

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ВХОДНЫХ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ИТЭР В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ НА ПОСТОЯННОМ И СРЕДНЕЧАСТОТНОМ ИМПУЛЬСНОМ ТОКЕ

© 2023 г. А. В. Рогов^а, Ю. В. Капустин^{а,*}, А. В. Горбунов^а

^а НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: Kapustin_YV@nrcki.ru

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 12.03.2023 г.

Принята к публикации 20.03.2023 г.

Внутривакуумные зеркала, используемые в системах оптической диагностики плазмы термоядерных установок, подвержены загрязнению и требуют периодической очистки. Очистку планируется проводить за счет ионного распыления загрязнения с отражающей поверхности в газовом разряде. В работе представлены результаты экспериментального исследования возможности контроля процесса очистки зеркал в тлеющем разряде, локализованном внутри сетчатого полого катода, на постоянном и среднечастотном импульсном токе. Исследованы три независимых метода контроля: по результатам измерения напряжения чистящего разряда при фиксированном токе, на основании измерения частоты возникновения микродуговых привязок при наличии диэлектрических загрязнений и посредством эмиссионной спектроскопии чистящего разряда. Отдельно для подтверждения эффекта очистки представлены результаты измерения спектра отражения зеркала. Показано, что все три способа могут быть использованы в системах очистки. Первый из рассмотренных методов выглядит наиболее перспективным, поскольку не требует дополнительных датчиков, используя только данные, получаемые от источника питания разряда, и применим при очистке как от электропроводящих, так и от тонких диэлектрических загрязнений. Контроль на основе измерения частоты возникновения микродуговых привязок может применяться для переключения между импульсным режимом и режимом постоянного тока при наличии слоистых металл-диэлектрических загрязнений, а также при очистке от локальных диэлектрических загрязнений, сформировавшихся в ходе аварий. Спектроскопический метод контроля обеспечивает наиболее высокую чувствительность и позволяет определить состав загрязнений, однако предъявляет повышенные требования к регистрирующей аппаратуре. Рассмотренные методы могут быть использованы для автоматизации процесса удаления загрязнений в системах плазменной очистки входных диагностических зеркал термоядерных установок, а также для контроля процесса финишной очистки подложек перед вакуумным осаждением покрытий.

Ключевые слова: ИТЭР, разряд с полым катодом, система очистки зеркал, спектроскопия водородных линий, ион-электронная эмиссия, молибден

DOI: 10.31857/S0367292123600036, **EDN:** WYGGXF

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические элементы, обращенные к плазме, в системах спектроскопической диагностики термоядерных установок являются критическим элементом, поскольку подвержены непосредственному воздействию плазмы и расположены рядом с первой стенкой реактора [1, 2]. В зависимости от эксплуатационного режима и места установки, входные зеркала могут подвергаться как распылению, так и загрязнению продуктами эрозии внутривакуумных элементов установки [3], а в зависимости от материала отражающей поверхности деградация оптических свойств также может происходить за счет формирования гид-

рооксидов и оксидов при авариях с прорывом воды или разгерметизацией вакуумной камеры установки [4, 5]. По этой причине в состав всех оптических диагностик международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР должна входить система плазменной очистки для удаления при необходимости загрязнений методом ионного распыления. Также предусмотрен специальный технологический режим работы установки с возможностью повышения давления до 10 Па [6] и отключения тороидального поля. В качестве рабочих газов могут быть использованы дейтерий (D_2), гелий (He), неон (Ne) и аргон (Ar) или смесь этих газов [6]. Одним из способов

очистки поверхности является ее ионное распыление в аномальном тлеющем разряде на постоянном токе (DC), локализованном в сетчатом пологом катоде, для удаления токопроводящих загрязнений, или на среднечастотном импульсном токе (PDC) для очистки от тонких диэлектрических загрязнений. Такие системы очистки предполагаются использовать в разрабатываемых диагностиках ИТЭР “Активная спектроскопия” и “Спектроскопия водородных линий” [7–10], где в качестве материала первых зеркал будет использоваться монокристаллический молибден.

Актуальным вопросом является определение момента окончания процесса очистки отражающей поверхности от загрязнения для уменьшения распыления материала зеркала и других негативных эффектов, вызванных ионной бомбардировкой поверхности в тлеющем разряде. Предлагаемая в данной работе методика контроля процесса очистки базируется на зависимости параметров самостоятельного тлеющего разряда от ион-электронной эмиссии с катодного электрода [11], одним из элементов которого является очищаемое зеркало. Элементный состав загрязнения отличается от состава материала зеркала и сетчатого полого катода. За счет различия коэффициента ион-электронной эмиссии с очищаемой поверхности при наличии загрязнений вольт-амперная характеристика газового разряда изменяется. Зная вольт-амперные характеристики разряда, измеренные с поверхности заведомо чистого зеркала, и принимая во внимание атомный состав ожидаемых в ИТЭР загрязнений, данная методика дополнительно позволяет оценить состав загрязнения.

В режиме очистки с помощью DC-разряда на катодном электроде за счет накопления положительного заряда при ионной бомбардировке поверхности диэлектрических загрязнений могут возникать микродуговые привязки. При этом может происходить локальный пробой диэлектрика, способный привести к деградации оптических свойств зеркала. Этого негативного эффекта можно избежать при использовании источника питания с малой выходной емкостью и быстродействующей системой токовой защиты. При этом частота возникновения микродуговых привязок может быть использована для контроля процесса очистки от диэлектрического загрязнения и определения момента ее окончания [12].

