

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург  
2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

**Мухин Евгений Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

**Тимофеев Николай Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующий кафедрой

**Алимов Владимир Хасатович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита состоится “29” октября 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.  
e-mail: artem.dmitriev@mai.ioffe.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе и на сайте [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Н.В. Теплова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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.

Отличительной особенностью ИТЭР по сравнению с существующими токамаками является значительная дистанция (5-10 м) от плазмы до границы вакуума. В связи с этим конструкция диагностических систем подразумевает наличие внутривакуумных компонентов. 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 плазмы, подверженные осаждению пленок, состоящих преимущественно из бериллия. 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 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.

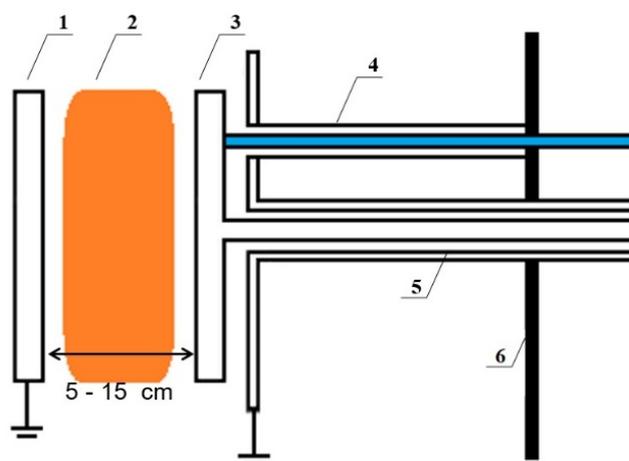


Рис.1 Принципиальная схема системы очистки первого диагностического зеркала в токамаке ИТЭР. 1 – заземленный электрод (шаттер), 2 – плазменный столб ВЧ разряда, 3 – нагруженный электрод (зеркало), 4 – система охлаждения зеркала, 5 – ВЧ-фидер, 6 – граница вакуума.

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 загрязнений, состоящих из 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 предполагается оборудовать 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.

Целью диссертационной работы является исследование и оптимизация параметров плазмы высокочастотного емкостного разряда и ее воздействия на пленочные осадения, 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 на ИТЭР.
- 2) Исследование параметров ВЧЕ чистящего разряда в условиях токамака ИТЭР.
- 3) Оптимизация параметров ВЧЕ чистящего разряда (поглощенная 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 осадений 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 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 осадений 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 ВЧ плазмы с поверхностью позволяют выработать рекомендации по выбору материалов металлических зеркал и диэлектрических окон, предназначенных для длительной экспозиции в плазме.
- Результаты исследования неоднородности чистки могут быть использованы для дальнейшей модификации конструкции первого зеркала с целью ослабления влияния краевых эффектов 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.

#### Апробация работы

Результаты работы представлялись на международных 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

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, содержит 122 страниц, 8 таблиц и 76 рисунков. Список литературы включает 73 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 *in-situ* восстановления отражательной способности первых зеркал необходимо предусмотреть наличие специальной системы очистки. На сегодняшний день в качестве основного инструмента очистки зеркал рассматривается плазма высокочастотного емкостного (ВЧЕ) газового разряда. Целью данной работы является исследование и оптимизация параметров плазмы ВЧЕ разряда, а также ее воздействия на пленочные осаждения и на морфологию поверхностей диагностических окон и зеркал в вакуумном объеме токамака ИТЭР. Практическая реализация

системы очистки первых оптических элементов диагностических комплексов также подробно рассмотрена в диссертации.

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

В **главе 1** *Постановка задачи по исследованию и оптимизации параметров плазмы ВЧЕ разряда для чистки оптических поверхностей в токамаке ИТЭР* 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 и пропускания окон. Особенно сильно этот эффект проявляется в области дивертора, где скорость осаждения на порядок и более превышает скорость осаждения в основном объеме токамака. Эрозия поверхности зеркала за счет физического распыления энергичными атомами перезарядки или вследствие травления ионами в чистящем разряде так же может привести к ухудшению параметров первого зеркала. Использование монокристаллических зеркал позволяет в значительной степени сохранить коэффициент отражения зеркала при удалении слоя толщиной до 5 мкм. Не менее значимым фактором, воздействующим на установленные внутри вакуумного объема ИТЭР зеркала, является нагрев, обусловленный интенсивными потоками нейтронного и гамма-излучения, что приводит к необходимости использования системы охлаждения зеркала. Радиационные повреждения материалов первого зеркала, вызванные нейтронным излучением и потоками атомов перезарядки, будут оказывать незначительное влияние на характеристики зеркал, по сравнению с другими воздействиями. Таким образом поверхность первых зеркал, расположенных внутри вакуумной камеры токамака ИТЭР будет подвержена осаждению пористых металлических пленок, приводящих к значительному ухудшению их

оптических свойств. Для *in-situ* восстановления отражательной способности первых зеркал необходимо предусмотреть наличие специальной системы очистки.

