

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Дмитриева Артема Михайловича
“Высокочастотный емкостной разряд и его взаимодействие с поверхностью
диагностических зеркал в условиях ИТЭР”,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.08 – физика плазмы

Основное содержание работы

В главе 1 приведен краткий обзор экспериментальных исследований модификации оптических поверхностей, экспонированных как в современных токамаках, так и в модельных экспериментах.

В главе 2 приведено описание экспериментальных установок для исследования параметров высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда, а также приводятся результаты экспериментального исследования параметров ионных потоков ВЧЕ разряда.

В главе 3 предложена методика оценки скорости удаления осадений в приближении толстых пленок, использующая экспериментальные данные о функции распределения ионов и литературные данные о скорости распыления. Проведена апробация чистки бериллиевых осадений, полученных на установке КСПУ-Ве, с помощью ВЧЕ разряда.

В главе 4 приведены результаты макетирования узла охлаждаемого первого зеркала с системой охлаждения, совмещенной с системой подведения ВЧ мощности.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Актуальность темы.

Диссертационная работа А.М. Дмитриева посвящена разработке системы очистки обращенных к плазме внутривакуумных оптических элементов международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Оптические диагностики предназначены для измерения температуры и плотности плазмы, эффективного заряда, и будут использоваться для управления параметрами плазмы токамака в реальном времени. По причине значительных размеров вакуумного объема ИТЭР, а также высокой интенсивности предполагаемых нейтронных потоков, конструкция оптических диагностик ИТЭР предполагает наличие внутривакуумных оптических элементов. 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. В процессе горения термоядерной плазмы на зеркала и окна оптических диагностик, находящихся в вакуумной камере реактора, будут осаждаться пленки, состоящие преимущественно из основного материала первой стенки ИТЭР - бериллия. Одним из основных требований к системе очистки оптики является эффективное удаление осадений при минимальном воздействии на поверхность оптического элемента.

В этой связи результаты исследования воздействия плазмы высокочастотного емкостного разряда на пленочные осадения, а также на оптические свойства и морфологию поверхностей диагностических зеркал в вакуумном объеме токамака ИТЭР, приведенные в диссертации А.М. Дмитриева, представляются чрезвычайно интересными, актуальными и важными.

Оценка научной новизны работы.

Научная новизна работы состоит в том, что, исходя из предполагаемых условий эксплуатации первых диагностических зеркал реактора ИТЭР, был впервые определен диапазон оптимальных параметров высокочастотного емкостного разряда, обеспечивающих приемлемую скорость очистки металлических осадений при минимальном воздействии на поверхность оптических компонентов. Была экспериментально подтверждена применимость системы охлаждения диагностических зеркал, выполненной на основе короткозамкнутой четвертьволновой коаксиальной линии. Проведены эксперименты по удалению бериллийсодержащих осадений в плазме высокочастотного емкостного разряда. Выполнена апробация предлагаемых решений на масштабированном макете охлаждаемого первого диагностического зеркала активной спектроскопической диагностики краевой плазмы токамака ИТЭР.

Оценка практической значимости работы.

Практическая значимость работы А.М. Дмитриева состоит в том, что были сформулированы требования к выбору материалов внутривакуумных оптических компонентов, а также к выбору рабочего газа для различных сценариев очистки поверхности зеркал, расположенных как в диагностических патрубках основного объема токамака, так и

в районе дивертора. Весьма значимыми для практического использования являются результаты изучения влияния продолжительной экспозиции в плазме высокочастотного емкостного разряда на морфологию поверхности металлических зеркал.

Необходимо более детально перечислить наиболее значимые результаты диссертационной работы А.М. Дмитриева, представляющие практическую ценность:

