

04

Влияние материала коронирующего электрода на развитие поверхностного барьера разряда в воздухе

© И.В. Селивонин,¹ А.В. Лазукин,² И.А. Моралев¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „МЭИ“,
111250 Москва, Россия
e-mail: inock691@ya.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2025 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2025 г.

Принято к публикации 19 мая 2025 г.

Исследовано влияние материала коронирующего электрода на динамику характеристик поверхностного барьера разряда при длительной его работе. Проведено сравнение структуры и динамики мощности разряда при непрерывной работе в течение 200 min на электродах из меди, никеля, молибдена и алюминия. Разряд на электродах из меди и никеля имеет высокую степень неоднородности по длине электрода. В случае электродов из алюминия и молибдена разряд выглядит как область диффузного свечения. При длительной работе разряда на электродах из меди и молибдена наблюдается заметное увеличение мощности, рассеиваемой в разряде, тогда как в случае электродов из никеля и алюминия — ее уменьшение. Причиной различного поведения электродов при модификации в разряде является энергия связи оксидов и их электропроводность.

Ключевые слова: газовый разряд, барьерный разряд, модификация электродов, ресурс электродов.

DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61595.33-25

Введение

Поверхностный барьерный разряд (ПБР) — это разряд высокого давления, инициируемый в системе двух и более электродов, разделенных диэлектрическим барьером [1–3]. Такой тип разряда может быть использован для решения многочисленных технологических задач в области плазмохимии [4,5], обработки биологических объектов [6,7], плазменной аэродинамики [8,9], плазменной обработки поверхностей металлов [10,11] и полимеров [12–14].

Питание разряда обычно осуществляется переменным или импульсным напряжением. При изменении потенциала коронирующего электрода относительно поверхности барьера достигаются пороговые значения напряженности электрического поля у кромки электрода, что приводит к возникновению разряда. В процессе развития разряда происходит перенос заряда на поверхность барьера, а также его накопление в объеме вблизи кромки коронирующего электрода. Собственное электрическое поле этого заряда экранирует поле электрода, в результате чего развитие разряда прекращается [15]. Поскольку время релаксации заряда на поверхности большинства диэлектриков достаточно велико, разряд может вновь возникнуть только при дальнейшем увеличении потенциала электрода. Если потенциал на открытом электроде изменяется монотонно, то каждый раз при достижении определенной напряженности поля процесс развития разряда повторяется. В воздухе при нормальных условиях барьерный разряд существует в виде

отдельных микроразрядов, каждому из которых соответствует импульс тока длительностью порядка 10–100 ns и амплитудой менее 1 A [16,17].

Ресурс разрядных систем на основе ПБР в большинстве случаев связан с деградацией диэлектрического барьера [18–21]. Инициация разряда на диэлектриках из полимеров и других органических материалов приводит к интенсивному локальному плавлению и испарению материала, что, в конечном итоге, приводит к пробою барьера и перехода слаботочного разряда в искровую форму. При использовании диэлектрических барьера из материалов, устойчивых к воздействию разряда, ресурс системы определяется деградацией электродов [22–24].

Изменение структуры коронирующих кромок при горении разряда в воздухе исследовалось в [25,26]. В работе [27] было продемонстрировано, что изменение структуры кромки при работе разряда в кислородосодержащей среде определяется балансом конкурирующих процессов эрозионной очистки электрода от оксидов (в результате ионной бомбардировки в катодных пятнах микроразрядов) и образованием измененного поверхностного слоя на электроде (в результате температурного окисления, имплантации и диффузии ионов кислорода вглубь электрода, а также рециклиинга эродированного материала). При этом значительные изменения могут наблюдаться и в случае изготовления электродов из благородных металлов [23,24]. Модификация электродов может оказывать существенное влияние на различные характеристики разряда, например, рассеиваемую

в разряде мощность [23,25] и его структуру [25,28], характеристики и статистику индивидуальных микроразрядов [17]. Формирование оксидного слоя на коронирующей кромке может приводить к изменению формы тока импульса на начальной стадии развития микроразряда [29]. Это свидетельствует о существенных изменениях эмиссионных свойств электрода, связанных с накоплением заряда на поверхности оксидной пленки [30], изменением работы выхода электрона [31] и электрическим пробоем оксидного слоя при старте микроразряда [32].

