

О т з ы в

на диссертацию Капустина Юрия Владимировича "Разработка системы очистки первого зеркала в оптических диагностиках ИТЭР на основе разряда в полом катоде соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Диссертация Ю.В. Капустина посвящена разработке системы очистки первого зеркала в узлах оптических диагностик уже строящегося Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), проблема, которая до сих пор, несмотря на целый ряд исследований, не находит адекватного решения. Это обстоятельство объясняет чрезвычайную актуальность диссертационной работы.

Работа включает введение, пять глав и заключение.

В первой главе приведён достаточно полный анализ механизмов деградации первых зеркал в узлах оптических диагностик термоядерного реактора, и обзор предлагаемых методов очистки поверхности зеркал от загрязнения. Автор справедливо заключает, что предлагаемые методы очистки зеркал не способны обеспечить функционирование зеркал в течение всего периода эксплуатации в ИТЭР и приходит к выводу о перспективности использования разряда на постоянном токе для разработки системы очистки первого зеркала.

Во второй и в последующих главах последовательно описывается выполнение задач, поставленных для достижения цели диссертационной работы. Это, прежде всего, разработка системы очистки на основании разряда постоянного тока. Рассматриваются два типа такого разряда: на основе полого катода и ячейки Пеннинга. Убедительно демонстрируется высокая степень очистки обоими этим разрядами молибденовых зеркал от металлических, диэлектрических и смешанных загрязнений, причём большое внимание уделено достижений равномерности очистки поверхности зеркала от загрязнений.

Автору удалось найти удачные, на мой взгляд, конструкционные решения интеграции систем очистки зеркал на основе обоих типов разряда постоянного тока в конструкцию узла входного зеркала оптических диагностик ИТЭР. Причём, учитывая особенности некоторых диагностических узлов ИТЭР, разработана конструкция комбинированной разрядной ячейки, допускающей одновременную очистку первого и второго зеркала как при наличии, так и в отсутствии магнитного поля установки.

В третьей главе исследуется влияние параметров источника питания системы очистки с разрядом постоянного тока на качество очистки молибденовых зеркал и рассматривается вопрос о встроенной системы контроля процесса очистки. В конечном итоге удалось разработать электрическую схему системы очистки сохраняющую устойчивость чистящего разряда в магнитном поле вплоть до максимальных значений тока и напряжения разряда в процессе очистки (1А, 1000В), и обеспечивающую равномерность очистки поверхности зеркала в перпендикулярном и параллельном направлениях относительно расположения цилиндрических анодов разряда.

Предложены решения весьма деликатной задачи контроля процесса очистки для отключения разряда после окончания очистки и предотвращения микродуг на поверхности зеркала при наличии диэлектрических включений в плёнке загрязнений.

В следующей, четвёртой главе описан изготовленный макет газоразрядной ячейки размерами 120×80×80 мм³ и математическая модель чистящего разряда в такой ячейке. Сопоставление результатов экспериментов с ячейкой и результатов моделирования позволило устранить целый ряд недостатков в процессе чистки зеркала в такой ячейке и, с другой стороны, доработать модель и добиться совпадения по порядку величины результатов экспериментов с результатами расчётов. Можно согласиться с автором и предположить, что такой результат позволяет использовать разработанную расчётную модель для предварительной оценки параметров чистящего разряда при масштабировании предложенной разрядной ячейки.

Кроме того, полученный результат позволил автору перейти к экспериментам с составным молибденовым зеркалом размерами 200×100×35 мм³, являющимся полноразмерным макетом первого зеркала диагностики «Активная спектроскопия», которое будет расположено в одном из портов ИТЭР. Было проведено три последовательных цикла очистки без магнитного поля в специально изготовленной разрядной ячейке. Эти эксперименты позволили провести дальнейшее улучшение конструкции разрядной ячейки и, что важно, обнаружить при проведении второго и третьего цикла чистки в гелиевом разряде, что общий уровень коэффициента зеркального отражения постепенно снижался. Величину зеркального отражения удалось восстановить проведением последующей аргоновой чистки, приведшей к удалению поверхностного слоя толщиной примерно 200 нм. Был сделан вывод, что снижение зеркального отражения происходило не из-за распыления поверхности ионами гелия, а в результате его накопления в поверхностных слоях молибдена.

Наконец, последняя пятая глава содержит составленные автором обобщённые требования и рекомендации по интеграции системы очистки на основе газового разряда на постоянном токе в узел входных зеркал оптических диагностик термоядерных реакторов. Глава включает детальный список требований и рекомендаций, относящихся к элементам разрядных ячеек и к источнику питания разряда. Кроме того, подробно рассматривается интеграция разрядных ячеек системы очистки в узел входного зеркала диагностик «Спектроскопия водородных линий» и «Активная спектроскопия» разрабатываемых для ИТЭР.

Вместе с тем, диссертация не лишена ряда недостатков.

1. Имитационные загрязнения напылялись на поверхность зеркал в магнетронной системе с распыляемыми алюминиевым и, судя по всему, цинковым катодами. При таком способе напыления формирующиеся слои не подвергались облучению быстрыми ионами, которые могли бы имитировать облучение поверхности зеркал в ИТЭР атомами перезарядки в процессе их загрязнения. В результате не происходило инициированное ионным облучением внедрение осаждающихся атомов алюминия, цинка, атомов, сорбированных на поверхности молекул остаточного газа в поверхность зеркала, как это должно происходить в ИТЭР. «Забитие» осаждающихся атомов покрытия в материал зеркала, особенно при многократном повторении циклов «осаждение загрязнений – очистка поверхности» приведёт к изменению состава поверхностного слоя, его очаговой оксидации, возникновению поверхностных напряжений и стимулируемых ими процессов развития рельефа поверхности при ионном облучении. Эти процессы могут быть факторами, существенно определяющими постепенную и плохо контролируруемую деградацию поверхности зеркала.