Третий способ контроля процесса очистки основан на мониторинге спектра излучения плазмы чистящего разряда [13]: при распылении материала загрязнения продукты эрозии частично ионизируются и возбуждаются в плазме газового разряда и могут быть зарегистрированы спектроскопическим методом. По мере удаления загрязнения интенсивность соответствующих ему ли-

ний уменьшается, а интенсивность линий материала зеркала и сетчатого катода, наоборот, увеличивается, что и может стать сигналом для определения момента окончания очистки.

В представленной работе проведено сравнительное экспериментальное исследование применимости всех трех рассмотренных выше подходов для контроля процесса удаления загрязнений в тлеющих разрядах DC/PDC, составляющих основу системы плазменной очистки зеркал. Для подтверждения эффекта очистки представлены результаты измерения спектральной зависимости коэффициента зеркального отражения использованных образцов зеркал.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на полноразмерных функциональных макетах DC/PDC-системы плазменной очистки двух измерительных каналов диагностики “Спектроскопия водородных линий”, которые будут размещены в экваториальных диагностических портах ИТЭР № 11 и № 12. Все элементы разрядной ячейки и полноразмерные макеты первого и второго зеркал были изолированы от стенок вакуумной камеры. Использованные в экспериментах сетчатые полые катоды отличались размерами, конструкционным материалом и расположением вырезов для прохождения оптического излучения. Для макета системы из порта № 11 использовался полый катод из нержавеющей стали размером $150 \times 180 \times 160$ мм, а для макета системы из порта № 12 – молибденовый сетчатый полый катод размером $160 \times 170 \times 250$ мм. Характерный размер ячейки сетчатого полого катода ≈ 5 мм. В обоих макетах предусмотрена одновременная очистка близко расположенных первого и второго зеркал с размерами отражающих поверхностей соответственно 164×60 мм, 164×50 мм в диагностическом порту № 11 и 150×60 мм, 130×50 мм в порту № 12. Общий вид узлов входных зеркал, на основе которых были изготовлены макеты разрядных ячеек, показан на рис. 1.

Эксперименты по контролю процесса очистки на основе измерения параметров разряда в DC-режиме, дополненные спектроскопическими измерениями, проводились на макете разрядной ячейки диагностики “Спектроскопия водородных линий” для порта № 11, а в PDC-режиме – на макете для диагностического порта № 12. В качестве имитационного загрязнения в первом случае использовались покрытия из алюминия Al (близок к бериллию по физико-химическим свойствам), нанесенные магнетронным распылительным устройством при напылении на смещенную наклонную вращающуюся подложку [14]. Неоднородность покрытия по толщине составляла не бо-