Целью настоящей работы является изучение процессов деградации электродов в барьерных разрядах и устройствах на их основе: озонаторах, плазмохимических реакторах, системах обработки биологических образцов. Для этого предпринято исследование структуры и электрических характеристик разряда в воздухе на электродах из металлов, оксиды которых обладают существенно различающимися свойствами — устойчивостью оксида к катодному распылению и электропроводностью.

1. Экспериментальная установка и методы

В настоящей работе исследовался барьерный разряд в поверхностной асимметричной конфигурации „кромка-плоскость“. Принципиальная схема разрядной ячейки со схемой подключения приведена на рис. 1.

Разрядная ячейка состояла из открытого (коронирующего) и ответного (заземленного) электродов и разделяющего их диэлектрического барьера из алюмооксидной керамики марки ВК-94 толщиной 1 mm и диэлектрической проницаемостью около 10. Размах кромки элек-

Таблица 1. Стандартная энталпия образования оксидов выбранных материалов [33]

Оксид	$-\Delta H_{298.15}^0$, kJ/mol
CuO	162.1
Cu ₂ O	173.3
NiO	239.9
Ni ₂ O ₃	485.7
MoO ₂	589.9
MoO ₃	745.7
Al ₂ O ₃	1676.8

тродов составлял 30 mm. Для предотвращения развития разряда на обратной стороне барьера ответный электрод покрывался силиконовым компаундом. Для предотвращения значительного нагрева ячейка помещалась на радиатор. Максимальная температура электродной системы в процессе эксперимента не превышала 60 °C.

Все исследования проводились в синтетическом воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. Для контроля состава рабочей среды разрядная система устанавливалась в герметичную камеру, где после предварительной откачки организовывался слабый проток синтетического воздуха (смеси 20 % O₂ и 79 % N₂), подаваемого из баллона. Доля примесей, согласно спецификации смеси, не превышала 1 % (главным образом, аргон), содержание влаги не превышало 0.0005 % объемных долей. Проток газа необходим для предотвращения наработки больших концентраций озона, синтезируемого при работе разряда.

Коронирующие электроды были изготовлены из фольги толщиной 20 μ m. В качестве материала электродов использованы медь, никель, молибден и алюминий. Такой выбор материалов обусловлен существенно различными величинами энергии связи оксидов этих металлов (табл. 1), что предположительно должно быть определяющим фактором деградации электродов фактором. Наклейка электродов на барьер осуществлялась с помощью клея для золочения LaDoratura на основе этанола с контролируемой толщиной адгезивного подслоя 2–3 μ m. Это позволило добиться максимальной повторяемости геометрии электродов при изготовлении различных разрядных ячеек. Перед началом эксперимента качество электродных кромок контролировалось на предмет отсутствия деформаций и загрязнений, для чего был использован оптический стереомикроскоп МБС-10.

Разряд питался переменным синусоидальным напряжением с амплитудой 3.4 kV и частотой 110 kHz. При таких параметрах напряжения значения плотности энерговклада в разряд являются оклопороговыми для наступления контракции. Предположительно при таком режиме на исследуемой разрядной ячейке достигаются

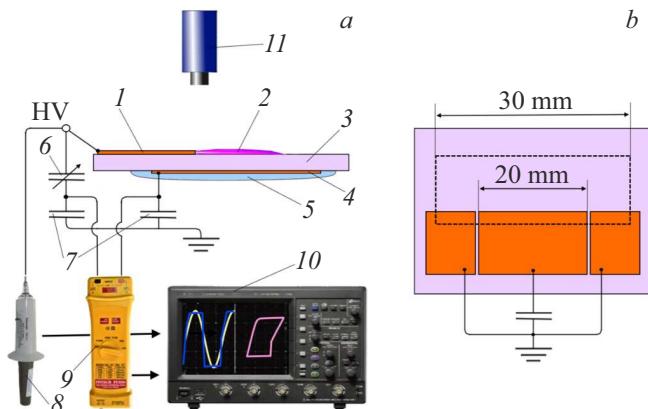


Рис. 1. *a* — изображение разрядной ячейки со схемой подключения: 1 — открытый (коронирующий) электрод, 2 — поверхностный барьерный разряд, 3 — керамический барьер, 4 — ответный электрод, 5 — компаунд, 6 — подстроечная емкость C_{comp} , 7 — измерительные емкости C_m , 8 — высоковольтный шуп, 9 — дифференциальный шуп, 10 — осциллограф, 11 — ПЗС-камера; *b* — изображение ответного электрода со схемой подключения.