1. Экспериментальные и численные исследования и разработанный прототип узла первого охлаждаемого зеркала, выполненные в рамках контракта между ФТИ и ИТЭР, позволяют перейти к стадии разработки общего подхода к очистке диагностических зеркал токамака ИТЭР.
2. 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.
3. Проведенные исследования по взаимодействию ВЧЕ плазмы с поверхностью позволяют выработать рекомендации по выбору материалов металлических зеркал и диэлектрических окон, предназначенных для длительной экспозиции в плазме.
4. Результаты исследования неоднородности чистки могут быть использованы для дальнейшей модификации конструкции первого зеркала с целью ослабления влияния краевых эффектов чистки.
5. В экспериментах по очистке масштабированного макета узла первого зеркала активной спектроскопической диагностики показана применимость активной системы охлаждения, выполненной по схеме короткозамкнутого четвертьволнового кабеля.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надежных экспериментальных методов, позволяющих исследовать как (i) функциональную зависимость характеристик высокочастотного емкостного разряда от таких параметров, как подводимая к разряду высокочастотная мощность, рабочая частота разряда, сорт и давление рабочего газа, величина внешнего магнитного поля, наличие электрического аналога системы охлаждения зеркала, выполненного в виде замкнутого четвертьволнового кабеля, так и (ii) влияние параметров плазмы высокочастотного емкостного разряда на процессы, приводящие к удалению тонкопленочных металлических осадений с поверхности оптических зеркал.

Достаточная обоснованность и надежность результатов диссертационной работы подтверждена использованием двух специально спроектированных экспериментальных стендов для исследования параметров высокочастотного емкостного разряда, а также комплекса современного оборудования для измерения параметров высокочастотного емкостного разряда и ионного потока, влияющих на механизмы удаления металлосодержащих примесей с поверхности оптических элементов.

Степень завершенности работы и качество ее оформления.

Диссертационная работа Дмитриева А.М. представляет собой целостную законченную научную работу, в которой поставлена актуальная научная цель и решены сложные научно-технические задачи. Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследований. Стиль изложения диссертационной работы и автореферата отражает способность автора лаконично и аргументировано излагать свои мысли.

Качественное оформление диссертационной работы, хорошо выполненные рисунки и графики дают дополнительное представление о высоком научном уровне диссертанта и способствуют пониманию масштабы проблем и задач, которые были решены при выполнении настоящей работы.

Замечания по диссертации и автореферату.

Оппонент не выявил недостатков, ставящих под сомнение основные выводы и положения диссертации, выносимые автором на защиту. В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующие:

1. На страницах 23-26 упоминается, что в некоторых экспериментах в качестве нагруженного электрода были использованы зеркала, выполненные из нержавеющей стали или поликристаллического молибдена. Однако в дальнейшем из текста не всегда очевидно следует, какой тип зеркал был использован в экспериментах, проводимых при выполнении диссертационной работы.
2. На странице 39 указано, что развязка нагруженного электрода осуществлялась при помощи последовательного включения конденсатора в цепь. Однако, далее в тексте не указана величина коэффициента стоячей волны (КСВ) данного конденсатора.

3. На странице 51 выражение «электростатический потенциал» корректнее было бы заменить на выражение «постоянный потенциал автосмещения».
4. На рисунке 3.4.6 (страница 94) не указано, что приведенные изображения получены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), хотя это фигурирует в тексте.
5. На странице 94 следовало добавить, что в случае измерения содержания бериллия, метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (англ. Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX) преимущественно используется для качественной оценки.
6. По тексту, не часто, но встречаются опечатки, и имеются фразы, в которые можно внести редакционные правки. В частности, на странице 29 в одном абзаце дважды присутствует выражение «тем не менее», на страницах 24, 27 и 85 присутствует лишний пробел во фразе «так же» и др.

Указанные замечания не влияют на научную и практическую значимость диссертационной работы и на общую положительную оценку.

Заключение

Диссертация Дмитриева Артема Михайловича содержит новые результаты по исследованию ионных потоков высокочастотного емкостного разряда, как основного инструмента системы защиты и восстановления первых оптических зеркал диагностических комплексов токамака ИТЭР, и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные закономерности удаления пленок, содержащих алюминий и бериллий с поверхности металлических зеркал.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, докладывались на 11 Международных и 5 Всероссийских научно-технических конференциях, опубликованы в 8 статьях, опубликованных в ведущих международных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Полученные экспериментальные данные несомненно будут полезны для проектирования и изготовления внутривакуумных оптических элементов, необходимых для эффективной эксплуатации термоядерного реактора.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Дмитриев Артем Михайлович, несомненно

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

Алимов Владимир Хасатович

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина

Российской академии наук (ИФХЭ РАН)

Почтовый адрес: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, дом 31, корпус 4.

Адрес электронной почты: vkahome@mail.ru

Телефон: 8 (925) 239-53-22

2 октября 2020 г.

Подпись Алимова В. Х. заверяю.

Врио директора
(приказ № 609/к
от 17.09.2020)



Р.Х. Закавурдинов