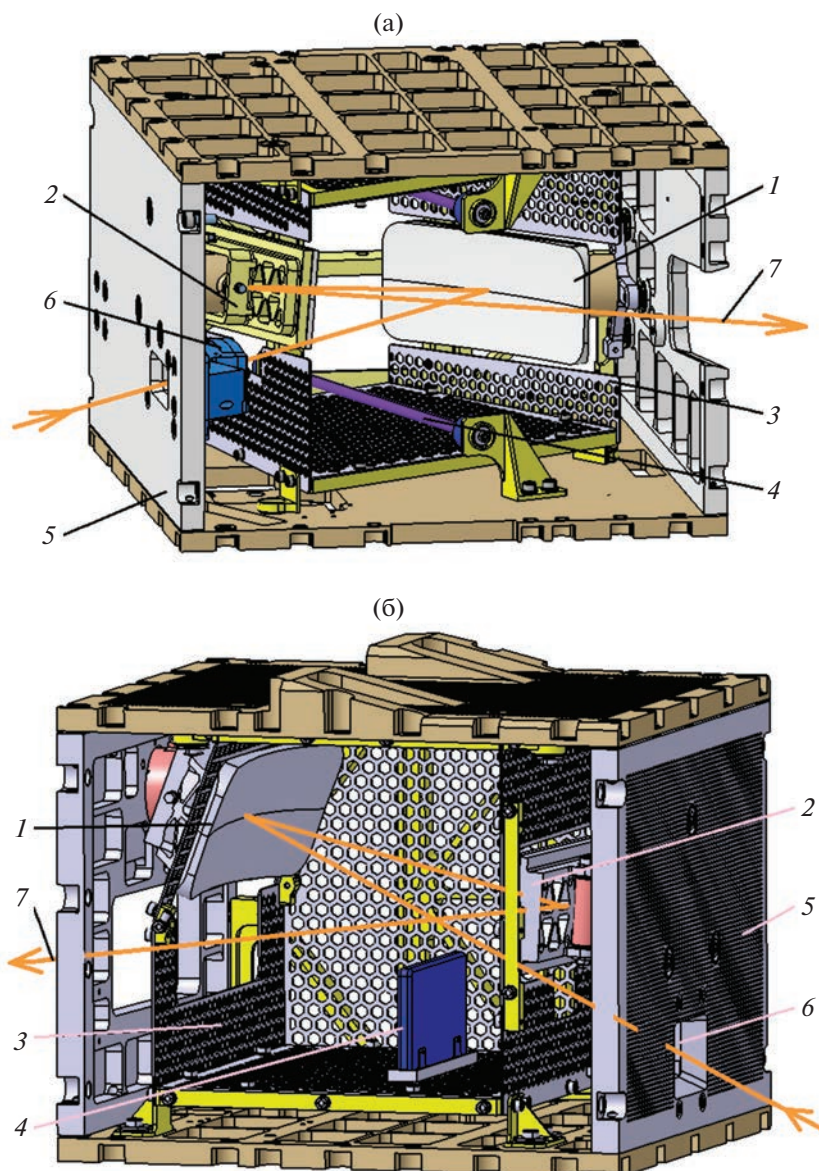


Рис. 1. Узел входного зеркала диагностики “Спектроскопия водородных линий” в экваториальных диагностических портах ИТЭР № 11 (а) и № 12 (б, передняя сеточная стенка разрядной ячейки не показана): 1 – первое зеркало, 2 – второе зеркало, 3 – сеточные электроды разрядной ячейки, 4 – анод, 5 – стенки узла входных зеркал, 6 – входной зрачок, 7 – центральная хорда наблюдения.

лее 5%. Во втором случае в качестве загрязнения использовался слой оксидов молибдена Mo, полученный в результате выдержки зеркала в 3% растворе перекиси водорода [15] в течение 30 минут при комнатной температуре, что моделирует загрязнение, формирующееся при аварийных ситуациях с разгерметизацией системы водяного охлаждения первой стенки и внутривакуумных элементов реактора [4].

Использовался блок питания APCL-M-1.5PDC [16], обеспечивающий стабилизацию тока, напряжения или мощности разряда, возмож-

ность работы как в DC-, так и в PDC-режиме с частотой повторения однополярных импульсов от 10 до 100 кГц и регулировкой скважности в диапазоне (10–80)%, а также снабженный встроенной быстродействующей системой защиты от токовых перегрузок. Максимальное значение выходного напряжения блока питания составляло 720 В при мощности до 1.5 кВт. Этот источник питания также имеет встроенный интерфейс для внешнего компьютерного управления и регистрации параметров разряда.

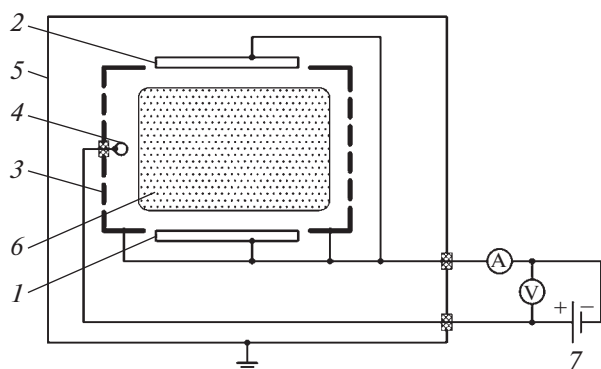


Рис. 2. Схема подключения элементов разрядной ячейки: 1 — первое зеркало, 2 — второе зеркало, 3 — сетчатые электроды разрядной ячейки, 4 — анод, 5 — стенки вакуумной камеры, 6 — область локализации разряда, 7 — блок питания разряда.

При проведении экспериментальных исследований в качестве рабочего газа использовались аргон Ar и гелий He высокой чистоты.

Схема включения элементов разрядной ячейки приведена на рис. 2. Контроль процесса очистки поверхности Mo-зеркала от Al-загрязнения на базе эмиссионной спектроскопии разряда основан на одновременной регистрации линий атомов алюминия Al I (394.40 нм и 396.15 нм), линии атомов молибдена Mo I (390.30 нм) и линий рабочего газа (в данном случае — линии атомов гелия He I, 388.86 нм). Эти измерения проводились одновременно с регистрацией динамики изменения напряжения разряда в режиме стабилизации тока в DC-режиме с использованием макета разрядной ячейки для диагностического порта № 11. По

мере очистки, за счет сетчатой конструкции полого катода, атомы загрязнения покидают область разряда, осаждаются на нераспыляемых стенках диагностического порта, а с очищенных участков отражающей поверхности зеркала и остальных катодных элементов разрядной ячейки начинает распыляться конструкционный материал их основы (Mo). Сложность реализации такого метода связана с относительно низкой интенсивностью линий Al и Mo по сравнению с характеристическими линиями рабочего газа, вызванной малой концентрацией продуктов эрозии в плазме газового разряда. Схема проведения спектроскопических измерений показана на рис. 3.

Для регистрации излучения использовался монохроматор МДР-206 [17] и CCD-видеокамера. Измерения проводились в диапазоне 388–401 нм, где присутствовали линии всех интересующих элементов (He, Al, Mo).

Предварительные эксперименты выявили, что наилучшее соотношение сигнал–шум обеспечивается при использовании хорды наблюдения, ориентированной под скользящим углом к распыляемой поверхности. Из-за конструктивных особенностей использованной вакуумной камеры, в эксперименте угол между хордой наблюдения и отражающей поверхностью макета первого зеркала составлял $\approx 20^\circ$.

