

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора  
по научной работе  
НИЦ «Курчатовский институт»  
П.А. ФОРШ



10

2020 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Дмитриева Артема Михайловича «Высокочастотный емкостной разряд и его взаимодействие с поверхностью диагностических зеркал в условиях ИТЭР», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа А.М. Дмитриева посвящена экспериментальному исследованию чистки зеркал, планируемых к использованию в системах оптической диагностики плазмы, в условиях, характерных для токамака-реактора ИТЭР, с применением высокочастотного газового разряда, а также оптимизации параметров плазмы чистящего разряда для обеспечения высокой скорости, равномерности очистки и снижения негативного воздействия на оптические свойства и морфологию отражающей поверхности зеркал.

Диагностические зеркала термоядерных установок, размещённые внутри рабочей камеры, испытывают на себе воздействие целого ряда негативных факторов: интенсивные потоки нейтронов и атомов перезарядки, осаждение на отражающей поверхности продуктов эрозии конструкционных материалов установки, воздействие агрессивной среды при возникновении аварий, связанных с разгерметизацией системы водяного охлаждения, и др. Все эти факторы приводят к постепенной деградации зеркал за счёт образования плёнок загрязнения на отражающей поверхности. В случае ИТЭР, регламент работы установки не



позволяет проводить частое обслуживание оборудования, размещённого внутри вакуумной камеры, поэтому для обеспечения длительной безотказной работы диагностического комплекса все системы оптической диагностики комплектуются встроенной системой очистки первого зеркала. Принцип работы систем очистки состоит в периодическом удалении с отражающей поверхности слоя загрязнения за счёт его физического и/или химического распыления при бомбардировке поверхности потоком высокоэнергетических ионов. В качестве одного из возможных путей решения указанной проблемы в диссертационной работе А.М. Дмитриевым рассматривается система очистки на базе высокочастотного емкостного газового разряда.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 73 наименований. Общий объем диссертации составляет 122 страницы.

Во **Введении** дано краткое описание проблемы загрязнения внутривакуумных оптических компонентов диагностических систем токамака ИТЭР и поднят вопрос о необходимости разработки эффективной системы очистки зеркал и оптических окон, на основании чего сформулированы актуальность работы, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. В разделе указаны личный вклад автора, положения, выносимые на защиту; перечислены российские и международные научные конференции и совещания, где проводилась апробация результатов работы, приведен список публикаций по теме диссертации в реферируемых журналах, дана краткая аннотация разделов диссертации.

В **первой главе** изложено текущее состояние дел по так называемой «проблеме первого зеркала»: представлены результаты экспериментального исследования загрязнения зеркал в действующих термоядерных установках (ASDEX, ToreSupra, TEXTOR, JET), показана возможность образования толстых (~ 100 нм) слоёв загрязнения преимущественно состоящего из материала первой стенки. Представлен статус работ по обоснованию выбора материала первого



зеркала, обзор статей по тематике очистки внутривакуумных зеркал установки ИТЭР, изложены преимущества использования высокочастотного емкостного разряда для очистки зеркал и опыт его применения в установке EAST.

Во **второй главе** приведено описание использованного в ходе экспериментальных исследований оборудования: двух вакуумных стендов, снабжённых соленоидами для создания магнитного поля в вакуумном объёме, системами вакуумной откачки, высокочастотными источниками питания и диагностическими системами. В главе представлены результаты исследования зависимости характеристик высокочастотного емкостного разряда от управляющих параметров (частоты и мощности подводимого к разряду питания, давления и состава рабочего газа, величины магнитного поля), представлены результаты измерения функции распределения ионов по энергиям на заземлённом электроде и результаты расчёта энергетического спектра ионов для нагруженного электрода; изложены результаты исследования характеристик разряда при использовании схемы с изолированным и заземлённым нагруженным электродом (с использованием четвертьволновой линии) в присутствии магнитного поля.

