коэффициент отражения зеркала был полностью восстановлен.

В конце диссертации имеется заключение, где перечислены основные результаты работы и помещен список литературы.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы представлялись на международных и российских совещаниях и конференциях:

1. XLII Международная конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Звенигород, 2015.

2. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Cadarache, France, November 2015.
3. XLII Звенигородская конференция по физике плазмы, Звенигород 8-12 февраля 2016.
4. 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference (FEC2017), Kyoto, Japan, 17 – 22 October, 2016.
5. 22<sup>nd</sup> International Conference on Plasma Surface Interaction in controlled Fusion Devices, Rome, Italy, May 30 – June 3, 2016.
6. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Cadarache, France, November 2016.
7. 16<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 16 – 19 May, 2017, Neuss, Germany.
8. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Cadarache, France, November 2017.
9. XXI конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», 24 – 25 февраля 2018, НИЯУ МИФИ, Москва.
10. 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018), Gandhinagar, India, 22 – 27 October, 2016.
11. 30<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, 16-21 September 2018, Giardini Naxos, Sicily, Italy.
12. ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Cadarache, France, November 2018.
13. XXII конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», 24 – 25 января 2019, НИЯУ МИФИ, Москва.
14. 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 20th-24th May 2019, Eindhoven, the Netherlands.
15. XVIII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», 11-13 сентября 2019, Красная Пахра.
16. XXIII конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», 23 – 24 января 2019, НИЯУ МИФИ, Москва.

Результаты работы опубликованы в следующих статьях:

1. RF discharge for in situ mirror surface recovery in ITER / A.G. Razdobarin, A.M. Dmitriev, A.N. Vazhenov et al. // *Nucl. Fusion – 2015 – vol. 55 – p.093022 (11pp)*
2. Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges / F. Leipold, R. Reichle, C. Vorpahl, E.E. Mukhin, A.M. Dmitriev, A.G. Razdobarin, D.S. Samsonov, L. Marot, L. Moser, R. Steiner, and E. Meyer // *Rev. sci. instrum. – 2016 – vol. 87 – p.11D439*
3. Blistering of mechanically polished molybdenum upon its exposure to deuterium-containing plasma / A.E. Gorodetsky, R.Kh Zalavutdinov, V.L. Bukhovets, A.V. Markin, A.P. Zakharov, T.V. Rybkina, V.I. Zolotarevsky, E.E. Mukhin, A.G. Razdobarin, A.M. Dmitriev // *J Surf. Invest.: X-Ray Synchrotron Neutron Tech – 2016 – vol.10, n.6 – pp.1214-1225*

4. Sputtering of Mo and Al in D 2/N 2 plasma cleaning discharge / V.L. Bukhovets, A.E. Gorodetsky, R.Kh. Zalavutdinov, A.V. Markin, L.P.Kazansky, I.A.Arhipushkin, A.P.Zakharov, A.M.Dmitriev, A.G.Razdobarin, E.E.Mukhin // *Nuclear Materials and Energy* – 2017 – vol. 12 – pp. 458-461
5. Deposition mitigation and in-vessel optics recovery in ITER / A.G. Razdobarin, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, I.M. Bukreev, A.P. Chernakov, A.M. Dmitriev et al. // *IAEA MPT/P5-40* – 2016
6. In situ plasma cleaning of ITER diagnostic mirrors in noble-gas RF discharge / A. M. Dmitriev, N. A. Babinov, A. N. Bazhenov, et al. // *Phys. Scr.* – 2017 – vol. T170 – p. 014072 (5pp)
7. Collisional RF Sheath in Capacitive Discharge in Strong Oblique Magnetic Field / A. Kobelev, N. Babinov, Y. Barsukov, T. Chernozumskaya, A. Dmitriev, E. Mukhin, A. Razdobarin, A. Smirnov // *Physics of Plasmas* – 2019 – vol. 26 – p. 013504
8. RF plasma cleaning of water-cooled mirror equipped with notch filter based on shorted  $\lambda/4$  line / A.M. Dmitriev, N. A. Babinov, A. N. Bazhenov et al. // *Fusion Eng. Des* – 2019 – vol.146-A – pp. 1390-1393
9. Diagnostic mirrors for ITER: research in the frame of the International Tokamak Physics Activity / A. Litnovsky, V.S. Voitsenya, R. Reichle, M. Walsh, A. Razdobarin, A. Dmitriev, N. Babinov, L. Marot, L. Moser, R. Yan, M. Rubel, A. Widdowson, S. Moon, S.G. Oh, Y. An, P. Shigin, I. Orlovsky, K. Yu. Vukulov, E. Andreenko, A. Krimmer, V. Kotov // *Nucl. Fusion* – 2019 – vol. 59, no.6 – p. 066029 (10pp)

Публикации. Результаты диссертации представлены в 9 публикациях в международных реферируемых научных журналах и на 11 международных и 5 российских конференциях и совещаниях.

# **Глава 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЧЕ РАЗРЯДА ДЛЯ ЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТОКАМАКЕ ИТЭР**

## **1.1 Проблема первого зеркала в термоядерной установке**

Ведущиеся с начала 1980-х годов разработка и строительство токамака-реактора ИТЭР являются переходом к новому этапу в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза. Успешная реализация проекта ИТЭР позволит продемонстрировать возможность коммерческого использования термоядерного реактора для получения электроэнергии. Являясь преимущественно экспериментальной установкой, ИТЭР подразумевает проведение испытаний различных подсистем, а также изучение происходящих в термоядерной плазме физических процессов. В связи с этим в ИТЭР предполагается установка порядка 50 диагностических систем, часть из которых будет использоваться для управления параметрами токамака в реальном времени [1]. Диагностики будут располагаться в большинстве верхних, экваториальных и диверторных портов вакуумной камеры токамака как показано на рисунке 1.1.1.

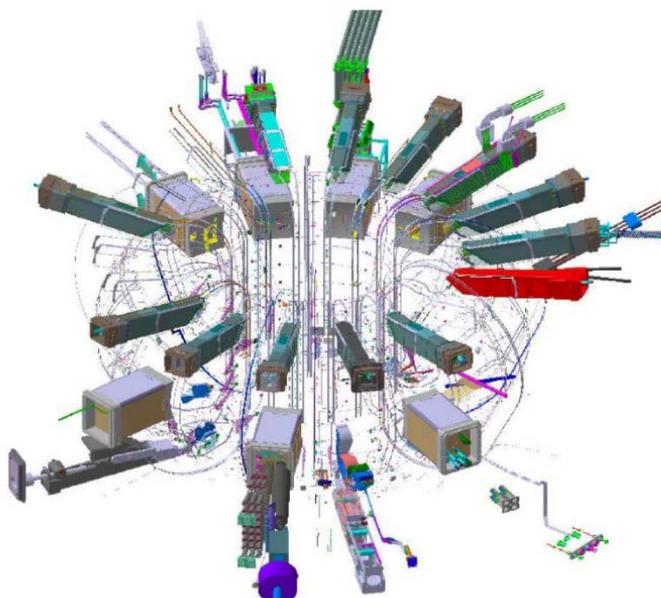


Рисунок 1.1.1. Обзор расположения диагностических систем в патрубках токамака ИТЭР [1]

Среди всех диагностик плазмы особую важность имеют оптические диагностики, позволяющие измерять такие фундаментальные параметры как температура и плотность плазмы, эффективный заряд и т.д. При этом оптические диагностические системы существующих установок во многом отличаются от предполагаемых к использованию в ИТЭР.

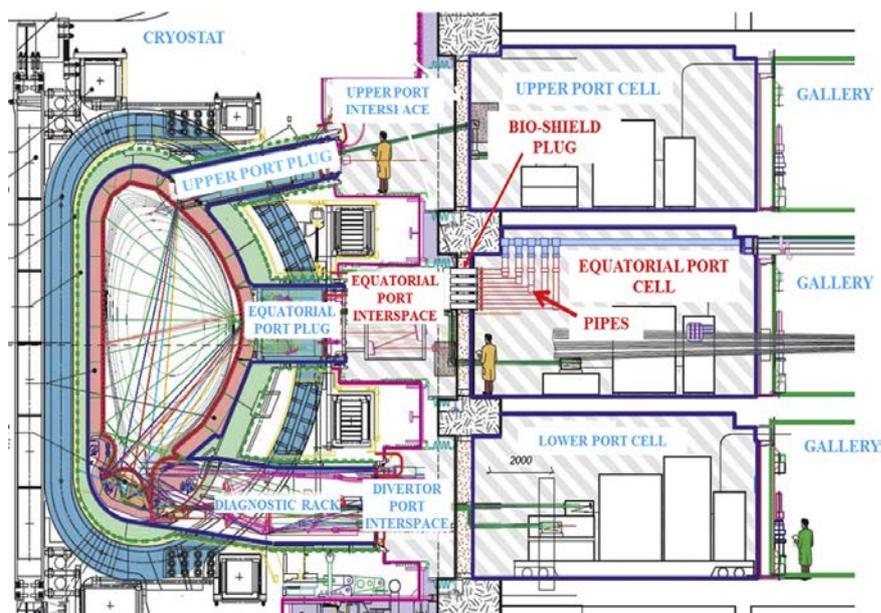


Рисунок 1.1.2. Схема полоидального сечения токамака ИТЭР с обозначением основных зон расположения оборудования и доступа персонала [2]

В существующих токамаках для ввода зондирующего лазерного излучения и сбора рассеянного света используются вакуумные окна, расположенные непосредственно на патрубках вакуумных камер установок. По причине значительных размеров вакуумного объема ИТЭР, а также высокой интенсивности предполагаемых нейтронных потоков [3], конструкция оптических диагностик ИТЭР предполагает наличие внутривакуумных оптических элементов. С целью защиты персонала и диагностического оборудования от ионизирующего излучения вакуумная камера ИТЭР будет окружена толстостенной биологической защитой, выполненной из специализированного бетона (Bio-shield на рисунке 1.1.2). Оптические элементы, расположенные в прямой видимости плазмы токамака, будут подвержены наиболее интенсивным тепловым нагрузкам и

дозам ионизирующего излучения. Эти элементы носят название первых зеркал или окон. На данный момент предполагается установка более 30 первых зеркал [4], схема расположения которых приведена на рисунке 1.1.3.

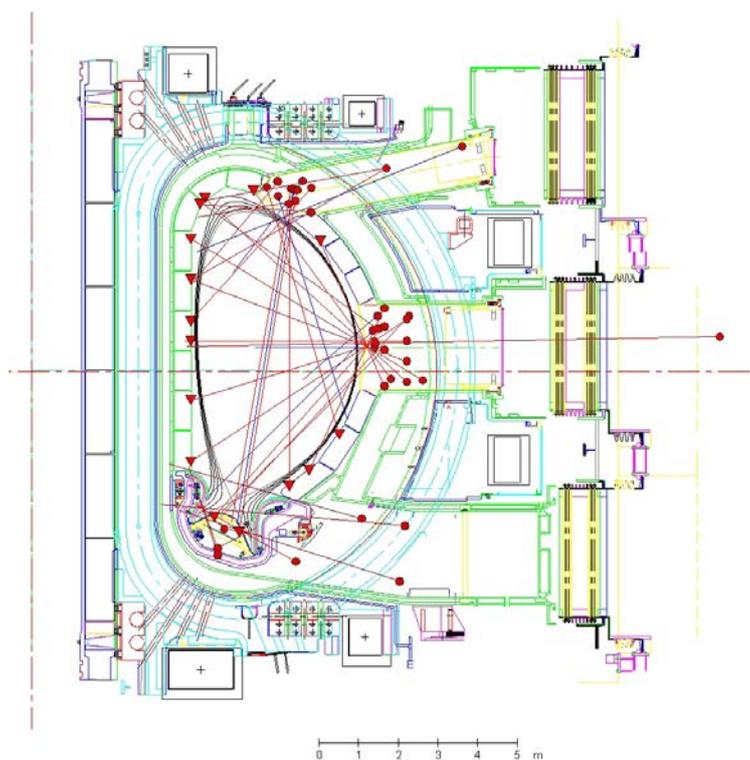


Рисунок 1.1.3. Схема полоидального сечения токамака с указанием мест расположения первых зеркал [4]. Положение зеркал указано красными точками

Сохранение функционала первых зеркал играет важнейшую роль в обеспечении долгосрочной эксплуатации оптических диагностик. Одним из основных факторов, оказывающих воздействие на работоспособность первых зеркал, является осаждение на их поверхности эродированных материалов первой стенки токамака. Осаждение пленок может привести к существенному искажению спектральных характеристик коэффициента отражения зеркал, что негативно скажется на результатах работы всей диагностической системы. Для оценки влияния переосаждения продуктов эрозии на оптические характеристики металлических зеркал были проведены эксперименты по экспозиции зеркал из различных материалов в ряде установок, таких как ASDEX, Tore Supra, TEXTOR и JET [5–7]. Наибольший

интерес представляют результаты, полученные на токамаке JET-ILW, ближайшем по размеру к ИТЭР и оснащеному ИТЭР-подобной первой стенкой, выполненной из бериллия и дивертора, выполненного из вольфрама. В работе [7] приведены сравнительные результаты исследований зеркал, расположенных в диверторе JET-ILW, по итогам трех экспериментальных кампаний. Исследования показали, что поверхность и отражательная способность зеркал подвергаются деградации после длительного выдерживания в диверторе. На рисунке 1.1.4 представлены изображения поверхности зеркал после экспозиции, полученные методом оптической микроскопии. Данные изображения можно разделить на три группы. На поверхности большинства зеркал, расположенных на некотором отдалении от плазмы (рисунок 1.1.4 а и б), были обнаружены цвета побежалости, характеризующие результат неравномерного осаждения тонких пленок. Зеркала, расположенные вблизи элементов конструкций, были подвержены осаждению крупных капель (рисунок 1.1.4 с). Зеркала, находившиеся в непосредственной близости от плазмы (рисунок 1.1.4 d) были подвержены интенсивной эрозии, что привело к закруглению их поверхности. При этом было обнаружено, что осаждение пленок приводит к значительному ослаблению коэффициента отражения зеркал из молибдена в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (рисунок 1.1.5). Ухудшение отражательной способности зеркал связано, в частности, со структурой осаждаемых пленок. В работе по модельному осаждению бериллиевых пленок из плазменной фазы на установке PISCES-B, расположенной в Сан-Диего, США, было обнаружено, что осаждаемые пленки имеют пористую структуру, значительно уменьшающую коэффициент отражения зеркал [8].

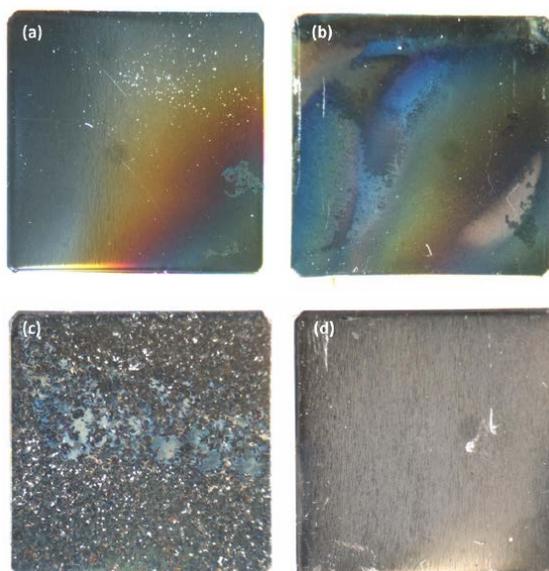


Рисунок 1.1.4. Оптическая микроскопия образцов молибденовых зеркал, экспонированных в токамаке JET [7]

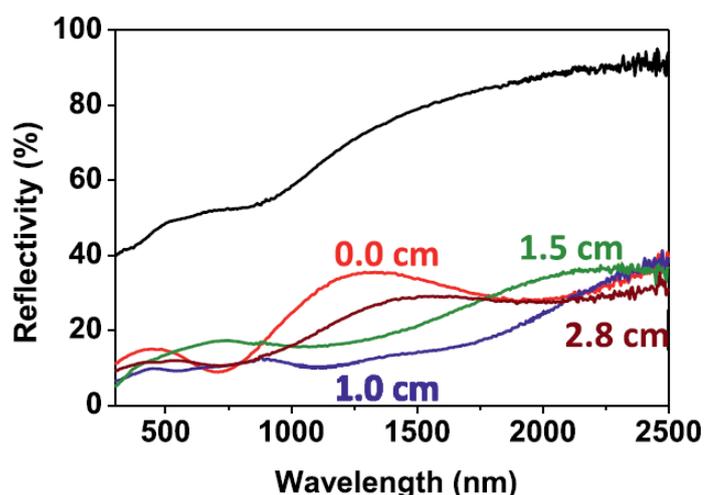


Рисунок 1.1.5. Коэффициент отражения зеркал из поликристаллического молибдена, расположенных на различном расстоянии (0, 1.0, 1.5, 2.8 см) от поверхности дивертора внутри макета диагностического канала, до (черная кривая) и после экспозиции в JET-ILW [7]

Анализ элементного состава осажденных на зеркала пленок, полученных на токамаке JET, проводился комбинацией методов спектрометрии атомов отдачи, вылетающих вперед (ERDA), для анализа легких элементов и резерфордовского обратного рассеяния (RBS) для анализа тяжелых элементов. Метод ERDA работает на основе анализа атомов отдачи, покинувших образец в результате их упругого взаимодействия с

атомами матрицы [9]. Исследования поверхности молибденовых зеркал показали, что пленки состоят преимущественно из бериллия с примесями кислорода, азота и углерода. Причем данные элементы распределены равномерно по глубине осажденной пленки (рисунок 1.1.6).

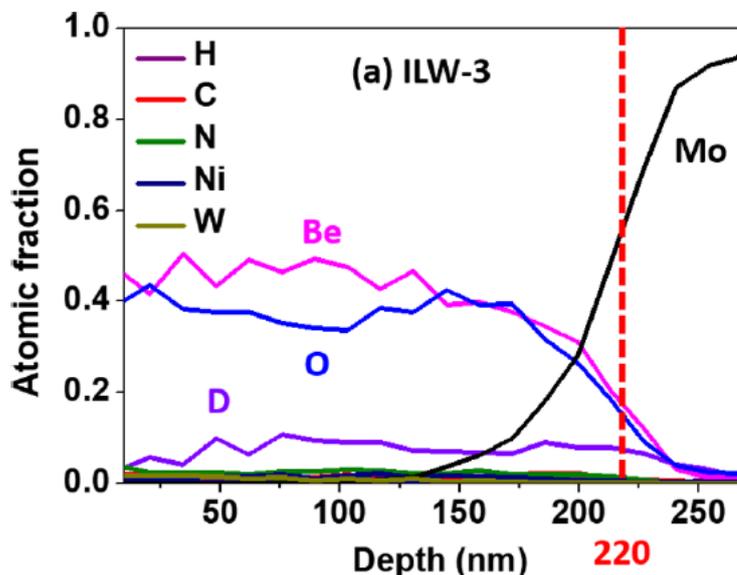


Рисунок 1.1.6. Элементный профиль пленки на молибденовом зеркале после экспозиции в диверторе JET [7]

Для зеркал, расположенных в нижних портах и в диверторе, существует возможность осаждения на них пленок с примесями вольфрама, являющегося основным материалом первой стенки дивертора. Наличие вольфрамовых включений на поверхности зеркала в дальнейшем может затруднить процесс восстановления оптических характеристик зеркала. Содержание вольфрама измерялось методом RBS, диагностики, основанной на анализе спектров обратнорассеянных ионов He или H, ускоренных до энергии в несколько МэВ, на атомах поверхности объекта исследования. Содержание легких элементов (Be, C, D) было измерено методом NRA (nuclear reaction analysis), основанным на анализе продуктов ядерных реакций, возбуждаемых ионами водорода и гелия [9]. В таблице 1.1.1 приведен элементный состав пленок, осажденных на зеркала, расположенные в разных частях дивертора JET-ILW, с учетом данных RBS и NRA. Из представленных данных видно, что осаждения состоят преимущественно из

бериллия. При этом было обнаружено, что концентрация вольфрама невелика и составляет меньше одного процента.

Таблица 1.1.1. Элементный состав пленок на зеркалах, экспонированных в токамаке JET-ILW [7]

	Inner, $10^{15}$ atom/cm <sup>2</sup>	Base, $10^{15}$ atom/cm <sup>2</sup>	Outer, $10^{15}$ atom/cm <sup>2</sup>
D	67 – 1906	161 – 247	73 – 1131
Be	854 – 854	979 – 1425	3105 – 6641
C	60 – 159	50 – 81	62 – 118
W	18 – 425	18 – 58	8 – 156

Результаты исследования зеркал, расположенных вблизи бериллиевой стенки токамака JET-ILW, приведены в [10]. Зеркала были расположены как непосредственно на стенке, так и на некотором отдалении (1,5; 3 и 4,5 см) от нее в узких каналах сечением  $1 \times 1$  см<sup>2</sup>. Коэффициент отражения большинства зеркал не претерпел существенных изменений, однако оптические характеристики некоторых зеркал ухудшились из-за переосаждения пленок и химической модификации их поверхности. Элементный анализ пленок, осажденных на поверхности зеркал, расположенных на расстоянии 3 см от бериллиевой стенки, был проведен методом ERDA. Результат элементного анализа приведен на рисунке 1.1.7. Полученные осаждения представляют собой смесь бериллия, кислорода и углерода, с примесью компонентов нержавеющей стали. В исследуемых пленках не было обнаружено вольфрамовых примесей и крупногабаритных капель. В целом исследования показали, что условия экспозиции первых зеркал вблизи бериллиевой стенки, значительно более щадящие по сравнению с условиями дивертора токамака. Однако зеркала, расположенные в глубине исследовательских каналов, также подвержены осаждению пленок из материалов первой стенки, что приводит к ухудшению их оптических свойств.

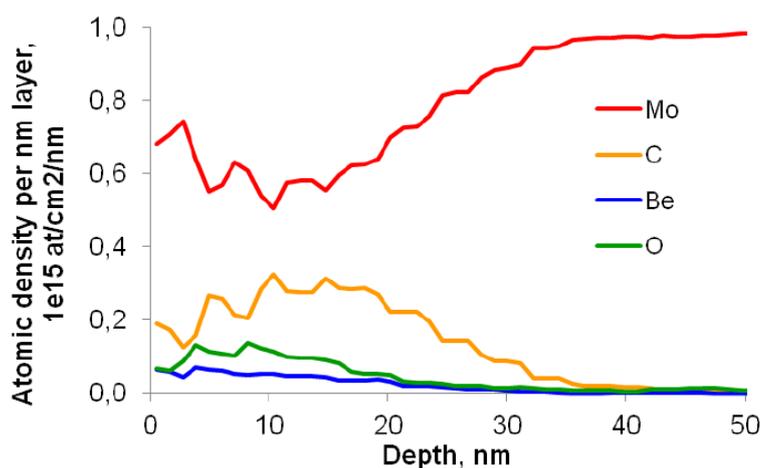


Рисунок 1.1.7. Элементный профиль пленки на Мо зеркале, расположенном на расстоянии 3 см от первой стенки, после экспозиции в JET-ILW [10]

Исходя из приведенных данных, ожидается, что во время работы ИТЭР время от времени будет требоваться проведение мероприятий по очистке первых зеркал от осажденных на них пленок. Согласно [11] на текущий момент в расписании работы ИТЭР предусмотрено наличие времени для обработки поверхности зеркал в течение так называемых технологических смен TCS (Test and Conditioning State), которые запланировано проводить один раз в две недели. В случае высокой скорости осаждения пленок или после нештатных ситуаций существует возможность возникновения необходимости проводить процесс очистки зеркал в ночь между рабочими сменами. Однако слишком частое проведение процедур очистки зеркал с помощью локальных плазменных разрядов может негативно сказаться на работе некоторых систем токамака. В частности, существуют ограничения, связанные с работой инжекторов нейтральных пучков [11].

Скорость осаждения пленок на предполагаемые к установке в ИТЭР зеркала может быть оценена на основании результатов проведенных в JET-ILW исследований. Согласно данным приведенным в [10], на зеркало, расположенное в канале глубиной 3 см, за 18,9 часов экспозиции в токамаке была осаждена пленка толщиной ~30 нм. Средняя скорость осаждения в таком случае составляет ~0,03 нм/мин. Ввиду того, что во время горения плазмы токамака давление фонового газа в верхних и экваториальных портах

не превышает долей Па распространение примеси в канале происходит в молекулярном режиме. Толщина пленок, осажденных на поверхности зеркал, расположенных в диверторе, находится в диапазоне 300–800 нм в зависимости от места их расположения. Средняя скорость осаждения в таком случае превышает 0,3 нм/мин. Для защиты оптических элементов от интенсивного формирования загрязняющих пленок и осаждения бериллиевой пыли в диагностике томсоновского рассеяния в диверторе предлагается использовать окно в качестве первого оптического элемента [12].

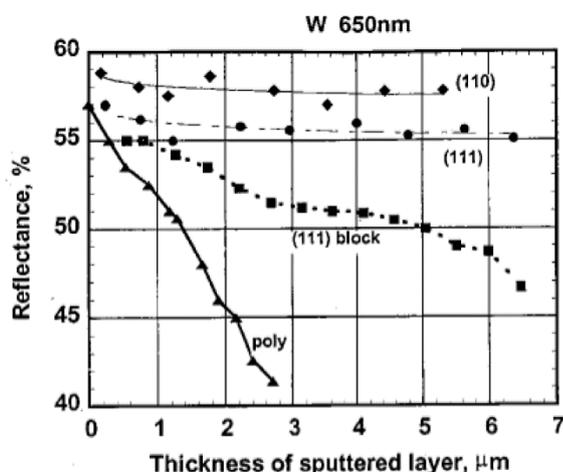


Рисунок 1.1.8. Зависимость коэффициента отражения моно- и поликристаллических вольфрамовых зеркал ( $\lambda = 650$  нм) от толщины слоя, удаленного с поверхности под действием ионов дейтерия [16]

Эрозия поверхности зеркала за счет физического распыления энергичными атомами перезарядки или вследствие травления ионами в чистящем разряде также может привести к ухудшению параметров первого зеркала. В ряде работ продемонстрировано, что шероховатость поликристаллических зеркал увеличивается за счет механизма селективного травления, вызванного разностью скоростей распыления зерен, имеющих различное кристаллографическое направление [13–15]. В работе [15] представлен результат исследования изменения коэффициента отражения вольфрамовых зеркал под действием бомбардировки дейтериевыми ионами высоких энергий. Как видно из рисунка 1.1.8, отражательная способность вольфрамового поликристаллического зеркала значительно падает с

толщиной слоя, распыленного с его поверхности. Использование монокристаллических зеркал напротив позволяет в значительной степени сохранить коэффициент отражение зеркала при удалении слоя толщиной до 5 мкм.

Наряду с монокристаллическими зеркалами перспективным является использование нанокристаллических зеркал. Являясь поликристаллическими, они так же подвержены селективному распылению, которое, однако, не приводит к ослаблению отражательной способности по причине малых размеров кристаллитов (десятки нм). Нанокристаллические зеркала получают преимущественно путем магнетронного напыления. В качестве подложек используются полированная нержавеющая сталь или TZM (сплав титан-цирконий-молибден) [16, 17]. Существует технологическая возможность осаждать нанокристаллические покрытия на зеркала большой площади [17].

Не менее значимым фактором, воздействующим на установленные внутри вакуумного объема ИТЭР зеркала, является нагрев, обусловленный интенсивными потоками нейтронного и гамма-излучения [18, 19]. В работе [20] приведен тепловой расчет первого зеркала, в условиях радиационного нагрева. Удельная мощность, падающая на поверхность зеркала, была ограничена величиной  $16 \text{ кВт/м}^2$ , что соответствует полной термоядерной мощности ИТЭР, равной 500 МВт. Исследование влияния метода охлаждения на максимальную температуру зеркала (рисунок 1.1.8а) и на его деформацию, вызванные градиентами температуры (рисунок 1.1.8б), показали преимущество использования системы водяного охлаждения. Данные результаты были учтены в ряде публикаций, описывающих разработку конструкции узла первого зеркала [18, 21, 22].

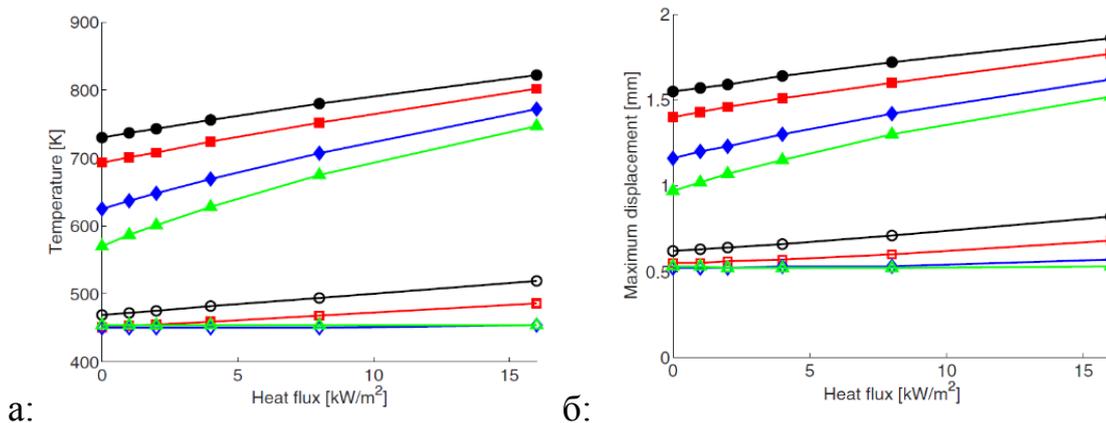


Рисунок 1.1.8. Результаты теплового расчета первого зеркала различной толщины (черный – 30 мм, красный – 20 мм, синий – 10 мм, зеленый – 5 мм) в условиях радиационного нагрева. В качестве материала первого зеркала рассматривалась нержавеющая сталь. Сплошные точки – радиационное охлаждение, закрашенные – водяное охлаждение, а: – зависимость максимальной температуры зеркала от величины теплового потока, б: – зависимость величины деформации поверхности зеркала, вызванной тепловыми напряжениями [20]

Воздействие интенсивного ионизирующего излучения также негативно сказывается на оптических параметрах металлических зеркал. Для моделирования, характерного для токамака нейтронного излучения, в экспериментальной работе часто применяют облучение мишеней собственными ионами. В работе [23] показано, что облучение зеркал из поликристаллического молибдена ионами  $^{98}\text{Mo}^+$  и  $^4\text{He}^+$  с энергией 350 кэВ и флюенсами, соответствующими радиационному воздействию в 1 сна (смещение на атом), приводит к незначительному (2–3 %) падению коэффициента отражения. При этом облучение зеркал ионами гелия, с флюенсом выше  $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , соответствующему воздействию 30 сна, приводит к значительному ослаблению коэффициента отражения [24]. Учитывая, что на первую стенку ИТЭР предполагается воздействие сравнимое с 1–2 сна, можно предположить, что ионизирующее излучение и потоки атомов перезарядки будут оказывать незначительное влияние на характеристики зеркал, по сравнению с другими воздействиями.

Таким образом, материал первого зеркала должен удовлетворять таким

требованиям как высокий коэффициент отражения, химическая стабильность, стойкость к бомбардировке быстрыми ионами и нейтралами, высокая температура плавления и отсутствие долгоживущих продуктов реакции с нейтронами высоких энергий. Помимо этого, важными факторами являются простота механической обработки и стоимость. Из допустимых к использованию в ИТЭР материалов на данный момент основными кандидатами являются нано- и монокристаллические молибден и родий [25]. Наряду с более высоким коэффициентом отражения родиевые зеркала обладают высокой стойкостью к окислению под действием горячего пара во время аварийного прорыва охлаждающей жидкости ISE (Ingress of Steam Event) [26]. Однако ввиду высокой стоимости родия, а также по причине трудности в изготовлении крупномасштабных макетов монокристаллических родиевых зеркал, монокристаллический молибден является на текущий момент основным кандидатом на роль материала первого зеркала в ИТЭР.

## 1.2 Литературный обзор экспериментов по плазменной очистке оптических поверхностей. Обоснование выбора высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕ) как основного инструмента очистки и анализ условий его применимости

Поверхность первых зеркал, расположенных внутри вакуумной камеры токамака ИТЭР, будет подвержена осаждению пористых металлических пленок, приводящих к значительному ухудшению их оптических свойств. По причине сложности конструкции, повышенного радиационного фона, необходимости соблюдения условия высокого вакуума и т.д. регулярная замена первых зеркал исключена. Для *in-situ* восстановления отражательной способности первых зеркал необходимо предусмотреть наличие системы очистки, обладающей следующим рядом свойств. Система очистки должна обеспечивать возможность удаления металлических и диэлектрических пленочных осадений с поверхности зеркальной оптики внутри вакуумной камеры токамака ИТЭР за время, отведенное для данной процедуры в

регламенте работы ИТЭР. При этом не должно происходить деградации поверхности зеркал, приводящей к значительному падению коэффициента отражения. Кроме того, система очистки должна эффективно работать в условиях высокого магнитного поля, направленного под произвольным углом к зеркальной поверхности. Для решения этой задачи в разное время рассматривались подходы, основанные на лазерной или плазменной очистке оптической поверхности.