Для измерения спектральных зависимостей коэффициента зеркального отражения использованных образцов в работе был использован спектрофотометр Perkin Elmer Lambda 850. Зеркальное отражение измерялось при использовании пучка света квадратного сечения (5 мм $\times$ 5 мм), угол падения составлял 8° .

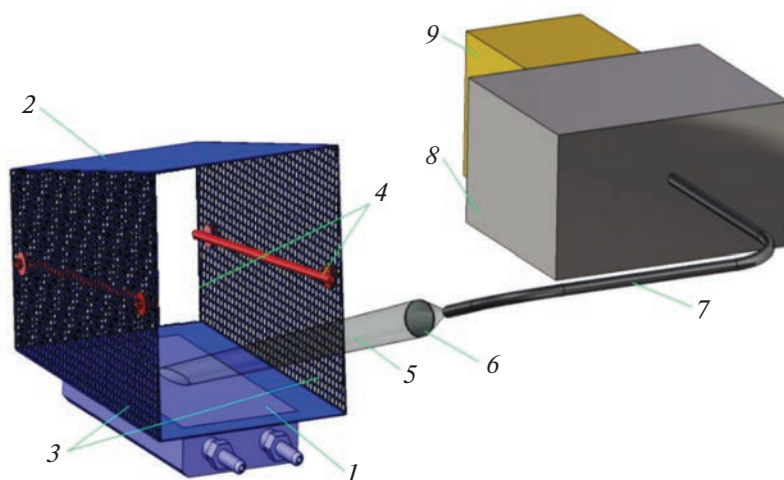


Рис. 3. Схема спектроскопического контроля процесса очистки, где: 1 — макет первого зеркала, 2 — макет второго зеркала, 3 — сетчатые электроды, 4 — аноды, 5 — хорда наблюдения, 6 — линзы, 7 — оптоволоконный кабель, 8 — монохроматор, 9 — камера.

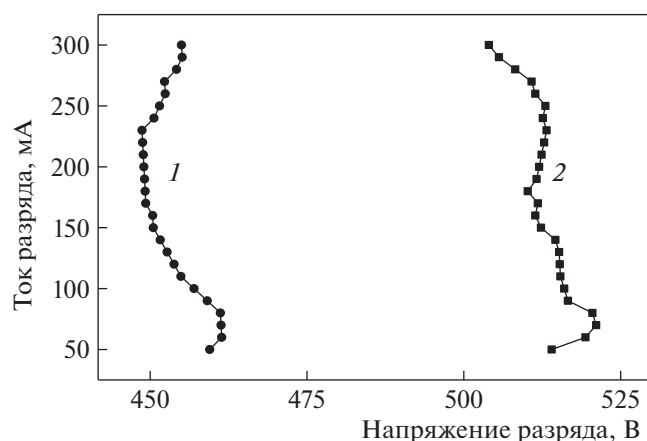


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика чистящего разряда ($P_{\text{He}} = 3$ Па): 1 – чистое Мо зеркало; 2 – то же зеркало, но с осажденным слоем Al.

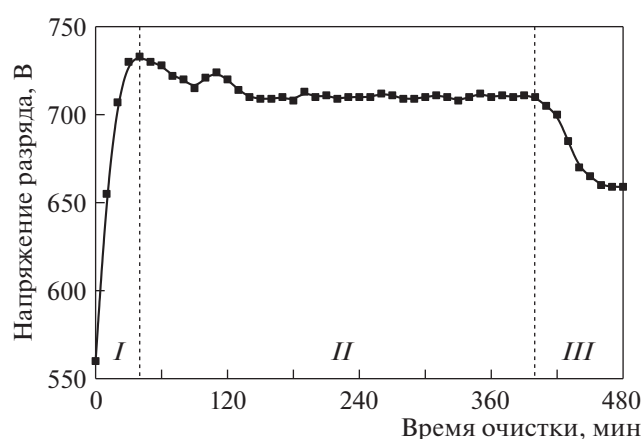


Рис. 5. Зависимость напряжения разряда от времени очистки Мо зеркала с двухслойным Al/Al₂O₃ загрязнением толщиной ≈ 30 нм при фиксированном токе разряда 300 мА.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Контроль очистки токопроводящих и тонких диэлектрических загрязнений

По существующим прогнозам [1–5] этот тип загрязнений в ИТЭР станет основным и будет образовываться за счет переосаждения на зеркалах продуктов эрозии стенок, обращенных к плазме: бериллия Be с первой стенки и вольфрама W с дивертора. Тонкие (~ 1 нм) оксидные и гидроксидные загрязнения могут формироваться за счет микротечей в рабочей камере.

На рис. 4 показаны вольт-амперные характеристики газового разряда, снятые при использовании He в качестве рабочего газа. Измерения проводились при давлении $P_{\text{He}} = 3$ Па. В качестве имитационного загрязнения использовался Al.

Отрицательное дифференциальное сопротивление на участке измеренной вольт-амперной характеристики свидетельствует о неустойчивости газового разряда при работе в режиме стабилизации напряжения, поэтому в системах очистки рассматриваемого типа предлагается использовать режим стабилизации тока разряда. Разница в напряжении разряда для загрязненного и чистого зеркала при токах 200–300 мА, характерных для режима очистки зеркал в ИТЭР, составляла примерно 70 В. Такое различие может быть использовано в качестве критерия удаления загрязнений для остановки процесса очистки.