В главе также приводится литературный обзор рассматриваемых в разное время инструментов очистки первых зеркал от продуктов эрозии первой стенки токамака. Лазерная чистка позволяет удалять металлические и диэлектрические покрытия при минимальном воздействии на спектральные характеристики зеркал, однако для ввода лазерного излучения, необходимого для очистки, потребуется установка специальной оптической схемы, включающей в себя первое зеркало, так же подверженное осаждению продуктов эрозии стенки и нуждающееся в системе очистки. В связи с этим в качестве основного инструмента очистки диагностических зеркал на сегодняшний день рассматривается физическое распыление в плазме газового разряда. На основании сравнительного анализа различных типов газовых разрядов в главе приведено обоснование выбора (ВЧЕ) разряда как основного инструмента очистки оптических поверхностей в токамаке ИТЭР.

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.

В **главе 2** ***Описание экспериментальных установок и результаты исследования характеристик ионного потока в зависимости от параметров ВЧЕ разряда*** приведено описание экспериментальных установок для исследования параметров ВЧЕ разряда, а также комплекса оборудования для измерения параметров ВЧЕ разряда и ионного потока на очищаемую поверхность. Одним из основных элементов измерительного оборудования являются анализаторы задерживающего поля,

предназначенные для измерения энергии и плотности тока 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 ВЧ разряде в зависимости управляющих параметров. Ионный поток на очищаемую поверхность характеризуется функцией распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) и плотностью ионного тока. ФРИЭ, измеренные на заземленном электроде ВЧ разряде на частоте 81 МГц для ряда давлений, приведены на рисунке 1а. Зависимость ионного потока на нагруженный электрод от подводимой частоты для ряда благородных газов показана на рисунке 1б.

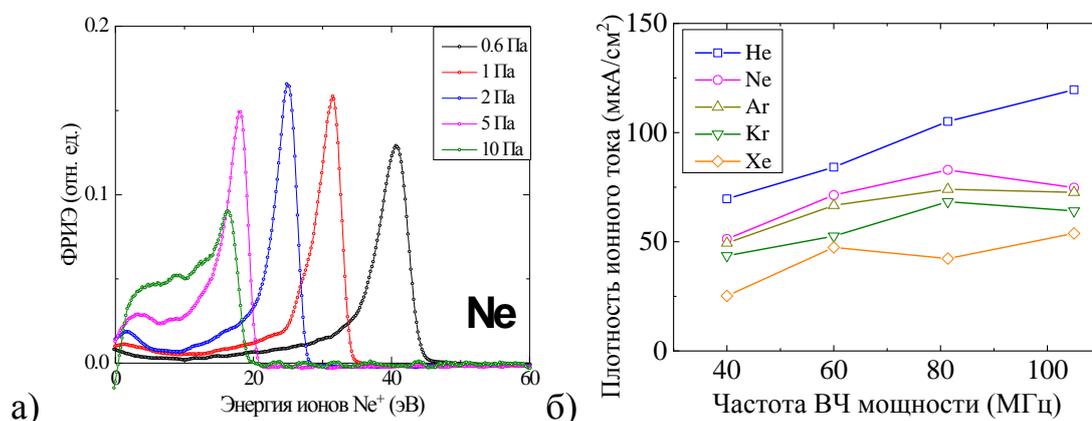


Рисунок 1. Параметры ионных потоков ВЧ разряда. Измерения проведены при давлении 2 Па и мощности  $0,2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

а) ФРИЭ, падающих на поверхность заземленного электрода.

б) плотность ионного тока, падающего на поверхность ВЧ электрода.

В главе приведено экспериментальное исследование 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

В главе обоснована 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 ФРИЭ в слое нагруженного электрода показал, что в низкоэнергитичном «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.