самые быстрые темпы деградации для стримерного режима горения разряда. Высокое напряжение создавалось транзисторным источником питания, подключенным к резонансному контуру. Для подстройки напряжения в течение эксперимента частота возбуждения контура могла варьироваться в пределах 5 % вблизи резонанса.

В ходе эксперимента разряд работал непрерывно в течение 200 min. Такая длительность разрядной экспозиции обусловлена тем, что при используемых в работе параметрах питающего напряжения (~ 100 kHz; 3.4 kV) основные значимые изменения, связанные с деградацией материала электрода, ожидаются в течение первых 60–120 min работы разряда [25].

В процессе горения разряда с интервалами в 3–30 min выполнялась регистрация осциллографом питающего напряжения и заряда, перенесенного с электрода на поверхность диэлектрика. Измерения перенесенного заряда осуществлялись с центральной части ответного электрода шириной 20 mm, подключенной к земле через измерительную емкость $C_m = 2.2$ nF (керамический конденсатор КВИ-3). Использование только центрального участка разряда при анализе его электрических характеристик позволило исключить из рассмотрения его неоднородности на краях и углах электрода. Боковые части ответного электрода, не участвующие в измерениях заряда, подключались непосредственно к „земле“. Величина измерительной емкости существенно больше емкости разряда $C_m \gg C_{dis} \sim 1 - 10$ pF [34], а ширина разрывов в подстилающем электроде существенно меньше толщины барьера (и характерного масштаба пространственной организации микроразрядов при схожих условиях [17]), поэтому измерительная цепь не оказывает влияния на развитие разряда.

Для исключения из измерений емкостного тока через электродную систему применялся конденсаторный мост, в верхнем плече которого устанавливался подстроечный вакуумный конденсатор $C_{comp} = 3 - 50$ pF. Величина C_{comp} подбиралась при напряжениях, меньших напряжения начала разряда (порядка 0.6–0.8 kV) таким образом, чтобы разность напряжений на измерительных емкостях равнялась нулю. Такой способ измерений является модификацией метода регистрации электрических характеристик ВЧ разряда, представленного в литературе [35]. Измерение разности напряжений на измерительных емкостях C_m производилось с помощью дифференциального щупа Pintek DP-150 Pro (погрешность 5 %, полоса пропускания 150 MHz). Измерение высокого напряжения производилось высоковольтным щупом Tektronix P6015A (точность 5 %, полоса пропускания 75 MHz). Данные собирались с помощью осциллографа LeCroy HDO6104AR с полосой пропускания 1 GHz и вертикальным разрешением 12 bit. Данные усреднялись по 128 периодам питающего напряжения.

Расчет рассеиваемой в разряде мощности проводился методом вольт-кулоновых циклограмм (ВКХ) [34,36–38]. Энергию, рассеиваемую в разряде за один период напря-

жения, можно определить, оценив площадь ВКХ:

$$E_T = \int_{-U_a}^{+U_a} Q(t)dU(t) = C_m \int_{-U_a}^{+U_a} U_c(t)dU(t),$$

$$P = \frac{1}{T} E_T = f E_T,$$

где $U(t)$ и $U_c(t)$ — измеренные осциллограммы питающего напряжения и разности напряжений на измерительных емкостях C_m , f — частота питающего напряжения. Детальное обоснование применимости измерения мощности методом ВКХ для исследуемой конфигурации приведено в [39]. Ошибка полученных значений рассеиваемой мощности составляла около 10 %.

Кроме электрических характеристик разряда были получены фотографии разряда и кромки электрода. Микрофотографии получались с помощью ПЗС-камеры с применением оптического микроскопа МБС-10 с увеличением 16x. Изображения разряда снимались в видимом спектральном диапазоне с экспозицией 30 ms.