Лазерная чистка заключается в сканировании поверхности загрязненного зеркала пучком лазерного излучения [27]. При этом в результате процесса лазерной абляции происходит испарение слоя, загрязняющего зеркало. Выбор оптимальной плотности мощности лазерного излучения позволяет обеспечить отсутствие негативного воздействия лазерной чистки на поверхности зеркала. Однако, описанные в [28] результаты показывают, что процедура лазерной очистки не позволяет полностью восстановить коэффициент отражения зеркала. Исследование поверхности зеркал после лазерной чистки показало присутствие остаточного слоя загрязнений толщиной  $\sim 5$  нм, для удаления которого потребовалась экспозиция зеркал в плазме газового разряда. Кроме того, применимость данной техники к *in-situ* очистке в ИТЭР вызывает ряд существенных трудностей. В частности, для ввода лазерного излучения, необходимого для очистки, потребуется установка специальной оптической схемы, включающей в себя первое зеркало, так же подверженное перенапылению продуктов эрозии стенки и нуждающегося в системе очистки.

В связи с этим в качестве основного инструмента на данный момент рассматривается плазменная очистка зеркала [29]. Данный метод заключается в организации перед зеркалом газового разряда, являющегося источником ускоренных ионов. Взаимодействие потока ионов с поверхностью зеркала приводит к удалению загрязняющего слоя в результате физического или химического распыления. В качестве основы системы

плазменной чистки в разное время рассматривалось несколько способов организации чистящего разряда.

В работе [29] продемонстрирована система очистки зеркала, основанная на разряде постоянного тока. Для обеспечения горения разряда во внешнем магнитном поле, параллельном поверхности очищаемых зеркал применена схема с дополнительными сетчатыми катодами и цилиндрическими анодами, между которыми зажигается основной разряд (рисунок 1.2.1). В такой схеме процесс очистки зеркала обусловлен вытягиванием ионов из плазмы первым и вторым зеркалами, находящимися под катодным потенциалом. Применение среднечастотного импульсного источника (DC/PDC) питания позволяет удалять с поверхности зеркал тонкие диэлектрические пленки, что невозможно в обычном разряде постоянного тока. В данной работе продемонстрировано, что применение такого подхода позволяет обеспечить высокую пространственную однородность очистки. В этой системе очистки реализуется два режима: без магнитного поля – используется электростатическое удержание плазмы в цилиндрическом полумесяце катода. В магнитном поле используется комбинация электростатического удержания в полумесяце катода и магнитного удержания в конфигурации ячейки Пеннинга. Продукты эрозии проходят через сетку и осаждаются на нераспыляемых стенках вакуумной камеры.

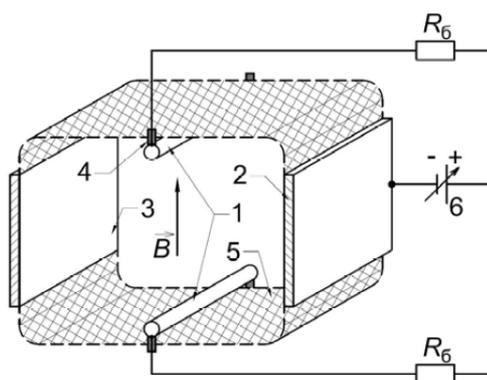


Рисунок 1.2.1. Схема плазменной очистки, основанной на разряде постоянного поля в присутствии магнитного поля [29]

Тем не менее, основным недостатком применения разряда постоянного тока является достаточно высокое катодное падение напряжение, характерное для разрядов такого типа. В частности, в [29] минимальное катодное напряжение составляло  $\sim 450$  В. Бомбардировка поверхности поликристаллических зеркал ионами, ускоренными в приэлектродном слое до энергий в сотни эВ, может привести к значительному увеличению шероховатости поверхности зеркала и ухудшению его спектральных характеристик. Кроме того, разряды такого типа обеспечивают низкую эффективность при распылении диэлектриков в среднечастотном импульсном режиме распыления, так как частота импульсов меньше 200 кГц, в связи с чем такая система очистки не может использоваться для удаления загрязнений с поверхности оптических окон. Тем не менее, на основе DC/PDC газового разряда в настоящее время идёт разработка систем плазменной очистки входного зеркала для Российских оптических диагностик ИТЭР “Активная спектроскопия” и “Спектроскопия водородных линий”, в которых в качестве первого зеркала предполагается использование полированного монокристаллического молибдена.

Наряду с разрядом на постоянном и среднечастотном импульсном токе система чистки зеркала может быть основана на разряде переменного тока. Основным преимуществом таких разрядов по сравнению с разрядами постоянного тока является возможность распыления как металлических, так и толстых диэлектрических покрытий.

В работе [30] в качестве источника ионов системы очистки зеркала рассматривалась плазма электронно-циклотронного (ЭЦР) разряда. Отличительными особенностями ЭЦР разряда являются возможность работы при низких давлениях (0.01 – 0.1 Па) и высокая плотность плазмы ( $10^9 - 10^{11}$  см<sup>-3</sup>). В большинстве систем, основанных на ЭЦР разряде, обрабатываемый образец находится на некотором удалении от плазмы [31]. При этом в случае образца под плавающим потенциалом ускоряющее напряжение вблизи его поверхности составляет десятки вольт. В таком случае наблюдаются условия,

оптимальные для химического распыления поверхности обрабатываемой мишени. В случае необходимости имеется возможность подачи отрицательного смещения на образец, что позволяет создать поток ускоренных ионов, приводящий к физическому распылению. Тем не менее данный подход не нашел существенного развития в направлении чистки внутривакуумной оптики по следующему ряду причин. Во-первых, для поджига ЭЦР разряда необходимо магнитное поле, которое может быть отключено во время очистки внутривакуумной оптики в ИТЭР. Во-вторых, частота электронно-циклотронного резонанса в условиях магнитного поля ИТЭР составляет 170 ГГц, что накладывает высокие требования на антенно-фидерный тракт. Наконец, в случае подачи на очищаемое зеркало постоянного потенциала для вытягивания ионов из плазмы исключается возможность распыления диэлектрических покрытий.

Другим способом удаления загрязнений в вакуумных условиях является ионное распыление в высокочастотном (радиочастотном) газовом разряде. Этот метод широко используется в технологическом оборудовании для вакуумного плазменного травления. Существует два типа ВЧ разряда – индукционный (ВЧИ) и емкостной (ВЧЕ). ВЧИ разряд формируется внутри протяженного или плоского индуктора и зачастую используется в качестве источника ионов для ионных пучков. В работе [32] была продемонстрирована возможность очистки металлических зеркал от углеводородных пленок путем помещения их в плазму индукционного разряда. При этом авторы статьи указывают, что в магнитном поле конфигурация разряда может существенно изменяться. В работе [33] продемонстрировано численное исследование ВЧИ разряда в присутствии внешнего магнитного поля с помощью двумерного гидродинамического кода, включающего в себя трехмерный Монте-Карло код, учитывающий электрон-электронные соударения. Обнаружено, что при включении слабого внешнего магнитного поля (единицы мТл) электроны, рожденные вблизи обмотки индуктора, удерживаются в этой области, приводя к росту

плотности плазмы в данной области. Применительно к чистке зеркал в ИТЭР данный эффект может привести к существенной неоднородности распыления и ухудшению спектральных характеристик зеркал.

ВЧЕ разряд формируется между двумя плоскопараллельными электродами, на один из которых подается ВЧ мощность, а другой заземлен (рисунок 1.2.1). В отличие от разряда постоянного тока, наличие диэлектрического покрытия не является препятствием для протекания высокочастотного тока, благодаря наличию в диэлектриках тока смещения [34]. В отличие от индукционного разряда, вся поверхность нагруженного электрода участвует в формировании плазмы разряда и распыляется под действием потока ускоренных в приэлектродном слое ионов. ВЧЕ разряд позволяет добиться достаточно высокой однородности плотности тока на электроде, сохраняя при этом приемлемую энергию бомбардирующих электрод частиц.

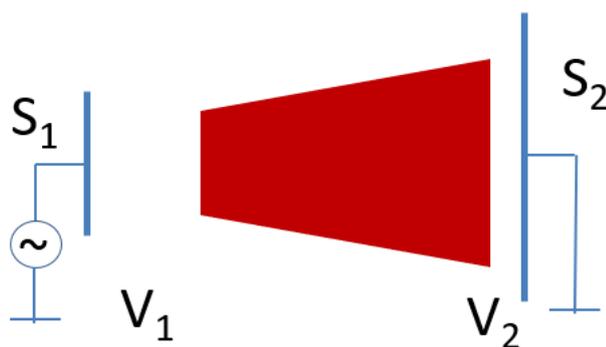


Рисунок 1.2.2. Принципиальная схема несимметричного ВЧЕ разряда.  $S_1$  и  $S_2$  – площади нагруженного (1) и заземленного (2) электродов, а  $V_1$  и  $V_2$  – падения напряжений в соответствующих приэлектродных слоях

Эффективность применения ВЧЕ разряда для задачи очистки внутривакуумной оптики продемонстрирована в ряде работ. Одним из основных направлений являлась демонстрация возможности очистки зеркал в присутствии магнитного поля. Так, в работе [35] была продемонстрирована плазменная чистка зеркала в слабом (0,35 Тл) и сильном (3,5 Тл) магнитном поле, направленным под углом от  $0$  до  $90^\circ$  к нормали зеркала. Экспозиция зеркал в аргоновом разряде на частоте 60 МГц в присутствии слабого

магнитного поля привела к успешной очистке образцов от модельных алюминиевых осадений.

С целью выбора оптимального материала для первого зеркала в работе [36] проводились эксперименты по стойкости зеркал из поли-, нано- и монокристаллов молибдена и родия к циклическим чисткам от металлических пленок. Исследования эволюция коэффициента отражения и шероховатости поверхности показали, что нано- и монокристаллические зеркала проявляют более высокую стойкость по сравнению с поликристаллическими. Ввиду опасности полного удаления нанокристаллического слоя применение монокристаллических зеркал является более предпочтительным.

Эксперименты по удалению алюминий-содержащих осадений с поверхности макета неохлаждаемого зеркала в установке EAST, описанные в [37], являлись первым подходом к верификации концепции ВЧ очистки в условиях токамака. Чистка проводилась в атмосфере неона при давлении 0,5 Па, на частоте 13,56 МГц и в присутствии постоянного магнитного поля величиной 2 Тл. Угол между направлением магнитного поля и нормалью к поверхности зеркала составлял 5 и 20°. Эксперименты по очистке зеркала привели к восстановлению коэффициента зеркального охлаждения на всей поверхности зеркала, за исключением угла магнитного поля в 5°, в котором наблюдалась существенная неоднородность чистки.

Таким образом, применение ВЧ разряда позволяет успешно удалять как металлические, так и диэлектрические осадения в условиях сильного магнитного поля. Применение монокристаллических зеркал позволяет добиться сохранения высокого коэффициента отражения после многократных циклов осаждения и чистки металлических пленок. Решение задачи подбора оптимального режима очистки, оценка скорости удаления пленок-загрязнителей, а также отработка ряда подходов к охлаждению зеркала и подведению к нему ВЧ мощности, описанные в настоящей

диссертации, позволят перейти к этапу инженерной разработки систем очистки внутривакуумной оптики токамака ИТЭР.

### **Выводы к главе 1:**

В обзорной главе 1 представлены основные факторы, воздействующие на первые зеркала диагностических систем токамака ИТЭР. Приведено обоснование использования ВЧЕ разряда, как основного инструмента системы очистки первых зеркал от переосажденных продуктов эрозии первой стенки токамака.

*Таким образом, в данной главе приведен краткий обзор экспериментальных исследований модификации оптических поверхностей, экспонированных в современных токамаках и модельных экспериментах. На основании сравнительного анализа различных способов in-situ очистки зеркал в токамаке приведено обоснование использования системы чистки, основанной на высокочастотном емкостном разряде.*

## **Глава 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННОГО ПОТОКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ВЧЕ РАЗРЯДА**

### **2.1 Описание экспериментальной установки для исследования параметров ВЧЕ разряда**

Эксперименты, описанные в диссертации, проводились на двух специально спроектированных экспериментальных стендах. Стенд № 1 (см. рис. 2.1.1) включает в себя вакуумный объем (~37 л) диаметром 220 мм и длиной 158 мм, который является составляющей частью магнитопровода с пятью катушками, создающими внутри вакуумного объема магнитное поле ~ 0,7 Тл. Передний и боковой фланцы, изготовленные из магнитомягкой стали марки 10895, представляют собой полюсные наконечники магнитопровода.

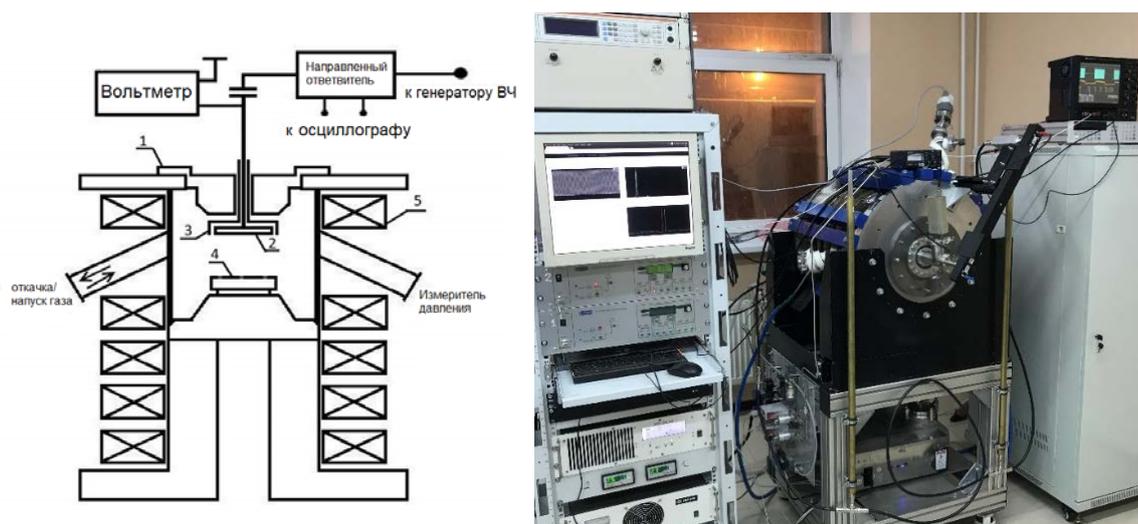


Рисунок 2.1.1. Экспериментальный стенд № 1 с аксиальным магнитным полем. 1 – вакуумный объем из нержавеющей стали, интегрированный с магнитопроводом, 2 – ВЧ электрод, 3 – заземленный экран, 4 – заземленный электрод с интегрированным зондом задерживающего поля, 5 – катушки магнитного поля

Профили изменения магнитной индукции внутри вакуумной камеры стенда приведены на рисунке 2.1.2. Величина неоднородности магнитного поля в зазоре между полюсными наконечниками составляет ~15% вдоль оси цилиндра и ~3% в радиальном направлении. Камера имеет 6 боковых патрубков, которые используются для напуска рабочего газа, контроля

давления, вакуумной откачки, а также для наблюдения за процессом горения ВЧ разряда.

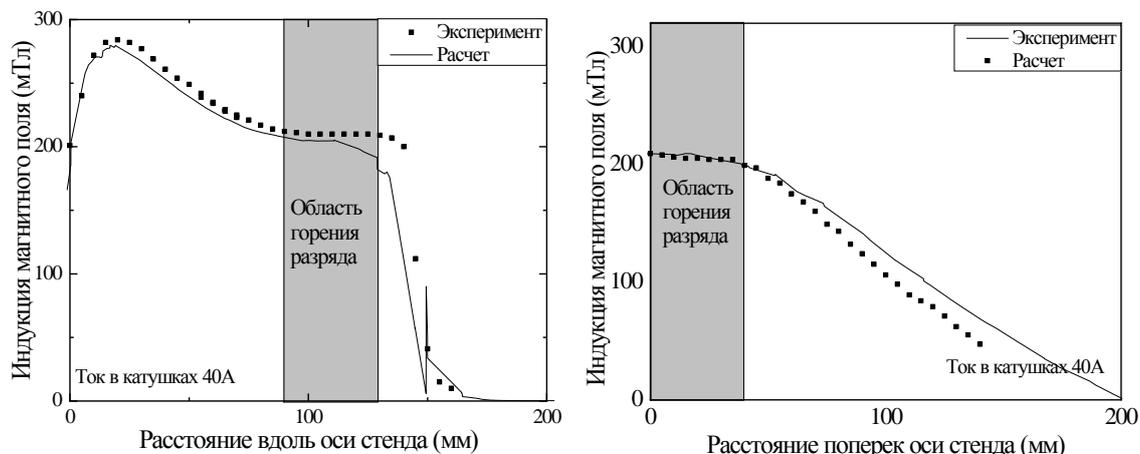


Рисунок 2.1.2. Профили индукции магнитного поля в экспериментальном стенде № 1. Слева – график величины индукции магнитного поля вдоль оси разряда, справа – профиль в радиальном направлении (для сечения, соответствующего координате вдоль оси разряда  $l = 100$  мм). Зона горения ВЧ разряда показана заштрихованной областью

Сечение трехмерной модели вакуумного объема с электродами представлено на рисунке 2.1.3. На переднем фланце вакуумной камеры располагается узел ВЧ-электрода (6), снабженный анализатором ионного потока (5). В области, находящейся за электродом, для предотвращения горения плазмы использовался заземленный экран (4). ВЧ мощность подводилась к нагруженному электроду через внутривакуумный ВЧ фидер и электрический гермоввод с коаксиальным ВЧ разъемом N-типа (3). На противоположном фланце располагается заземленный электрод, интегрированный с четырехсеточным анализатором задерживающего поля (7). Полусные наконечники (2, 8), также, как и фланец (1), являются частью магнитопровода и выполнены из магнитомягкой стали марки 10895, покрытой слоем хрома, предотвращающего появление коррозии.

Расстояние между нагруженным и заземленным электродами составляет 5 см. В некоторых экспериментах в качестве нагруженного электрода использовались зеркала диаметром 80 мм, выполненные из нержавеющей стали или поликристаллического молибдена.

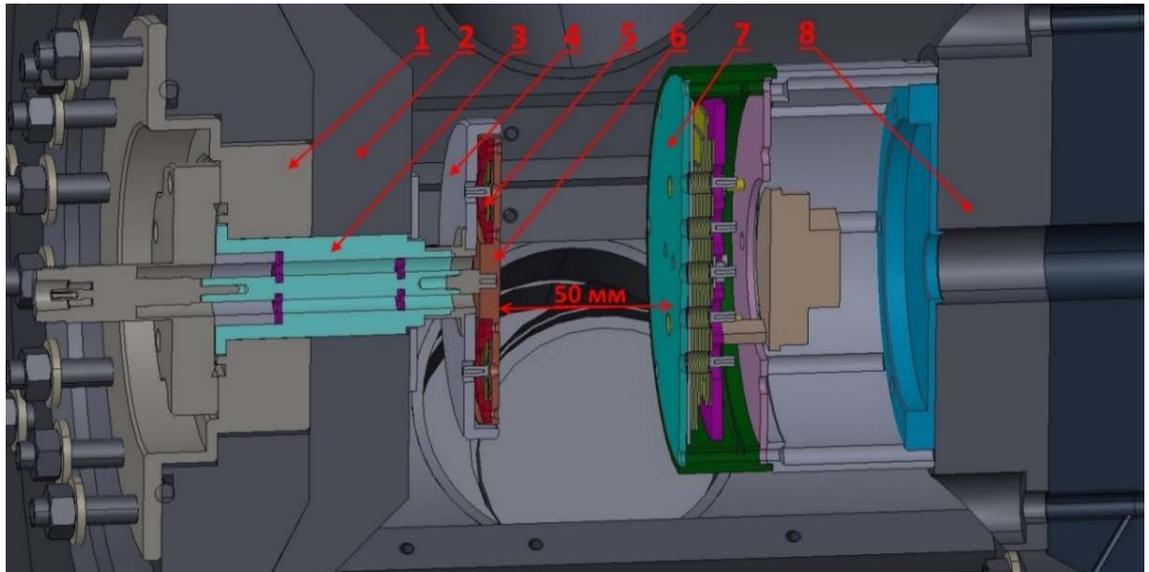


Рисунок 2.1.3. Трехмерная модель, демонстрирующая схему расположения электродов внутри экспериментального стенда № 1.

1 – Вакуумный фланец, 2 – полюсный наконечник, 3 – вакуумный ВЧ фидер, 4 – заземленный экран, 5 – анализатор потока ионов, 6 – ВЧ электрод, 7 – анализатор задерживающего поля, 8 – полюсный наконечник

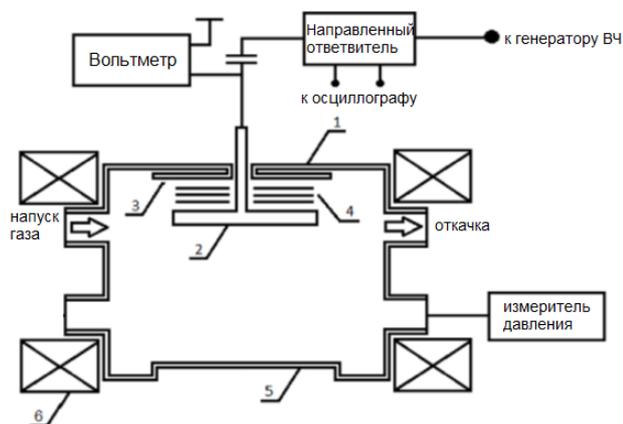


Рисунок 2.1.4. Экспериментальный стенд № 2 с аксиальным магнитным полем на оси, перестраиваемым от 0 до 0,05 Тл. 1 – вакуумная камера из нержавеющей стали, 2 – ВЧ-электрод, 3 – заземленный экран, 4 – кольца под плавающим потенциалом, 5 – заземленный электрод, 6 – катушки магнитного поля

Принципиальная схема и фотография экспериментального стенда № 2 приведены на рисунке 2.1.4. Схема расположения электродов идентична

схеме стенда № 1. Зазор между заземленным и нагруженным электродами составляет 10 см. Данный стенд использовался для экспериментов с охлаждаемым макетом узла первого диагностического зеркала (см. описание в главе 4) и был оборудован двумя магнитными катушками, создающими аксиальное магнитное поле, величина которого перестраивается на оси в диапазоне от 0 до 0,05 Тл. Величина неоднородности магнитного поля вдоль области горения разряда составляет ~5% (см. рисунок 2.1.5).

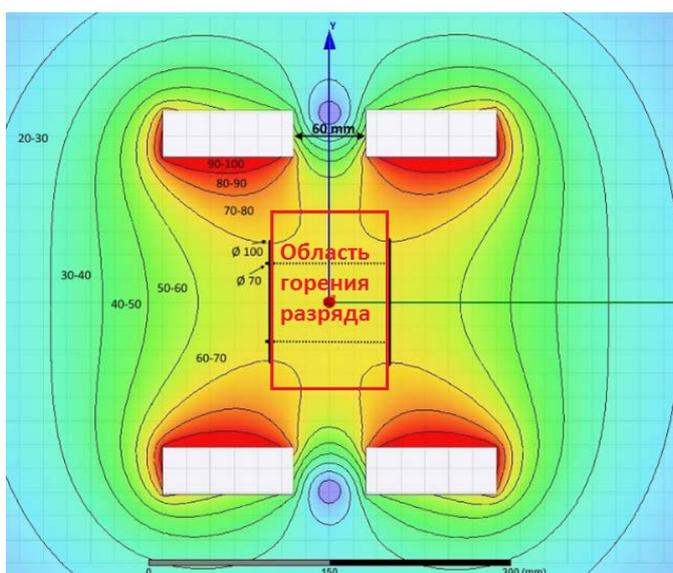


Рисунок 2.1.5. Результат численного моделирования магнитного поля, создаваемого катушками экспериментального стенда № 2.

Предельное остаточное давление в вакуумных камерах стендов составляет  $(1-5) \times 10^{-4}$  Па. Откачка осуществляется с помощью вакуумных откачных постов Agilent TPS Compact (стенд № 1) и Pfeiffer HiCube 80 (стенд № 2). Подача газа в камеры осуществляется с помощью газораспределительной системы с регуляторами расхода газа РРГ-10 фирмы «ЭлТочПрибор». Имеющееся оборудование позволяет проводить эксперименты в атмосфере молекулярного дейтерия ( $D_2$ ) и благородных газах (He, Ne, Ar, Kr, Xe) в диапазоне давлений 0,1 – 10 Па.

На стадиях зажигания и поддержания разряда в экспериментальных стендах используются следующие ВЧ генераторы:

- Генератор фиксированный частоты 81 МГц с выходной мощностью

до 500 Вт (RFPS500 A81);

– Генератор, перестраиваемый в диапазоне частот 60 – 120 МГц, с выходной мощностью до 500 Вт (GA-60.120-5);

– Генератор, перестраиваемый в диапазоне частот 0,1 – 400 МГц, с выходной мощностью до 100 Вт (Amplifier Research CL00400AM4).

Для измерения поглощенной в разряде ВЧ мощности используются направленные ответвители с коэффициентом ответвления 20 дБ, сигналы с которых через набор аттенюаторов подаются на вход измерительной платы с частотой оцифровки 5 ГГц и полосой 700 МГц [38]. Применение быстрого преобразования Фурье позволяет выделить из полученного сигнала амплитуды содержащихся в нем гармоник. Величина ВЧ мощности высчитывается как сумма мощностей на каждой гармонике. Полная поглощенная в разряде мощность вычислялась как разность падающей и отраженной мощности.

Согласование плазменной нагрузки производилось путем П-образного согласующего устройства, состоящего из двух короткозамкнутых коаксиальных волноводов, переменной длины (рисунок 2.1.5), включенных в цепь параллельно. Максимальная длина волновода составляла ~0,9 м, расстояние между точками подключения волноводов в цепь составляло ~1 м. Такое согласующее устройство позволяло достигать коэффициента стоячей волны в диапазоне 1,5-1,8 в диапазоне частот 40 – 120 МГц.

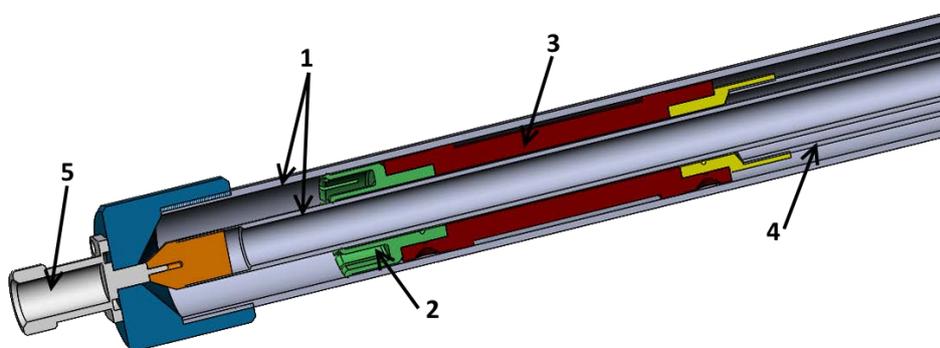
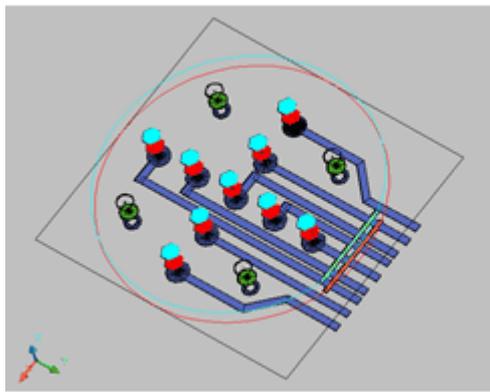


Рисунок 2.1.5. Схема короткозамкнутого коаксиального волновода, использовавшегося в устройстве согласования. 1 – трубки коаксиального волновода, 2 – подвижная цанга, обеспечивающая закорачивание волновода, 3,4 – элементы подвижного плунжера, 5 – разъем n-типа.

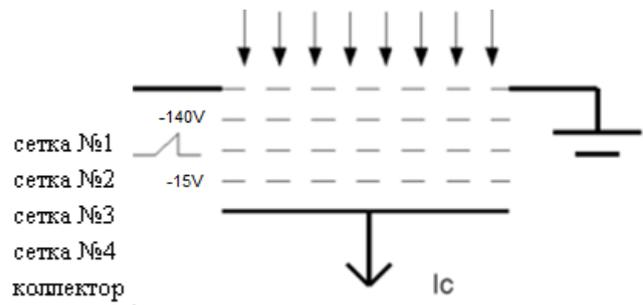
Развязка нагруженного электрода по постоянному току осуществляется с помощью последовательного включения конденсатора в фидерный тракт. Конденсатор был смонтирован в едином корпусе с выводом для измерения величины потенциала автосмещения, которое возникает в несимметричном ВЧ разряде.

## 2.2 Энергоанализатор для диагностики ионного потока на поверхность электрода

Планарный четырехсеточный энергоанализатор задерживающего потенциала был разработан, изготовлен и интегрирован в заземленные электроды стендов № 1 и № 2. Подобные зонды широко известны и часто используются в диагностике ионных потоков плазмы газового разряда [39, 40]. Диаметр корпуса разработанного анализатора составляет 100 мм, что позволяет разместить в одном корпусе девять каналов и исследовать пространственное распределение функций распределения по энергии ионов, бомбардирующих поверхность электрода. Каналы энергоанализатора имеют гальванически соединенные между собой наборы сеток и индивидуальные анализирующие коллекторы. Анализатор отличается малым зазором между сетками (~0,5 мм), который позволяет использовать его при длинах свободного пробега нейтральных частиц  $> 1$  мм, что соответствует давлению несколько Па. Конструкция и принципиальная схема многопозиционного четырёхсеточного энергоанализатора задерживающего поля показаны на рисунке 2.2.1. Фотографии анализатора в сборе с полюсным наконечником стенда № 1 и процесса сборки анализатора представлены на рисунке 2.2.2.

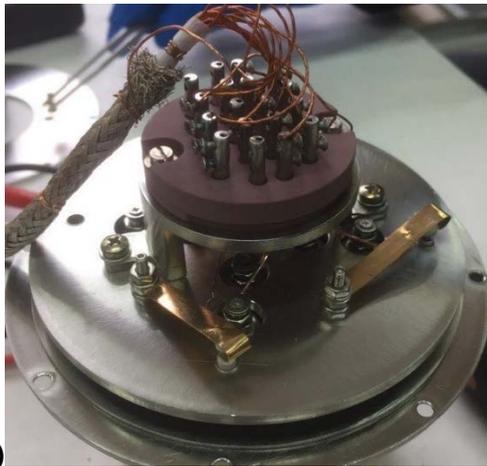


а



б

Рисунок 2.2.1. Схема многопозиционного четырёхсеточного энергоанализатора задерживающего поля. а – конструкция многопозиционного четырёхсеточного энергоанализатора; б – схема подключения электродной системы зонда



а)



б)

Рисунок 2.2.2. Многопозиционный четырёхсеточный энергоанализатор задерживающего поля. а – процесс сборки анализатора задерживающего поля; б – анализатор в сборе с полюсным наконечником стенда № 1

Конструкция анализатора включает заземленный корпус, четыре сетки, формирующих ионный поток на пространственно-распределенную систему коллекторов, которые заземлены через амперметр. Первая сетка, находящаяся под заземленным потенциалом, необходима для предотвращения взаимного влияния потенциалов плазмы и анализирующих сеток. Вторая сетка имеет отрицательный потенциал (-200 В) и служит барьером для потока электронов из плазмы. На третью сетку подается анализирующий пилообразный потенциал. Отрицательный потенциал

четвертой сетки (-15 В) используется для уменьшения влияния на показания анализатора эффекта ион-электронной эмиссии с поверхности коллектора.

Пример типичной зависимости ионного потока от потенциала на анализирующей сетке представлен на рисунке 2.2.3а. Функция распределения ионов по энергиям вычисляется путем дифференцирования данной зависимости (рисунок 2.2.3б).