Помимо этих характеристик важное значение имеют показатели симметричности разряда. ВЧЕ разряды низкого давления обычно существенно ассиметричны ввиду того, что боковая поверхность разрядной камеры играет роль заземленного электрода. В случае изолированного от земляного потенциала ВЧ электрода такая асимметрия приводит к образованию постоянного смещения между электродами. В случае заземленного через четвертьволновый кабель ВЧ электрода в результате асимметрии возникает постоянный электронный и ионный токи, текущие соответственно на нагруженный и заземленный электроды.

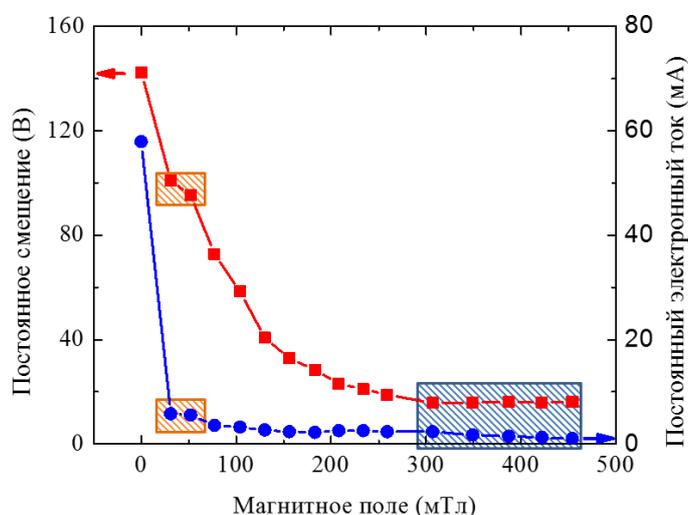


Рисунок 2. Зависимость параметров асимметрии ВЧ разряда от величины аксиального магнитного поля для схем с изолированным и заземлённым ВЧ электродом на частоте 81.36 МГц в неоне при давлении 1 Па и поглощенной мощности 1 Вт/см<sup>2</sup>. Красная кривая – потенциал автосмещения в схеме с изолированным электродом, синяя кривая – постоянный электронный ток в схеме с заземленным электродом.

Проведено экспериментальное исследование параметров разряда изолированным ВЧ-электродом и с ВЧ-электродом, заземленным через

четвертьволновую линию в присутствие магнитного поля. Показано, что с увеличением сонаправленного с осью разряда магнитного поля, асимметрия разряда уменьшается, о чем свидетельствует поэтапное замагничивание электронной и ионной компонент плазмы (см. рис. 2).

Таким образом, в главе результаты исследования основных параметров ионного потока ВЧЕ разряда при чистке диагностических зеркал в вакуумном объеме ИТЭР, включая подводимую и поглощенную мощность, электрическую схему подключения ВЧ мощности, рабочую частоту при наличии или отсутствии внешнего магнитного поля, в зависимости от величины магнитного поля, сорта и давления фонового газа. Продемонстрировано, что при магнитном поле более 0,3 Тл для неоновой плазмы наступает симметризация ВЧЕ разряда, связанная с замагниченностью ионной и электронной компонент плазмы. Обнаружено, что в симметризованных разрядах с изолированным и заземлённым ВЧ-электродом достигается выравнивание параметров ионных потоков на электроды.

В **главе 3 *Исследование эффективности и однородности травления пленочных осадений, моделирующих напыление в ИТЭР*** приведено краткое описание процесса физического распыления под действием ионных потоков. На основании экспериментального исследования параметров разряда, предложена методика оценки скорости удаления осадений в приближении толстых пленок, использующая экспериментальные данные о функции распределения ионов и литературные данные о скорости распыления. Для учета формы ФРИЭ использован эффективный коэффициент распыления, рассчитываемый по формуле

$$Y_{\text{эфф}} = \frac{\int_{\varepsilon_{\text{мин}}}^{\varepsilon_{\text{макс}}} f(\varepsilon) y(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\text{мин}}}^{\varepsilon_{\text{макс}}} f(\varepsilon) d\varepsilon} \left[ \frac{\text{атом}}{\text{ион}} \right], \quad (1)$$

где,  $f(\varepsilon)$  – ФРИЭ,  $y(\varepsilon)$  – коэффициент распыления, взятый из табличных данных,  $\varepsilon$  – энергия налетающего иона. Эффективная скорость распыления определяется как:

$$R_{\text{эфф}} = j \cdot y_{\text{эфф}} \left[ \frac{\text{атом}}{\text{см}^2} \right], \quad (2)$$

где,  $j$  – плотность тока, измеренная в эксперименте

Приведен анализ ожидаемой эффективности применения различных фоновых газов и функций распределения ионов в приэлектродном слое ВЧЕ разряда в зависимости от химического состава пленочных осадений.