Результаты

В процессе горения разряда происходят изменения распределения яркости свечения разряда вдоль кромки, которые сопровождаются изменениями его электрических характеристик.

На рис. 2 приведена динамика мощности разряда на различных электродах. В начальный момент значения рассеиваемой мощности практически одинаковы и находятся на уровне 70 mW с 1 mm кромки. Далее в случае электродов из меди и молибдена происходит некоторое увеличение мощности за время около 60 min. В случае электродов из алюминия и никеля рассеиваемая в разряде мощность значительно падает до уровня 20 mW/mm.

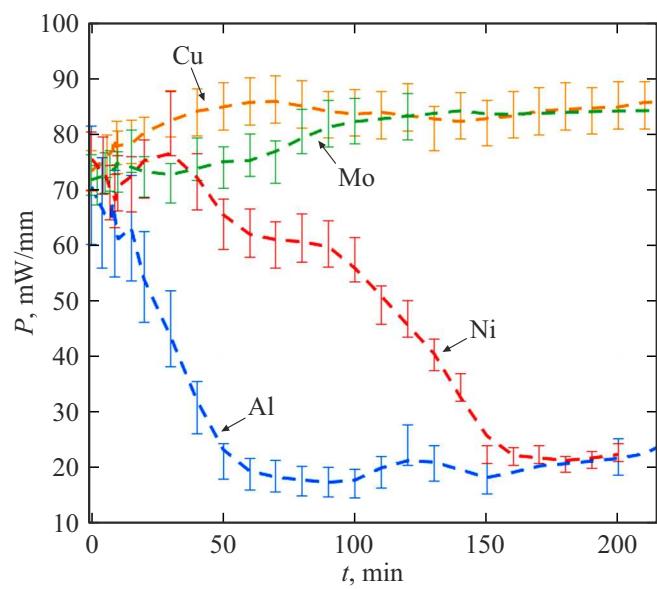


Рис. 2. Динамика мощности разряда на электродах из различных материалов.