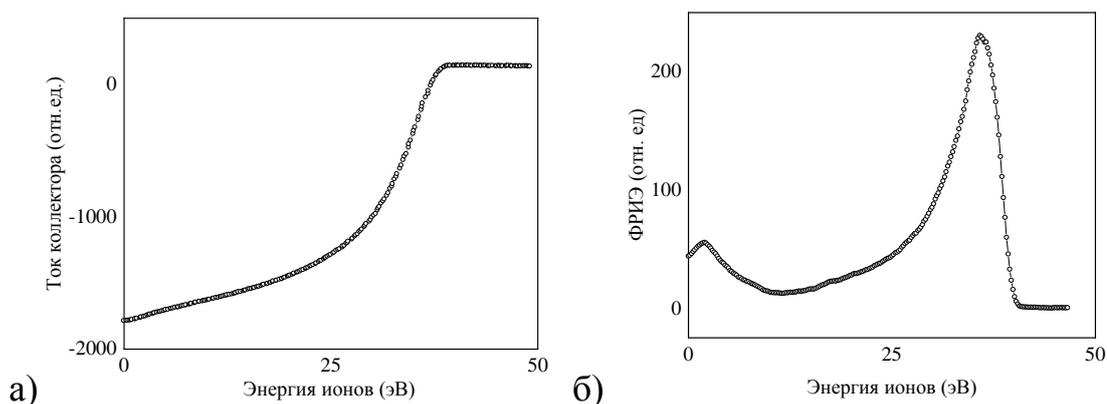


Рисунок 2.2.3. Результат измерения параметров ионного потока на поверхность заземленного электрода (в относительных единицах). а – пример типичной зависимости ионного потока на коллектор зонда от величины анализирующего потенциала; б – пример типичной функции распределения ионов на заземленном электроде

Для измерений абсолютных значений ионного потока на нагруженный электрод используется анализатор потока частиц, расположенный внутри нагруженного электрода. Схема анализатора представлена на рисунке 2.2.4.

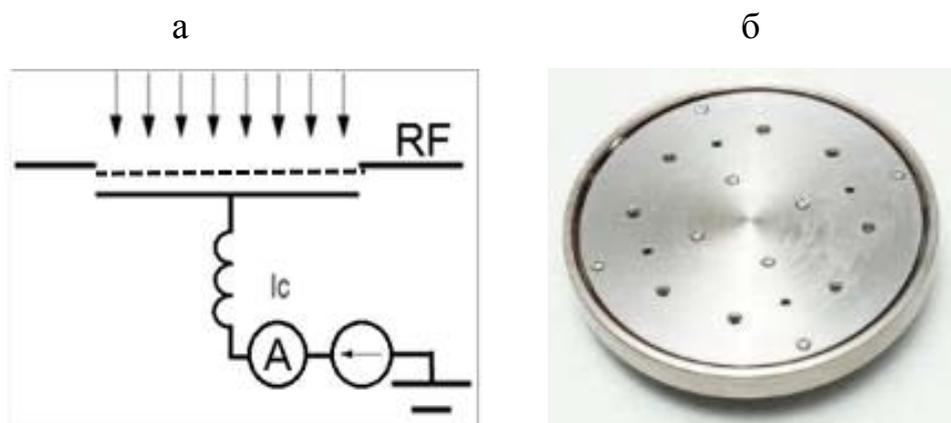


Рисунок 2.2.4. Анализатор ионного потока. а – принципиальная схема анализатора потока частиц; б – фотография ВЧ электрода, интегрированного с четырьмя анализаторами ионного потока

В процессе измерения ионного потока на коллектор анализатора подается потенциал, задерживающий электроны из плазмы. Квазипостоянная составляющая ионного тока измеряется при помощи специально разработанной платы, позволяющей отрезать ВЧ компоненту ионного тока с помощью фильтра нижних частот. Единственная сетка зонда предназначена для уменьшения возмущения плазмы под действием потенциала коллектора.

Известно, что при подаче на коллектор потенциала, достаточного для блокировки электронного тока, ионный ток на зонд не насыщается [40]. В первую очередь это связано с тем, что при увеличении потенциала происходит увеличение толщины слоя, из которого зонд собирает частицы. Для определения величины ионного тока на практике применяют экстраполяцию кривой тока «насыщения» в область более низких потенциалов, что, верно, если  $T_e \gg T_i$ . Точный закон экстраполяции зачастую неизвестен и поэтому для оценки чаще всего используется линейная экстраполяция.

Схожий принцип использовался в работе с анализатором потока частиц, описанным в настоящей диссертации. На рисунке 2.2.5 представлена ионная часть анализатора вольтамперной характеристики (ВАХ) при двух потенциалах электрода, соответствующая различным мощностям поглощенного в плазме ВЧ излучения. В описанных ниже экспериментах величина ионного тока измерялась при двух потенциалах, заведомо больших чем потенциал электрода. Затем при помощи линейной экстраполяции кривой «насыщения» определялось значение ионного тока при потенциале коллектора анализатора, равном потенциалу нагруженного электрода.

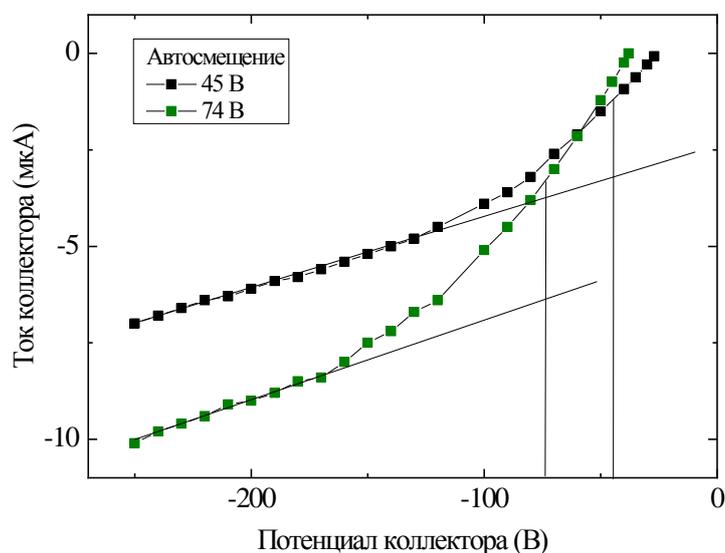


Рисунок 2.2.5. Ионная часть анализатора ВАХ потока частиц, снятая для двух различных величин потенциала электрода

### 2.3 Исследование зависимости потенциала автосмещения от поглощенной в разряде мощности

Плазма ВЧЕ разряда формируется между двумя электродами, один из которых заземлен, а на другой подается ВЧ мощность от генератора. Электроны осциллируют между двумя электродами в переменном ВЧ поле. Ускоряясь в электрическом поле, электроны приобретают направленную скорость. После столкновения с нейтральной частицей рабочего газа скорость электрона хаотизируется, после чего электрон начинает заново ускоряться в направлении действия поля, а кинетическая энергия электронов, приобретенная между столкновениями, переходит в энергию хаотического движения. Двигаясь значительно быстрее ионов часть электронов уходит на электроды, и плазма приобретает положительный потенциал по отношению к электродам. Ионы, имеющие низкую по сравнению с электронами подвижность, слабо реагируют на осцилляции электрического поля и остаются практически неподвижными. Таким образом, в установившемся режиме рядом с поверхностью электродов формируются так называемые приэлектродные слои объемного заряда. Ионы, находящиеся вблизи электрода, за счет теплового движения попадают в слой и приобретают

скорость, направленную к поверхности электрода. За несколько периодов колебаний поля ионы достигают поверхности электрода и при бомбардировке ускоренными ионами поверхности электрода возникает распыление его материала.

В разрядах относительно низкого давления в случае, когда зазор между электродами сравним или меньше длины свободного пробега, падение напряжения в слоях приобретает значение, равное среднему потенциалу плазмы (рисунок 2.3.1а) [34]. В этом случае площади электродов, задействованные в формировании разрядной плазмы, равны. Разряды такого типа принято называть симметричными. В большинстве разрядных камер эффективная площадь заземленного электрода оказывается больше площади нагруженного электрода за счет замыкания ионного тока через заземленные стенки камеры. Это приводит к возникновению асимметрии разряда. Ввиду равенства средних за период абсолютных значений потоков на оба электрода, плотность потока электронов на нагруженный электрод становится выше плотности потока на заземлённый электрод, что выражается в появлении дополнительного постоянного падения напряжения (т.н. потенциал автосмещения) в слое нагруженного электрода (рисунок 2.3.1б).

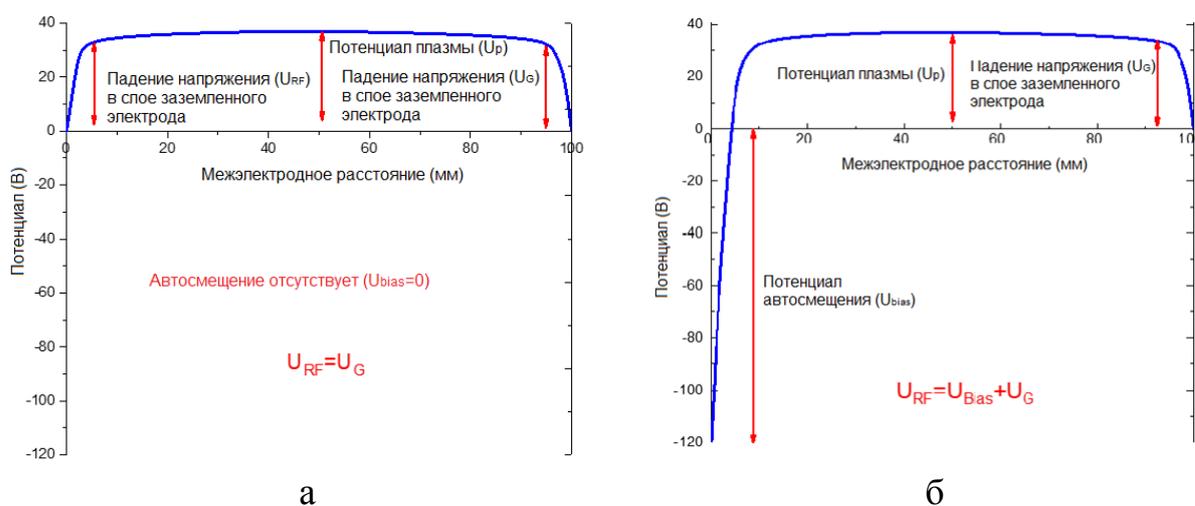


Рисунок 2.3.1. Типичное распределение потенциала вдоль оси ВЧЕ разряда для: а – симметричного разряда; б – несимметричного разряда

В присутствии автосмещения ионы, бомбардирующие поверхность ВЧ

электрода, приобретают дополнительную энергию (десятки – сотни эВ), приводящую к более интенсивному распылению его поверхности по сравнению с заземленным электродом. Так как потенциал плазмы в разрядах низкого давления обычно невелик (20–40 эВ), энергия ионов, бомбардирующих поверхность ВЧ электрода, преимущественно определяется потенциалом автосмещения.

Энергия ионов, полученная в результате суммирования потенциал автосмещения и потенциала плазмы, измеренная в экспериментальном ВЧ стенде № 2, как функция поглощенной в разряде ВЧ мощности, представлена на рисунке 2.3.2. Измерения проводились в атмосфере неона при давлении 1 Па на частоте 81,36 МГц. Площадь ВЧ электрода во всех описанных ниже экспериментах составляла 50 см<sup>2</sup>.

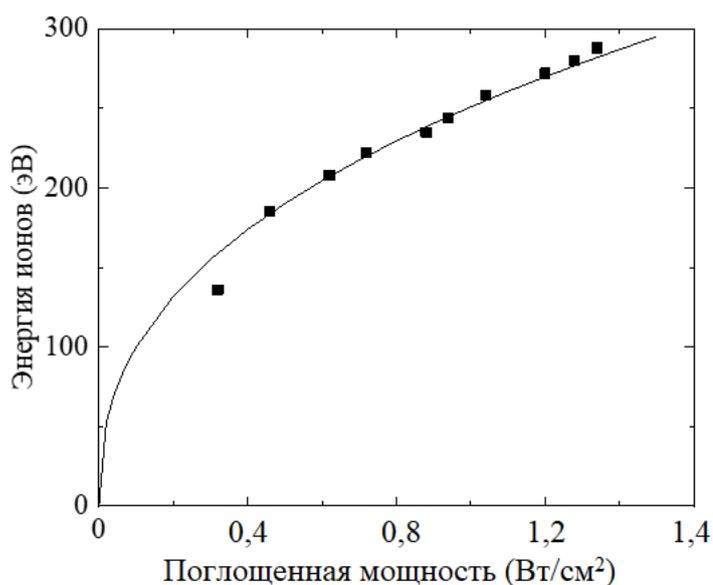


Рисунок 2.3.2. Зависимость энергии ионов от поглощенной в разряде ВЧ мощности для разряда в атмосфере неона при давлении 1 Па

Значение потенциала плазмы определялось при помощи описанного в разделе 2.2 четырехсеточного зонда, расположенного на заземлённом электроде. Значение потенциала плазмы и вид ФРИЭ оставался неизменным в широком диапазоне мощности, подводимой к разряду (Ne, 1 Па).

Описать полученную зависимость величины автосмещения от мощности можно следующим образом. Примем допущение, что толщина

приэлектродного слоя  $L$  не зависит от подводимой к разряду мощности. Ионы, бомбардирующие поверхность нагруженного электрода, распределены по энергиям аналогично зависимости, показанной на рисунке 2.2.3б. При этом максимум распределения:

$$\varepsilon \sim U, \quad (2.3.1)$$

где  $\varepsilon$  – максимальная энергия ионов,  $U$  – падение напряжения в слое, равное сумме величины автосмещения и потенциала плазмы. Ввиду того, что в исследуемом диапазоне подводимой ВЧ мощности потенциал плазмы мал по отношению к величине автосмещения, примем  $U$ , равным величине автосмещения. Величина автосмещения определяется электрическим полем, создаваемым пространственным зарядом в слое около нагруженного электрода:

$$U = EL. \quad (2.3.2)$$

При этом электрическое поле, создаваемое пространственным зарядом в слое у нагруженного электрода, согласно [41] равно:

$$E = \frac{4\pi j_0}{\omega}, \quad (2.3.3)$$

где  $j_0$  – ток, протекающий между электродами,  $\omega$  – частота этого тока.

Ионный ток в слое:

$$j_i = nev_i, \quad (2.3.4)$$

где  $n \sim j_0$  – концентрация ионов в слое,  $v_i = \sqrt{\frac{4\pi j_0 \lambda_i}{\omega m}}$  – скорость ионов в слое [41]. В ВЧЕ разряде низкого давления поглощенная ВЧ мощность расходуется в первую очередь на ускорение ионов в приэлектродных слоях и ионизацию нейтральных атомов электронами в положительном столбе:

$$W = U_{\text{нагр}} j_i + U_{\text{заземл}} j_i + 2j_i \varepsilon^*. \quad (2.3.5)$$

Учитывая принятые допущения, а также то, что падение напряжения в слое нагруженного электрода много больше падения напряжения в слое заземленного электрода, подведенную к разряду мощность можно записать как:

$$W = Uj_i = Un_i ev_i = Un_i e \sqrt{\frac{4\pi j_0 \lambda_i}{\omega m}}, \quad (2.3.6)$$

где  $\lambda_i$  – длина свободного пробега ионов в слое. Подставляя (2.3.2 и 2.3.3) в (2.3.6), получаем:

$$W = \frac{4\pi j_0}{\omega} L \frac{j_0}{\omega} \sqrt{\frac{4\pi j_0 \lambda_i}{\omega m}}, \sim j_0^{\frac{5}{2}}. \quad (2.3.7)$$

Преобразуя (2.3.7) относительно разрядного тока и учитывая (3), можно получить вид зависимости потенциала автосмещения от подведенной к разряду мощности:

$$\varepsilon \sim U = \frac{4\pi j_0}{\omega} L \sim W^{\frac{2}{5}}. \quad (2.3.8)$$

Экспериментальные данные зависимости автосмещения от мощности хорошо аппроксимируются полученной зависимостью (см. рисунок 2.3.2). Стоит отметить, что при данных давлении и частоте зависимость будет определяться в первую очередь мощностью, требуемой для поддержания баланса ионизации/рекомбинации. Кроме того, коэффициент пропорциональности между величиной автосмещения и мощностью является функцией многих параметров, таких как сорт и давление рабочего газа, несущая частота подводимой ВЧ мощности, геометрия разрядной камеры и т.д. Для определения зависимости автосмещения от этих параметров требуется проведение экспериментального исследования или численного моделирования.

#### 2.4 Экспериментальное исследование характеристик ионного потока в зависимости от сорта рабочего газа и подводимой частоты

Основными показателями эффективности чистящего ВЧЕ разряда в условиях ИТЭР являются:

- способность удалять пленки бериллия, возможно с незначительной примесью вольфрама, водорода, кислорода, азота

и скорость их распыления;

- влияние ионных потоков и экспозиции в плазме на оптические свойства очищаемого элемента.

Плазменное травление может происходить в результате химического травления или физического распыления. При использовании разряда в благородном газе травление будет определяться преимущественно физическим распылением. Скорость физического распыления поверхности электрода может быть представлена в виде:

$$R = j \cdot y_{\text{эфф}},$$

где  $j$  – ток ионов на поверхность электрода [мкА],  $y_{\text{эфф}}$  – эффективный коэффициент распыления [атом/ион], который подробно рассмотрен в главе 3. Ток ионов на электрод в свою очередь определяется как:

$$j = n_{\text{плазмы}} \cdot v_{\text{Bohm}},$$

где  $n_{\text{плазмы}}$  – плотность плазмы вблизи приэлектродного слоя, а  $v_{\text{Bohm}} = \sqrt{T_e/M_i}$  – боровская скорость, с которой ион массы  $M_i$  попадает в приэлектродный слой из плазменного столба с электронной температурой  $T_e$  [42]. Указанные параметры являются функцией многих параметров, таких как сорт и давление газа, подводимая частота, наличие магнитного поля, геометрия разрядной камеры и т.д.

Согласно одному из сценариев чистки первых зеркал в ИТЭР имеется возможность заполнения всего объема токамака требуемым газом при давлении от 0,1 до 10 Па [11]. На сегодняшний день к использованию для чистки в ИТЭР разрешены следующие газы: двухатомные –  $\text{H}_2$  и его изотопы,  $\text{N}_2$ , а также благородные одноатомные –  $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$  и  $\text{Ar}$ . Использование благородных газов для задач очистки первых зеркал представляется более предсказуемым в виду отсутствия химических процессов, которые могут изменять скорость травления на несколько порядков величины в зависимости от температуры обрабатываемой поверхности [43]. Выбор сорта и давления газа, в связи с этим,

представляется важной задачей, рассмотренной в настоящей диссертации. Для ряда диагностик, расположенных в диверторе, по причине чрезвычайно высоких потоков примеси предполагается проведение чистки зеркал непосредственно во время рабочего импульса токамака. В таком случае, условия проведения очистки зеркал будут определяться составом и давлением газа в диверторном порту, которые в свою очередь будут определяться условиями работы дивертора. Предварительные оценки показывают, что давление нейтрального газа будет колебаться в диапазоне 1–10 Па, с основным содержанием изотопов водорода (дейтерий, тритий) с возможной 2% примесью  $N_2$  или Ne.

Известно, что частота ВЧ мощности, подводимой к нагруженному электроду, оказывает существенное влияние на плотность плазмы и тем самым на характеристики ионного потока на электроды. Скейлинг, численно полученный Т.Н. Чангом в [44], предсказывает рост плазменной плотности с увеличением подводимой частоты (рисунок 2.4.1).

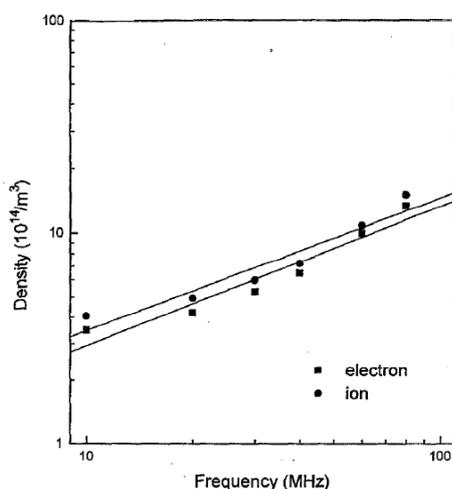


Рисунок 2.4.1. Зависимость плотности плазмы ВЧЕ разряда от подводимой частоты, полученная в результате численного расчета для разряда в аргоне при давлении 60 мТорр [44]

Данный скейлинг качественно согласуется с экспериментальными данными, полученными в стенде № 1 при исследовании разрядов в атмосфере различных благородных газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe) при давлении 2

Па в диапазоне подводимых частот от 40 до 100 МГц.

На рисунке 2.4.2 приведена зависимость плотности тока ионов на поверхность ВЧ электрода, измеренная с помощью односеточного анализатора потока частиц, интегрированного в нагруженный электрод. Из представленной зависимости видно, что для каждого из исследованных благородных газов плотность ионного тока растет с увеличением подводимой частоты. При переходе к более тяжелому газу на данной частоте наблюдается уменьшение плотности ионного тока, связанное с уменьшением боровской скорости ионов.

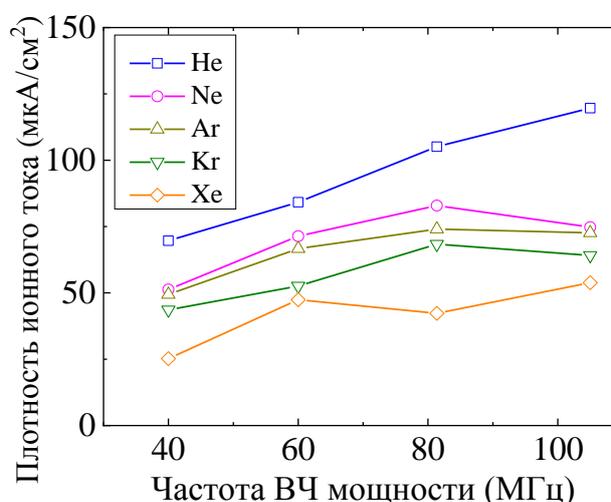


Рисунок 2.4.2. Зависимость плотности ионного тока на поверхность ВЧ электрода, измеренная в эксперименте для ряда благородных газов и рабочих частот при давлении 2 Па и подведенной ВЧ мощности 0,2 Вт/см²

Величина потенциала плазмы слабо зависит от частоты подводимого ВЧ излучения. При этом была обнаружена сильная зависимость потенциала плазмы от сорта рабочего газа. Как известно из литературы [34], потенциал плазмы связан с электронной температурой следующим образом:

$$V_{gnd} = - \left( \frac{kT_e}{2e} \right) \ln \left( \frac{M_i}{2,3m} \right), \quad (2.5.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – число Эйлера,  $m$  – масса электрона. Экспериментально измеренные потенциалы плазмы для различных благородных газов сведены в таблицу 2.4.1, из которой видно, что с увеличением атомного номера газа потенциал плазмы падает и приближается к потенциалу ионизации.

Исходя из формулы (2.5.1), уменьшение потенциала плазмы говорит об уменьшении электронной температуры. Электронная температура в установившемся режиме определяется из соотношения скоростей «ухода» и «прихода» частиц. В ВЧЕ разрядах низкого давления уход частиц определяется преимущественно рекомбинацией на стенках камеры и поверхностях электродов. Приход частиц определяется ионизацией атомов газа электронным ударом. С увеличением атомного номера газа энергия ионизации падает, и, соответственно, падает электронная температура.

Таблица 2.4.1. Энергия ионизации и потенциал плазмы ВЧ разряда на частоте 81 МГц в благородных газах при давлении 2 Па

Газ	Энергия ионизации (эВ)	$U_{\text{плазмы}}$ (В)
He	24.5	35
Ne	21.6	27
Ar	15.8	19
Kr	13.9	16
Xe	12.1	13

Было обнаружено, что с ростом подводимой частоты наряду с ростом тока падает величина потенциала автосмещения. Несимметричность разряда возникает за счет дрейфового движения частиц плазмы поперек оси ВЧ разряда. В процессе осцилляции в приложенном переменном электрическом поле электроны сталкиваются с нейтральными атомами газа и приобретают хаотическую составляющую скорости. За счет данной составляющей скорости часть электронов может уйти из межэлектродного промежутка и погибнуть на стенках разрядной камеры. По пути часть электронов может совершить один или несколько актов ионизации нейтральных атомов фонового газа. Таким образом происходит фактическое увеличение площади заземленной поверхности занятой разрядом. В установившемся режиме для выравнивания плотностей тока электронов и ионов ВЧ электрод приобретает дополнительный электростатический потенциал. Простая модель ВЧЕ

разряда [34] дает соотношение потенциалов ВЧ и заземленных электродов пропорциональное обратному отношению площадей их поверхностей в степени  $n$ :

$$\frac{U_{\text{ВЧ}}}{U_{\text{земл}}} = \left( \frac{S_{\text{земл}}}{S_{\text{ВЧ}}} \right)^n,$$

где  $n$  принимает значение от 1,5 до 2.

При увеличении подводимой к разряду частоты амплитуда осцилляции электронов уменьшается, что затрудняет их поперечный дрейф и, соответственно, уменьшается величина потенциала автосмещения. Увеличение массы атома благородного газа также приводит к подавлению поперечного дрейфа, что согласуется с экспериментальными данными, представленными на рисунке 2.4.3.

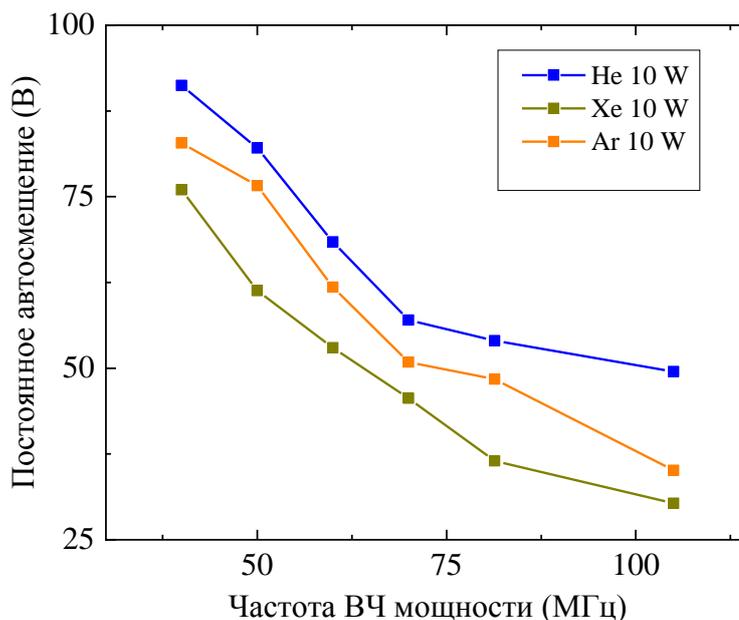


Рисунок 2.4.3. Зависимость величины потенциала автосмещения от несущей частоты ВЧ мощности, измеренной в эксперименте для ряда благородных газов и рабочих частот при давлении 2 Па и подводимой ВЧ мощности 0,2 Вт/см<sup>2</sup>

В предложенной для ИТЭР схеме чистящего ВЧ разряда внутривакуумные зеркала и окна будут играть роль нагруженного электрода. В отсутствии внешнего магнитного поля энергия ионов, бомбардирующих

поверхность ВЧ электрода, в первом приближении можно определить как сумму потенциалов плазмы и автосмещения. Распределение по энергии ионов, падающих на электрод, показано на рисунке 2.4.4. Характер этого распределения зависит от соотношения  $\omega/\omega_p$ , где  $\omega$  – подводимая ВЧ частота, а  $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / M_i}$  – ионная плазменная частота [45]. В случае  $\omega \gg \omega_p$  (высокочастотный режим), чтобы пересечь приповерхностный слой и достигнуть зеркала ионам требуется промежуток времени соответствующий нескольким периодам ВЧ поля. В таком случае энергия иона определяется исключительно падением напряжения в слое и не зависит от фазы, в которую ион попал в слой. В случае  $\omega \ll \omega_p$  энергия ионов определяется моментом попадания иона в слой. ФРИЭ в таких случаях существенно размывается.

В ВЧ разрядах низкого давления приэлектродный слой принято рассматривать как бесстолкновительный. В таком случае энергия иона будет определяться в большей степени величиной падения напряжения в слое и, в меньшей степени, фазой ВЧ поля, в которую ион попал в слой. Однако при повышении давления выше нескольких единиц Па столкновения ионов с атомами газа начинают играть заметную роль, и ФРИЭ размывается. На рисунке 2.4.4 приведены функции распределения ионов по энергиям, измеренные на заземленном электроде для разряда в гелии при давлении от 0,6 до 10 Па. Из представленного графика видно, что с увеличением давления газа существенно увеличивается и количество ионов, имеющих энергию ниже максимальной. При этом пик ФРИЭ сдвигается в область более низких энергий. Ввиду низкой плотности плазмы рекомбинация заряженных частиц (электронов и ионов) происходит преимущественно на стенках разрядной камеры. Ионизация в свою очередь происходит в положительном столбе разряда.

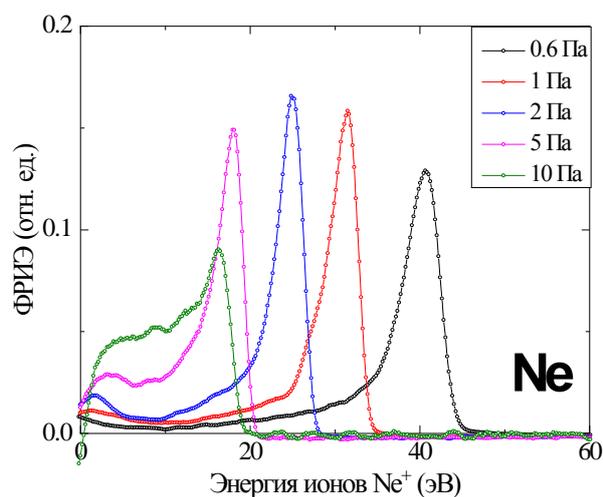


Рисунок 2.4.4. Экспериментально измеренные функции распределения ионов по энергии в слое заземленного электрода в зависимости от давления фонового газа. Данные получены в разряде в неоне на частоте 81 МГц и мощности 0,3 Вт/см<sup>2</sup>

При увеличении давления фонового газа электроны претерпевают большое количество соударений с нейтральными атомами газа, что приводит к большему, по сравнению со случаем низкого давления, количеству актов ионизации. Уход частиц на стенки в этом случае затрудняется по причине столкновений с частицами газа. Из-за дисбаланса прихода и ухода частиц температура электронов в таком случае падает, что приводит к уменьшению потенциала плазмы и падения напряжения в приповерхностном слое заземленного электрода. Схожим образом ведет себя и зависимость потенциала автосмещения от давления газа (см. рисунок 2.4.5). Из-за столкновений с атомами фонового газа с ростом давления область, занятая разрядом, уменьшается, что приводит к уменьшению эффективной площади заземленного электрода. Таким образом, с ростом давления несимметричность разряда уменьшается, что в конечном итоге приводит к отсутствию несимметричности в разрядах среднего давления [34].

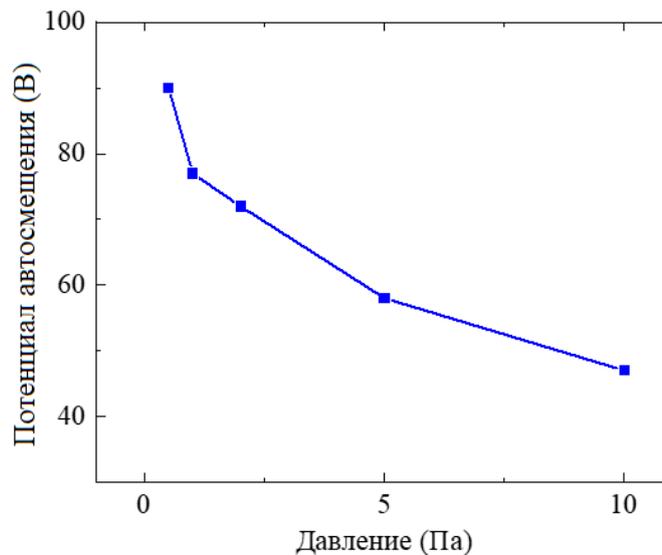


Рисунок 2.4.5. Зависимость величины потенциала автосмещения от давления фонового газа, измеренная экспериментально в разряде в аргоне на частоте 81 МГц и подведенной ВЧ мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$

Ввиду отсутствия измерений в слое нагруженного электрода ФРИЭ были рассчитаны в коде, использующем методы Монте-Карло и частиц в ячейках [46]. В качестве входных данных для кода использовались экспериментально измеренные параметры приповерхностного слоя – плотность тока и потенциал автосмещения. Данный код позволяет производить расчеты транспорта частиц вдоль столкновительного приэлектродного слоя ВЧ разряда в приближении постоянной толщины слоя. На каждом шаге по времени в коде производятся две операции. В первую очередь частицы двигаются в электрическом поле, являющимся результатом суммы осциллирующего ВЧ поля и поля, создаваемого объемным зарядом частиц. При этом учитываются процессы резонансной перезарядки и упругого рассеяния ионов на нейтральных атомах рабочего газа. Затем величина электрического поля пересчитывается на основании данных об изменении объемного заряда, создаваемого заряженными частицами.