Измерение зависимости напряжения разряда от времени очистки с одновременной регистрацией эмиссионного спектра плазмы газового разряда проводилось на макете разрядной ячейки диагностики “Спектроскопия водородных линий” для диагностического порта ИТЭР № 11. Материал макета зеркала – Мо, загрязнение – Al толщиной ≈ 30 нм со слоем естественного оксида

(~ 1 нм), рабочий газ – He. Зависимость напряжения разряда при фиксированном токе $I_d = 300$ мА от времени очистки представлена на рис. 5.

Согласно литературным данным, ориентировочные значения коэффициента ион-электронной эмиссии при бомбардировке поверхности ионами He с энергией ≈ 500 эВ для молибдена, алюминия и оксида алюминия соответственно составляют $\gamma_{\text{Mo}} \approx 0.3$ электронов/ион [18], $\gamma_{\text{Al}} \approx 0.05$ электронов/ион [19], $\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3} \approx 1$ электронов/ион [20]. Это соответствует наблюдаемой динамике изменения напряжения разряда: на начальном этапе (I) распыляется слой поверхностного оксида, обладающего наибольшим коэффициентом ион-электронной эмиссии, при этом напряжение разряда при токе 300 мА оказывается минимальным. По мере удаления оксидированного слоя и переосаждения Al с зеркала на элементы разрядной ячейки напряжение разряда увеличивается и стабилизируется на уровне ≈ 710 В (этап II), когда все распыляемые катодные поверхности оказываются покрыты алюминием, обладающим наименьшим коэффициентом электронной эмиссии. Наконец, на заключительной стадии очистки (III) распыляемые поверхности очищаются от Al, и напряжение разряда определяет коэффициент ион-электронной эмиссии Мо. Эмиссионный спектр чистящего разряда, измеренный на начальном этапе очистки, с отмеченными основными линиями интересующих элементов представлен на рис. 6.

На рис. 7 показан график изменения относительной интенсивности линий атомов Al I (394.4 нм) и Mo I (390.3 нм) в процессе очистки зеркала. Видно, что примерно через 450 мин после начала очистки интенсивность линии материала загрязнения падает практически до нуля, что

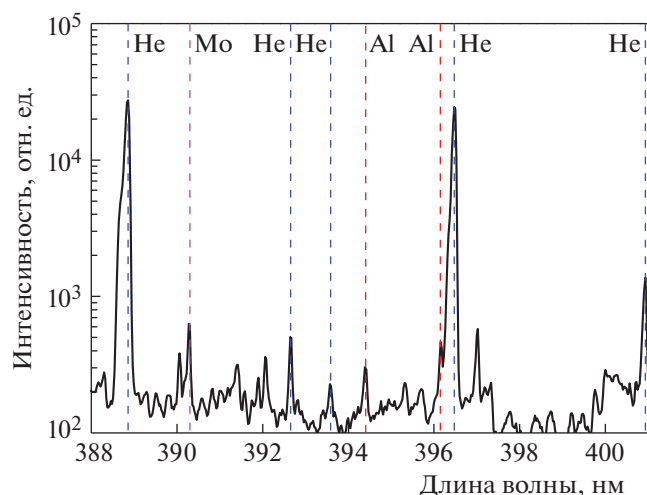


Рис. 6. Эмиссионный спектр чистящего разряда. Материал зеркала — Mo, загрязнение — Al/Al₂O₃. Рабочий газ — He.

говорит о его практически полном удалении с поверхности распыляемых элементов разрядной ячейки. При этом с самого начала очистки в разряде присутствуют атомы Mo, который является материалом основы зеркала и всех дополнительных катодных электродов, также подверженных распылению. Сравнение результатов измерений зависимости напряжения разряда и интенсивности линий Mo и Al от времени очистки показывает их хорошее согласие в вопросе определения момента окончания очистки, что подтверждает применимость обоих этих методов контроля для рассматриваемого типа плазменных систем очистки.

Отдельно после каждого этапа обработки макета зеркала проводилось измерение спектральной зависимости коэффициента отражения. Результаты представлены на рис. 8. Отметим, что пленки, обнаруженные на диагностических зеркалах действующих термоядерных установок, в отличие от использованной в эксперименте пленки Al, обладают пористой структурой и состоят из смеси чистого металла с его оксидами, и это приводит к существенному снижению коэффициента отражения [1]. Некоторое снижение зеркального отражения после очистки поверхности за счет бомбардировки ионами He⁺ объясняется формированием в приповерхностном слое гелиевых пузырей малого размера и релеевским рассеянием на них падающего излучения [21]. Для удаления этого слоя был проведен дополнительный цикл очистки с использованием разряда в аргоне Ar (длительность обработки 2 часа, давление 3 Па, ток разряда 300 мА, напряжение 500 В), позволивший полностью восстановить

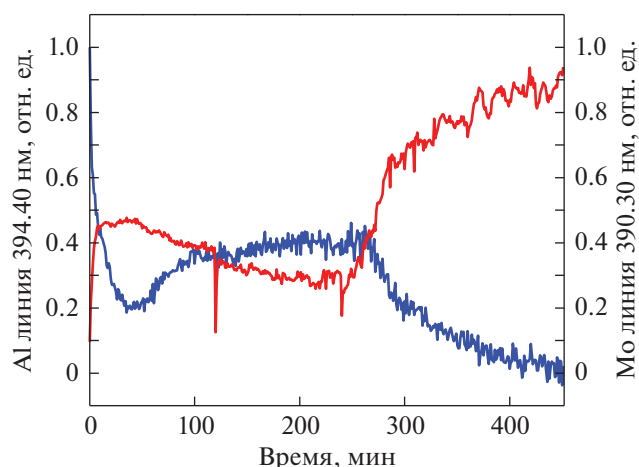


Рис. 7. Изменение относительной интенсивности линий Al I и Mo I в процессе очистки зеркала.