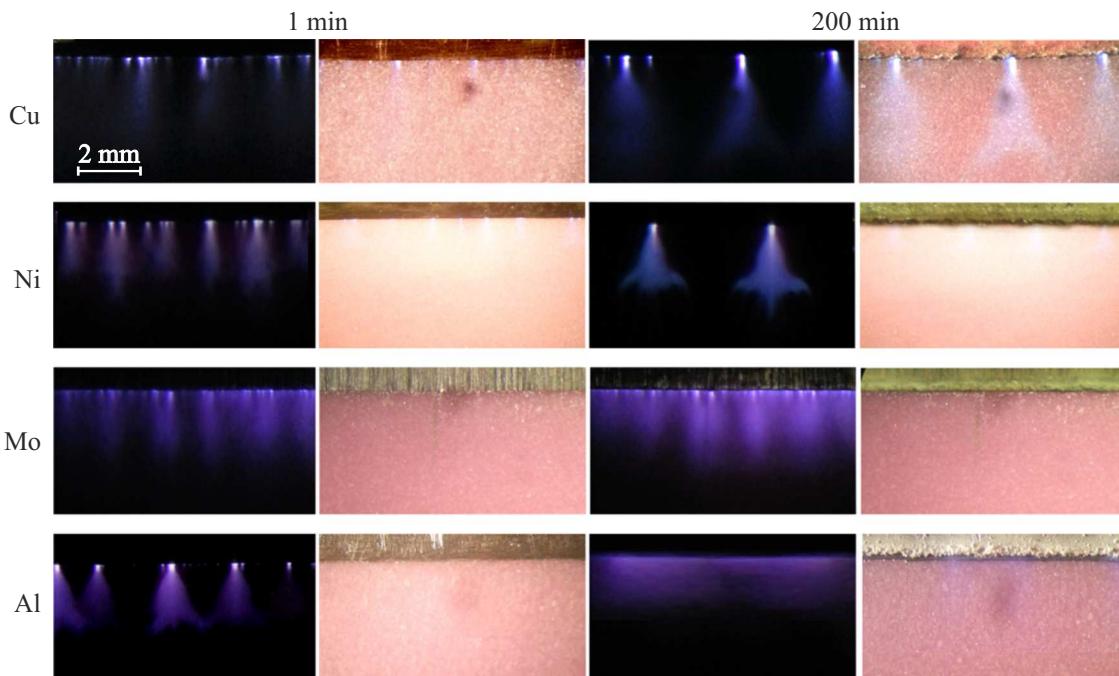


Рис. 3. Изображения разряда и электродов из различных материалов в первую минуту работы разряда и после непрерывной работы в течение 200 min. Экспозиция кадров 30 ms.

При этом изменения на алюминиевом электроде происходят значительно быстрее, чем на электроде из никеля.

Фотографии разряда на различных электродах показаны на рис. 3. Изначально на всех электродах разряд неоднороден вдоль кромки. Более яркие области чередуются с темными участками с пространственным периодом, приблизительно соответствующим длине разряда.

При непрерывном горении разряда в течение более 60 min разряд на электродах из меди и никеля стабилизируется и выглядит как набор отдельных разрядных факелов, распределенных вдоль электрода. При этом структура разряда на медном электроде далее заметно не меняется вплоть до окончания эксперимента, а в случае электрода из никеля наблюдается постепенное угасание отдельных филаментов с уменьшением „активной“ области электрода, с которой развивается разряд.

Морфология кромки на этих электродах претерпевает существенные изменения. В окрестности точек привязки разрядных факелов можно наблюдать образование кратеров субмиллиметровых размеров, окруженных продуктами переосаждения окислов.

На модифицированном алюминиевом электроде разряд выглядит как область диффузного свечения. При этом на коронирующей кромке можно наблюдать образование равномерного по размаху электрода темного слоя. Анализ состава и структуры этого слоя, проведенный ранее в работе [25], показал, что он формируется в результате замещения металла на кромке электрода оксидом Al_2O_3 .

На электроде из молибдена разряд практически не изменяется даже после его работы в течение 200 min. Вкупе с очень малыми изменениями рассеиваемой мощности, это позволяет предположить, что свойства молибденового электрода мало меняются в процессе его модификации в барьерном разряде.

Формирование оксидных образований на кромке электрода влияет на динамику микроразрядов, о чем свидетельствуют искажения формы ВКХ разряда (рис. 4). Развитию каждого микроразряда соответствует ступенька на ВКХ [16]. При осреднении ВКХ большого количества стохастически развивающихся микроразрядов происходит сглаживание кривых. Однако при синхронизации старта множества микроразрядов вдоль кромки ступенчатая структура ВКХ сохраняется. На рис. 4 видно, что такая синхронизация действительно наблюдается в положительном полупериоде питающего напряжения (когда коронирующий электрод — анод) при филаментированном режиме горения разряда, который реализуется на электродах из меди и никеля. Напротив, ВКХ разряда на молибденовых и алюминиевых электродах гладкие, что объясняется случайным моментом старта поверхностных стримеров с кромки электрода.

2. Обсуждение результатов

Наиболее заметным результатом модификации электрода является изменение однородности разряда вдоль кромки. Учет этого эффекта может быть крайне важным при использовании разряда для решения ряда при-