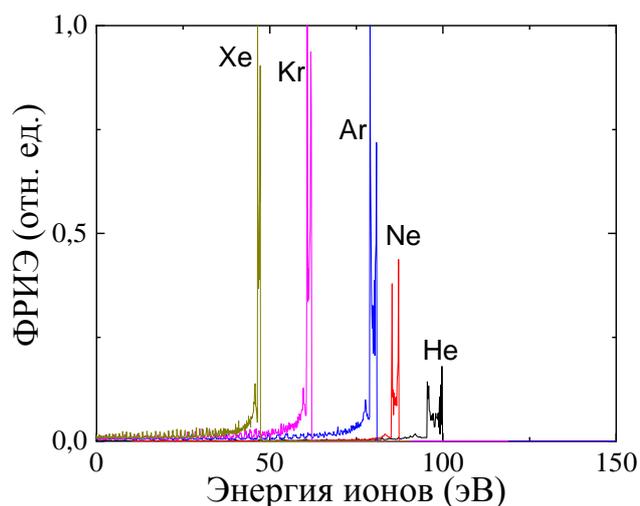


Рисунок 2.4.6. Функции распределения ионов по энергии в слое заземленного электрода в зависимости от давления фонового газа. Данные получены для ВЧ разряде на частоте 81 МГц и мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$

На рисунке 2.4.6 представлена полученная ФРИЭ на ВЧ электроде для различных благородных газов при давлении 1 Па и вложенной на частоте 81 МГц мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$ . Из рисунка видно, что при одинаковой частоте подаваемой ВЧ мощности энергия частиц, бомбардирующих нагруженный электрод, падает с увеличением массы частиц рабочего газа. Данные результаты согласуются с рассуждениями, приведенными выше.

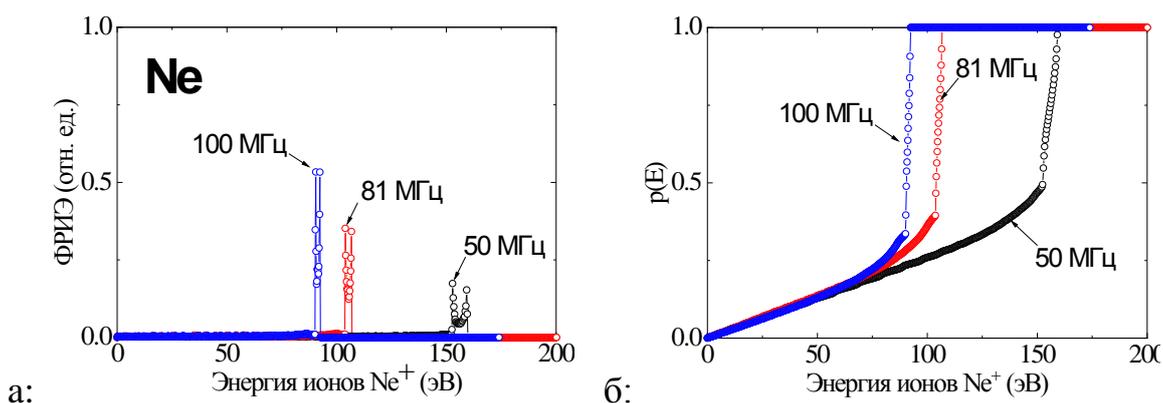


Рисунок 2.4.7. а – ФРИЭ на ВЧ электроде, нормализованная на единицу для разряда на частотах 100 МГц, 81 МГц и 50 МГц при вложенной в разряд мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$  в неоне при давлении 2 Па. б – сумма нарастающим итогом от ФРИЭ

Расчеты функции распределения ионов на нагруженном электроде показывают, что с уменьшением частоты подаваемой ВЧ мощности пик функции распределения уширяется в области более высоких энергий (рисунок 2.4.7а). Особый интерес также представляет сумма нарастающим итогом ФРИЭ, представленная на рисунке 2.4.7б, из которой следует, что в низкоэнергичном «хвосте» функции распределения содержится значительная доля частиц, энергия которых находится вблизи порога распыления. Ввиду этого учет формы функции распределения представляется необходимым при оценке скорости распыления ВЧ электрода. Рассмотрение зависимости скорости распыления приведены в главе 3.

## 2.5 Измерение параметров плазмы в схеме с заземленным ВЧ электродом

Во время основных D-T разрядов токамака ИТЭР элементы первой стенки, включая расположенные в непосредственной близости первые диагностические зеркала, будут подвержены нагреву, вызванному потоками нейтронного и гамма-излучения [19]. В области расположения первых зеркал в экваториальных портах ИТЭР ожидается тепловой поток  $\sim 0,5 \text{ МВт/м}^2$  [18].

Для предотвращения деформации поверхности первых зеркал, обусловленных температурными градиентами, планируется оборудовать зеркала системой водяного охлаждения [20, 47]. Для обеспечения равномерного охлаждения в конструкции зеркал должны быть предусмотрены каналы, обеспечивающие циркуляцию охлаждающей жидкости.

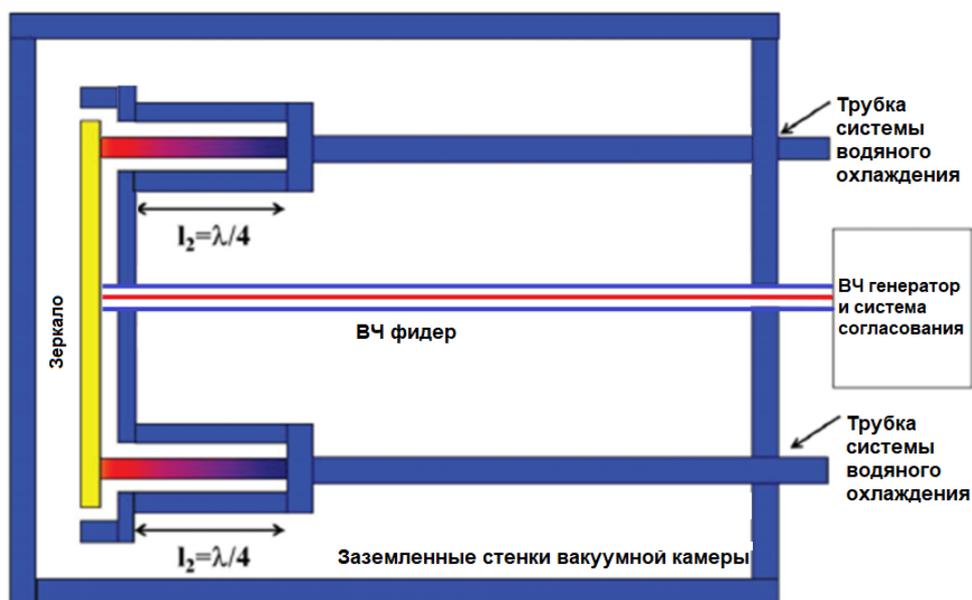


Рисунок 2.5.1. Схема совмещения системы охлаждения с системой ВЧ чистки первого диагностического зеркала ИТЭР

Согласно требованиям ИТЭР трубки, соединяющие зеркало с общим контуром циркуляции охлаждающей жидкости токамака, должны иметь заземленный потенциал. Для совмещения системы охлаждения зеркала с системой ВЧ чистки предложено выполнить трубки водяного охлаждения по принципу коаксиального четвертьволнового короткозамкнутого фильтра (notch-фильтра) [47]. Схема совмещения систем ВЧ очистки и охлаждения первого зеркала приведена на рисунке 2.5.1. Импеданс отрезка короткозамкнутой коаксиальной линии зависит от длины линии, как показано на рисунке 2.5.2. В случае, если длина короткозамкнутого отрезка линии равняется четверти пропускаемой по ней волны, в ней устанавливается резонанс токов, характерный для параллельного колебательного контура. Подключение такого отрезка параллельно в электрическую схему не влияет на S-параметры системы с точностью до учета активных потерь.

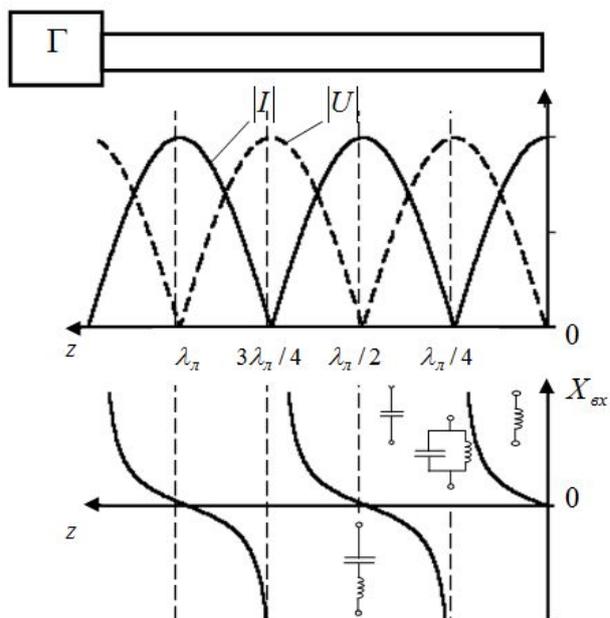


Рисунок 2.5.2. Примеры эпюр напряжений, тока и сопротивления в короткозамкнутой линии [48]

С целью изучения параметров ВЧЕ разряда в схеме с notch-фильтром было проведено экспериментальное исследование параметров разряда в экспериментальном стенде № 1 в неоне при давлениях 1 и 10 Па. В экспериментах использовался неохлаждаемый ВЧ электрод диаметром 80 мм, с интегрированным односеточным анализатором потока частиц. Эксперименты проводились для схем с изолированными и заземленными электродами с целью сравнения параметров приэлектродного слоя. В качестве модели четвертьволновой короткозамкнутой охлаждающей линии был использован коаксиальный кабель соответствующей длины, подсоединенный к электроду внутри вакуумной камеры, как показано на рисунке 2.5.3. Внутри вакуумной камеры в данных экспериментах использовался кабель с минеральной изоляцией РК316 50-3-71 производства ОАО "Кирскабель", к которому через вакуумный электрических ввод с разъемом CP-50 подключался коаксиальный кабель RG-58.



Рисунок 2.5.3. Фотография экспериментальной установки по исследованию параметров плазмы ВЧ разряда с заземленным ВЧ электродом. К круглому ВЧ-электроду (1) присоединён коаксиальный кабель с минеральной изоляцией (3), который был присоединен с атмосферной стороны к коаксиальному кабелю с полиэтиленовой изоляцией. Суммарная длина кабелей составляла  $\lambda/4$ .

Исходя из данных, представленных на рисунке 2.5.4, энергия бомбардирующих нагруженный электрод ионов значительно уменьшается при переходе к схеме с заземленным ВЧ электродом. Как указывалось выше, в режиме с изолированным ВЧ электродом максимальная энергия ионов определяется как сумма величины постоянного потенциала и потенциала плазмы относительно заземленного электрода. При этом в исследуемом диапазоне мощностей потенциал плазмы остается неизменным, а постоянный потенциал растет с мощностью по степенному закону. Энергия ионов в таком случае может достигать сотен эВ, что приводит к значительной скорости физического распыления поверхности нагруженного электрода, и практически полному отсутствию распыления заземленных поверхностей.

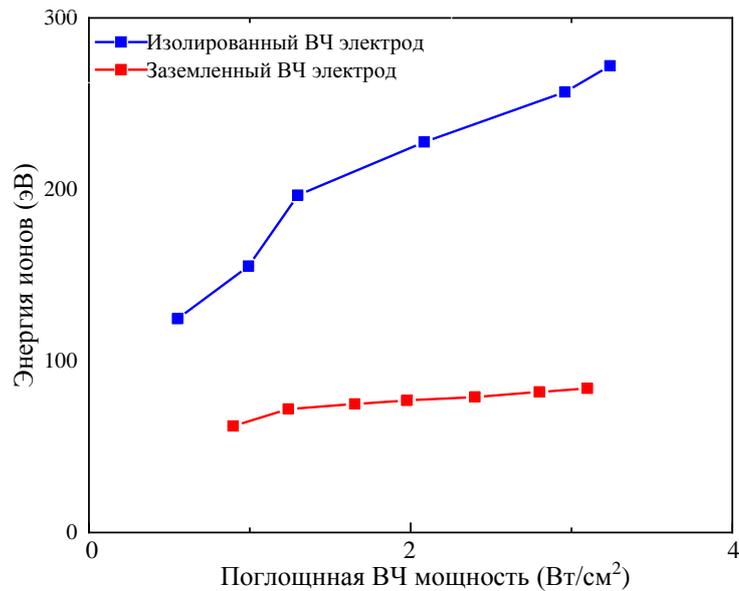


Рисунок 2.5.4: Зависимость максимальной энергии ионов от вложенной в разряд мощности для разряда с изолированным и заземленным электродами. Синяя линия – максимум потенциала в слое изолированного нагруженного электрода. Красная линия – потенциал плазмы для случая заземленного нагруженного электрода

Заземление нагруженного электрода приводит к исчезновению потенциала автосмещения и значительному росту потенциала плазмы [49]. В этом случае максимальная энергия ионов, падающих на поверхности обоих электродов, равна и определяется потенциалом плазмы. Вследствие этого скорости распыления поверхностей электродов становятся практически равными, что приводит к миграции распыленных частиц с одного электрода на другой до тех пор, пока они не попадут на не участвующую в формировании разрядной плазмы поверхность вакуумной камеры. Данный эффект перенапыления может приводить к значительному замедлению процесса очистки зеркала [50]. Учет перенапыления и модификация геометрии разрядного объема представляются важной задачей, требующей внимания при разработке инженерного дизайна системы очистки первых зеркал.

Стоит отметить, что исчезновение автосмещения в схеме с заземленным ВЧ электродом не приводит к симметризации разряда. Напротив, асимметричность разряда сохраняется и проявляет себя в

протекании через разряд постоянного тока. Механизм возникновения постоянного тока схож с механизмом возникновения автосмещения. Отличие заключается в том, что в случае заземленного ВЧ электрода заряд, вызванный дисбалансом ионов и электронов, не копится на обкладке блокирующей емкости, а приводит к протеканию тока в цепи между электродами. При этом на заземленный электрод течет «положительный» ионный ток, а на нагруженный электрод – «отрицательный» электронный ток.

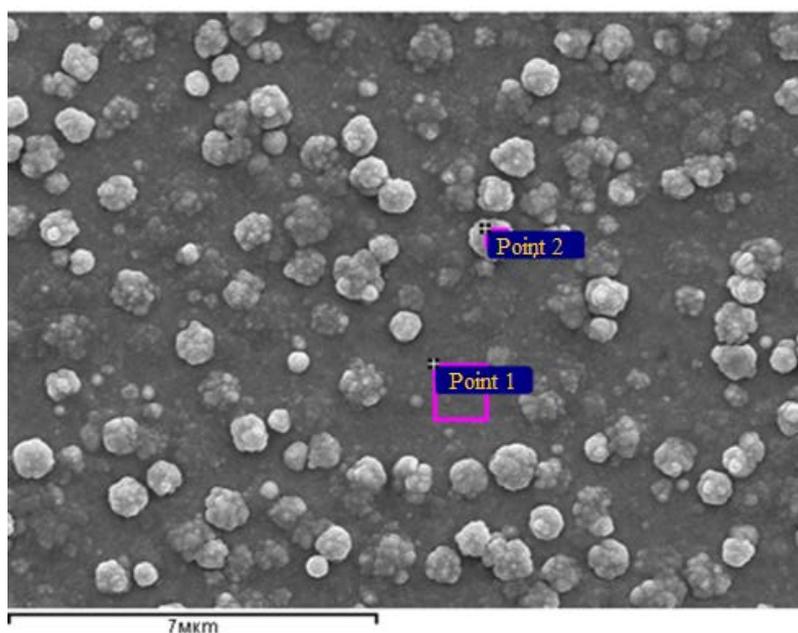


Рисунок 2.5.5. РЭМ-изображение поверхности молибденового зеркала после его перегрева в схеме с имитацией системы охлаждения короткозамкнутым коаксиальным кабелем. На площадках Point 1 и Point 2 проводился EDX анализ состава поверхности

Таблица 2.5.1. Данные EDX анализа зеркала (масс.%)

	O	Al	Cr	Fe	Ni	Mo	Total
Point 1	4,30	1,15	0,51	2,17	0,00	91,86	100,00
Point 2	12,87	34,90	5,27	18,76	4,66	23,54	100,00

Важно отметить, что электронный постоянный ток в данном случае

рассматривают как паразитный, поскольку он не совершает полезной работы, т.е. не приводит к распылению поверхности нагруженного электрода. При этом протекание электронного тока приводит к перегреву неохлаждаемого зеркала, что было подтверждено экспериментально. На молибденовое зеркало, использовавшееся в качестве заземленного ВЧ электрода, была нанесена пленка  $Al/Al_2O_3$  толщиной 35 нм, после чего оно подверглось экспозиции в плазме чистящего разряда. Спустя ~30 минут поверхность зеркала приобрела вид, показанный на рисунке 2.5.5. На поверхности зеркала были обнаружены скопления сферических включений. Анализ, основанный на энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) показал отсутствие алюминия на «плоской» (точка 1) области, при этом в области сферического включения (точка 2) была обнаружена комбинация атомов алюминия, кислорода, молибдена и компонентов нержавеющей стали, из которой была выполнена разрядная камера (таблица 2.5.1). Эти данные позволяют утверждать, что в отсутствие системы охлаждения протекание постоянного электронного тока привело к разогреву поверхности зеркала до температуры плавления алюминиевой пленки ( $660^\circ \text{C}$ ). Наличие значительного содержания атомов железа, хрома и никеля в сферических включениях говорит о том, что центром образования алюминиевых капель могли послужить перенапыленные атомы заземленного электрода, изготовленного из нержавеющей стали.

Измерения постоянного электронного тока показывают, что его величина на два порядка превышает значение ионного тока, текущего на ВЧ электрод (рисунок 2.5.6). При этом было обнаружено, что ионный ток на ВЧ электрод не меняется при переходе к схеме с заземленным электродом.

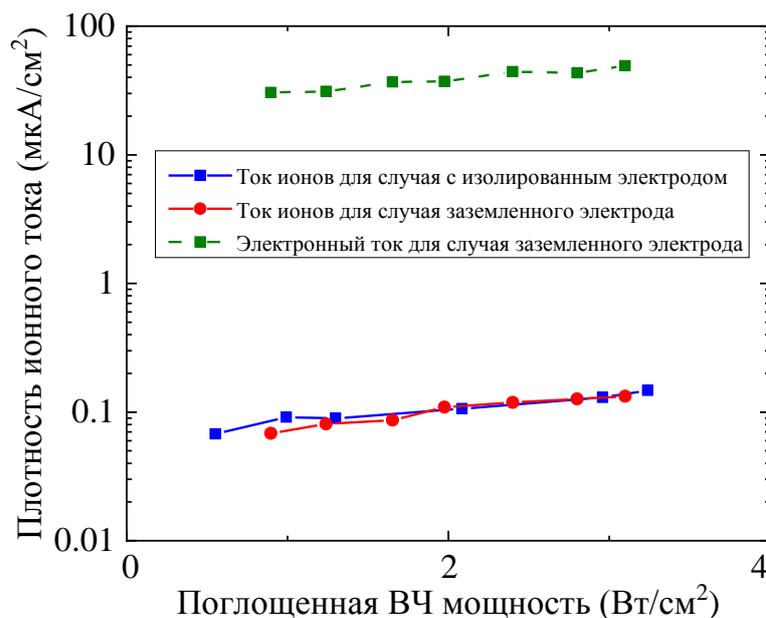


Рисунок 2.5.6. Зависимость ионного тока на ВЧ электрод от поглощенной в разряде мощности для схем с изолированным и заземленным ВЧ электродом для ВЧ разряда на частоте 81.36 МГц в неоне при давлении 1 Па. Синяя линия обозначает ионный ток в схеме с изолированным электродом, красная – ионный ток в схеме с заземленным электродом. Зеленая линия – постоянный электронный ток, текущий на нагруженный электрод

## 2.6. Влияние магнитного поля на параметры ВЧЕ разряда

Чистка зеркал в токамаке ИТЭР, как указывалось ранее, будет проводиться в специально отведенные для обслуживания так называемые maintenance-смены [11]. Во время этих смен вакуумный объем токамака будет заполняться необходимым для чистки газом, в котором будет зажигаться чистящий разряд. Ввиду трудоемкости процесса ввода и вывода тока в сверхпроводящие обмотки тороидальных и полоидальных катушек токамака, магнитное поле будет отключаться крайне редко. В связи с этим чистка зеркал будет проводиться в присутствии сильного магнитного поля (2–4 Тл), направленного под углом к нормали поверхности очищаемого зеркала.

Учитывая вышесказанное, особый интерес представляет исследование процессов, происходящих в чистящем разряде в присутствии внешнего

магнитного поля. Наличие внешнего магнитного поля в области горения низкотемпературной плазмы в первую очередь приводит к анизотропии движения заряженных частиц. В отсутствие столкновений заряженные частицы плазмы двигаются вокруг направления, совпадающего с направлением вектора индукции магнитного поля, по спирали с радиусом:

$$r_c = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}. \quad (2.6.1)$$

где  $v_{\perp}$  – скорость частицы в плоскости, перпендикулярной  $B$ ,  $|q|$  – модуль заряда частицы,  $m$  – масса заряженной частицы.

Частота обращения заряженной частицы в магнитном поле:

$$\omega_c = \frac{|q|B}{m}. \quad (2.6.2).$$

Ввиду наличия столкновений заряженных частиц низкотемпературной плазмы с нейтральными частицами газа для формирования циклотронного движения необходимо выполнить два условия [51]:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\omega_c}{\nu} > 1 \quad (1) \\ \frac{L}{r_c} > 1 \quad (2) \end{array} \right\} \quad (2.6.3)$$

где  $\nu$  – транспортная частота столкновений заряженных частиц с частицами нейтрального газа, а  $L$  – характерный размер разрядной камеры. Второе условие выполняется в подавляющем большинстве разрядных камер.

Частота соударений частиц сорта 1 с частицами сорта 2 определяется формулой:

$$\nu_1 = n_2 \nu \sigma_{12}(\nu), \quad (2.6.4)$$

где  $n_1$  – концентрация частиц сорта 2, а  $\sigma_{12}(\nu)$  – сечение столкновения. В практической работе для приблизительной оценки частоты соударений зачастую пользуются приближенной формулой [34]:

$$\nu = 5,93 \cdot 10^7 \sqrt{T} P_c p, \quad [c^{-1}] \quad (2.6.5)$$

где  $T$  – температура частиц,  $p$  – давление газа в разрядной камере, а  $P_c$  – величина, определенная эмпирическим путем (рисунки 2.6.1 и 2.6.2).

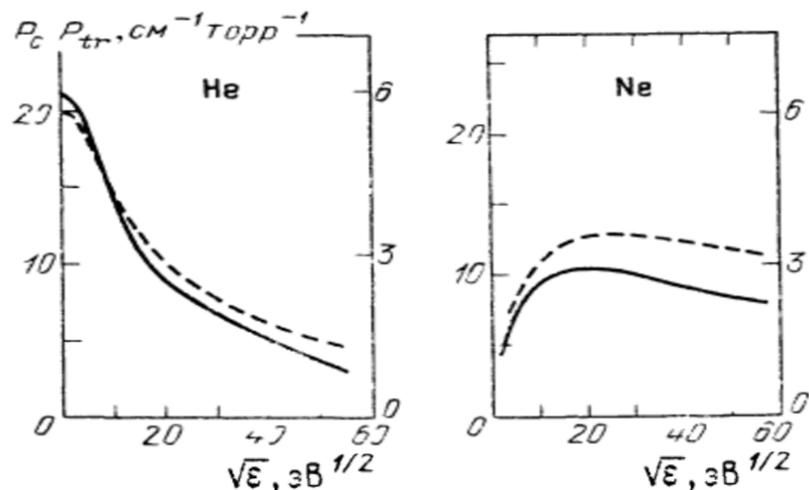


Рисунок 2.6.1. Сечения упругих столкновений (пунктирные кривые) и  $P_c$  (сплошные линии), соответствующие транспортным сечениям для He и Ne, в зависимости от энергии электронов [34].

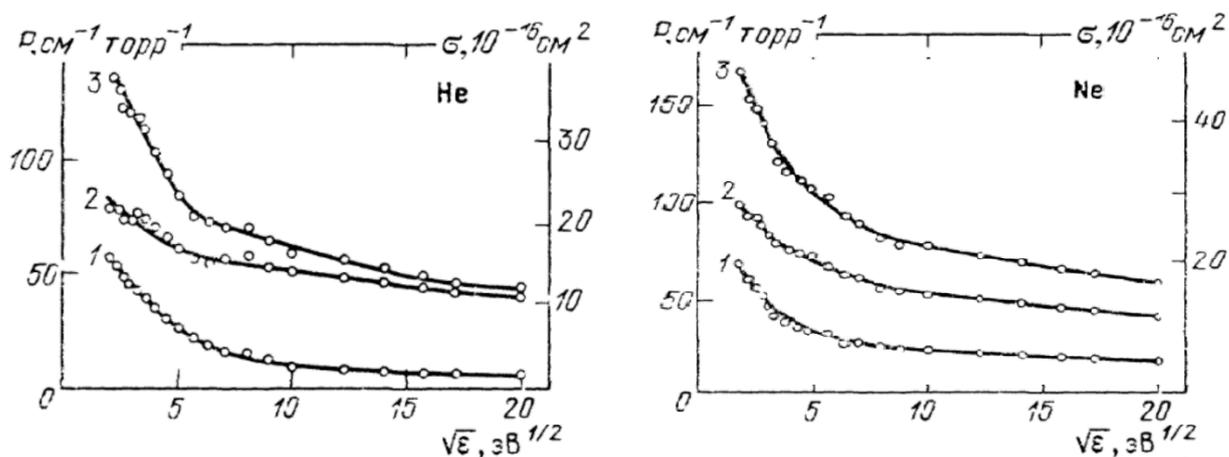


Рисунок 2.6.2.  $P_c$  и сечения столкновений ионов в инертных газах в зависимости от энергии ионов 1 – упругое рассеяние, 2 – перезарядка, 3 – их сумма [34].

Для условий, характерных для чистящего разряда в ИТЭР (давление 1–2 Па, температура электронов 3–5 эВ) электронная и ионная частоты соударений, высчитанные по формуле (2.6.5), для разряда в неоне практически равны и составляют приблизительно 10 МГц. Величина магнитного поля, необходимая для выполнения условия (1) в формуле (2.6.3) составляет около 1 мТл для электронов и 300 мТл для ионов.

Данная оценка согласуется с результатами экспериментов по измерению параметров плазмы ВЧЕ разряда в присутствии внешнего магнитного поля. Эксперименты были проведены в установке № 1 при

давлении 2 Па в атмосфере неона. На рисунке 2.6.3 представлена зависимость величины потенциала автосмещения в зависимости от внешнего аксиального магнитного поля для двух различных частот возбуждения ВЧ разряда – 40 и 81 МГц. Из графика видно, что потенциал автосмещения падает и выходит на плато при достаточно низких значениях магнитного поля, что, согласно приведенным выше расчетам, соответствует критерию замагниченности электронов.

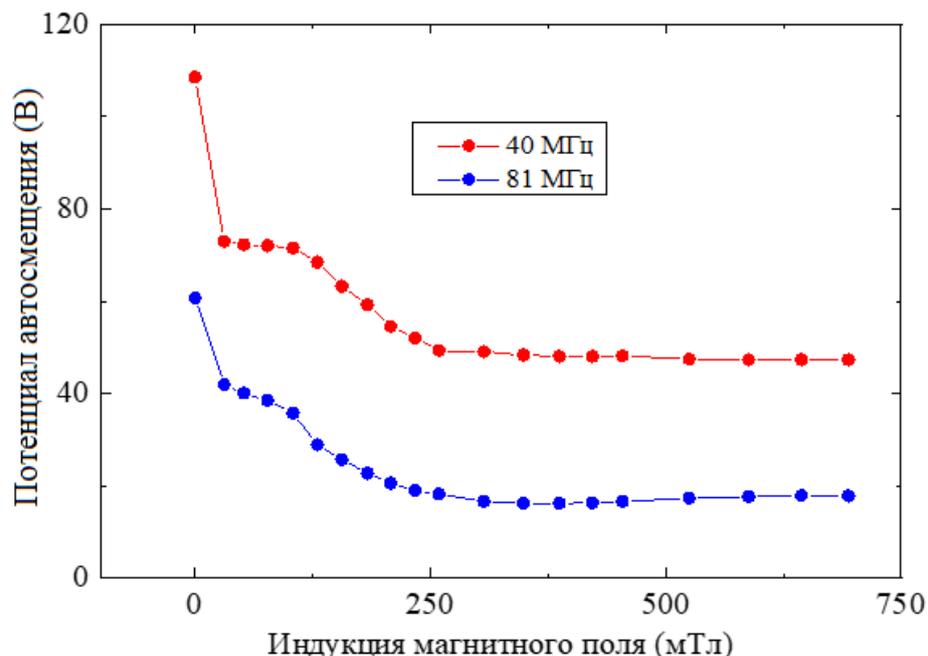


Рисунок 2.6.3. Зависимость потенциала автосмещения от внешнего аксиального магнитного поля для разряда в атмосфере неона при давлении 2 Па и поглощенной мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$  для двух частот возбуждения – 40 и 81 МГц

Замагниченность электронов в случае аксиального магнитного поля приводит к ослаблению их дрейфа на боковые заземленные стенки разрядной камеры, что обуславливает симметризацию разряда. Дальнейшее увеличение величины индукции магнитного поля приводит к дальнейшей симметризации разряда, которая насыщается при полях равных 0,25–0,3 Тл. При таких значениях магнитного поля ионы становятся полностью замагниченными, что приводит к ослаблению их дрейфа и практически полной симметризации разряда. Потенциал автосмещения, сохранившийся после замагничивания плазмы, объясняется неоднородностью магнитного поля в

экспериментальной установке. Вид плазмы до и после намагничивания показан на рисунке 2.6.4. Из рисунка видно, что плазма незамагниченного разряда визуально занимает весь объем разрядной камеры. Замагниченный разряд, напротив, выстраивается преимущественно вдоль линий магнитного поля, со-направленного с осью нагруженного электрода.

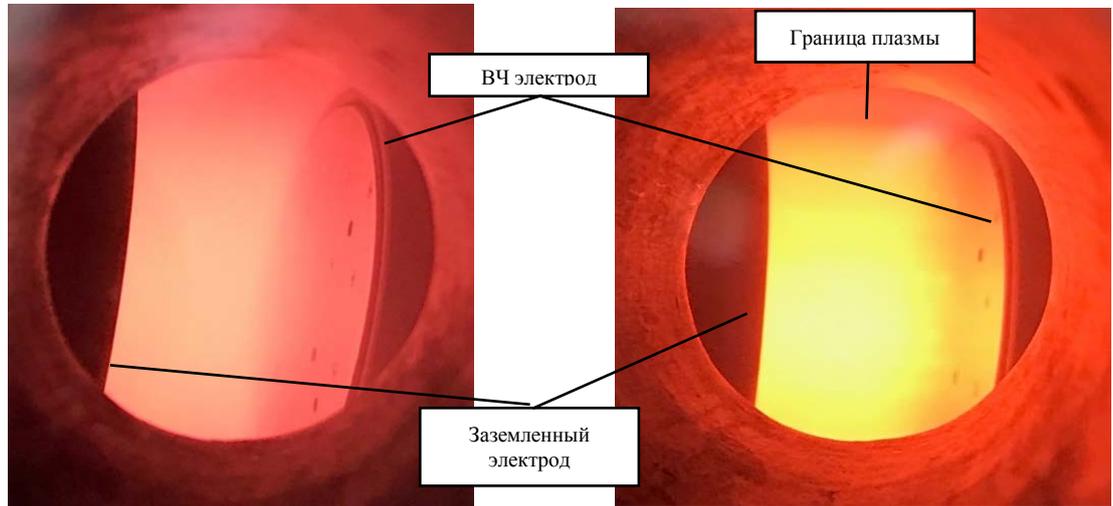


Рисунок 2.6.4. Слева – фотография незамагниченного разряда в неоне, справа – фотография замагниченного разряда в неоне.