В **третьей главе** изложены основные идеи теории распыления и на основе литературных данных об энергетических зависимостях коэффициента распыления проведён анализ возможности выбора рабочего газа (из числа разрешённых для использования в ИТЭР) и энергии ионов для обеспечения селективности очистки  $M_0$  зеркал от W и Be загрязнения; представлены результаты расчёта и экспериментальные данные о равномерности очистки макета  $M_0$  зеркала диаметром 80 мм при наличии и без магнитного поля, результаты очистки от комбинированного металл-оксидного ( $Al/Al_2O_3$ ) и Be загрязнений.

**Четвертая глава** содержит результаты разработки функционального макета системы очистки зеркал, снабжённого системой водяного охлаждения: дано описание элементов конструкции, особенностей настройки системы, представлены результаты функциональных тестов; продемонстрировано сравнение равномерности очистки для систем с изолированным и заземлённым через



четвертьволновую линию нагруженным электродом, представлены результаты экспериментального исследования равномерности очистки.

В **Заключении** приведены основные выводы из полученных в диссертации результатов.

#### **Новизна и научная ценность полученных результатов:**

– Выбран диапазон оптимальных параметров высокочастотного емкостного разряда, обеспечивающих приемлемую ( $\sim 0,1$  нм/мин) скорость удаления загрязнений с отражающей поверхности металлических зеркал при минимальной эрозии материала основы зеркала, что в случае использования монокристаллического зеркала позволяет добиться практически неограниченного срока его службы.

– Предложена методика учёта формы функции распределения ионов по энергиям на поверхности очищаемого зеркала при оценке эффективности очистки металлических и диэлектрических загрязнений.

– Сформулированы рекомендации по выбору рабочего газа для различных сценариев чистки зеркал, расположенных на первой стенке и в диверторной области ИТЭР.

– Исследовано влияние продолжительной экспозиции в плазме высокочастотного емкостного разряда на морфологию поверхности металлических зеркал, обнаружено различие модификации морфологии в разрядах дейтерия и неона при воздействии плазмы высокочастотного газового разряда.

#### **Практическая значимость полученных автором результатов:**

– Экспериментально подтверждена применимость системы охлаждения, выполненной на основе короткозамкнутой четвертьволновой коаксиальной линии, что позволяет использовать систему очистки на основе высокочастотного разряда для зеркал, испытывающих сильные тепловые нагрузки.

– Продемонстрирована возможность очистки зеркал от основных типов загрязнений, ожидаемых в ИТЭР: металлических (Ве) и комбинированных металл-оксидных.



– Выполнена апробация предлагаемых решений на масштабированном макете высокочастотной системы очистки водоохлаждаемого входного зеркала для оптической диагностики диверторной плазмы ИТЭР "Edge-CXRS".

– Результаты исследования неоднородности очистки могут быть использованы для модификации конструкции первого зеркала с целью ослабления влияния краевых эффектов при использовании высокочастотной системы плазменной очистки.

### **Степень достоверности результатов исследований**

Достоверность представленных в диссертации экспериментальных результатов подтверждается их хорошим совпадением с результатами численного моделирования параметров высокочастотного разряда в использованной геометрии разрядной ячейки и качественным совпадением с результатами, полученными другими исследовательскими группами (L. Marot, L. Moser и др.).

### **Личный вклад соискателя в полученные результаты исследований**

Изложенные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии.

### **Апробация и публикации материалов диссертационной работы**

По теме диссертационной работы автором подготовлено 9 публикаций в международных реферируемых научных журналах. Содержание работы обсуждалось на 11 международных и 5 российских конференциях и совещаниях.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке технических требований для проектирования системы очистки на основе высокочастотного емкостного разряда для зеркал термоядерных установок; полученные зависимости характеристик плазмы чистящего разряда от величины магнитного поля, вкладываемой в разряд мощности, давления и рода рабочего газа могут быть использованы для разработки перспективных технологий создания функциональных покрытий.