исходную спектральную зависимость коэффициента отражения.

Также отметим, что в рассматриваемых системах оптической диагностики предполагается использовать системы калибровки. С их помощью планируется периодически измерять спектральную зависимость интегрального коэффициента пропускания оптического тракта, что позволит корректно интерпретировать результаты очистки при наличии небольших отклонений коэффициента отражения от исходного значения [22].

Контроль очистки при наличии диэлектрических загрязнений

Диэлектрические загрязнения большой толщины могут сформироваться при воздействии ат-

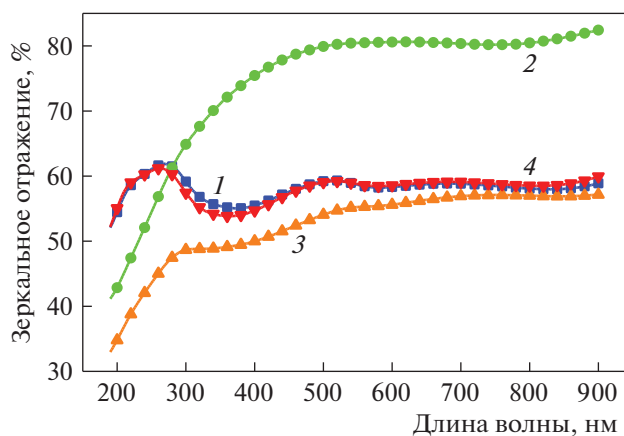


Рис. 8. Спектральный коэффициент отражения Mo зеркала: 1 — исходное состояние; 2 — с Al загрязнением; 3 — после очистки в He; 4 — после дополнительного цикла очистки в Ar.

мосферного воздуха или воды на отражающую поверхность Мо зеркала при повышенных температурах (более 200°C) во время аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией вакуумной камеры или системы водяного охлаждения внутривакуумных компонентов [4]. Особенность очистки зеркал от таких загрязнений в DC-разряде состоит в том, что диэлектрические пленки могут заряжаться под действием ионной бомбардировки, препятствуя дальнейшему поступлению ионов на распыляемую поверхность, что приводит к гашению разряда. Другим негативным фактором является электрический пробой, происходящий при превышении электрической прочности диэлектрического материала, сопровождающийся повышенным энерговыделением при формировании микродуговой привязки [12]. Если не предпринимать дополнительных мер, такие процессы могут привести к локальному расплавлению и разбрызгиванию материала загрязнения. Такая проблема актуальна только при наличии достаточно толстых (≥ 100 нм) пленок Ве и образовании на его поверхности диэлектрического загрязнения, что может реализоваться только при крупных авариях. На практике осаждение на отражающей поверхности зеркала бериллиевой пленки толщиной ~ 10 нм уже вызывает существенное ухудшение отражательной способности зеркала [23] и приводит к необходимости проведения очистки для восстановления работоспособности диагностической системы. Поэтому формирование толстых Ве загрязнений является маловероятным.

Для обеспечения работоспособности системы очистки в случае диэлектрических загрязнений может быть использован либо DC-режим с ограничением энерговыделения при микродуговых привязках за счет применения быстродействующей системы защиты и пониженной выходной емкости источника питания, либо PDC-режим при частоте однополярных отрицательных импульсов до 100 кГц. PDC-режим обеспечивает полное подавление микродуговых привязок и возможность распыления достаточно толстых диэлектрических загрязнений за счет нейтрализации положительного заряда, возникающего на распыляемой поверхности, плазменными электронами в промежутках между импульсами [12]. При соответствующем выборе частоты и скважности импульсов (при длительности импульсов менее времени накопления на диэлектрике заряда, достаточного для его пробоя) параметры газового разряда во время рабочего импульса схожи с DC-режимом распыления, поэтому можно предположить, что для PDC-режима применима DC-методика контроля очистки на основе измерения динамики изменения эффективного значения напряжения разряда.

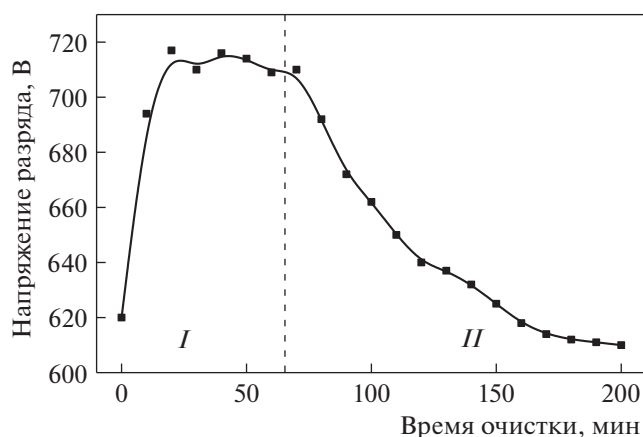


Рис. 9. Зависимость напряжения разряда от времени очистки Мо зеркала с гидроксидным загрязнением.