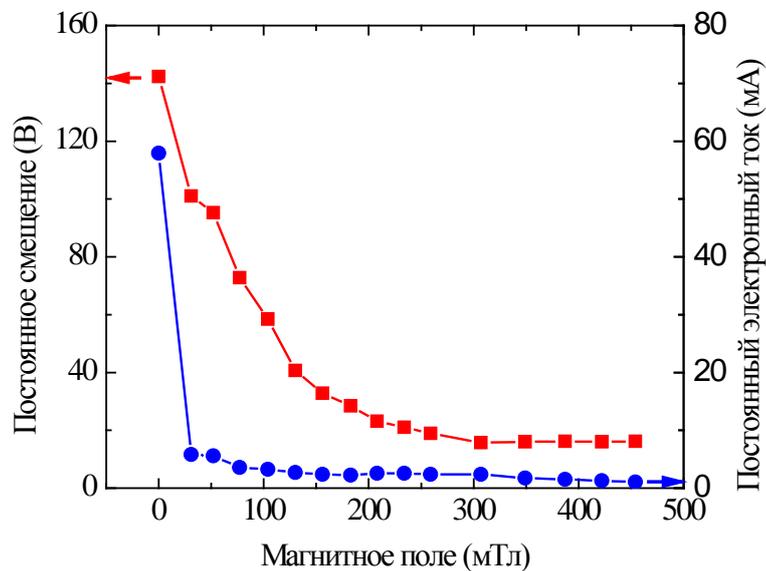


Рисунок 2.6.5. Зависимость параметров асимметрии ВЧ разряда от величины аксиального магнитного поля для схем с изолированным и заземлённым ВЧ электродом на частоте 81,36 МГц в неоне при давлении 1 Па и поглощенной мощности 1 Вт/см<sup>2</sup>. Красная кривая – потенциал автосмещения в схеме с изолированным электродом, синяя кривая – постоянный электронный ток в схеме с заземленным электродом

В случае заземлённого через четвертьволновой кабель нагруженного электрода асимметрия разряда, как указывалась ранее в п.2.5, проявляет себя в виде постоянного тока, протекающего через столб разряда. Включение аксиального магнитного поля влияет на поведение такого разряда схожим образом, как и на разряд с изолированным электродом. На рисунке 2.6.5 приведена зависимость параметров асимметрии (постоянного тока и потенциала автосмещения) разряда в зависимости от величины аксиального магнитного поля. Как и в предыдущем случае асимметрия разряда не падает до нуля в связи с неравномерностью магнитного поля установки.

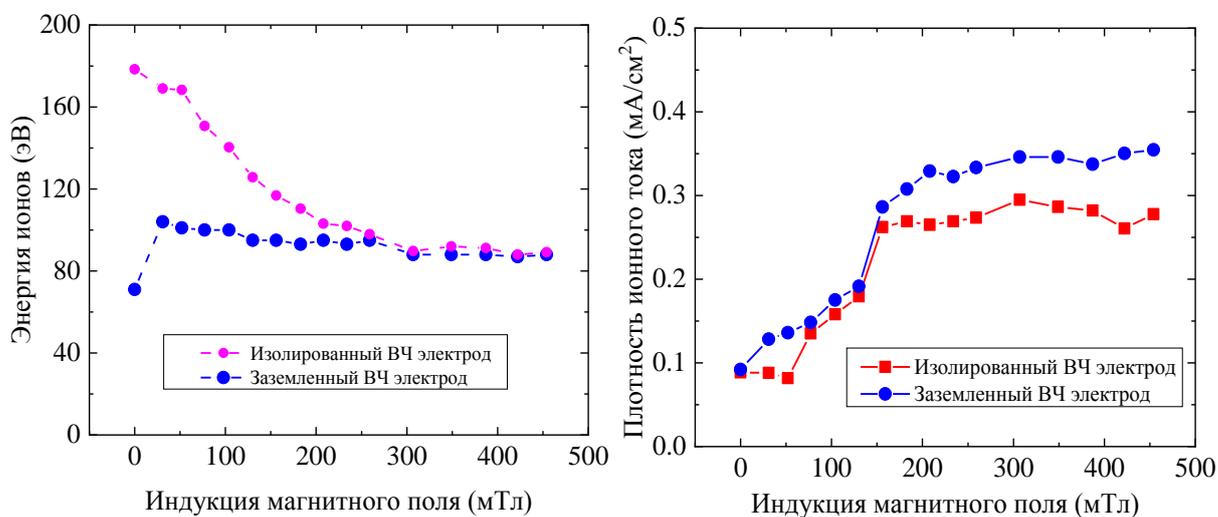


Рисунок 2.6.6. Зависимости параметров ионного потока для схем с изолированным и заземленным ВЧ электродам на частоте 81,36 МГц в неоне при давлении 1 Па и поглощенной мощности 1 Вт/см<sup>2</sup>. Слева – зависимость энергии ионов, падающих на заземлённый и нагруженный электроды. Справа – зависимость величины плотности тока ионов на нагруженный электрод

В ходе эксперимента было обнаружено, что при величине магнитного поля, соответствующей критерию замагниченности ионов значения максимальной энергии и потока ионов, падающих на нагруженный и заземленный электроды, практически совпадают (рис. 2.6.6). Следовательно, с точки зрения скорости распыления пленочных осадений с поверхности нагруженного и заземленного электродов, разряды с изолированным и заземленным нагруженным электродом идентичны. В таком случае атомы,

распыленные с поверхности электродов, могут проходить множество циклов распыления-осаждения, пока будут полностью удалены из области чистящего разряда, что может замедлить процесс очистки.

### **Выводы к главе 2:**

Приведено описание экспериментальных установок, на которых были проведены описываемые в диссертации эксперименты. Приведено описание анализаторов параметров ионных потоков, в частности энергоанализатора, встраиваемого в заземленный электрод, позволяющего измерять функцию распределения ионов, и анализатора потока ионов, встраиваемого в нагруженный электрод.

Проведено исследование зависимости параметров ионных потоков высокочастотного емкостного разряда от таких управляющих параметров, как частота и величина поглощенной ВЧ мощности, давление и сорт рабочего газа, величина индукции аксиального магнитного поля для схем с изолированным и заземленным ВЧ электродом.

Экспериментально показано, что величина потенциала автосмещения растет с увеличением подводимой мощности по степенному закону. Приведены результаты исследования параметров емкостного разряда для ряда благородных газов и частот подводимой ВЧ мощности. Экспериментально показано, что величина ионного потока растет с увеличением частоты ВЧ мощности и падает с увеличением атомного номера благородного газа. На основании численного расчета функций распределения ионов по энергиям в слое ВЧ электрода сделан вывод о необходимости учета формы ФРИЭ при оценке скорости физического распыления поверхности электрода.

Проведено экспериментальное исследование параметров ВЧ разряда в схеме с электрическим аналогом системы охлаждения зеркала, выполненной по принципу коаксиального короткозамкнутого четвертьволнового фильтра. Продемонстрировано, что заземление ВЧ электрода приводит к

исчезновению постоянного смещения и появлению постоянного электронного тока, приводящего к значительному разогреву ВЧ электрода.

Экспериментально продемонстрировано, что увеличение аксиального магнитного поля приводит к последовательному замагничиванию электронов и ионов, что в свою очередь приводит к симметризации разряда. При достаточной величине индукции магнитного поля наблюдается выравнивание параметров ионных потоков в разрядах с изолированным и заземлённым электродом.

*Таким образом, в главе 2 приведены результаты исследования свойств высокочастотного емкостного разряда в зависимости от поглощенной мощности, электрической схемы включения зеркала ВЧ-цепь, рабочей частоты, давления и сорта фонового газа, при наличии или отсутствии внешнего магнитного поля, в зависимости от величины магнитного поля.*

### **Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОДНОРОДНОСТИ ТРАВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ОСАЖДЕНИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ НАПЫЛЕНИЕ В ИТЭР**

#### **3.1. Физическое распыление. Коэффициент распыления**

Механизм физического распыления [52], выбранный для чистки диагностических зеркал от металлических и диэлектрических осадений (см. главу 1), – это распыление, вызванное передачей атомам поверхности импульса частиц, падающих на поверхность. Ионы или нейтральные атомы, падая на мишень, вызывают серию соударений внутри поверхностного слоя атомов мишени. В модели упругих столкновений выделяют механизм прямого выбивания и механизм линейных каскадов (рисунок 3.1.1)

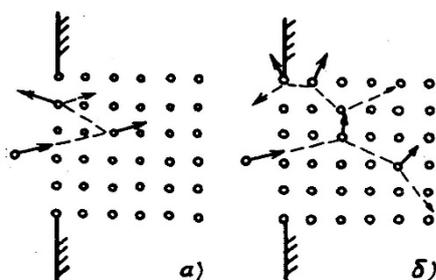


Рисунок. 3.1.1. Два режима распыления в модели упругих столкновений (а – режим первичного прямого выбивания, б – режим линейных каскадов) [52]

Механизм прямого выбивания заключается в получении атомами мишени энергии, необходимой для преодоления потенциального барьера и вылета с поверхности. В отличие от механизма линейных каскадов, в режиме прямого выбивания налетающие ионы не имеют достаточной энергии для каскадного вылета атомов мишени с поверхности. Приближенно можно утверждать, что режим первичного выбивания происходит в диапазоне энергий налетающих частиц от десятков эВ до нескольких кэВ в зависимости от угла падения налетающей частицы. Область действия механизма линейных каскадов соответствует энергиям от сотен эВ [52].

Распыление атомов мишени происходит при достижении налетающей частицей энергии, превышающей некоторую пороговую величину. Условие

выбивания атома твердого тела налетающей частицей в результате однократного столкновения при максимальной передаче энергии записывается следующим образом:

$$E_t \geq E_s \frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2},$$

где  $E_s$  – энергия сублимации атома мишени, равная энергии связи атома поверхностного слоя мишени. При этом количество атомов мишени, выбитых в результате взаимодействия с налетающей частицей, определяется коэффициентом распыления, зависящим от энергии налетающих частиц, как показано на рисунке 3.1.2 для распыления различных материалов ионами гелия.

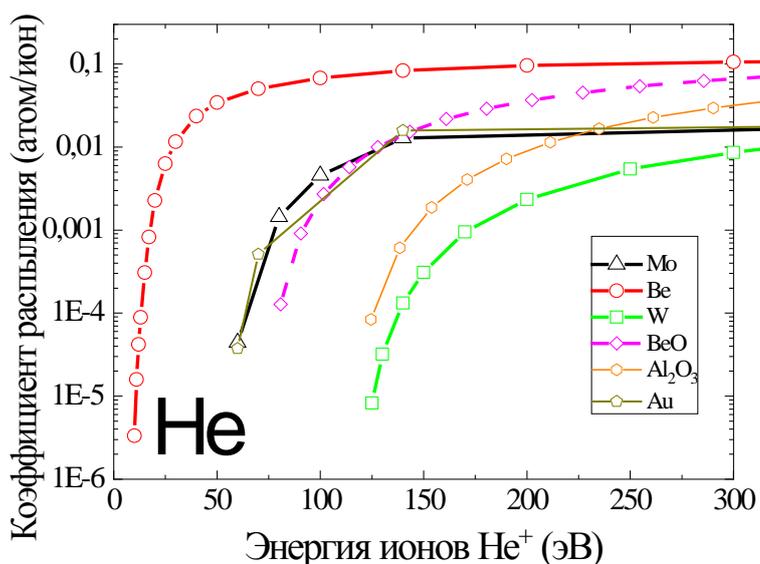


Рисунок 3.1.2. Зависимость коэффициента распыления некоторых материалов от энергии ионов гелия при нормальном падении [53]

При отклонении угла падения частиц от нормали коэффициент распыления увеличивается, достигая максимума в диапазоне углов от 70 до 80° [54]. Шероховатость поверхности мишени приводит к уменьшению коэффициента распыления и уменьшению зависимости его величины от угла падения налетающей частицы [55].

### 3.2 Методика оценки скорости удаления осадений на основе экспериментальных данных о функции распределения ионов и литературных данных о скорости распыления. Селективность распыления

Для осуществления очистки первых зеркал в ИТЭР предусмотрен режим, при котором вакуумный объем токамака заполняется необходимым для чистки газом при постоянном давлении. На данном этапе в качестве рабочего газа системы очистки рассматриваются благородные – гелий и неон, а также молекулярные газы – водород и дейтерий. Использование тяжелых благородных газов ограничено требованиями некоторых вспомогательных систем токамака [11]. Максимально разрешенные в ИТЭР давление и поток напуска для разрешенных газов приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. Ограничение на использование различных газов в системе очистки диагностических зеркал ИТЭР [11]

Тип газа	$P_{\text{макс}}$ , Па	$\Phi_{\text{макс}}$ , Па·м <sup>3</sup> /с	Ограничения
H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub>	10	10	Менее 2 кг на вакуумный объем ИТЭР (для ~1600 м <sup>3</sup> соответствует давлению D <sub>2</sub> менее 350 Па при комнатной температуре)
He, Ne	7	7	Разрешен при закрытых затворах инжекторов нейтральных пучков

На данный момент рассматриваются два способа поддержания давления, требуемого для зажигания чистящего разряда. В первом случае предполагается напуск газа в вакуумную камеру токамака при отключенной системе вакуумной откачки. В данном случае время, отведенное на чистку, ограничено в первую очередь величиной потока примеси со стенок вакуумной камеры. Для поддержания концентрации атомов водорода (и его изотопов) на уровне 1% во время процесса очистки зеркал, а также для предотвращения взаимодействия поверхности зеркал с атомами и молекулами химически активных газов (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> и т.д.) необходимо ограничить время чистки одним часом. После этого весь объем токамака

может быть откачен и заполнен требуемым газом для повторения процедуры очистки.

В другом случае предполагается проводить чистку в режиме протока газа, когда напуск и вакуумная откачка работают одновременно. Ввиду достаточно высокой производительности откачных систем ИТЭР (1 м<sup>3</sup>/с по азоту) концентрация примеси будет оставаться на уровне меньше 1%. Время, отведенное на чистку, в таком случае ограничивается работой основных служб ИТЭР. В частности, в отведенную на восстановление зеркал 8-часовую техническую смену непосредственно плазменная очистка будет проводиться только 4 часа. Остальное время затрачивается на подготовку вакуумной камеры токамака для проведения основной экспериментальной работы. В связи с вышеперечисленным, особый интерес представляет выбор сорта рабочего газа, обеспечивающего максимальную скорость очистки зеркал от металлических осадений за отведенное на процедуру время.

В настоящей диссертации предложена методика выбора частоты и подводимой ВЧ мощности, а также рабочего газа для очистки зеркал в ИТЭР. Методика заключается в оценке скорости распыления пленок с поверхности металлических зеркал. Скорость распыления оценивалась на основании экспериментально измеренных параметров ионного потока, описанных в главе 2, и коэффициентов распыления, взятых из [53]. На рисунке 3.2.1 приведены коэффициенты распыления основных материалов загрязнений – Ве и W в сравнении с коэффициентом распыления основного материала первых зеркал – Мо для двух допущенных к использованию в ИТЭР благородных газов – гелия и неона. При энергии налетающего иона гелия в диапазоне 0 – 50 эВ коэффициент распыления бериллия значительно (на несколько порядков) превышает коэффициент распыления молибдена. При этом в области энергий от 50 до 100 эВ коэффициент распыления бериллия значительно превышает коэффициент распыления молибдена. Пороговая энергия, необходимая для распыления вольфрама в гелиевом разряде, значительно выше, а коэффициент распыления значительно ниже, чем

коэффициенты распыления Be и Mo. Коэффициенты распыления Be, Mo и W ионами неона при энергиях <300 эВ практически неотличимы друг от друга и имеют схожую пороговую энергию распыления.

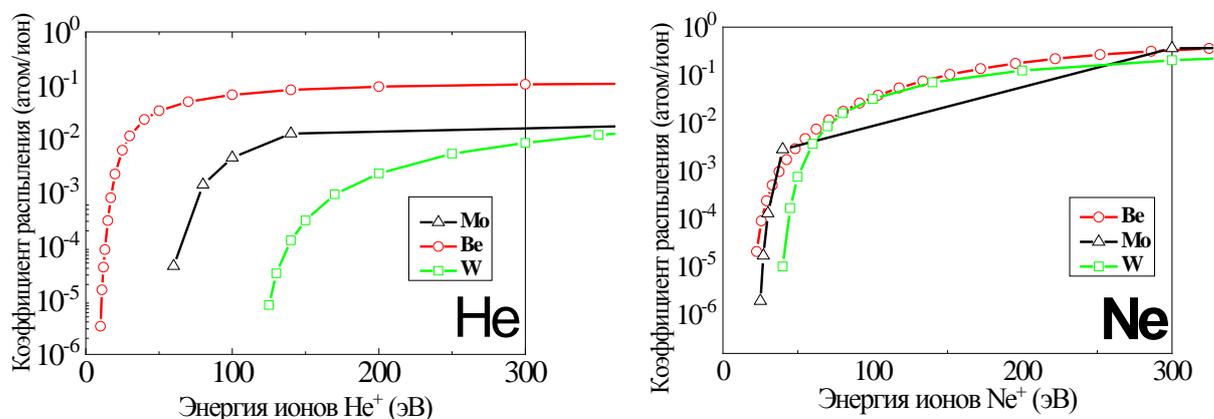


Рисунок 3.2.1. Коэффициенты распыления бериллия, вольфрама и молибдена ионами гелия (слева) и неона (справа) при нормальном падении ионов [53]

Исходя из данных экспериментов по измерению функций распределения ионов по энергиям, приведенных в главе 2, при расчете скорости распыления следует учитывать не только максимум, но и форму ФРИЭ, поскольку значительная часть ионов имеет энергию меньше порога распыления Be. Для оценки влияния функции распределения ионов по энергиям применялась величина эффективного коэффициента распыления, рассчитываемая по формуле:

$$y_{\text{эфф}} = \frac{\int_{\varepsilon_{\text{мин}}}^{\varepsilon_{\text{макс}}} f_i(\varepsilon) y(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\text{мин}}}^{\varepsilon_{\text{макс}}} f_i(\varepsilon) d\varepsilon},$$

где  $f_i(\varepsilon)$  – функция распределения ионов по энергиям,  $\varepsilon$  – энергия иона, а  $y(\varepsilon)$  – коэффициент распыления бериллия или молибдена, взятый из [53]. Исходя из данных о коэффициенте распыления бериллия, осажденного в плазме газового разряда [57], коэффициент распыления  $y(\varepsilon)$ , взятый из [53], может быть принят за оценку сверху.

На рисунке 3.2.2 приведены зависимости эффективных коэффициентов распыления Be и W – основных продуктов эрозии первой стенки, а также Mo – основного материала зеркал в ИТЭР, от частоты, подведенной к разряду ВЧ

мощности. Расчет был проведен для широкого диапазона частот (40–100 МГц). В качестве рабочего газа рассматривались благородные газы – He, Ne, Ar, Kr и Xe. Наиболее высокий эффективный коэффициент распыления бериллия был обнаружен в гелиевом разряде на частоте 100 МГц, что связано с близостью атомарных масс гелия и бериллия, которая приводит к большей доле переданного при столкновении импульса. Однако в гелиевом разряде в исследованном диапазоне управляющих параметров не было обнаружено превышения порога распыления вольфрама. В тяжелых газах, таких как Ne, Ar и т.д., высокий коэффициент распыления вольфрама наблюдался наряду с высоким коэффициентом распыления молибдена. Причем на низких частотах ВЧ мощности эффективный коэффициент распыления W оказалась выше.

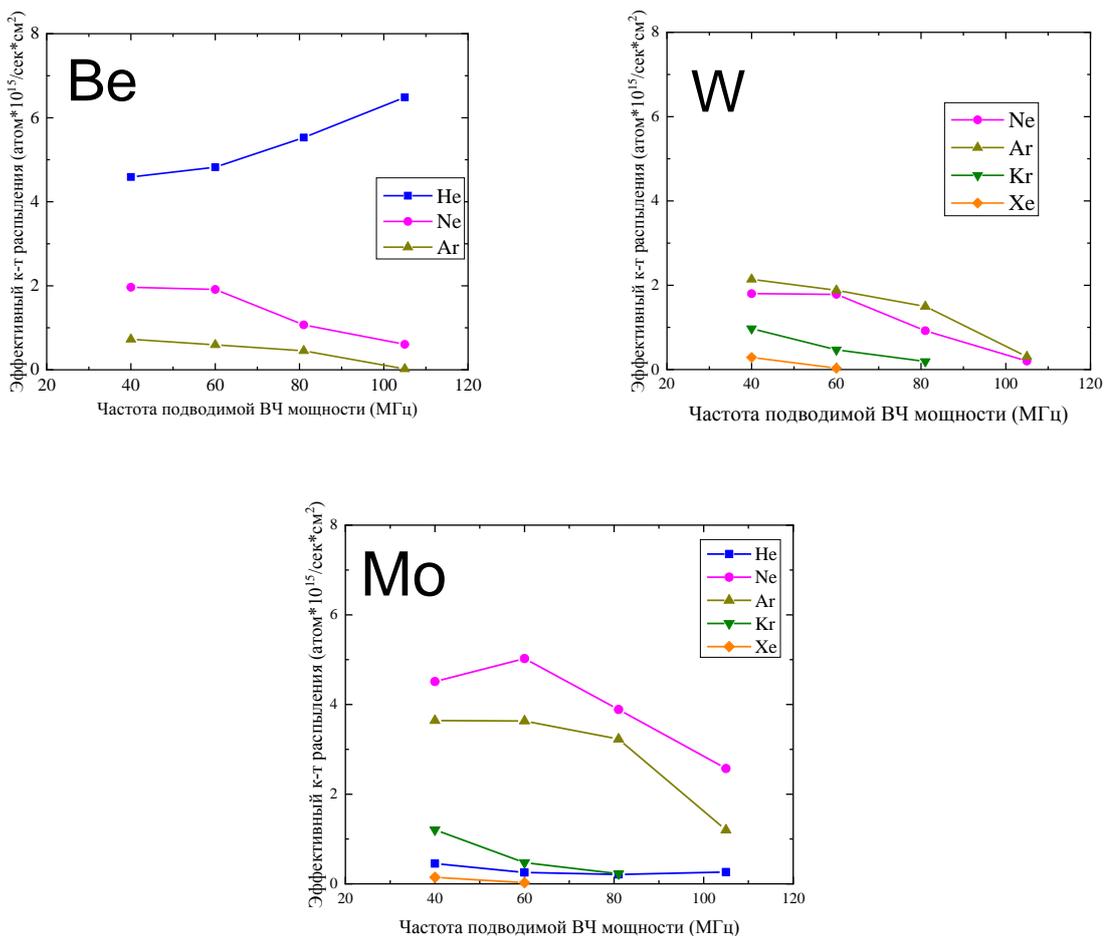


Рисунок 3.2.2. Зависимость эффективных коэффициентов Be, W и Mo от частоты подведенной к чистящему разряду ВЧ мощности для ряда благородных газов. Исследования проводились при давлении 2 Па и поглощенной мощности  $0,3 \text{ Вт/см}^2$

Для оценки эффективности использования того или иного рабочего газа системы чистки зеркал, был введен параметр селективности чистки, равный отношению соответствующих эффективных коэффициентов распыления:

$$S_{A/B} = \frac{y_{эффA}}{y_{эффB}}$$

Селективность распыления позволяет дать оценку, насколько та или иная система очистки влияет на очищаемую поверхность. На рисунке 3.2.3 показана зависимость селективности распыления  $Ve/Mo$  и  $Ve/W$  в зависимости от частоты ВЧ мощности для ряда благородных газов. В отличие от остальных исследованных благородных газов, гелий позволяет добиться селективности чистки  $Ve/Mo$  превышающей единицу, причем наибольшее значение селективности наблюдалось на частотах 81,36 и 100 МГц.

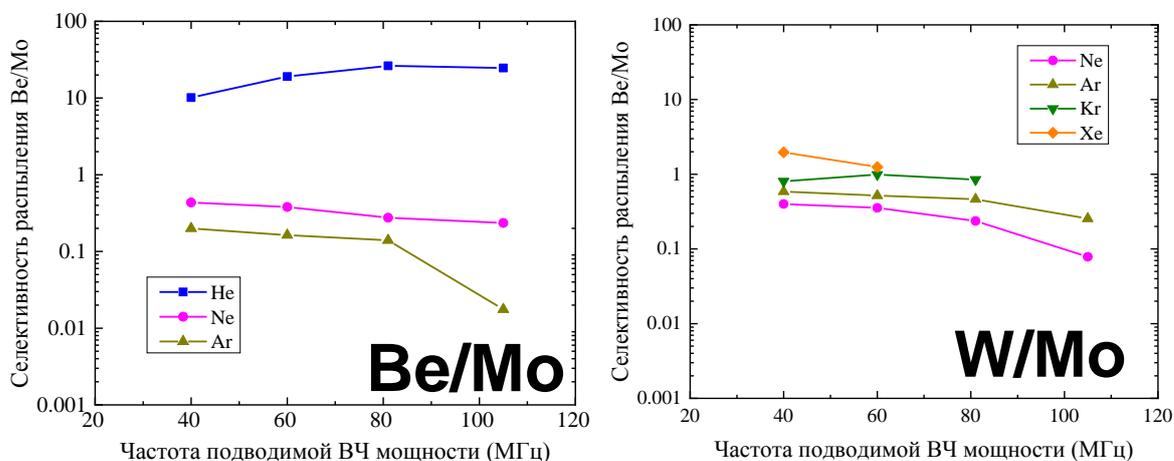


Рисунок 3.2.3. Зависимость селективности распыления  $Ve$  и  $W$  по отношению к  $Mo$  от частоты, подведенной к чистящему разряду ВЧ мощности, для ряда благородных газов. Исследования проводились при давлении 2 Па и поглощенной мощности  $0,3 \text{ В/см}^2$

Разряды в Ne, Ar, Kr и Xe рассматривались как основные претенденты для чистки зеркал от перенасыщенных пленок с вольфрамовыми включениями. Эксперименты показали, что различные благородные газы, за исключением He, обеспечивают сравнимые селективности распыления

W/Mo, однако ни в одном из этих газов селективность не превышает единицу. Наибольшая селективность достигается в разряде Хе. Однако, учитывая возможность образования долгоживущих радиоактивных изотопов Ar, Kr и Хе в процессе эксплуатации в токамаке-реакторе [57, 59], наиболее вероятным кандидатом для удаления вольфрама с поверхности зеркал является разряд в Не. Причем оптимум наблюдается при частоте ВЧ мощности  $\leq 40$  МГц. Увеличение поглощенной в разряде мощности позволяет добиться заметного роста селективности травления W/Mo в разряде Ne (рисунок 3.2.4).

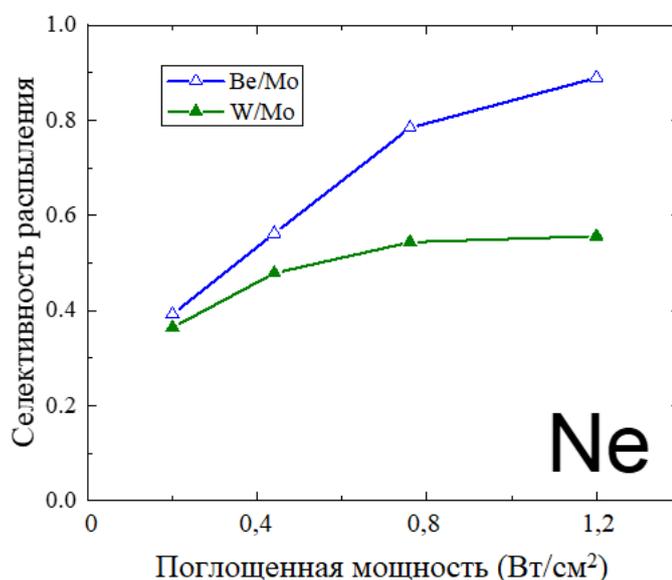


Рисунок 3.2.4. Зависимость селективности распыления Be и W по отношению к Mo в неоне от мощности, поглощенной в чистящем разряде ВЧ на частоте 81,36 МГц. Исследования проводились при давлении Ne 2 Па

Оценка скорости распыления предложенным образом для молекулярных газов – водорода и дейтерия, не проводилась по ряду причин. В газовом разряде в водороде всегда присутствуют молекулярные ионы. При столкновении с поверхностью такие ионы диссоциируют, разделяя кинетическую энергию между осколками. При этом эффективная энергия распыляющих частиц падает, что приводит к уменьшению эффективного коэффициента распыления. Ввиду того, что точный ионный состав таких разрядов зачастую неизвестен, оценка скорости физического распыления для

таких газов в значительной степени затруднена. Кроме того, наряду с физическим распылением, при малых энергиях молекулярных и атомарных ионов водорода превалирует химическое распыление, оценка скорости которого существенна затруднена, т.к. требует знания ФРИЭ каждой из компонент и может сильно зависеть от температуры обрабатываемой поверхности. Оценка скорости распыления пленок в молекулярных газах требует проведения отдельного экспериментального исследования. В разделе 3.5 приведена экспериментальная оценка скорости распыления пленок Ве/ВеО для разрядов в гелии и дейтерии.

### 3.3 Экспериментальное исследование однородности распыления металлических осадений с использованием плазмы ВЧ разряда

Одним из ключевых требований к системе очистки первого зеркала является однородность скорости распыления по площади очищаемого зеркала. Существует ряд факторов, влияющих на однородность распыления, среди которых – однородность плотности потока распыляющих ионов [59], переосаждение распыленных атомов примеси [60], а также изменение геометрии плазменного столба в магнитном поле [61]. В данной главе сделан акцент на исследовании пространственного распределения потока ионов на электрод в цилиндрической геометрии, как в присутствии, так и в отсутствии аксиально направленного магнитного поля.

В данной работе было проведено исследование пространственного распределения скорости травления металлической пленки на поверхности нагруженного электрода. Для этого в качестве ВЧ электрода использовались круглые (диаметр 80 мм) зеркала из поликристаллического молибдена, покрытые тонким (30–40 нм) слоем золота (рисунок 3.3.1). Эксперименты были проведены в экспериментальной установке № 2 (см. главу 2) в атмосфере Ne при давлении 1 Па.



Рисунок 3.3.1. Молибденовое зеркало, использовавшееся в экспериментах по исследованию неоднородности очистки в качестве ВЧ электрода, с нанесенной тонкой пленкой золота толщиной ~40 нм

Толщина слоя золота на поверхности электрода измерялась по данным эллипсометрии (рисунок 3.3.2), метода определения оптических параметров прозрачных пленок по относительному изменению амплитуд и фаз компонент вектора электрического поля электромагнитной волны, расположенных в плоскости падения и перпендикулярно ей, при взаимодействии с исследуемым образцом [62]. Возможность одновременного измерения амплитудных и фазовых характеристик отраженного излучения позволяет определять как толщины пленок, так и оптические константы материала пленок. Толщина золотой пленки, осажденной на исследуемом зеркале, измерялась до и после экспозиции электрода в плазме чистящего разряда в восьмидесяти точках по поверхности зеркала. Затем по разности между измерениями в каждой точке определялась скорость распыления и профиль скорости по всей площади электрода. Типичный профиль распыления для схемы разряда с изолированным ВЧ электродом в отсутствии магнитного поля приведен на рисунке 3.3.3.