## Замечания по диссертационной работе

1. Импеданс газоразрядной плазмы имеет активную и реактивную составляющие, которые изменяются по разным законам в зависимости от режима работы, элементного состава электродов, рабочего давления и состава газа. Применение  $\lambda/4$  фильтра усугубляет эту проблему, так как эффективность его использования зависит от степени согласованности нагрузки и волнового сопротивления ВЧ линии электропитания. Постановка общей задачи оптимизации параметров плазмы высокочастотного емкостного разряда, заявленной в качестве цели диссертационной работы на стр. 5, требует использования адаптивного согласования во всём диапазоне возможных импедансов переменной нагрузки, однако этот вопрос в диссертации не рассматривается.
2. В диссертации не исследовалась эффективность очистки в замкнутом объёме без протока газа через область газового разряда, что соответствует эксплуатационным условиям в диагностическом порту ИТЭР.
3. В первой главе нет постановки оптимизационной задачи, заявленной в названии этого раздела.
4. На стр. 98 – нет принципиальной схемы проведения экспериментов с лабораторным макетом системы очистки. На трёхмерной модели (рис. 4.1.1) не указано, является ли высокочастотный коаксиальный ввод (4) согласующим устройством, показанным на рис. 2.1.5, и использовалось ли оно при проведении этих экспериментов. На рис. 2.5.1 согласующее устройство также не показано и нет упоминаний о его использовании. Без его использования применение  $\lambda/4$  фильтра не эффективно.
5. Эксперименты по измерению равномерности чистки в присутствии магнитного поля проводились только с использованием изолированного нагруженного электрода, что противоречит заявленному ранее требованию его заземления в узле входного зеркала.
6. По результатам работы не сформулирован список технических требований для проектирования системы очистки на основе высокочастотного емкостного разряда и нет общих рекомендаций по её применению в оптических диагностиках ИТЭР.



7. В работе не дана оценка критериев, определяющих достоверность полученных результатов.

8. В работе присутствует большое количество пунктуационных ошибок, несогласованных словосочетаний, опечаток и пр. Также при прочтении работы вызывает затруднение терминология, предложенная автором, согласно которой один из электродов разрядной ячейки назван «заземлённым», а второй – «нагруженным»: при использовании четвертьволновой линии для заземления зеркала терминология полностью сливается, и можно только догадываться, о каком именно электроде идёт речь в тексте. Вызывает вопросы оформление ряда рисунков (например, Рисунков 3.1.2 и 3.2.1). Имеет место ошибочная нумерация рисунков (Рисунок 1.1.8 встречается дважды), ссылок на литературные источники ([16] на Рисунке 1.1.8).

9. В автореферате указано, что целью работы, в том числе, является исследование воздействия высокочастотного емкостного разряда на морфологию поверхности диагностических окон, однако в диссертации этот вопрос остался не рассмотренным.

Сделанные замечания не снижают значимость полученных результатов и общую высокую оценку проделанной работы.

#### **Соответствие автореферата диссертации ее содержанию**

Автореферат диссертации отражает ее содержание.

#### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертация Дмитриева Артема Михайловича «Высокочастотный емкостной разряд и его взаимодействие с поверхностью диагностических зеркал в условиях ИТЭР» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, соответствует паспорту специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» в действующей редакции Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842). Автор диссертации,



Дмитриев Артем Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен (единогласно) на заседании Учёного совета по физике токамаков КЯТК Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», протокол от «29» сентября 2020 г. № 85.

Отзыв составил

Начальник Теоретической лаборатории  
физики вакуумного распыления  
Института информационных технологий  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
кандидат физико-математических наук



Рогов Александр  
Владимирович

Учёный секретарь  
Института информационных технологий  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
кандидат физико-математических наук



Капустин  
Юрий Владимирович

Научный руководитель Курчатовского  
комплекса термоядерной энергетики  
и плазменных технологий  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
доктор технических наук



Хвостенко  
Петр Павлович

Ученый секретарь  
Ученого совета по физике токамаков КЯТК  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Кузнецова  
Лариса Константиновна

Заместитель директора –  
главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



Николаенко  
Андрей Владимирович

Адрес: НИЦ «Курчатовский институт»:  
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
e-mail: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)  
<http://www.nrcki.ru>