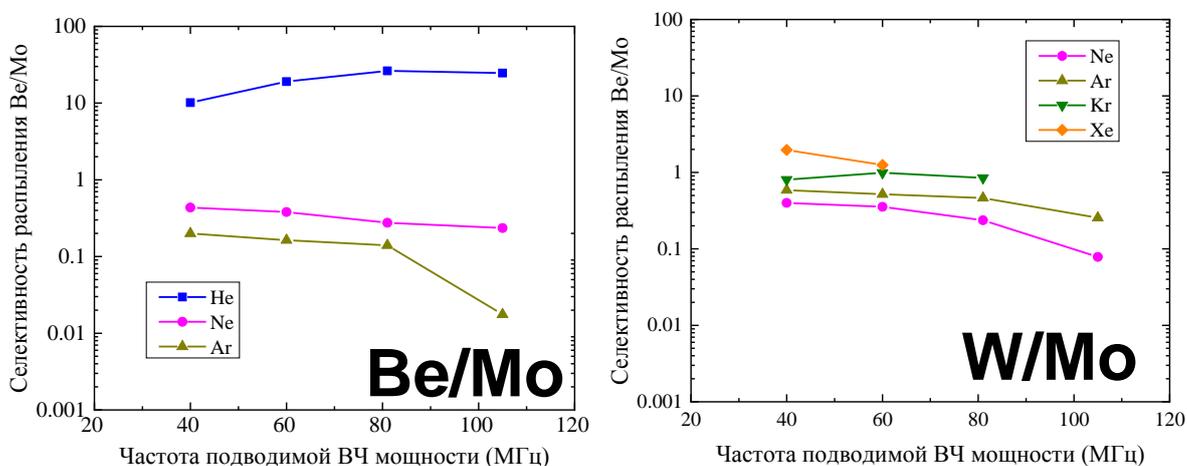


Рисунок 3. Зависимость селективности распыления Be и W по отношению к Mo от частоты подведенной к чистящему разряду ВЧ мощности для ряда благородных газов. Исследования проводились при давлении 2 Па и поглощённой мощности 0,3 В/см<sup>2</sup>.

Так, на основании оценки селективности травления, равной отношению соответствующих эффективных коэффициентов распыления, (см. рис. 3) 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 (рисунок 4).

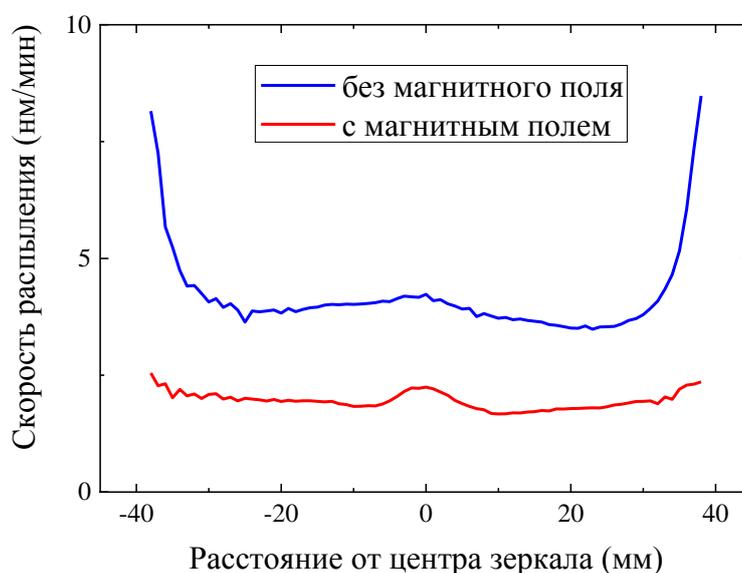


Рисунок 4. Радиальные профиль распыления пленки золота с круглого молибденового электрода в разряде в Ne при давлении 1 Па и мощности 1 Вт/см<sup>2</sup> для случаев с магнитным полем (0,05 Тл) и без поля.

Приведены результаты экспериментов по удалению пленочных осадений Al, моделирующих сформированные в вакуумном объеме ИТЭР пленки Be. Приведены результаты длительной обработки поликристаллических молибденовых зеркал в плазме ВЧ разряда. Показано, что такая обработка приводит к существенному ухудшению их оптических характеристик, причем обнаружено различие в механизмах модификации морфологии поверхности зеркал в результате экспозиции в плазме различных газов. Так, обработка в благородном газе приводит к образованию рельефа на поверхности зеркала из-за разности скоростей травления различно ориентированных кристаллитов (рис. 5а). Обработка зеркал в дейтериевой плазме привела к образованию блистеров на поверхности зеркала (рис. 5б).