На рис. 9 представлен график изменения напряжения разряда при работе источника питания в импульсном режиме (частота 100 кГц, скважность 60%) при стабилизации тока разряда ($I_d = 300$ мА). Рабочий газ — Ag при давлении $P_{\text{Ag}} = 5$ Па. Материал макета зеркала — Мо. Имитационное загрязнение — слой оксидов Мо. В эксперименте использован макет разрядной ячейки для диагностического порта № 12. При очистке в импульсном среднечастотном разряде график зависимости напряжения разряда от времени очистки в целом повторяет график, приведенный на рис. 5. Отличие состоит в том, что после удаления слоя оксидов молибдена (этап I) сразу начинается распыление основного материала зеркала (Мо) на очищенных участках (этап II), поэтому для контроля этого процесса могут быть использованы те же алгоритмы. Это упрощает разработку системы автоматического управления процессом очистки поверхности в DC/PDC-разряде.

В DC-режиме очистки также можно контролировать наличие диэлектрических загрязнений на основе измерения частоты возникновения микродуговых привязок. Экспериментальное исследование такого режима контроля проводилось на полноразмерном макете Мо-зеркала, покрытого пленкой из Al_2O_3 толщиной ≈ 30 нм. Система быстрого дугогашения в использованном источнике питания обеспечила сохранение оптического качества зеркала при возникновении микродуговых привязок. Результаты измерения зависимости частоты возникновения микродуг от времени очистки при работе источника в режиме стабилизации постоянного тока и использовании Ag при давлении 2 Па в качестве рабочего газа показаны на рис. 10 (макет разрядной ячейки для диагностического порта № 12). Как видно из рис. 10, по мере уменьшения толщины диэлектрического загрязнения снижается частота возникно-

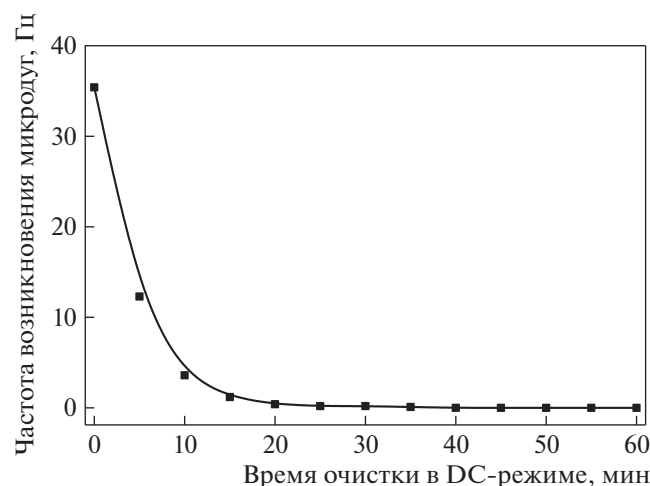


Рис. 10. Зависимость частоты микродуговых привязок от времени очистки в DC-режиме.

вения микродуговых привязок. После удаления слоя диэлектрика (≈ 20 мин) микродуги больше не возникали. Таким образом, по результатам измерения частоты возникновения микродуг в DC-режиме очистки можно определить наличие диэлектрических загрязнений на очищаемой поверхности. Во время микродуговой привязки происходит частичное испарение загрязнения, поэтому данный режим также может применяться для удаления относительно толстых многослойных или локальных загрязнений (например, капельных или кластерных микровключений) при условии, что температура плавления материала зеркала много больше температуры плавления материала загрязнения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что в системах очистки зеркал на основе разряда постоянного или импульсного тока путем измерения напряжения разряда в режиме реального времени удастся контролировать наличие как токопроводящих, так и диэлектрических загрязнений. Аналогичная динамика зависимости параметров разряда от типа загрязнения позволяет использовать те же алгоритмы работы в DC- и PDC-режимах, что упрощает разработку единой системы управления, обеспечивающей их реализацию в условиях ИТЭР и других термоядерных установок. Из-за высокой токсичности, для непосредственной проверки применимости этого метода для контроля очистки от бериллиевых загрязнений и их оксидов требуется проведение дополнительных исследований на площадке, аттестованной для работы с этим материалом. Кроме того, отметим необходимость более подробного исследова-

ния структуры пленок, формируемых на диагностических зеркалах термоядерных установок и ее влияния на эмиссионные характеристики загрязнений. Для решения этого вопроса в проектируемом в России токамаке TRT планируется использовать ряд специальных диагностических систем [24, 25].

Метод контроля по частоте возникновения микродуговых привязок в DC-режиме распыления может быть использован при наличии слоистых металл-диэлектрических загрязнений для определения момента переключения между DC- и PDC-режимами распыления, а также для контроля и удаления локальных диэлектрических загрязнений. Это может привести к повышению эффективности системы очистки за счет обеспечения максимальной скорости распыления токопроводящих загрязнений в DC-режиме.