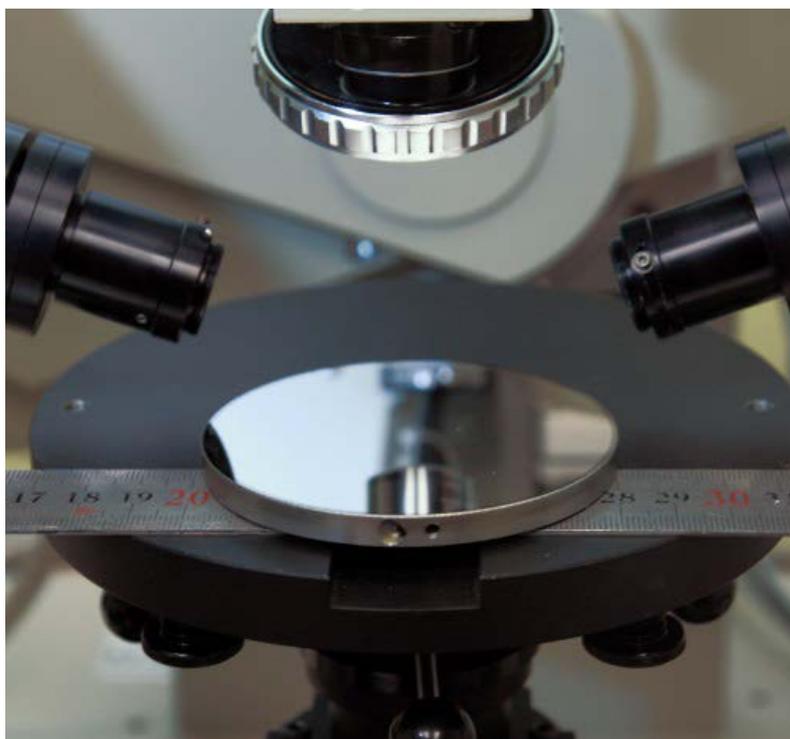


Рисунок 3.3.2. Полированный молибденовый электрод на предметном столике во время проведения эллипсометрических измерений

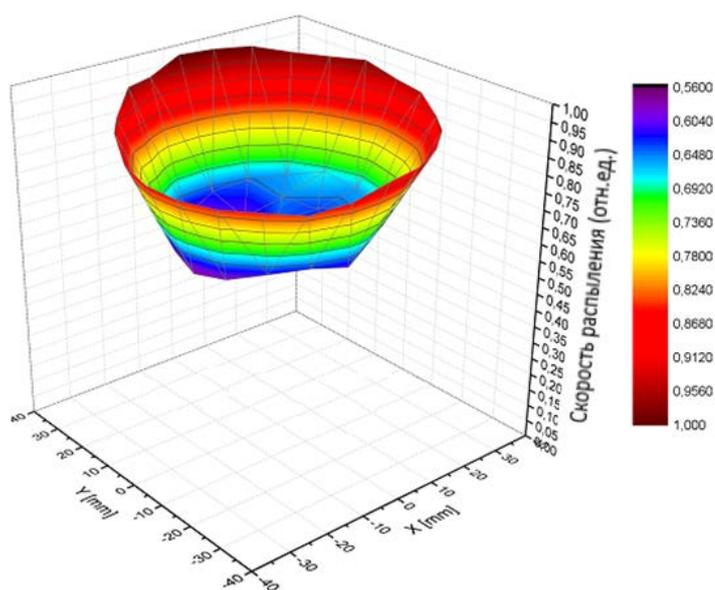


Рисунок 3.3.3. Профиль распыления тонкой пленки золота с поверхности молибденового изолированного ВЧ-электрода, полученный с помощью эллипсометрии, после экспозиции в плазме ВЧ разряда в Ne в отсутствие магнитного поля при давлении 1 Па для случая изолированного зеркала.

Как видно из рисунка 3.3.3, профиль распыления имеет ярко выраженную краевую неоднородность, в то время как в центре зеркала

скорость распыления меняется крайне незначительно. Полученный результат можно объяснить следствием неоднородности характеристик ионного потока на поверхность исследуемого зеркала, игравшего роль ВЧ электрода. Полученные экспериментальные данные скорости распыления качественно совпадают с результатом расчета в коде CFD-ACE+ распределения ионного потока на ВЧ-электрод (рисунок 3.3.4). Наряду с краевыми эффектами небольшое (1–10%) увеличение скорости распыления в центре наблюдается как в численном моделировании плазмы, так и в эксперименте, и объясняется повышением плотности плазмы в центре разряда.

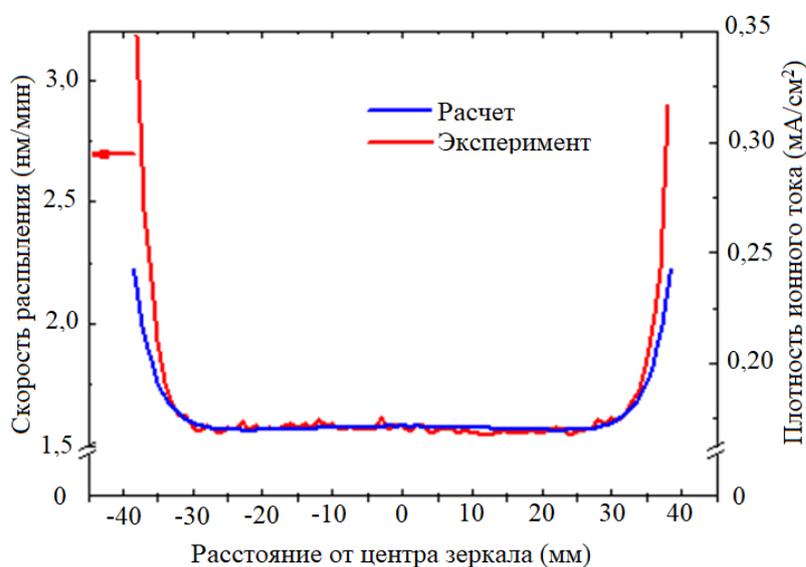


Рисунок 3.3.4. Сравнение радиального распределения ионного потока на ВЧ-электрод, полученное из численного моделирования и из экспериментально измеренной скорости травления металлической пленки на поверхности электрода

Подавление радиального дрейфа электронов и ионов при включении продольного магнитного поля приводит к симметризации ВЧ разряда, что в свою очередь сказывается на профиле распыления поверхности ВЧ-электрода. Как видно из рисунка 3.3.5, включение магнитного поля приводит к значительному подавлению краевой неоднородности распыления. При этом неоднородность, вызванная повышенной плотностью плазмы в центре столба, увеличивается. Симметризация разряда в магнитном поле приводит

также к значительному уменьшению энергии ионов в слое ВЧ электрода. Это в первую очередь связано с уменьшением величины потенциала автосмещения (DC bias), вносящего большой вклад в энергию частиц, бомбардирующих нагруженный электрод (см. п. 2.6), что приводит к уменьшению скорости распыления поверхности ВЧ электрода в присутствии аксиального магнитного поля, наблюдаемому на рисунке 3.3.5.

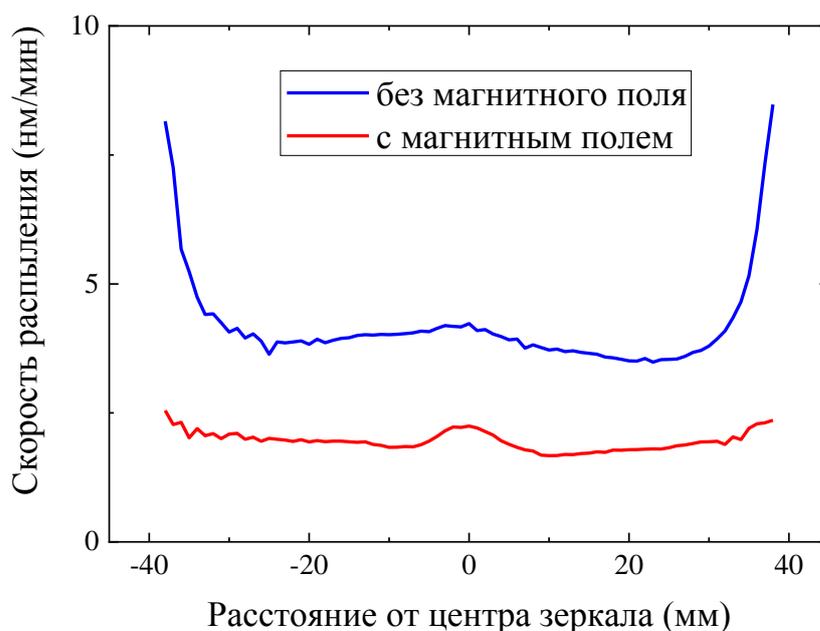


Рисунок. 3.3.5. Радиальные профили распыления пленки золота с круглого молибденового электрода в разряде в Ne при давлении 1 Па и мощности 1 Вт/см<sup>2</sup> для случаев с магнитным полем (0,05 Тл) и без поля

Уменьшение скорости распыления может быть также связано с процессом перенапыления продуктов эрозии на поверхности электродов в ходе плазменной обработки. В ВЧЕ разряде, получаемом между плоскими параллельными электродами, распыленные атомы имеют сравнительно высокую энергию (единицы эВ) и надкосинусное угловое распределение, что приводит к высокой вероятности их переосаждения на противоположном электроде. В симметризованном разряде со сравнимой энергией частиц и, соответственно, скоростью распыления на обоих электродах материалы эрозии первой стенки могут проходить множество циклов распыления-осаждения, пока не будут полностью удалены из области чистящего разряда.

При этом атомы распыленного материала с большей вероятностью покидают газоразрядный промежуток, будучи распыленными с края зеркала, что может усиливать краевую неоднородность. Более детальное описание процесса перенапыления приведено в главе 4.

В случае если ориентация магнитного поля не совпадает с описанной выше, наблюдается эффект дрейфа плазмы в скрещенных  $E \times H$  полях, что может привести к сильной неоднородности очистки по поверхности зеркала. Оценка неоднородности распыления в таком случае необходимо проведение экспериментального исследования или численного моделирования в условиях реальной геометрии первого зеркала.

#### 3.4 Эксперименты по удалению пленочных осадений Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, моделирующих пленочные осадения Ве в вакуумном объеме ИТЭР

В ИТЭРе, где большая часть первой стенки изготовлена из бериллия, ожидается повсеместное осаждение бериллийсодержащих пленочных осадений. Из-за токсичности бериллия в лабораторных опытах поведение переосажденных материалов первой стенки моделируется Al мишенями. Алюминий и бериллий химически близки: оба легко окисляются, формируя твердые оксиды – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ВеО, и химически устойчивы в атмосфере водорода. В то же время Al и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеют более высокие пороги распыления в дейтерии ( $E_{th} = 36$  и  $66$  eV), чем Ве и ВеО ( $E_{th} = 10$  и  $29$  eV), где  $E_{th}$  – порог распыления [63]. Таким образом, технология плазменной чистки, испытанная на Al мишенях, должна так же подходить и для чистки Ве содержащих пленочных осадений.

Эксперименты по удалению алюминиевых пленок с поверхности зеркал из поликристаллического молибдена, описанные в данном разделе, производились в двух различных газах – Ne (зеркало № 1) или D<sub>2</sub> (зеркало № 2) и включали несколько этапов. На первом этапе на зеркало методом магнетронного распыления осаждалась тонкая пленка (40–50нм) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, толщина которой измерялась с помощью эллипсометрии. Затем проводилась

экспозиция зеркала в плазме ВЧ разряда до полного распыления алюминиевой пленки. В связи с необходимостью удаления трудно распыляемой пленки оксида алюминия в описываемых экспериментах была выбрана энергия ионов, значительно превышающая пороговую энергию распыления Al и Mo. В связи с этим для изучения влияния ионных потоков с такой энергией на морфологию поверхности поликристаллического молибдена, после очистки зеркала были подвержены повторной экспозиции в ВЧ разряде. На каждом этапе эксперимента проводилось измерение коэффициента отражения, который в последствии сравнивался с исходным. Поверхность зеркал после экспозиции в разряде была исследована на микроскопе-профилометре МНП-1, разработанном в КТИ НО СО РАН [64].

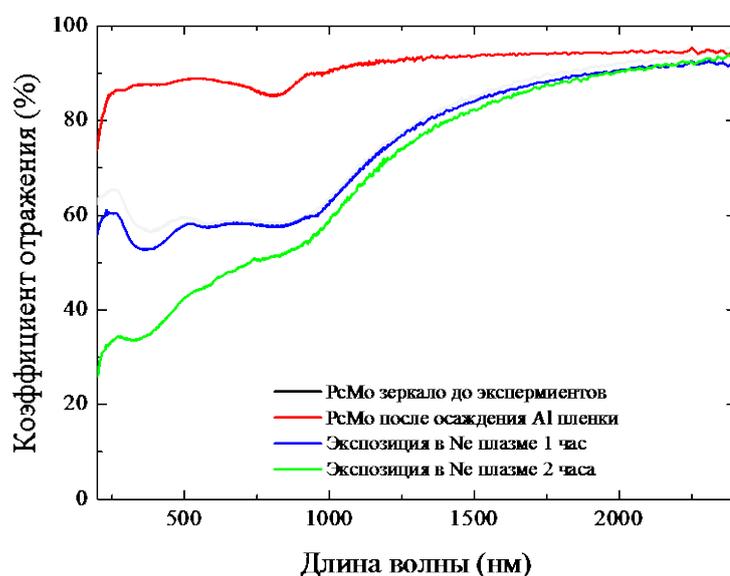


Рисунок 3.4.1. Эволюция спектров отражения под углом  $45^\circ$  поликристаллического молибденового зеркала № 1 с напыленной пленкой алюминия в ходе распыления в ВЧ разряде в атмосфере неона

На рисунке 3.4.1 представлена эволюция коэффициента отражения поликристаллического молибденового зеркала № 1 на каждом этапе эксперимента. Черной линией на графике показан коэффициент отражения исходного зеркала. Красная кривая показывает коэффициент отражения после осаждения Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пленки на поверхность зеркала. После удаления пленки алюминия в ВЧ разряде в атмосфере Ne при энергии 220 эВ и

длительности травления 1 час коэффициент отражения оказался несколько ниже, чем у исходной подложки в области коротких волн, что может говорить о развитии микрорельефа поверхности. Дальнейшая экспозиция привела к усилению деградации оптических характеристик зеркала, которая связана с образованием рельефа на поверхности зеркала, представленного на рисунке 3.4.2. Появление такого рельефа обусловлено поликристаллической структурой исследуемого молибденового зеркала. При экспозиции поликристаллических материалов в потоках ускоренных ионов может происходить селективное травление зерен с различным кристаллографическим направлением [65], что, в итоге, приводит к образованию характерного рельефа на поверхности зеркала.

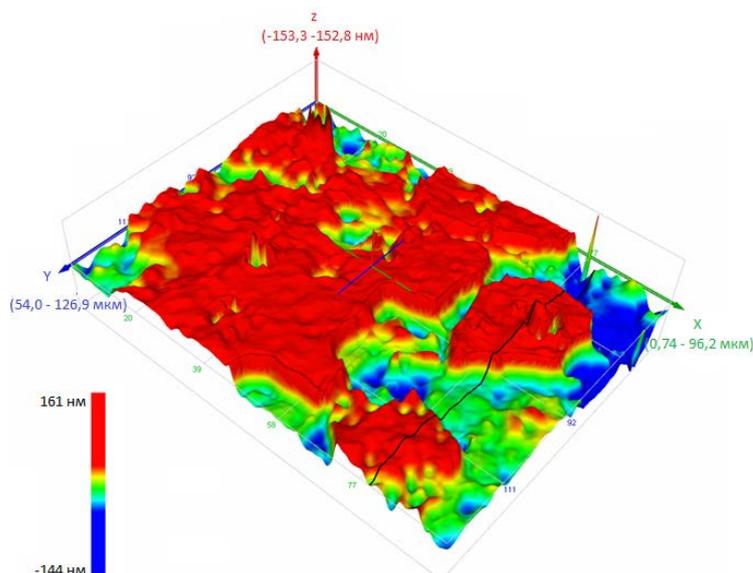


Рисунок 3.4.2. Изображение молибденового зеркала, полученное при помощи интерференционного микроскопа, после экспозиции в ВЧ разряде в атмосфере Ne при энергии ионов 220 эВ.

Для удаления пленки  $Al/Al_2O_3$  с поверхности зеркала № 2 в разряде в атмосфере дейтерия потребовалось 4 часа при энергии ионов, равной 300 эВ, что привело к незначительному уменьшению коэффициента отражения во всем исследованном диапазоне длин волн. После дальнейшей 7-часовой экспозиции очищенного зеркала в ВЧ разряде в атмосфере дейтерия деградация оптических свойств исходной подложки также усилилась, хотя и в меньшей степени по сравнению с травлением в Ne (рисунок 3.4.3).

Исследования поверхности зеркала методом интерференционной микроскопии выявили отсутствие проявления поликристаллической структуры образца, обнаруженное после экспозиции в Ne. Напротив, после экспозиции в дейтерии, на поверхности зеркала было обнаружено скопление холмистых неровностей, что может говорить о начале процесса блистерообразования [66] (рис. 3.4.4), которое, согласно [67], может приводить к наблюдаемым изменениям в спектре отражения зеркала.

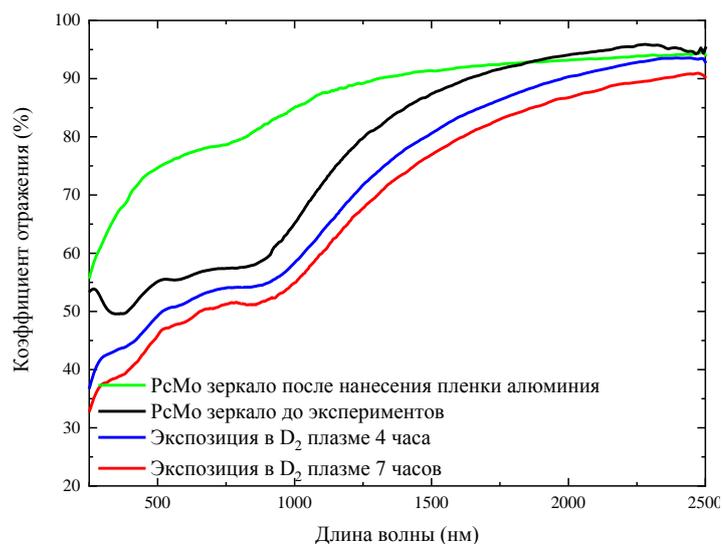


Рисунок 3.4.3. Эволюция спектров отражения под углом 45° молибденового зеркала с напыленной пленкой алюминия в ходе распыления в ВЧ разряде в атмосфере дейтерия

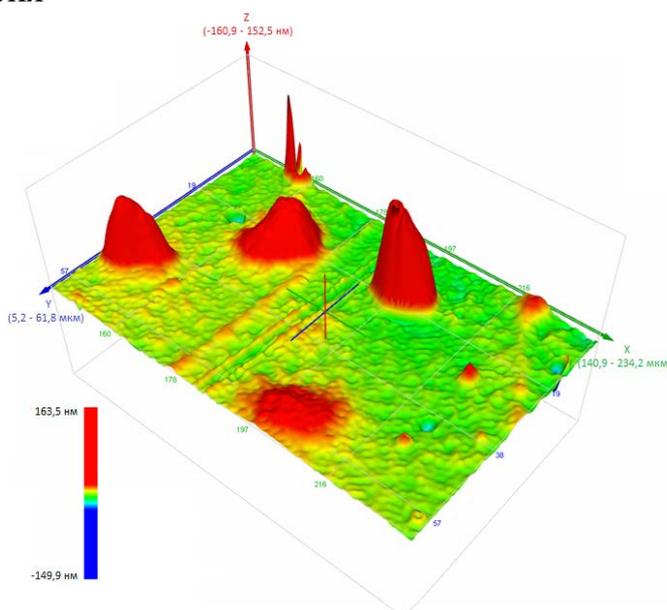


Рисунок 3.4.4. Изображение молибденового зеркала, полученное при помощи интерференционного микроскопа, после экспозиции в ВЧ разряде в атмосфере дейтерия при энергии ионов 300 эВ

Исходя из представленных результатов, видно, что длительная экспозиция поликристаллических зеркал в плазме чистящего разряда может приводить к значительному ухудшению их свойств. Вне зависимости от типа применяемого для очистки газа использование монокристаллических зеркал из молибдена или родия в качестве первого зеркала позволит в значительной мере ослабить деградацию очищаемой поверхности [36].

### 3.5 Эксперименты по удалению бериллийсодержащих пленок в плазме ВЧ разряда

Для оптимизации режимов чистки, а также для исследования взаимодействия поверхности внутривакуумных оптических компонентов с бериллийсодержащими осаждениями был разработан стенд, имеющий интерфейс стыковки с мишенной камерой квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ-Ве), расположенного в ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. КСПУ-Ве представляет собой коаксиальный сильноточный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем [68]. Схема ускорителя КСПУ-Ве и процесса проведения экспериментов представлена на рисунке 3.5.1.

На первом этапе экспериментальной кампании проводилось облучение гелиевым импульсным плазменным потоком бериллиевой мишени, имитирующей защитное покрытие первой стенки ИТЭР, толщиной 10 мм и размерами 80×80 мм. Мишень была расположена таким образом, что обращенная к плазме поверхность была перпендикулярна оси патрубка с ВЧ электродом и исследуемыми образцами, которые моделируют очищаемую оптическую поверхность. В результате такого облучения на поверхности исследуемого образца происходило формирование бериллиевого осаждения, причем интенсивность облучения и расстояние от образца до мишени выбираются так, что за один импульс на поверхности образца осаждается пленка толщиной около 10 нм. Затем разрядная камера, пристыкованная к

мишени в камере, отсекалась от основного объема высоковакуумным дисковым затвором, и в разрядной камере зажигался ВЧЕ разряд в атмосфере рабочего газа (гелий или дейтерий). Во время процесса очистки осуществлялось поддержание давления рабочего газа, равного 2 Па.

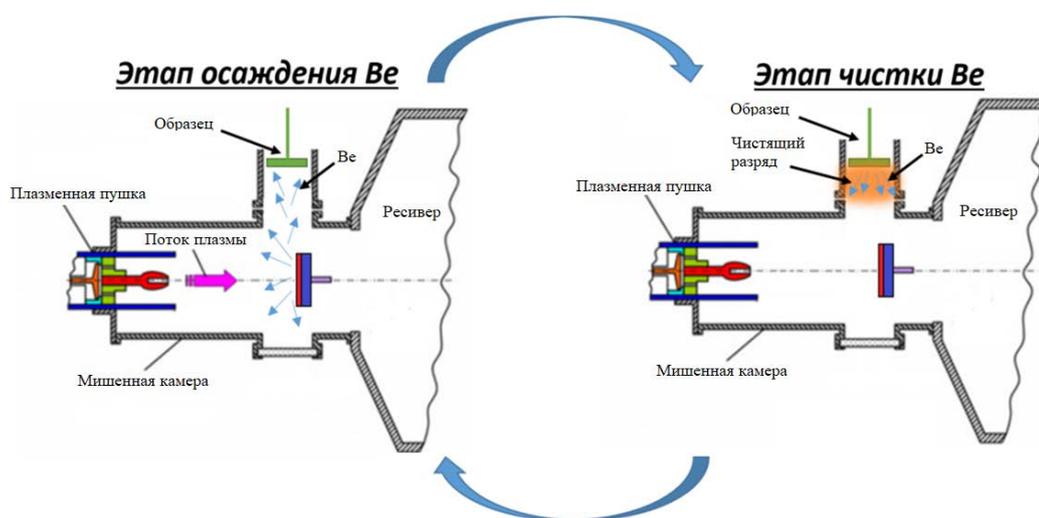


Рисунок 3.5.1 Схема эксперимента по многократным осаждениям и очисткам бериллийсодержащих осадков в установке КСПУ-Ве

Для обеспечения проведения экспериментов по исследованию процесса осаждения продуктов эрозии бериллия в стенде для многократной плазменной очистки на базе установки КСПУ-Ве, была разработана и изготовлена опытная мишень из российского бериллия марки ТГП-56ПС, разрешенного для использования в качестве облицовки первой стенки ИТЭР. Мишень представляет собой квадратную пластину 80×80×10 мм. Внешний вид опытной мишени размером 80×80×10 мм представлен на рисунке 3.4.2. Параметры бериллия марки ТГП-56ПС сведены в таблице 3.4.1.

Таблица 3.4.1. Характеристики бериллия марки ТГП-56ПС

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание Ве, % масс.	Содержание ВеО, % масс.	Средний размер зерна, мкм
ТГП-56ПС	1,84	≥ 99,16	~0,86 % Ве О	16–17

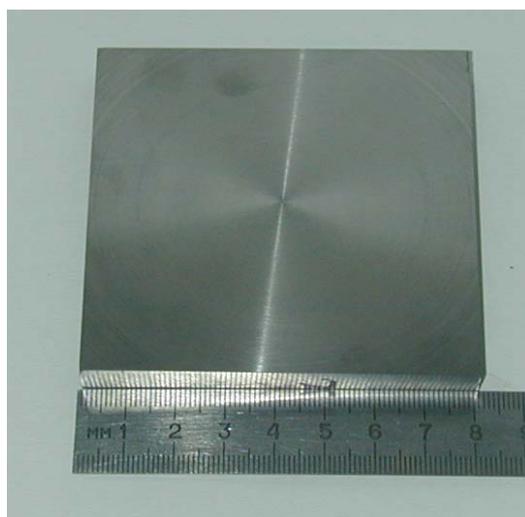


Рисунок 3.4.2. Фотография опытной мишени из бериллия размером 80×80×10мм

Перед проведением экспериментов по плазменной очистке макетов первого окна системы сбора света ДТР для отработки процесса осаждения пленок была проведена серия отладочных пусков установки КСПУ-Ве. Внешний вид установки приведен на рисунке 3.4.3. Разрядная камера была присоединена к одному из патрубков мишенной камеры КСПУ-Ве. Вакуумная откачка разрядной камеры осуществлялась при помощи сильфонной откачной магистрали, подключенной к двухступенчатой откачной системе, состоящей из одного турбомолекулярного и двух форвакуумных пластинчато-роторных насосов.

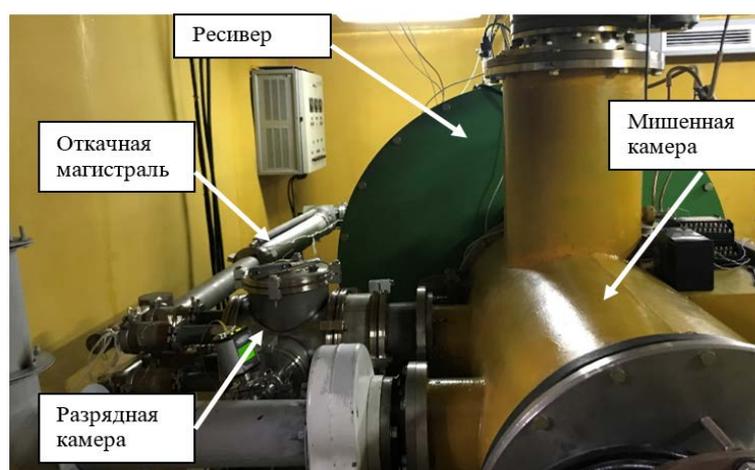


Рисунок 3.4.3. Фотография установки КСПУ-Ве с присоединенной разрядной камерой

Для уменьшения содержания углеводородных соединений распыление бериллиевой мишени проводилось в атмосфере гелия. В качестве материала очищаемой оптической поверхности были использованы образцы монокристаллического кремния размерами  $38 \times 18 \times 0,2$  мм, закрепленные на поверхности изолированного ВЧ-электрода диаметром 100 мм. Расположение бериллиевой мишени относительно электрода-держателя образцов показано на рисунке 3.4.4. Мишень располагалась таким образом, что обращенная к плазме поверхность была смещена на расстояние 50 мм от оси электрода-держателя с исследуемыми образцами. Расстояние между поверхностью электрода держателя и мишенью составляло 500 мм. Такая геометрия позволила минимизировать количество бериллиевых капель, осажденных на поверхности образцов.



Рисунок 3.4.4. Внешний вид мишенной камера КСПУ-Ве с установленной бериллиевой мишенью

При каждом пуске установки КСПУ-Ве происходило облучение мишени импульсным потоком гелиевой плазмы. В результате такого облучения на поверхности образцов, закрепленных на ВЧ электроде, происходило формирование бериллийсодержащего осаждения. Толщина формируемых за один импульс пленок оценивалась, основываясь на измерениях толщины пленки, осажденной за несколько импульсов установки

КСПУ-Ве. Было проведено три серии пусков, по десять импульсов в первых двух и шесть импульсов – за третью серию. После каждой серии импульсов, толщина пленки измерялась методом оптической микроинтерферометрии при помощи микроинтерферометра МИИ-4 (см. рисунок 3.4.5). Результаты измерений толщин пленок приведены в таблице 3.4.2. Исходя из данных измерений толщины осадений, можно сделать вывод, что толщина осаждения продуктов эрозии бериллиевой мишени, формируемая за один импульс КСПУ-Ве, составляла около 7 нм.

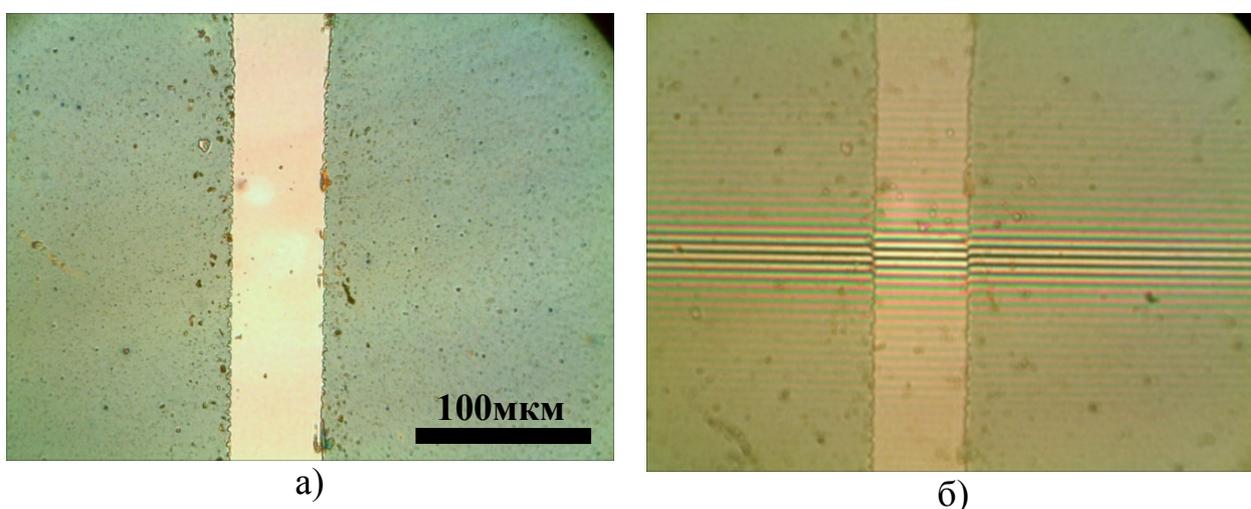


Рисунок 3.4.5. Измерение толщины пленки осажденных продуктов эрозии на поверхности макета диагностического окна ДТР. а) – поверхность макета с технологической царапиной; б) – интерференционная картина

Таблица 3.4.2. Результаты измерений толщины бериллийсодержащих осадений

Количество импульсов	Толщина осаждения, нм
10	50
20	140
26	220

Морфология поверхности бериллийсодержащих пленок, осажденных на кремниевых образцах за 20 импульсов КСПУ-Ве, была исследована методом растровой электронной микроскопии (рисунок 3.4.6). Как видно из полученных изображений, поверхность образцов содержит незначительное

количество крупных капельных включений размером 1–2 мкм и плотностью около 10 капель на квадратный миллиметр. При этом было обнаружено, что морфология пленки представляет собой скопление включений размером 50–200 нм, расположенных равномерно по поверхности исследуемых образцов.

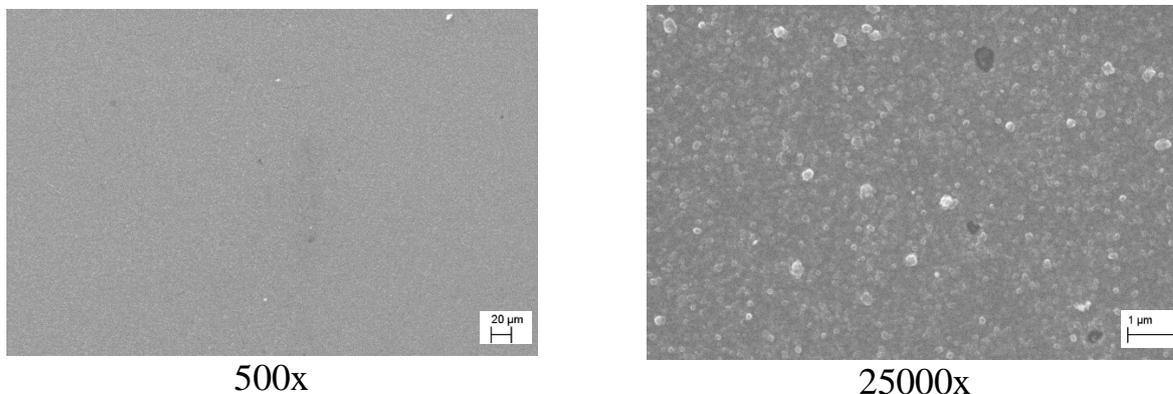


Рисунок 3.4.6. Изображения пленки после 20 импульсов, полученные на электронном микроскопе с различным увеличением

Элементный состав пленок определялся методом EDX. На рисунке 3.4.7 приведены карты областей с привязкой к микроструктуре поверхности продуктов эрозии (спектр 1–7), осевших на поверхности пленок.