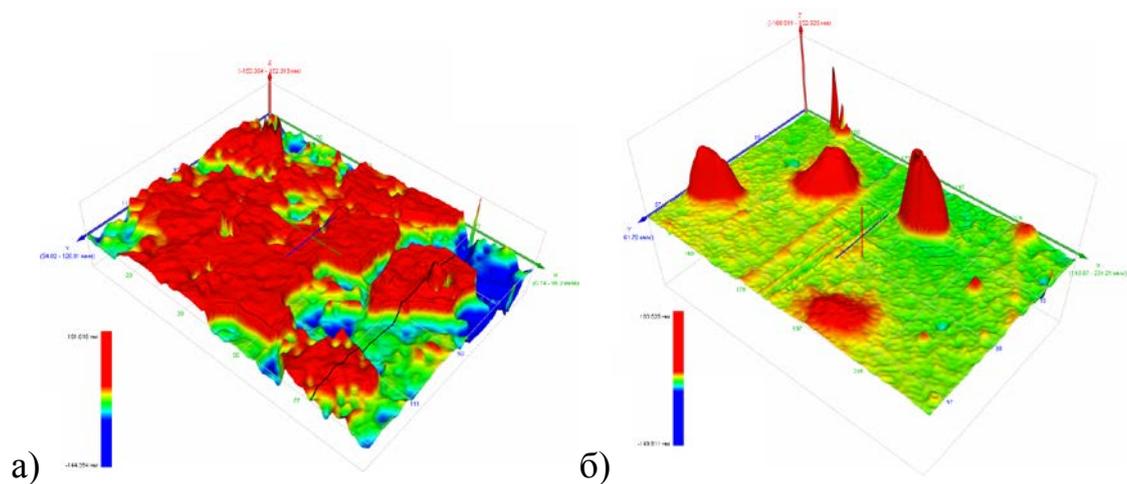


Рисунок 5. Изображения молибденового зеркала, полученное при помощи интерференционного микроскопа, после экспозиции в ВЧ разряде:  
 а) в атмосфере Ne ионами с энергией 220 эВ  
 б) в атмосфере дейтерия ионами с энергией 300 эВ.

Проведена апробация ВЧ чистки бериллийсодержащих осадений, полученных на установке КСПУ-Ве. Проведена отработка режима напыления бериллийсодержащих осадений путем облучения бериллиевой мишени направленным потоком гелиевой плазмы. Обнаружено, что морфология и элементный состав полученных осадений во многом схожи с результатами исследования осадений, получаемых в токамаке JET. 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. Подобранный режим очистки обеспечил высокие скорости распыления бериллиевых осадений  $\sim 0,5$  нм/мин в гелиевом разряде, и  $\sim 0,8$  нм/мин в плазме дейтериевого разряда.

Таким образом в 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.

В главе 4 *Результаты макетирования системы чистки совмещенной с системой охлаждения узла первого диагностического зеркала* приведены результаты макетирования узла охлаждаемого первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности. Приведено описание макета прямоугольного охлаждаемого зеркала, оборудованного системой водяного охлаждения, совмещенной с системой подвода мощности (рисунок 6).

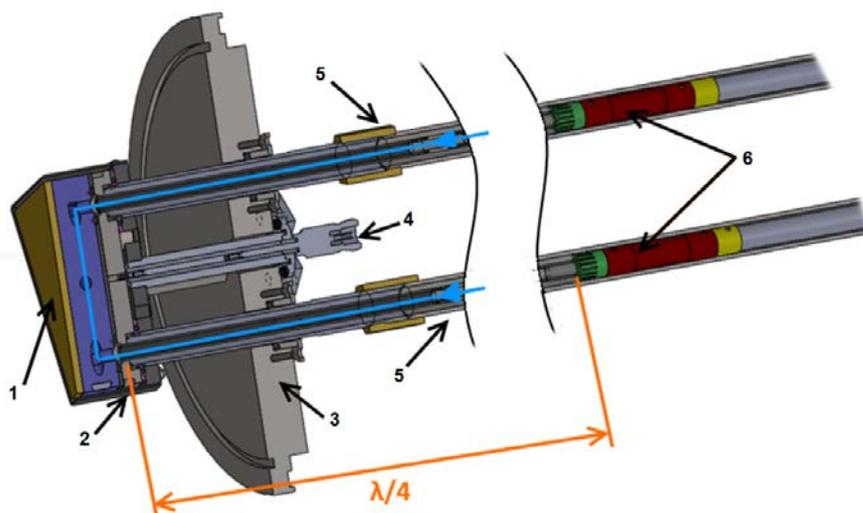


Рисунок 6. Трехмерная модель лабораторного макета узла прямоугольного первого зеркала с совмещенными системами подачи ВЧ мощности и водяного охлаждения.