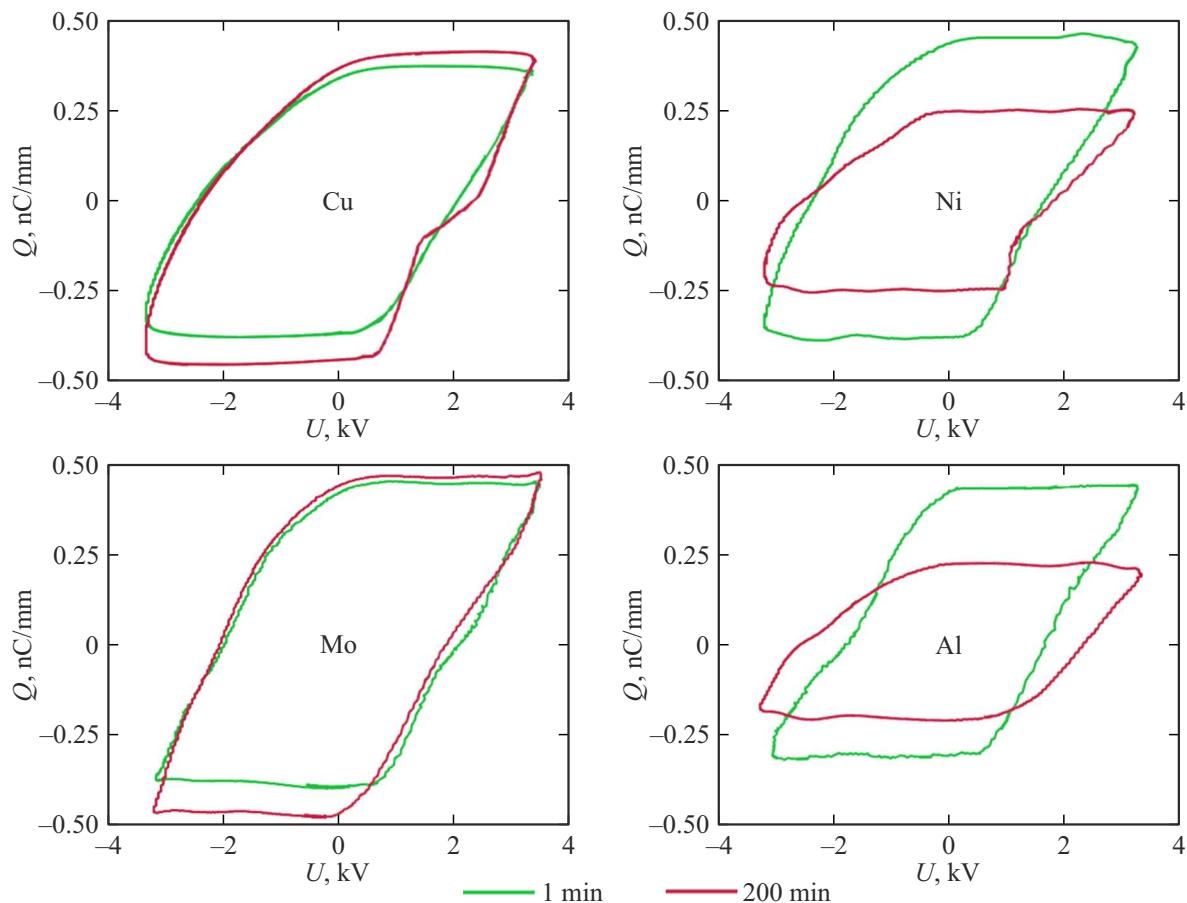


Рис. 4. Осредненная по 128 периодам питающего напряжения ВКХ разряда на электродах из различных материалов в момент зажигания разряда и после непрерывной работы разряда в течение 200 min.

кладных задач. Например, этот эффект имеет значение при плазменной обработке поверхностей или биологических объектов [40,41], где накладываются требования однородности обработки и предельной плотности энерговклада, или при управлении потоком с помощью актуаторов на основе ПБР, где неоднородности разряда могут приводить к индуцированию течений с трехмерной структурой [42].

Физическим механизмом, отвечающим за изменения в наблюдаемой структуре разряда, является изменение динамики одиночных микроразрядов, вызванное модификацией кромки. Детальное описание организации филаментированного режима со стабилизацией каналов на медном электроде и квазидиффузного режима на алюминииевом дается в работах [17,25]. На временных масштабах порядка длительности существования одного поколения микроразрядов (менее $1\ \mu\text{s}$) разряд выглядит как множество каналов, распределенных равномерно вдоль размаха кромки [17]. При этом мгновенная структура разряда не различается на электродах из различных материалов.

В случае медного и никелевого электродов образование локальных структур в виде кратеров с бортиком из

оксида приводит к сильной неоднородности напряженности электрического поля вдоль кромки и локализации привязок микроразрядов в области сильного поля. В результате этого микроразряды всегда стартуют с тех же участков электрода, и при осреднении на больших временах разряд выглядит как набор изолированных филаментов. Неоднородности напряженности возникают вследствие зарядки оксидного бортика при горении разряда, а также локальной деформации кромки в области кратеров, что может существенно изменить пороговое напряжение старта микроразрядов в этой области [43].