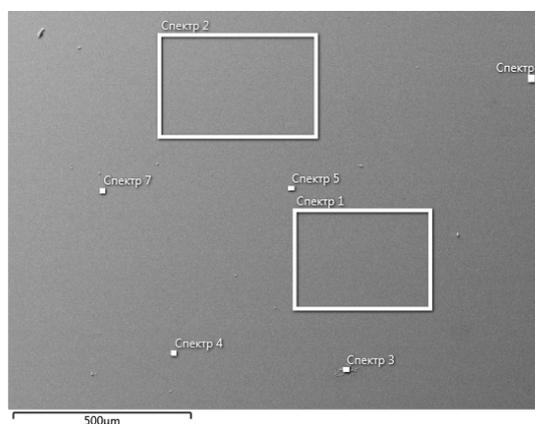


Рисунок 3.4.7. Изображение поверхности бериллийсодержащих пленок, осажденных за 20 импульсов КСПУ-Ве, с указанием областей элементного анализа

В таблицу 3.4.3 сведены результаты элементного анализа бериллийсодержащих осадений, за вычетом сигнала, соответствующего материалу подложки (Si). В среднем по поверхности исследуемой пленки содержание бериллия составило ~ 70 масс. %, углерода – ~20 масс. %. Обнаруженные включения размером 1–2 мкм представляли собой как смесь

бериллия и углерода, так и капли, состоящие преимущественно из бериллия. Помимо этого, на образцах было обнаружено присутствие незначительного количества углеродных капель.

Таблица 3.4.3. Результаты элементного анализа (масс. %) бериллийсодержащих осадений на макетах первых диагностических зеркал

Химический элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4	Спектр 5	Спектр 6	Спектр 7
Be	72	71	50	35	0	87	74
C	20	24	38	53	74	9	18
O	5	4	7	6	2	2	7
Остальное	3	1	5	2	24	2	1
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

На основании результатов работ по подбору параметров чистящего разряда была проведена тестовая очистка образцов, закрепленных на электроде держателе. Очистка проводилась путем экспозиции в ВЧЕ разряде на частоте 81 МГц в атмосферах дейтерия и гелия. Параметры чистящего разряда были выбраны на основе результатов, приведенных в главе 2. Энергия ионов, бомбардирующих поверхности исследуемых образцов, в обоих случаях составляла  $\sim 150$  эВ, что позволяло преодолеть порог распыления оксида бериллия. После 3-часовой экспозиции образцов в плазме чистящего ВЧЕ разряда в атмосферах гелия и дейтерия было произведено измерение толщины остаточных бериллийсодержащих осадений методом оптической микроинтерферометрии. Результаты измерений сведены в таблицу 3.4.4.

Таблица 3.4.4. Результаты измерения толщины бериллийсодержащих пленок после экспозиции в плазме чистящего разряда

Исходный образец, толщина осадения, нм	Толщина пленки спустя 3 часа в He плазме, нм	Толщина пленки спустя 2 часа в D <sub>2</sub> плазме, нм
220	130	120

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что скорость удаления бериллийсодержащих пленок, полученных на установке КСПУ-Ве, составляет  $\sim 0,5$  нм/мин в плазме гелиевого разряда, и  $\sim 0,8$  нм/мин в плазме дейтериевого разряда. Более высокая скорость распыления пленок в плазме  $D_2$  может быть связана с тем, что наряду с физическим распылением подключался механизм химического травления.

### **Выводы к главе 3:**

На основе данных о плотности потока и функции распределения ионов по энергиям в слое нагруженного электрода была проведена оценка скорости распыления бериллия и вольфрама – основных материалов загрязняющих осадений, которые, как ожидается, будут состоять из перенапыленных материалов первой стенки ИТЭР. На основании оценки селективности травления установлено, что ВЧЕ разряд в гелии на частоте  $\sim 81$  МГц является оптимальным для удаления бериллия с поверхности молибденовых зеркал. Для удаления вольфрамовых осадений предпочтительно использование разряда в неоне на частотах 40–60 МГц.

Экспериментально измерена неоднородность скорости распыления металлических осадений с поверхности зеркала. Полученная неоднородность распыления хорошо согласуется с результатом численного моделирования неоднородности потока ионов на поверхность нагруженного электрода. Экспериментально показано, что включение аксиального магнитного поля, обеспечивающего симметризацию разряда, приводит к подавлению краевой неоднородности скорости распыления.

Проведены модельные эксперименты по удалению пленок  $Al/Al_2O_3$ , моделирующих бериллиевые осадения, с поверхности поликристаллического Мо зеркала. Обнаруженное ослабление коэффициента отражения поликристаллических зеркал связано с механизмом селективного травления различно ориентированных кристаллитов для разряда в неоне и с процессом блистерообразования для разряда в дейтерии.

Осуществлена апробация ВЧ чистки бериллиевых осадений, полученных на установке КСПУ-Ве. Проведена отработка режима напыления бериллийсодержащих осадений путем облучения бериллиевой мишени направленным потоком гелиевой плазмы. Приведены результаты исследований морфологии и состава полученных осадений. Подобранный режим очистки обеспечил скорости распыления бериллиевых осадений ~ 0,5 нм/мин в гелиевом разряде, и ~0,8 нм/мин в плазме дейтериевого разряда.

*Таким образом, в данной главе предложена методика учета влияния формы функции распределения ионов по энергиям на скорость физического распыления металлических осадений, разработаны и обоснованы основные принципы выбора параметров ВЧ разряда для различных сценариев работы оптических элементов, приведены механизмы деградации поликристаллического зеркала в плазме чистящего разряда в зависимости от типа рабочего газа, приведены результаты апробации ВЧ чистки макета зеркала от бериллийсодержащих осадений.*

## **Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МАКЕТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЧИСТКИ, СОВМЕЩЕННОЙ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ УЗЛА ПЕРВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА**

### **4.1 Конструкция макета узла первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности**

Геометрия чистящего разряда диагностических зеркал токамака ИТЭР, расположенных в прямой видимости термоядерной плазмы, в значительной мере отличается от осесимметричной геометрии, описанной в предыдущих главах [18, 20]. Необходимость интеграции конструкции зеркала со схемой подведения ВЧ мощности и системы водяного охлаждения в значительной степени влияют на конструкцию узла первого зеркала [47]. В связи с этим экспериментальная проверка применимости инженерных концепций реализации узла первого зеркала является актуальной задачей. Для испытания системы очистки охлаждаемого зеркала сложной геометрии был разработан лабораторный макет узла прямоугольного первого зеркала активной спектроскопической диагностики edge-CXRS краевой плазмы токамака ИТЭР.

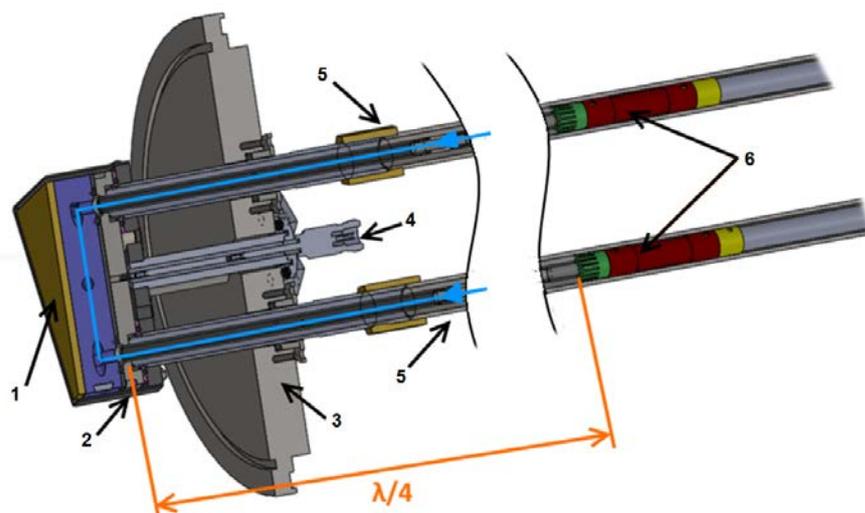


Рисунок 4.1.1. Трехмерная модель лабораторного макета узла прямоугольного первого зеркала с совмещенными системами подачи ВЧ мощности и водяного охлаждения. Функциональная схема макета приведена на рисунке 2.5.1.

Трехмерная модель макета первого зеркала приведена на рисунке 4.1.1. Прямоугольное зеркало (1) размером 100×50 мм изолированное керамическими шайбами от заземленного экрана (2), отстоящим от зеркала на 1 мм, было смонтировано на фланце ISO-F 200 (3), который в дальнейшем подключался к экспериментальному стенду № 2. ВЧ мощность подавалась на зеркало с помощью внутривакуумного 50-Ω коаксиального волновода, соединенного с электрическим вакуумным вводом с разъемом типа-N (4). Система водяного охлаждения состояла из двух линий (5), представлявших собой короткозамкнутые коаксиальные волноводы, трубки которых были изолированы с помощью фторопластовых колец. Входной и выходной потоки воды проходили по внутренним трубкам коаксиальной линии, которые были приварены к зеркалу в местах выхода его внутренних водяных каналов. Заземление трубок осуществлялось с помощью бронзовых цанг, соединенных с подвижными плунжерами (6), обеспечивающими возможность подстройки длины короткозамкнутых линий. Циркуляцию охлаждающей жидкости по системе охлаждения обеспечивал водяной чиллер LabTech H150-1500. Для защиты от прорыва воды и атмосферы в вакуумную камеру использовались два вакуумных витоновых уплотнения. Для проведения сравнительных испытаний была также разработана оснастка, позволяющая проводить эксперименты в схеме с неохлаждаемым изолированным ВЧ электродом.

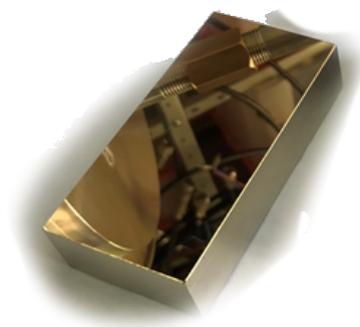


Рисунок 4.1.2. Зеркало из нержавеющей стали размером 50×100 мм с покрытием из золота толщиной 40 нм

В разработанной геометрии были проведены эксперименты по измерению параметров ВЧ разряда в условиях наличия и отсутствия системы водяного охлаждения. В качестве нагруженного электрода для этих целей использовался шлифованный электрод из нержавеющей стали размером 100×50 мм. В экспериментах по исследованию неоднородности ионного потока на электрод, а также в демонстрационных экспериментах по очистке от алюминий-содержащих осадений, использовались зеркала из полированной нержавеющей стали (см. рисунок 4.1.2).

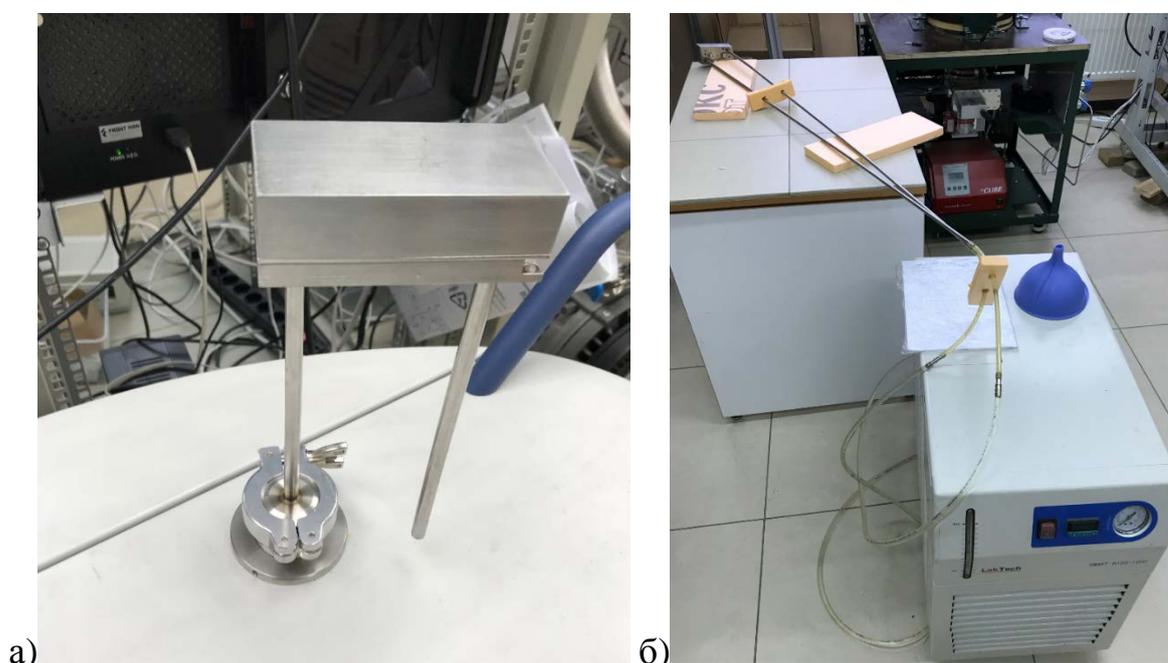


Рисунок 4.1.3. Функциональные тесты макета узла первого зеркала. а) – проверка герметичности уплотнения вода/вакуум на гелиевом течеискателе. б) – проверка герметичности уплотнений во время циркуляции охлаждающей жидкости

Перед сборкой и установкой в вакуум элементы макета были подвергнуты двум функциональным тестам. Первый тест заключался в проверке герметичности интерфейса вода-вакуум при помощи гелиевого течеискателя Inficon UL1000 путем откачки водяного тракта, как показано на рисунке 4.1.3а. Измеренное натекание гелия составило менее  $10^{-11}$  Торр л/с. Такое натекание влияет на величину остаточного давления при учете производительности вакуумной откачной системы экспериментального

стенда. Второй тест заключался в проверке герметичности водяного тракта во время циркуляции воды при давлении 2 избыточных атмосферы (см. рисунок 4.1.3б). По итогам успешно пройденных функциональных тестов макет узла первого зеркала был собран (рисунок 4.1.4а) и установлен в экспериментальный стенд № 2 для проведения экспериментов (рисунок 4.1.4б).

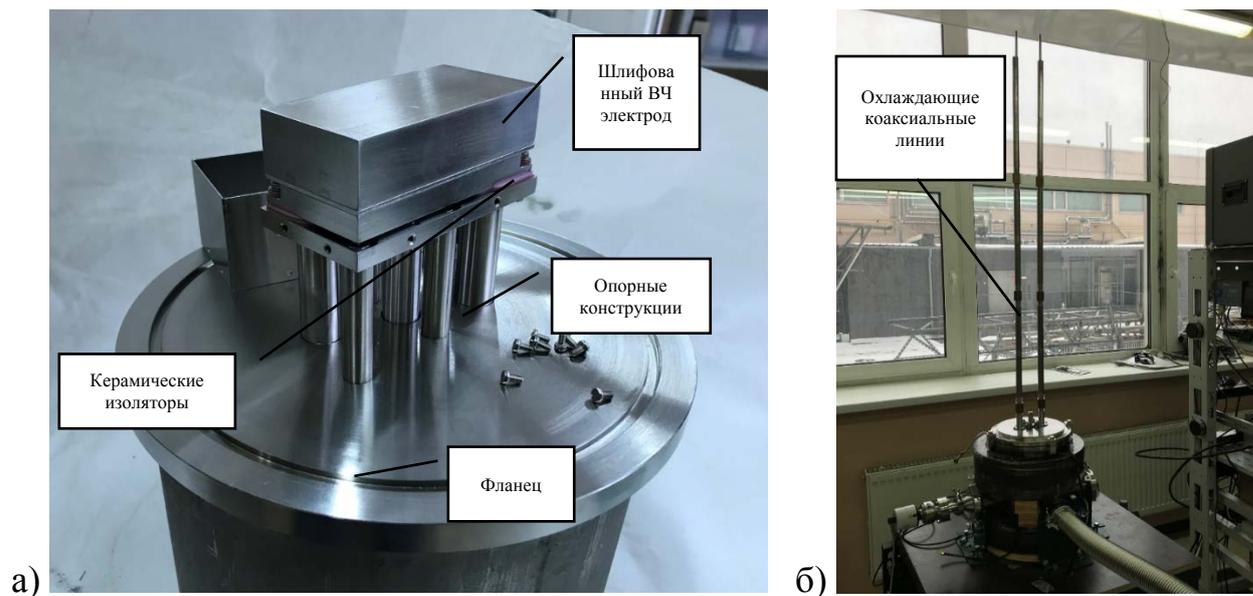


Рисунок 4.1.4. а) – макет узла первого зеркала после сборки. Заземленный экран снят для наглядности. б) – общий вид экспериментально стенда № 2

После сборки макета была проведена настройка четвертьволнового фильтра на частоту 81 МГц путем изменения точки заземления коаксиальных волноводов, играющих роль трубок системы охлаждения. Входной импеданс фильтра контролировался при помощи векторного анализатора цепей Планар TR5048. Известно, что на выделенной частоте при определенной длине четвертьволновой короткозамкнутой линии ее импеданс стремится к бесконечности, а подключение такого отрезка линии в электрическую цепь практически не приводит к изменению S-параметров системы. Для случая коаксиальной линии без потерь на частоте 81,36 МГц резонансная длина, равная четверти волны, составляет приблизительно 92 см. Исходя из данных, приведенных на рисунке 4.1.5а, резонанс в короткозамкнутых коаксиальных

охлаждающих линиях достигался при длине линии  $\sim 87$  см. Отличие данного значения от теоретического связано в первую очередь с наличием активных потерь ВЧ мощности в волноводе [48]. Согласно данным, приведенным на рисунке 4.1.6б, на резонансной длине в каждой из трубок системы охлаждения теряется около 11% амплитуды ВЧ мощности. Столь высокие потери вызваны применением неполированной нержавеющей стали в качестве материала волновода. Применение в качестве материала трубок охлаждения материала с высокой проводимостью и низкой шероховатостью (полированная медь, серебро и т.д.) позволит значительно уменьшить активные потери.

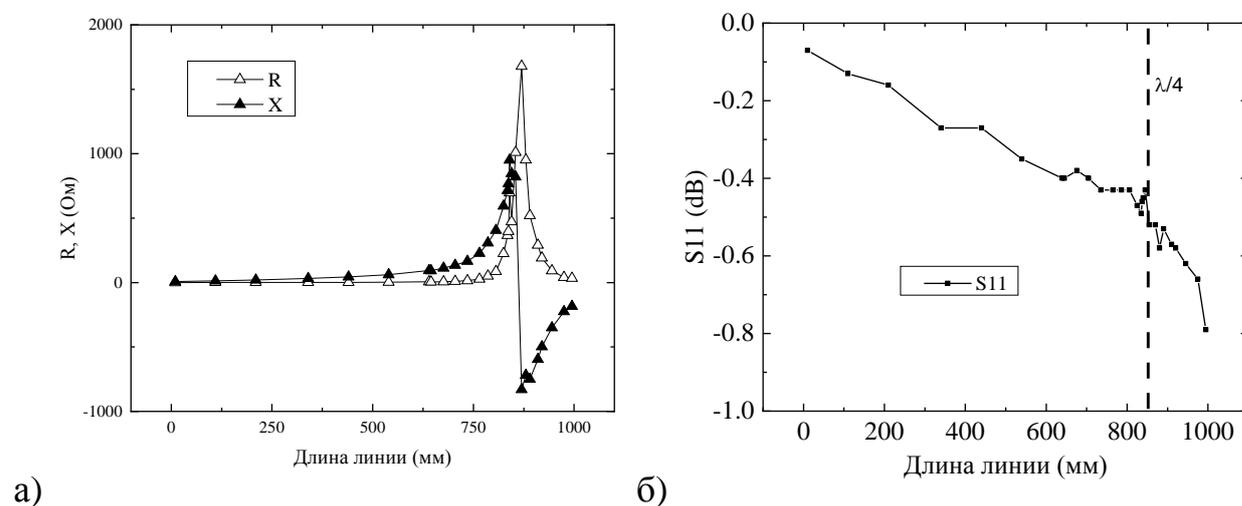


Рисунок 4.1.5. Измерение параметров коаксиальных трубок системы охлаждения. а – реальная и мнимая части импеданса трубки в зависимости от ее длины; б – зависимость величины активных потерь от длины трубки

Измерение эффективности системы водяного охлаждения было проведено путем наблюдения за эволюцией температуры поверхности зеркала при помощи инфракрасной камеры Testo 885-2 IR, фиксирующей тепловое излучение через вакуумное окно, изготовленное из материала  $\text{BaF}_2$ . Измерения проводились в присутствии ВЧ разряда в атмосфере неона при давлении 2 Па. Поглощенная в разряде мощность на частоте 81 МГц составляла 200 Вт. Как видно из рисунка 4.1.6, за 10 минут горения плазмы

температура поверхности зеркала стабилизировалась на значении 31 °С для случая циркуляции охлаждающей жидкости и 40 °С при выключенном протоке воды. В обоих случаях был обнаружен незначительный градиент температуры, составлявший не более 2 °С. Стоит отметить, что наличие системы охлаждения значительно снижает тепловую нагрузку на керамические проставки, электрически изолирующих нагруженный электрод от заземленных опорных конструкций зеркала. Таким образом, можно сделать вывод, что спроектированная система охлаждения позволяет обеспечить зажигание разряда и эффективное охлаждение в процессе экспозиции зеркала в ВЧ плазме.

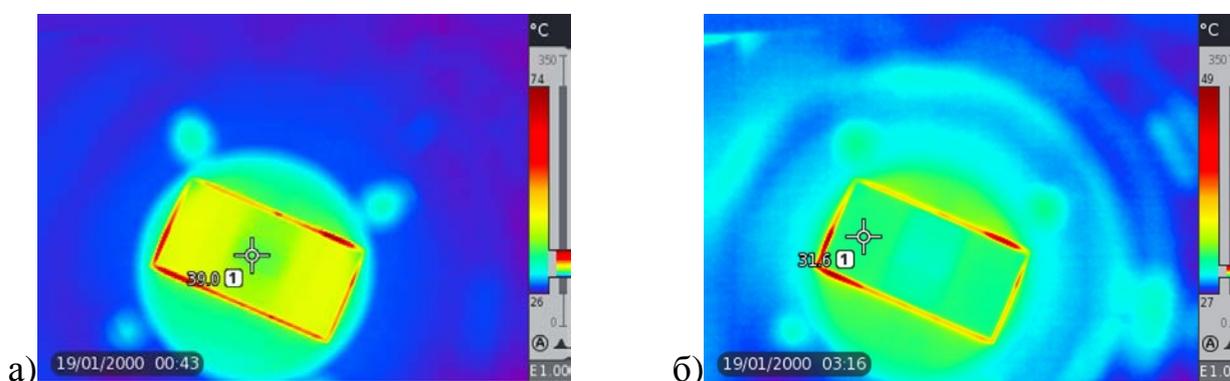


Рисунок 4.1.6. Поле температур после 10 минут горения 81 МГц ВЧ разряда при 200 Вт подаваемой мощности ( $4 \text{ Вт/см}^2$ ) в геометрии узла первого зеркала в неоне при давлении 2 Па для двух случаев: а – без протока охлаждающей жидкости; б – с протоком охлаждающей жидкости

#### 4.2 Измерение параметров ВЧ разряда в макете узла первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности

После сборки и проведения функциональных тестов макета узла первого зеркала были выполнены эксперименты по измерению параметров ВЧ разряда. Измерение параметров ионного потока на ВЧ электрод в данных условиях было невозможно по причине сложной конструкции охлаждаемого зеркала. В связи с этим измерения энергии частиц были проведены в приэлектродном слое заземленного электрода при помощи анализатора задерживающего поля, описанного в главе 2. В случае схемы с заземленным

ВЧ электродом такой подход справедлив по причине равенства падений напряжений в слоях обоих электродов. Измерения проводились для двух электрических схем: с заземленным и с изолированным зеркалом, играющим роль ВЧ электрода. В случае изолированного зеркала помимо энергии ионов, бомбардирующих заземленный электрод, измерялся также потенциал автосмещения, после чего его значение прибавлялось к максимуму ФРИЭ в слое заземленного электрода. Результаты измерений приведены на рисунке 4.2.1.

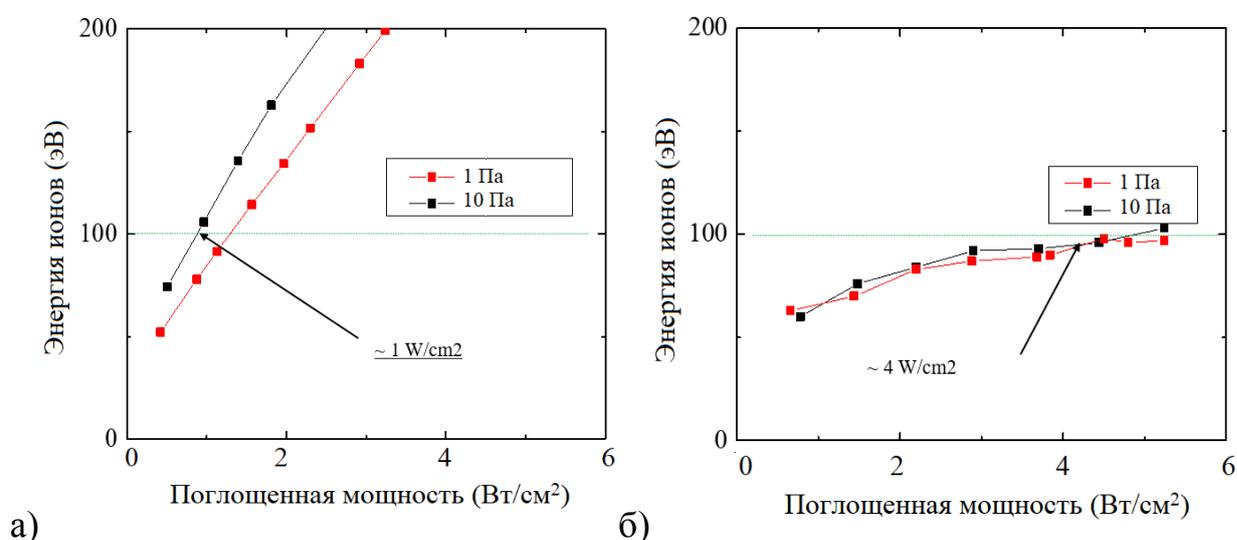


Рисунок 4.2.1. Зависимости максимальной энергии ионов, бомбардирующих поверхность макета узла первого зеркала (81МГц, Ne, 2 Па) от поглощенной в разряде мощности для двух электрических схем: а) – зеркало является изолированным ВЧ электродом; б) – зеркало является заземленным ВЧ электродом

Результаты экспериментов в геометрии макета охлаждаемого зеркала качественно совпадают с результатами, полученными на неохлаждаемом круглом электроде, которые приведены в главе 2. В частности, в схеме с изолированным неохлаждаемым электродом для достижения сопоставимой энергии ионов необходимо приложить значительно более высокую ВЧ мощность. Так для достижения энергии 100 эВ в схеме с изолированным электродом требуется плотность мощности  $1 \text{ Вт/см}^2$ , в то время как в случае заземленного зеркала –  $4 \text{ Вт/см}^2$ . Однако для достижения энергии,

обеспечивающей высокую скорость распыления бериллия (50 – 60 эВ), для схемы с заземленным электродом требуется сравнительно небольшая мощность  $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$ , что позволяет говорить о перспективе применения такой схемы в ИТЭР.

Измерение неоднородности очистки, как и измерения параметров разряда проводились для двух схем включения зеркала в электрическую цепь. Значение ВЧ мощности выбиралось таким образом, чтобы обеспечить в обоих случаях одинаковую энергию ионов, равную 100 эВ. Измерения проводились путем распыления тонкой пленки золота, осажденной на поверхность ВЧ электрода методом магнетронного напыления, аналогично экспериментам, описанным в главе 3. Толщина пленки измерялась до и после экспозиции электрода в плазме чистящего разряда, после чего по разности между измерениями определялась скорость распыления и профиль скорости по всей площади электрода.

В случае изолированного неохлаждаемого зеркала результат качественно совпал с описанными в главе 3 данными, полученными на круглом зеркале. Как видно из рисунка 4.2.2а в схеме с изолированным электродом наблюдался плоский профиль распыления с ярко выраженной краевой неоднородностью, в то время как в центре зеркала скорость распыления меняется крайне незначительно. В случае охлаждаемого зеркала, заземленного через четвертьволновой фильтр, был обнаружен седловидный профиль распыления. Помимо слабовыраженной краевой неоднородности в центре зеркала присутствуют два локальных минимума скорости распыления (рисунок 4.2.2б).

Полученный результат неоднородности распыления качественно совпадает с профилем плотности плазмы ВЧЕ разряда, полученным в результате расчета по методу частиц в ячейках, выполненному в трехмерном коде Фраунгоферовского института, описание которого приведено в [69, 70]. Отличительной особенностью кода является независимость учета движения и столкновений крупных частиц в рамках дискретных шагов по времени.

Крупные частицы представляют собой набор усредненных согласно весовым коэффициентам частиц. В коде производятся расчеты движения как заряженных, так и нейтральных частиц, при этом имеется возможность самосогласованного расчета столба и слоев ВЧ разряда [71].

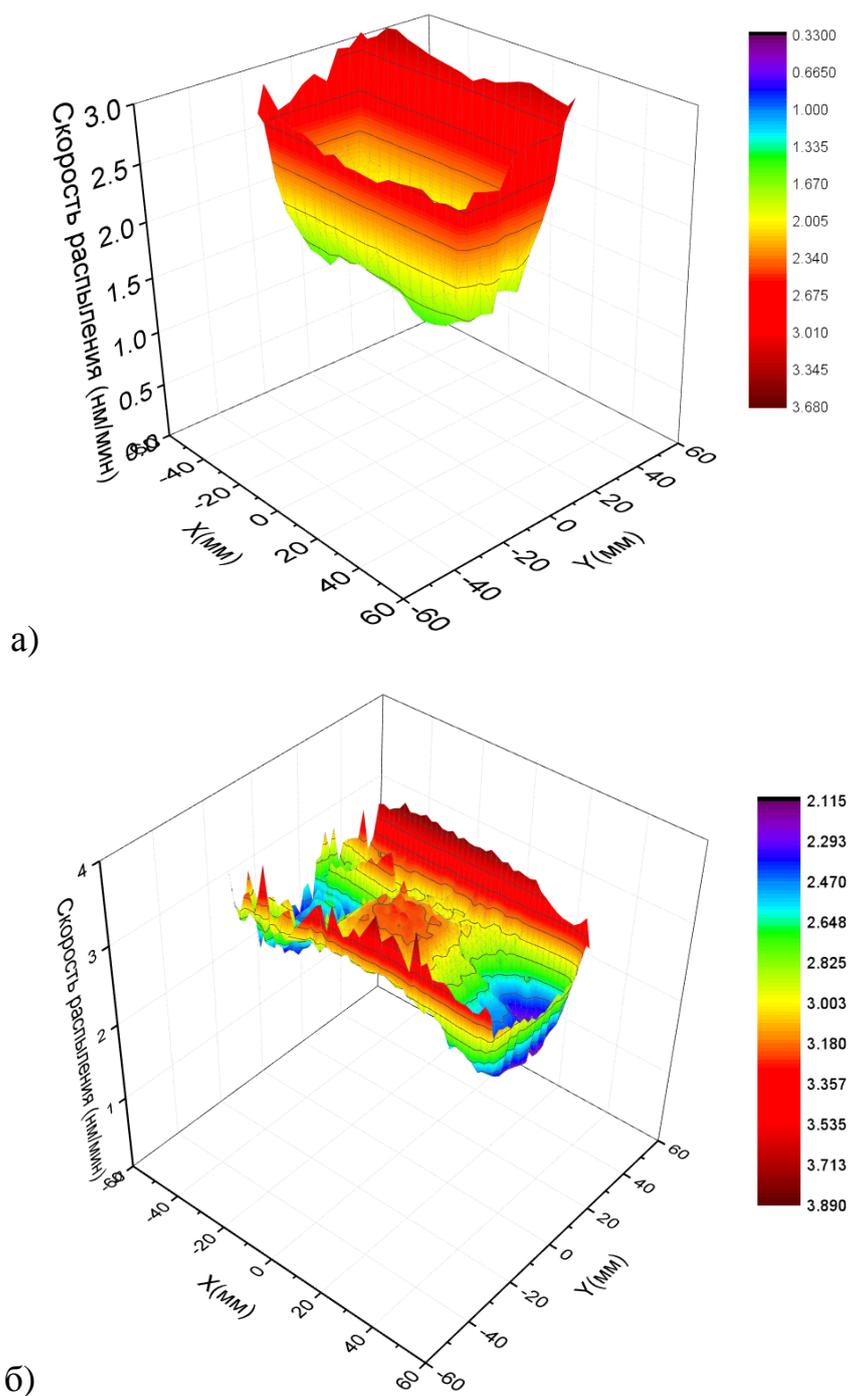


Рисунок 4.2.2. Профили скорости распыления [нм/мин] тонкой пленки золота с поверхности прямоугольного зеркала ионами Ne с энергией 100 эВ при

давлении 1 Па для случаев: а) – зеркало является изолированным ВЧ электродом; б) – зеркало является ВЧ электродом через четвертьволновой фильтр

Известно, что величина плотности ионного потока на электрод пропорциональна плотности плазмы в слое перед электродом и может быть вычислена по формуле [41]:

$$j = n_e \sqrt{\frac{T_e}{m_i}},$$

где  $j$  – плотность ионного потока,  $n_e$  – плотность плазмы, а  $\sqrt{\frac{T_e}{m_i}}$  – боровская скорость. Соответственно, профиль плотности ионного тока на поверхности электрода будет качественно повторять профиль плотности плазмы в слое перед электродом.