Прямоугольное зеркало (1) размером 100×50 мм вместе с заземленным экраном (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 трубок (5), представлявших собой короткозамкнутые коаксиальные линии, 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 бронзовыми цангами, соединенными с подвижными плунжерами (6), обеспечивающими возможность подстройки длины короткозамкнутых линий.

Параметры плазмы ВЧ разряда были измерены для ряда управляющих параметров в геометрии макета узла первого зеркала. 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 50 эВ, 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 (рисунок 7а), качественно совпадающий с пространственным распределением плотности плазмы, полученном в результате численного расчета, проведенного с использованием 3D Монте-Карло кода Fraunhofer (рисунок 7б). Приведены результаты апробации системы чистки на макете охлаждаемого зеркала. 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.

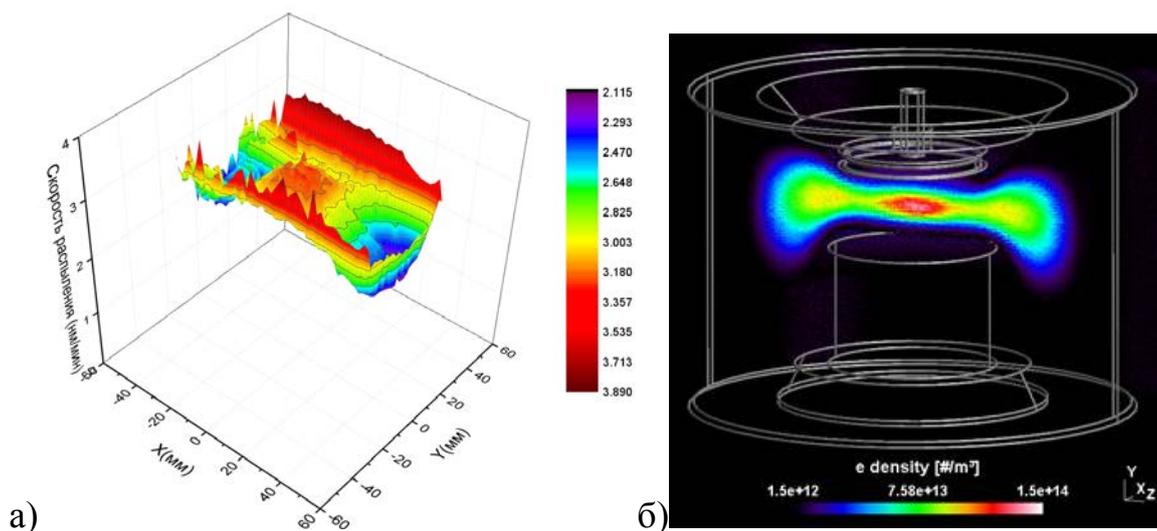


Рисунок 7. Несимметричность ВЧЕ разряда с заземленным ВЧ электродом.  
 а) Профиль распыления тонкой пленки золота с поверхности прямоугольного зеркала ионами Ne с энергией 100 эВ при давлении 1 Па для случая зеркала, заземленного через четвертьволновой фильтр;  
 б) Результат расчета плотности плазмы ВЧ разряда в трехмерном PIC-МС коде для схемы с заземленным ВЧ электродом.

Таким образом, в главе приведено описание оригинальной конструкции зеркала с системой охлаждения совместимой с подведением ВЧ мощности и проведено макетирование системы чистки совмещенной с системой охлаждения узла первого диагностического зеркала активной спектроскопической диагностики (CXRS) краевой плазмы токамака ИТЭР.

## 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 параметров ионных потоков в приповерхностных слоях 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 Вe 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 тонок 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 Ве и Al (модель Ве) 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  $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$ .

В конце диссертации помещен список использованной литературы.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. RF discharge for in situ mirror surface recovery in ITER/ A.G. Razdobarin, A.M. Dmitriev, A.N. Bazhenov 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.Arkipushkin, 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)