2. Для определения методом взвешивания толщины распылённой части слоёв загрязнений зеркала (Al и ZnN) в процессе чистки и скорости их распыления, на поверхности слоёв загрязнений располагались маркеры из металлических Al, Zn и Mo. Скорость распыления тонких слоёв существенно зависит от условий напыления, даже если они не включают посторонних загрязнений. Вместе с тем, в диссертации не приводятся условия их осаждения, не сообщается, в частности, давление и состав остаточных газов, скорость напыления и т.п. Поэтому, можно с большой вероятностью ожидать присутствия в осаждённых слоях кислорода и водорода, которые послужат дополнительным фактором различия между скоростями распыления слоёв загрязнений и металлов, используемых в качестве маркеров. Следует также отметить, что не приводятся данные, подтверждающие одинаковую скорость распыления металлического цинка и напылённого слоя нитрида цинка

3. Ионы чистящего разряда (как ионы гелия, так и ионы аргона) с энергией в несколько сотен электронвольт «вбивают» атомы загрязнений (атомы металлов, азота, кислорода) в поверхностные слои зеркала. Этот процесс при многократном повторении циклов «осаждение загрязнений – очистка поверхности» приведёт к тем же последствиям, что и облучение поверхности зеркала быстрыми атомами перезарядки при осаждении слоя загрязнений. Три цикла очистки выполненных автором в эксперименте с зеркалом большой площади, совершенно недостаточно для выбора режима очистки зеркала при необходимости многократных повторений циклов очистки. Поэтому, на мой взгляд, преждевременно рекомендовать проводить очистку зеркал оптических диагностик термоядерного реактора в режимах облучения, предлагаемых соискателем.

4. Автор предлагает два возможных способа определения момента остановки очистки зеркала: отслеживание динамики изменения разрядного напряжения в процессе очистки и отслеживание наличия линий загрязнения в спектре излучения чистящего разряда. Разрядное напряжение может не меняться заметно при очистке зеркала от металлических загрязнений, а при повторяющихся циклах очистки из-за изменения состава поверхностного слоя зеркала. Для отслеживания наличия линий загрязнения в спектре излучения чистящего разряда, необходимо наличие масс-спектрометра, установка которого в узлах входных зеркал ИТЭР, очевидно, невозможна.

Кроме того, и что, по-видимому, самое главное, ни один из рассматриваемых методов очистки не сможет заметить остающихся на поверхности зеркала после окончания процесса чистки «точечных» загрязнённых участков и участков с модифицированным составом. Не контролируемое увеличение количества которых, как отмечалось выше, приведёт со временем к уменьшению отражательной способности зеркала.

Отмеченные выше обстоятельства, на мой взгляд, свидетельствуют о необходимости доработки предложенных методов очистки зеркал и контроля длительности очистки прежде, чем они могут быть рекомендованы для применения в условиях ИТЭР.

Наконец, отмечу, что списки Основных положений и Личного вклада соискателя составлены довольно небрежно. Например, знакомство с последним наводит на мысль о том, что участие соискателя в разработке положений, выносимых на защиту носило по большей части чисто технический, вспомогательный характер. Только при беседе с ним выявляется объём исследовательских работ, который он на самом деле провёл.

Суммируя всё вышесказанное, я хочу подчеркнуть, что, несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа в целом представляет собой законченное научное исследование, выполненное на достаточно высоком уровне. Она включает последовательность успешно выполненных разносторонних исследований, в процессе которых впервые была предложена и обоснована возможность использования газового разряда на постоянном токе для очистки первых зеркал узлов оптических диагностик термоядерных установок, составлены математические модели разрядных ячеек, изготовлены и протестированы модели разрядных ячеек для системы очистки зеркал и источники питания разряда, предложены режимы очистки зеркал облучением ионами гелиевого и аргонового разрядов.

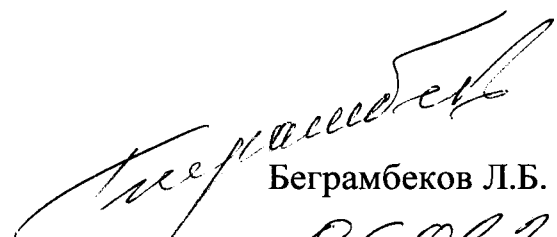
Все основные результаты работы отражены в публикациях (6 работ, 3 из которых опубликованные в журналах из списка ВАК).

О достоверности и значимости результатов диссертации говорят успешные результаты её обсуждения на конференциях и семинарах.

Автореферат написан хорошим языком и достаточно полно отражает большой объем исследований, выполненных по теме диссертационной работы.

По своей научной значимости и практической ценности представленная к защите диссертационная работа Капустина Юрия Владимировича" удовлетворяет требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор достоин присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Профессор
кафедры Физики плазмы,
НИЯУ МИФИ
доктор. физ.-мат.наук.


Беграмбеков Л.Б.
06.02.2017

НИЯУ МИФИ,
Москва, 115409, Каширское шоссе 31
Тел.: 8 495 788 5699
lbb@plasma.mephi.ru

Подпись Беграмбекова Л.Б.

ЗАВЕРЯЮ