Согласно данным расчета, в схеме с изолированным ВЧ электродом наблюдается плоский профиль плотности плазмы в центре газоразрядного промежутка, при этом на периферии разряда рядом со стенками разрядной камеры имеется область повышенной плотности плазмы (рисунок 4.2.3а). Такое распределение плотности приводит к увеличению количества частиц, собираемых краями ВЧ электрода и, следовательно, увеличению скорости распыления на краях по сравнению с центром электрода. В схеме с ВЧ электродом, заземленным через четвертьволновой фильтр, область повышенной плотности плазмы образуется в центре газоразрядного промежутка (рисунок 4.2.3б), что приводит к появлению области повышенной скорости распыления в центре ВЧ электрода. При этом в радиальном направлении плотность плазмы уменьшается от центра к краю, до определенного момента, после чего наблюдается небольшое увеличение плотности рядом со стенками разрядной камеры. Данное поведение плотности плазмы приводит к уменьшению скорости распыления и появлению седловидного профиля травления. Эффект увеличения скорости

распыления на краях зеркала в обеих электрических схем связан с эффектами неоднородности разряда.

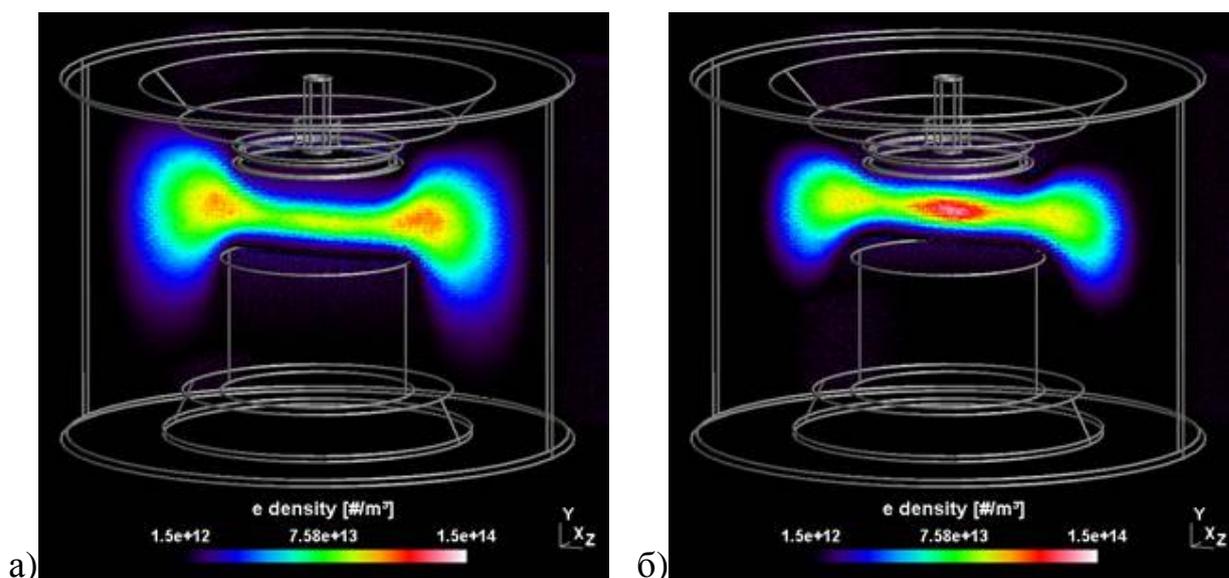


Рисунок 4.2.3. Результаты расчета плотности плазмы ВЧ разряда в трехмерном PIC-МС коде: а) для схемы с изолированным ВЧ электродом; б) для схемы с заземленным ВЧ электродом. Параметры расчета – атмосфера гелия при давлении 1 Па, мощности ВЧ 1 Вт на частоте 13,56 МГц

#### 4.3 Демонстрационные эксперименты по ВЧ чистке макета узла охлаждаемого зеркала

Демонстрационный эксперимент по плазменной очистке зеркала в схеме с активной системой охлаждения состоял из следующих этапов. На первом этапе на поверхности зеркала методом магнетронного распыления была осаждена пленка  $Al/Al_2O_3$  толщиной  $\sim 30$  нм. Затем зеркало было подвержено экспозиции в разряде в атмосфере Ne при давлении 1 Па. Величина подаваемой ВЧ мощности на частоте 81 МГц составляла 116 Вт, что обеспечивало максимальную энергию ионов равную  $\sim 100$  эВ. Относительно низкая энергия частиц была выбрана для обеспечения возможности очистки зеркала с минимальным воздействием на морфологию его поверхности.

Фотография зеркала по истечении 4 часов экспозиции в чистящем разряде приведена на рисунке 4.3.2. Как видно из рисунка, скорость

распыления алюминиевой пленки в краевой области оказалась значительно выше, чем в центре зеркала. Отличие от результатов, приведенных в предыдущем разделе, связано с особенностью транспорта распыленных атомов в разрядной камере, которые описаны ниже. Типичное угловое распределение распыленных атомов приведено на рисунке 4.3.1.

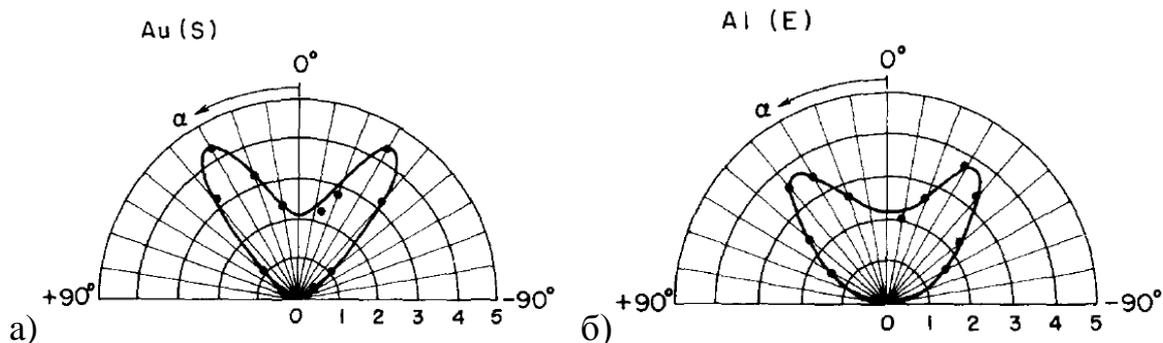


Рисунок 4.3.1. Угловое распределение атомов золота (а) и алюминия (б), распыленных под действием ионов аргона с энергией 500 эВ [72]

После распыления с поверхности ВЧ электрода атомы начинают двигаться от места распыления, сталкиваясь с атомами остаточного газа, пока не осядут на не участвующих в горении разряда стенках вакуумной камеры. В некоторых случаях осевший атом может быть вновь распылен потоком ионов из плазмы, после чего в результате столкновений с нейтральными атомами или в результате диффузии после термолиза он может вернуться на поверхность ВЧ электрода. Данный процесс носит название перенапыления и может значительно влиять на процессы плазменного травления различных материалов [73]. В случае распыления золота с поверхности электрода атомами Ne эффект перенапыления сказывается незначительно. Это связано с тем, что для потери импульса атому золота необходимо большое количество соударений, поскольку масса атома золота значительно выше массы атома Ne. С учетом приведенного выше углового распределения распыленные атомы золота с большой вероятностью покидают газоразрядный промежуток и оседают на поверхностях, не контактирующих с плазмой чистящего разряда. Масса атома алюминия сравнима с массой атомов Ne, что приводит к быстрой потере импульса за

счет столкновений с атомами остаточного газа. После нескольких столкновений термализованные атомы начинают диффундировать в объеме вакуумной камеры, оседая как на поверхности нагруженного электрода, так и на поверхности заземлённых стенок камеры. Учитывая равенство энергий атомов, бомбардирующих поверхности обоих электрода, осевшие на заземленный электрод атомы также распыляются и частично возвращаются на поверхность ВЧ электрода. Таким образом, атомам алюминия требуется несколько циклов перенапыления для того, чтобы покинуть поверхности, участвующие в горении ВЧ разряда. По причине малого расстояния между электродами вероятность покинуть газоразрядный промежуток выше у атомов, распыленных с края зеркала, что приводит к образованию профиля распыления, показанного на рисунке 4.3.2. Схожий эффект ожидается во время процесса распыления бериллийсодержащих осадений с поверхности зеркал в плазме гелия или дейтерия, что может в значительной мере сказаться на требованиях к геометрии и конструкции узла первых зеркал ИТЭР.



Рисунок 4.3.2. Неоднородность распыления пленки  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  с поверхности охлаждаемого зеркала после 4 часов экспозиции в плазме чистящего разряда в Ne

После 14 часов экспозиции в плазме Ne с энергией ионов 100 эВ пленка алюминия была полностью удалена с поверхности зеркала. Длительность необходимой для удаления пленки алюминия экспозиции, объясняется наличием трудно распыляемой пленки оксида алюминия, коэффициент

распыления которого при низких энергиях на несколько порядков ниже коэффициента распыления алюминия. Коэффициент отражения зеркала был полностью восстановлен, как видно из рисунка 4.3.2, что говорит о незначительном воздействии ионного потока на морфологию использованного в эксперименте зеркала.

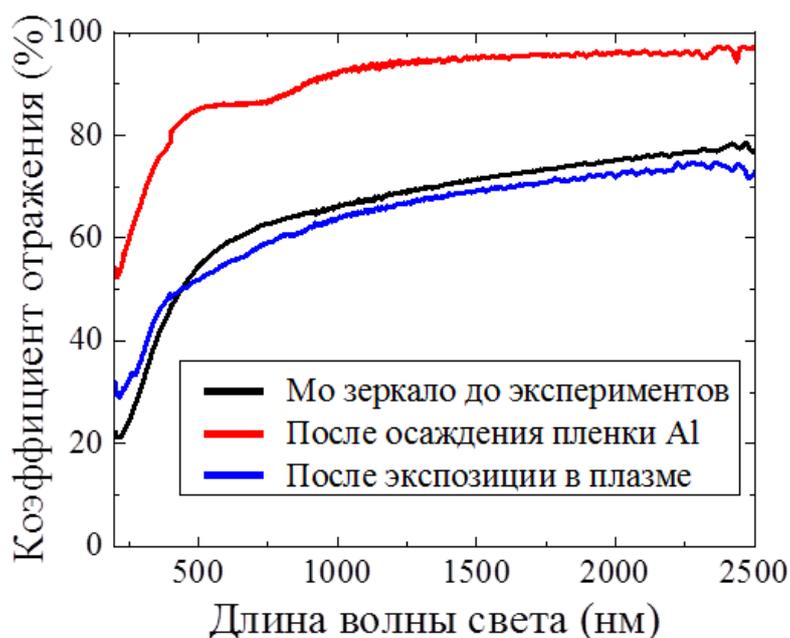


Рисунок 4.3.2. Эволюция коэффициента отражения охлаждаемого зеркала, изготовленного из нержавеющей стали. Черная линия – исходный коэффициент отражения, красная линия – коэффициент отражения зеркала после осаждения пленки Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Синяя линия – коэффициент отражения зеркала после 14-часовой экспозиции в чистящем разряде в Ne.

#### **Выводы к главе 4:**

Проведена разработка лабораторного образца узла первого зеркала, оборудованного системой ВЧ чистки, совмещенной с системой активного водяного охлаждения. Проведены эксперименты по исследованию параметров чистящего ВЧ разряда в условиях разработанной геометрии.

Экспериментально показано, что для достижения энергии 100 эВ в схеме с заземленным электродом необходима в 4 раза большая ВЧ мощность, чем в схеме с изолированным электродом. Для достижения энергии,

необходимой для распыления бериллиевых пленок, необходимая плотность ВЧ мощности составит  $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$ .

В демонстрационных экспериментах по распылению пленки золота с поверхности охлаждаемого зеркала в схеме с заземленным электродом обнаружен седловидный профиль распыления, качественно совпадающий с профилем плотности плазмы, полученном в численном эксперименте, проведенном с использованием 3D Монте-Карло кода Fraunhofer. В результате 14-часовой экспозиции в плазме чистящего разряда пленка Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> была удалена с поверхности охлаждаемого зеркала, выполненного из нержавеющей стали, в результате чего спектральный коэффициент отражения зеркала был полностью восстановлен.

*Таким образом, в данной главе описаны результаты первой реализации чистки узла макета первого диагностического зеркала токамака ИТЭР с активной системой охлаждения, выполненной по схеме короткозамкнутого четвертьволнового фильтра.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной к защите работе изложены материалы по исследованию ионных потоков высокочастотного емкостного разряда, как основного инструмента системы защиты и восстановления первых оптических зеркал диагностических комплексов токамака ИТЭР, в том числе:

- Проведен анализ факторов, воздействующих на внутривакуумную диагностическую оптику (тепловые потоки, скорости осаждения пленок, и т.д.) в существующих токамаках и ожидаемых в ИТЭР. Приведено обоснование использования ВЧ емкостного разряда, как основного инструмента системы очистки первых зеркал от переосажденных продуктов эрозии первой стенки токамака.
- Выполнено экспериментальное исследование зависимости энергии и плотности тока ионов на электродах ВЧЕ разряда для ряда управляющих разрядом параметров, таких как атомный номер инертного газа, частота поля, поглощенная ВЧ мощность и величина магнитного поля для схем с изолированным и заземленным ВЧ-электродом.
- Экспериментально продемонстрировано, что симметризация ВЧЕ разряда, связанная с замагниченностью ионной и электронной компонент плазмы, при магнитном поле более 0,3 Тл для неоновой плазмы. В экспериментах по исследованию параметров ионного потока обнаружено, выравнивание параметров ионных потоков достигается в симметризованных разрядах с изолированным и заземлённым ВЧ-электродом.
- Предложена методика учета формы функции распределения ионов по энергиям при оценке эффективности травления пленочных осадений в плазме ВЧЕ разряда с использованием литературных данных о коэффициентах распыления и экспериментальных данных о параметрах ионного потока позволяет оптимизировать диапазон параметров ВЧЕ разряда. На основании предложенной методики обнаружено, что ВЧЕ

разряд в Ne на частоте 81,36 МГц является оптимальным для удаления Be пленок с поверхности Mo. Для удаления W осадений с поверхности Mo предпочтительно использование разряда в Ne на частотах 40–60 МГц.

- В экспериментах по экспозиции поликристаллических Mo зеркал в D<sub>2</sub> и в Ne плазме ВЧЕ разряда обнаружено различие механизмов модификации морфологии поверхности. Так, воздействие плазмы Ne на поверхность поликристаллического зеркала приводит к селективному травлению различно ориентированных кристаллитов, воздействие плазмы D<sub>2</sub> приводит к блистеробразованию на поверхности зеркала.
- Измерение пространственной неоднородности распыления путем травления тонкой пленки золота показало, что разный характер неоднородности для случаев изолированного и заземленного ВЧ-электрода, связан с характером распределения плотности плазмы в объеме газоразрядного промежутка. Симметризация плазмы в магнитном поле при прочих равных приводит к уменьшению краевой неоднородности и подавлению скорости распыления.
- Проведенные эксперименты по травлению тонкопленочных осадений Be и Al (модель Be) с поверхности макетов зеркал продемонстрировали эффективность использования ВЧЕ разряда в системе очистки зеркал токамака ИТЭР.
- Экспериментально продемонстрировано удаление модельных тонкопленочных осадений на макете узла первого диагностического зеркала, играющего роль заземленного по постоянному току ВЧ-электрода, оборудованного системой водяного охлаждения. Экспериментально установлено, что для случая заземленного охлаждаемого зеркала для достижения энергии, необходимой для распыления бериллиевых пленок, необходимая плотность ВЧ мощности для такой схемы составляет  $\sim 1$  Вт/см<sup>2</sup>.

## **БИБЛИОГРАФИЯ**

- [1] Integration of diagnostics on ITER in Fusion Engineering / M. Walsh, P. Andrew, R. Barnsley, L. Bertalot, R. Bouhamou, L. Caplat, N. Casal, G. Counsell, M. Dapena, M. De Bock // *26th Symposium on. IEEE* – 2015 – 26 – Pp. 1–8.
- [2] First neutronics analysis for ITER bio-shield equatorial port plug / T. Dang, D. Ying, Q. Yanga, M. Loughlinc, A. Davis // *Fus. Eng. Des.* – 2012 – Vol. 87 – Pp. 1447–1459.
- [3] Plasma diagnostics for INTER-FEAT / K. Ebisawa, A. Costley, A. Donne, G. Janeschitz, S. Kasai, A. Malaquias, G. Vayakis, C. Walker, S. Yamamoto, and V. Zaveriaev // *Rev. Sci. Instrum.* – 2001 – Vol. 72 No.1 – Pp. 545–550.
- [4] *T. Sugie*. Update of First Mirror Table // 12th Meeting of the ITPA Topical Group Diagnostic, Princeton, USA – 26-30 March 2007.
- [5] Physico-chemical characteristics of carbon deposits collected in TEXTOR and Tore Supra tokamaks / M. Richou, C. Martin, P. Delhaes, M. Couzi, W. Saikaly, C. Brosset, B. Pegourie, A. Litnovsky, V. Philipps, P. Wienhold et al. // *Carbon* – 2007 – Vol. 45, No. 14 – Pp. 2723–2731.
- [6] First studies of ITER-diagnostic mirrors in a tokamak with an all-metal interior: results of the first mirror test in ASDEX Upgrade / A. Litnovsky, M. Matveeva, A. Herrmann, V. Rohde, M. Mayer, K. Sugiyama, K. Krieger, V. Voitsenya, G. Vayakis, A. Costley et al. // *Nucl. Fus.* – 2013 – Vol. 53, No. 7 – Pp. 073033.
- [7] First mirror test in JET for ITER: Complete overview after three ILW campaigns / Sunwoo Moon, P. Petersson, M. Rubel, E. Fortuna-Zalesna, A. Widdowson, S. Jachmich, A. Litnovsky, E. Alves and JET Contributors // *Nucl. Mater. Energy* – 2019 – Vol. 19 – Pp. 59–66.
- [8] Beryllium deposition on International Thermonuclear Experimental Reactor first mirrors: Layer morphology and influence on mirror reflectivity / G. De Temmerman, M. Baldwin, R. Doerner, D. Nishijima, R. Seraydarian, K. Schmid, F. Kost, C. Linsmeier and L. Marot // *J. Appl. Phys.* – 2007 – Vol. 102, No. 8 – p. 083302.

- [9] Методы анализа элементного состава поверхностных слоев : пособие для студентов спец. 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)» и 1-31 04 02 «Радиофизика» / В. В. Углов, Н. Н. Черенда, В. М. Анищик. – Минск: БГУ, 2007. – 167 с.
- [10] An overview of the comprehensive First Mirror Test in JET with ITER-like wall / D. Ivanova, M. Rubel, A. Widdowson, P. Petersson, J. Likonen, L. Marot, E. Alves, A. Garcia-Carrasco, G. Pintsuk and JET-EFDA Contributors // *Phys. Scr.* – 2014 – T159 – 014011 (10pp).
- [11] P. Shigin. RF discharge mirror cleaning system development for ITER diagnostics // 14<sup>th</sup> International Symposium on Fusion Nuclear Technology – Budapest, Hungary – 22<sup>nd</sup> – 27<sup>th</sup> September 2019.
- [12] Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor / E.E. Mukhin, G.S. Kurskiev, A.V. Gorbunov et al // *Nucl. Fusion.* – 2019 – Vol. 59. No 8 – Pp.086052.
- [13] First direct comparative test of single crystal rhodium and molybdenum mirrors for ITER diagnostics / A. Litnovsky, Yu. Krasikov, M. Rasinski et al. // *Fusion Eng. Des.* – 2017 – Vol. 123 – Pp. 674–677.
- [14] V.S. Voitsenya. Experimental simulation of the behavior of diagnostic first mirrors fabricated of different metals for ITER conditions / V.S. Voitsenya, A.F. Bardamid and A.J.H. Donné // *Open Physics Journal* – 2016 – vol. 3 – Pp. 23–54.
- [15] Diagnostic first mirrors for burning plasma experiments / V. Voitsenya, A. Costley, V. Bandourko, A. Bardamid, V. Bondarenko, Y. Hirooka, S. Kasai, N. Klassen, V. Konovalov, M. Nagatsu et al., // *Rev. sci. inst.* – 2001 – Vol. 72, No. 1 – Pp. 475–482.
- [16] Rhodium coated mirrors deposited by magnetron sputtering for fusion applications / L. Marot, G. De Temmerman, P. Oelhafen, G. Covarel, A. Litnovsky // *Rev. Sci. Instrum.* – 2007 – Vol. 78 – 103507 7 pp.
- [17] Deposition and Characterization of a Rhodium Thin Films with a Niobium Interlayer on a Molybdenum Mirror for ITER First-Mirror Application / S. Rai, U.

- Shaislamov, J. K. Yang, S. Saud, W.A. Muhammed & H.J. Lee // *Journal of the Korean Physical Society* – 2019 – Vol.75 No. 8 – Pp. 644–651.
- [18] Achievements on engineering and manufacturing of ITER first mirrors mock-ups / M. Joanny, J. Travere, S. Salasca, L. Marot, E. Meyer, C. Thellier, C. Cammarata, G. Gallay, and J. Ferme, // *Fusion Engineering (SOFE) IEEE/NPSS 24th Symposium on. IEEE* – 2011 – Pp. 1–6.
- [19] First mirrors in ITER: material choice and deposition prevention/cleaning techniques / E.E. Mukhin, V.V. Semenov, A.G. Razdobarin et al. // *Nucl. Fusion* – Vol. 52 – p. 013017.
- [20] Investigation of first mirror heating for the collective Thomson scattering diagnostic in ITER / M. Salewski, F. Meo, H. Bindslev et al., // *Rev. Sci. Instrum.* – 2008 – Vol. 79 – p.10E729.
- [21] С.Н. Тугаринов. Прогресс в создании диагностической системы активная спектроскопия ИТЭР // XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС – Звенигород – 18-22 марта 2019 г.
- [22] J.M. Travere. The ITER VIS/IR Wide Angle Viewing System: challenges and on-going // *R&D Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications* – Ghent, Belgium – 2011.
- [23] A.T. Krawczynska. Impact of material migration and radiation damage on the reflectivity of molybdenum mirrors: laboratory test for DEMO / A.T. Krawczynska, Łukasz Ciupiński and Per Petersson // *Phys. Scr.* – 2020 – Vol. 014019.
- [24] Impact of helium implantation and ion-induced damage on reflectivity of molybdenum mirrors / A. Garcia-Carrasco, P. Petersson, A. Hallén et al.// *Nuclear Instruments and Methods B* – 2016 – Vol. 382 – p. 91.
- [25] Diagnostic mirrors for ITER: research in the frame of the International Tokamak Physics Activity/ A. Litnovsky V.S. Voitsenya, R. Reichle et al // *Nuclear Fusion* – 2019 – Vol. 59 No 6

- [26] Plasma cleaning of steam ingressed ITER first mirrors / Kunal Soni, Lucas Moser, Roland Steiner et al.// *Nuclear Materials and Energy* – 2019 – Vol. S2352-1791(19) – p.30047-X
- [27] Laser cleaning of diagnostic mirrors from tungsten–oxygen tokamak-like contaminants / A. Maffini, A. Uccello, D. Dellasega and M. Passoni // *Nucl. Fusion* –2016 – Vol. 56 – 086008 (9pp).
- [28] *In situ* cleaning of diagnostic first mirrors: an experimental comparison between plasma and laser cleaning in ITER-relevant conditions / A. Maffini, L. Moser, L. Marot et al.// *Nucl. Fusion* – 2007 – Vol. 57 – 046014 (13pp).
- [29] А.В. Рогов, Ю. В. Капустин. Разработка системы очистки диагностических зеркал в ИТЭР на основе комбинированной разрядной конфигурации «полый катод — ячейка Пеннинга // *Успехи прикладной физики* – 2016, Том 4, № 3 – С.
- [30] Modeling of the behavior of in-vessel mirrors for ITER with ECR plasma discharges / V.S. Voitsenya, A. F. Bardamid, Alla I. Belyaeva et al.// *Nucleonika* – 2012 – Vol. 57 No 2 – Pp.157–162.
- [31] Вакуумно-плазменные процессы и технологии / Ефремов А.М., Светцов В.И., Рыбкин В.В. Учебное пособие – ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2006. – 260 с.
- [32] Research on mirror cleaning in inductively and capacitively driven radio-frequency discharges / М.М. Kochergin, Е.Е. Mukhin, К.А. Podushnikova et al.// *Plasma Devices and Operations* – 2006 – Vol. 14, No. 2 – Pp.171–176.
- [33] Electron energy distributions in a magnetized inductively coupled plasma/ S.H. Song, Y. Yang, P. Chabert et al.// *Phys. Plasmas* – 2014 – Vol. 21 – p. 093512.
- [34] Высокочастотный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения / Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. – Долгопрудный: Издательство МФТИ. 1995г. – 320 с.

- [35] Plasma cleaning of ITER First Mirrors in magnetic field / L. Moser, R. Steiner, F. Leipold et al.// *Journal of Nuclear Materials* – 2015 – Vol. 463 – Pp. 940–943.
- [36] Plasma cleaning of ITER first mirrors / L. Moser, L. Marot, R. Steiner et al.// *Phys. Scr.* – 2017– Vol. T170 – p. 014047.
- [37] Plasma cleaning of ITER edge Thomson scattering mock-up mirror in the EAST tokamak / R. Yan, L. Moser, B.G. Wang et al.// *Nucl. Fusion* – 2018 – Vol. 58 – p. 026008.
- [38] *S. Ritt*. Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4 18th IEEE-NPSS Real Time Conference – Dresden, 2012.
- [39] Calibration of a miniaturized retarding field analyzer for low-temperature plasmas: geometrical transparency and collisional effects / T. Baloniak, R. Reute, C. Flötgen, & A. von Keudell // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2010 – Vol. 43 – p. 055203.
- [40] Электрический зонд в плазме/ О.В. Козлов – Москва: Атомиздат, 1969 – 293 с.
- [41] Прикладная физика. Физика газового разряда / А.С. Смирнов. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 1997 – 68 с.
- [42] Principles of plasma discharges and materials processing / M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg – Hoboken: John Wiley & Sons, 2005 – 794 p.
- [43] Chemical sputtering Sputtering by Particle Bombardment IV (Topics in Applied Physics vol 10) ed R Behrisch and W Eckstein / W. Jacob and J. Roth – Berlin: Springer, 2007 – Pp. 329–400.
- [44] *T. H. Chung*. Scaling laws verification for capacitive rf-discharge Ar plasma using particle-in-cell simulations / T. H. Chung, H. S. Yoon, J.K. Lee // *Journal of Applied Physics* – 1996 – Vol. 78 – p. 6441.
- [45] Ion energy distributions in rf sheaths: review, analysis and simulation / E. Kawamura, V. Vahedi, M. Lieberman, and C. Birdsall // *Plasma Sources Science and Technology* – 1999 – Vol. 8, No. 3 – Pp. 6441–6447.

- [46] A. Kobelev. Numerical and experimental study of ion impingement from RF discharge on the mirror surface in strong magnetic field // International Conference on Phenomena in Ionized Gases –Lisbon, 2017.
- [47] Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges / F. Leipold, R. Reichle, C. Vorpahl et al. // Rev. Sci. Instrum. – 2016 – Vol. 87, p. 11D439.
- [48] Антенно-фидерные устройства / Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. – Москва: Радио и связь, 1989. – 352 с.
- [49] Ion energy distributions in rf sheaths; review, analysis and simulation/ E Kawamura, V Vahedi, M A Lieberman and C K Birdsall // Plasma Sources Sci. Technol. – 1999 – Vol. 8 – Pp. R45–R64.
- [50] Код КИТе: моделирование распыления, транспорта и осаждения для чистки оптических элементов ИТЭР / Л.А. Варшавчик, Н.А. Бабинов, П.А. Затылкин и др.// - Сборник «Взаимодействие плазмы с поверхностью» – 2020 – С. 20–22.
- [51] Plasma transport across magnetic field lines in low-temperature plasma sources / G. J. M. Hagelaar and N. Oudini // *Plasma Phys. Control. Fusion* – 20199 – Vol. 53 – p. 124032 (12pp).
- [52] Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения / Л.Б. Беграмбеков. Москва: МИФИ, 2008. – 196 с.
- [53] IPP-report 9/132 / W. Eckstein – Garching, 2002.
- [54] Y. Yamamura. Few collisions approach for threshold sputtering // *Vacuum* – 1985 – Vol. 35–12 – Pp. 561–571.
- [55] The influence of surface roughness on the angular dependence of the sputter yield / M. Küstner, W. Eckstein, V. Dose, J. Roth // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* – 1998 – Vol. B 145 – P. 320.
- [56] R.P. Doerner. Measuring the difference between gross and net erosion / R.P. Doerner, D. Nishijima and T. Schwarz-Selinger // *Nucl. Fusion* – 2012 – Vol. 52 No 10 – p. 103003.

- [57] Noble Gas Radioisotopes:  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{81}\text{Kr}$  / H.H. Loosli, B.E. Lehmann, W.M. Smethie. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology – Berlin: Springer, 2000 – Pp. 379–396.
- [58] Radionuclides in the Environment/ Edited by David A. Atwood. - Vienna: John Wiley & Sons, 2010.
- [59] Ion flux non-uniformities in large-area high-frequency capacitive discharges / A. Perret, P. Chambert, J.-P. Booth et al // *Applied Physics Letters* – 2003 Vol. 83 No 2 – p. 243.
- [60] Моделирование транспорта и переосаждение распыленных частиц в чистящем ВЧЕ-разряде ИТЭР/ Н.А. Бабинов, Л.А. Варшавчик, П.А. Затылкин и др. // Сборник «Взаимодействие плазмы с поверхностью» – 2019 – С. 20–22.
- [61] Pattern Formation in a Complex Plasma in High Magnetic Fields / M. Schwabe, U. Konopka, P. Bandyopadhyay, and G. E. Morfill // *Phys. Rev. Letters* – 2011 – Vol. 106 – p. 215004.
- [62] Эллипсометрия / А.М. Штеренберг, Ю.В. Великанова – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 53 с.
- [63] J. Bohdansky. An analytical formula and important parameters for low energy ion sputtering / J. Bohdansky, R. Roth, H.L. Bay // *J. Appl. Phys.* – 1980 – Vol. 51 – p. 2861
- [64] Е.В. Сысоев. Измерение микро- и нанорельефа поверхности методами низкокогерентной интерферометрии: Новосибирск, 2010 – 136 с.
- [65] Sputtering effects on mirrors made of different tungsten grades / V.S. Voitsenya, O.V. Ogorodnikova, A.F. Bardamid et al. // *Journal of Nuclear Materials* – 2017 – Vol. 500 – Pp. 56–63.
- [66] Testing of molybdenum film mirrors under bombardment by deuterium plasma ions / A. F. Bardamid, K.Yu. Vukulov, V.G. Konovalov et al. // *Plasma Devices and Operations* – 2006 – Vol. 14 No 2 – Pp. 159–170.

- [67] The effect of low temperature deuterium plasma on molybdenum reflectivity / B. Eren, L. Marot, M. Langer et al. // *Nucl. Fusion* – 2001 – Vol. 51 – p. 103025 (10pp).
- [68] First experiments at the QSPA-Be plasma gun facility / D.V, Kovalenko, N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov et al. // *Phys. Scr.* – 2011 – Vol. T145 – p. 014065,
- [69] Parallel Particle-in-Cell Monte-Carlo Algorithm for Simulation of Gas Discharges under PVM and MPI / C. Schwanke, A. Pflug, M. Siemers, & B. Szyszka // *Lecture Notes in Computer Science* – 2012 – Vol 7133 – Pp. 213–219.
- [70] A. Pflug. Design tools and simulations for plasma processing in large area coaters // 51<sup>nd</sup> SVC Annual Technical Conference – Santa Clara, 2009.
- [71] G.A. Bird. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows.* – Oxford: Clarendon Press, 1994 – 458 p.
- [72] H. Tsuge. Angular distribution of sputtered atoms from polycrystalline metal targets / H. Tsuge and S. Esho // *J. Appl. Phys.* – 1981 – vol. 52 – p. 4391.
- [73] Influence of redeposition on the plasma etching dynamics / L. Stafford, J. Magrot, S. Delprat et al. // *J. Appl. Phys* – 2007 – Vol. 101 – p. 083303.