

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03 НА БАЗЕ  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-  
технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по  
диссертации  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 29.10.2020 № 4

О присуждении Дмитриеву Артему Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Высокочастотный емкостной разряд и его взаимодействие с поверхностью диагностических зеркал в условиях ИТЭР» в виде рукописи по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» принята к защите 23 июня 2020, протокол №2 п. 1, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75 прил. 3 от 12 июля 2019 г.

Соискатель Дмитриев Артем Михайлович, 1991 г.р., в 2014 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского политехнического университета по специальности 011200 «Физика» и поступил в аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе, год окончания – 2018, в настоящее время работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника в лаборатории физики высокотемпературной плазмы Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории физики высокотемпературной плазмы Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Мухин Евгений Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лаборатории лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью Федерального бюджетного

учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Тимофеев Николай Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой оптики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета.
2. Алимов Владимир Хасатович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация НИЦ «Курчатовский институт» в своем положительном заключении, подписанном начальником теоретической лаборатории физики вакуумного распыления, к. ф.-м. н Роговым Александром Владимировичем, ученым секретарем института информационных технологий, к. ф.-м. н Капустиным Юрием Владимировичем, научным руководителем Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий, д. ф.-м. н Хвостенко Петром Павловичем, ученым секретарем ученого совета по физике токамаков КЯТК, к. ф.-м. н Кузнецовой Ларисой Константиновной, заместителем директора, главным ученым секретарем Николаенко Андреем Владимировичем, указала, что содержание диссертации А.М. Дмитриева соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.08– «Физика плазмы», а диссертант А.М. Дмитриев заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а другой степень кандидата наук, они работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что НИЦ «Курчатовский институт» широко известен своими достижениями в физике плазмы. В частности, в этом институте уже в течение последних десяти лет ведутся работы по разработке систем плазменной очистки, а руководитель этого направления Рогов Александр Владимирович является признанным специалистом в данной области. Кроме того, в НИЦ «Курчатовский институт» имеется диссертационный совет Д 520.009.02 по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Основное содержание диссертации представлено в 9 научных статьях, 8 из которых индексированы в международной системе цитирования Web of Science:

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)

На автореферат поступило 4 отзыва.

Отзыв доцента Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, к. ф.-м. н. Козловского С.С. положительный и замечаний не содержит.

Отзыв заместителя начальника отдела ИТЭР Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», д. ф.-м. н. Вуколова К.Ю. положительный и замечаний не имеет.

Отзыв доцента кафедры физики плазмы Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», к. ф.-м. н. Гаспаряна Ю.М. положительный, содержит одно замечание:

1. К недостатку работы можно отнести отсутствие сравнения полученных экспериментальных данных по скорости эрозии напыленных пленок с приведёнными в работе расчетными значениями и литературными данными.

Отзыв ведущего научного сотрудника Гельмгольцевского научного центра в г. Юлих, Германия, PhD, Литновского А.М. положительный, содержит пять замечаний:

1. Заслонка диагностического канала, называемая в автореферате шаттером, в условиях реальных диагностических систем не всегда заземлена, как показано на рисунке 1, или заземлена вдалеке, на расстоянии нескольких метров от зеркала.
2. Морфология со-осажденных слоев на первом зеркале зависит от многих внешних факторов, таких как источник примесных атомов, характер и особенности со-осаждения, температура зеркала, геометрия диагностического канала, удаление от источника примесей и многих других. Металлические со-осажденные слои не всегда пористые, как утверждается в автореферате.
3. На рисунке 3 непонятна энергия ионов, производящих распыление.

4. Неверное обозначение оси абсцисс на правой части рисунка 3: верное обозначение  $W/M_0$ .
5. Также, уважаемый автор несколько склонен к употреблению английских терминов при наличии аналогов в русском языке.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд результатов, важных для физики плазмы газового разряда, а именно:

- Зависимость энергии и плотности тока ионов на электродах ВЧЕ разряда от величины внешнего магнитного поля, типа инертного газа, ВЧ частоты и поглощенной мощности.
- Симметризация ВЧЕ разрядов в магнитном поле с изолированным и заземлённым ВЧ-электродами, вследствие замагниченности ионной и электронной компонент плазмы.
- 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.
- 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.
- Способ включения ВЧ электрода в электрическую цепь (изолированный по постоянному току, заземленный) и его влияние на пространственную неоднородность распыления при наличии и отсутствии магнитного поля.
- Демонстрация травления тонкопленочных металлических осадков (Au, Al, Be) в ВЧЕ разряде. Прототипирование диагностического зеркала ИТЭР, играющего роль заземленного по постоянному току ВЧ-электрода, оборудованного системой водяного охлаждения.

Научная новизна и практическая значимость обоснована тем, что, исходя из предполагаемых условий эксплуатации первых диагностических зеркал, выбран диапазон оптимальных параметров ВЧЕ разряда, обеспечивающих приемлемую скорость очистки металлических осадков 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. 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. Экспериментальные и численные исследования, выполненные в рамках работы над диссертацией, позволяют перейти к стадии разработки предварительного дизайна системы очистки первого диагностического зеркала.

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.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Личный вклад автора состоял в выполнении экспериментов и анализе полученных результатов, формулировке требований к системе чистки диагностических зеркал и рекомендациях по ее использованию, а также в подготовке публикаций и выступлений на конференциях.

Диссертация Дмитриева А.М. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в физику плазмы газового разряда.

На заседании 29 октября 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Дмитриеву А.М. ученую степени кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов по специальности 01.04.08 «Физика плазмы»,

участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 17, против – 0, воздержались – 0.

Председатель  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Васютинский Олег Святославович

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Аскинази Леонид Георгиевич

29 октября 2020 г.