Спектроскопический метод контроля процесса очистки также подтвердил свою работоспособность, однако его практическое применение требует повышения разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, а также проведения дополнительных исследований с использованием всех допустимых к использованию в системах очистки газов и всех ожидаемых типов загрязнений, что затруднительно на данном этапе разработки оптических диагностик ИТЭР.

Рассмотренные методы также могут быть использованы для контроля процесса финишной очистки подложек перед вакуумным напылением с использованием сетчатого полого катода в качестве распылительного устройства [26].

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 621 от 28.03.2022 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litovsky A., Voitsenya V.S., Costley A., Donné A.J.H. // Nuclear fusion. 2007. V. 47. Is. 8. P. 833–838. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/8/014>
2. Voitsenya V.S., Bardamid A.F., Donné A.J.H. // Open physics journal. 2016. V. 3. PHY-3-23. P. 23. <https://doi.org/10.2174/1874843001603010023>
3. Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Литиновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1103 <https://doi.org/10.31857/S0367292121110214>
4. Канустин Ю.В., Рогов А.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. В. 1. С. 57. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-57-65>
5. Pereira A., Martín P., Heredero R.L., Torquemada M.C., Rodrigo M.T., Gómez L.J., Vila R., Belenguer T., Medrano M., Piqueras J.J., Le Guern F., Pastor C., Rodriguez M.C., Quintana J.A., Carrasco R., Lapayese F., de la Peña A., Alén-Cordero C. // IEEE transactions on plasma science. 2020. V. 48. Is. 6. P. 1. <https://doi.org/10.1109/tps.2020.2967460>

6. Shigin P., Babinov N., De Temmerman G., Danisi A., Dmitriev A., Larsen J., Madsen R., Marot L., Moser L., Mukhin E., Kochergin M., Ortiz R., Razdobarin A., Reichle R., Pitts R., Samsonov D., Tsalas M., Udintsev V., Walsh M. // *Fusion engineering and design*. 2021. V. 164. 112162. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112162>
7. Ключников Л.А., Крупин В.А., Коробов К.В., Нургалеев М.Р., Немец А.Р., Днестровский А.Ю., Науменко Н.Н., Тугаринов С.Н., Серов С.В., Денщик Д.С. // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 1. С. 95.
8. Orlovskiy I., Alekseev A., Andreenko E., Asadulin G., Gorshkov A. // *Fusion engineering and design*. 2017. V. 123. P. 1011. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.057>
9. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Алексеев А.Г. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 168. <https://doi.org/10.7868/S0032816214060111>
10. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 3. С. 240.
11. Борисов А.М., Машкова Е.С. Физические основы ионно-лучевых технологий. I. Ионно-электронная эмиссия: уч. пособ. М.: Университетская книга. 2011. 142 с.
12. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера. 2010. 528 с. ISBN: 978-5-94836-222-9.
13. Marot L., Moser L., Steiner R., Erni W., Steinacher M., Dine S., Porosnicu C., Lungu C.P., Soni K., Antunes R., Le Guern F., Piqueras J., Meyer E. // *Fusion engineering and design*. 2021. V. 163. 112140. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112140>
14. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // Приборы и техника эксперимента. 2019. В. 1. С. 103–109. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010221>
15. Qu X.-P., Yang G., He P., Feng H. // *ECS journal of solid state science and technology*. 2017. V. 6. Is. 7. P. 470–476. <https://doi.org/10.1149/2.0351707jss>
16. URL: <http://apelvac.com/catalog/69/index.html>.
17. URL: <http://lomophotonica.ru/monohromator/>.
18. Ferron J., Alonso E.V., Baragiola R.A., Oliva-Florio A. // *Journal of Physics D: Applied physics*. 1981. V. 14. P. 1707–1719. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/14/9/018>
19. Smith P.C., Hu B., Ruzic D.N. // *J. Vac. Sci. Technol.* 1994. V. A12. P. 2692–2700. <https://doi.org/10.1116/1.579090>
20. Szapiro B., Rocca J.J., Prabhuram T. // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. Is. 358. <https://doi.org/10.1063/1.100401>
21. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко Ю.В. // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. В. 9. С. 1369–1375. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51216.37-21>
22. Gorshkov A.V., Alekseev A.G., Andreenko E.N., Asadulin G.M., Ageorges N., Kampf D., Naumenko N.N. // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 146. Part A. P. 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.061>
23. Moser L., Marot L., Steiner R., Newman M., Widdowson A., Ivanova D., Likonen J., Petersson P., Pintsuk G., Rubel M., Meyer E. // *Physica Scripta*. 2016. T. 167. 014069. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014069>
24. Безрамбеков Л.Б., Грунин А.В. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 12. С. 1244–1252. <https://doi.org/10.31857/S036729212260056X>
25. Раздобарин А.Г., Гаспарян Ю.М., Богачев Д.Л., Дмитриев А.М., Елец Д.И., Коваль А.Н., Курскиев Г.С., Мухин Е.Е., Булгадарян Д.Г., Крат С.А., Маренков Е.Д., Алексеенко И.В. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 12. С. 1216. <https://doi.org/10.31857/S0367292122100249>
26. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // Приборы и техника эксперимента. 2018. В. 2. С. 150. <https://doi.org/10.7868/S0032816218020064>