Алюминиевый электрод вдоль кромки покрывается слоем пористого оксида микронной толщины. При развитии микроразряда происходит локальная зарядка образовавшегося диэлектрического слоя, что приводит к экранировке поля в этой области. В результате следующие микроразряды стартуют с других областей электрода, а при больших временах наблюдения разряд практически однороден вдоль кромки.

Электрод из молибдена также покрывается однородным слоем, предположительно состоящим из оксида, но к заметным изменениям характеристик разряда модификация кромки не приводит.

Таблица 2. Свойства различных оксидов металлов открытых электродов

Оксид	$-\Delta H_{298.15}^0$, кJ/mol	Температура плавления, °C	Температура испарения, °C	R , $\Omega \cdot \text{м}$
CuO	162.1	1336	2000(разлагается)	Полупроводник $10^0 - 10^1$ (20 °C) $5 \cdot 10^{-2}$ (700 °C)
Cu ₂ O	173.3	1242	1800 (разлагается)	Диэлектрик $10^6 - 10^7$ (20 °C) 70 (130 °C)
NiO	239.9	1957 (разлагается)	—	Диэлектрик 1011 (20 °C) 101 (590 °C)
MoO ₂	589.5	1927	1977 (разлагается)	Проводник $2 \cdot 10^{-2}$ (20 °C) [48]
WO ₂	589.9	1570	1852 (разлагается)	Полупроводник 10^1 (20 °C) [48]
MoO ₃	745.7	795	1155	Диэлектрик 10^4 (20 °C) [49]
WO ³	843.2	1473 – 2130	1850 10^4 (20 °C) [50]	Диэлектрик
Al ₂ O ₃	1676.8	2046.5	2980	Диэлектрик 10^{14} (10 °C) $3 \cdot 10^{10}$ (400 °C)

Примечание: Данные, для которых не указан источник, взяты из [33].

В работе [27] было показано, что в отсутствие кислорода материал электрода практически не оказывает влияния на структуру разряда. Основными априорными гипотезами о причинах различного протекания процессов модификации электродов из различных материалов в кислородосодержащей среде являются устойчивость самого материала и его оксида к катодному распылению. В табл. 2 приведены некоторые свойства оксидов, которые предположительно могут оказывать влияние на модификацию кромки. Кроме использованных в работе материалов для сравнения приведены параметры оксидов вольфрама. В работе [28] было продемонстрировано, что после длительного горения на вольфрамовом электроде разряд гораздо более однороден, чем на медном.

Можно видеть, что среди использованных материалов наблюдается явная корреляция между степенью однородности разряда и динамикой мощности при тренировке электродов с величиной энталпии образования оксида.

При ионной бомбардировке поверхности электрода ион проникает на некоторую глубину и инициирует каскад соударений атомов в материале электрода, что может приводить к разрыву связи атомов на поверхности электрода и их распылению [44,45]. Если в случае ионных ионов их захват возможен лишь структурными дефектами поверхностного слоя мишени, то в случае хи-

мически активных ионов протекают химические реакции между ними и атомами мишени. При этом происходит образование измененного поверхностного слоя [46,47]. При длительном воздействии пучка достигается равновесная концентрация захваченных ионов, определяемая соотношением скорости имплантации ионов и их удаления за счет распыления, а также соотношением диффузионных потоков вглубь мишени и к ее поверхности. Наконец, образование измененного поверхностного слоя может сопровождаться его нагревом, если протекающие химические реакции являются экзотермическими. Если образуемое соединение обладает низкой энергией связи, то его молекулы и атомы могут покинуть поверхность мишени при ее нагреве в результате десорбции.

Свойства измененного поверхностного слоя отличаются от свойств материала мишени, и его образование приводит к изменению характеристик распыления. Распыление оксидного слоя с электрода можно рассматривать как распыление многокомпонентного вещества. Парциальные коэффициенты распыления каждого компонента различаются. Как правило, в многокомпонентной системе наиболее интенсивно распыляется самый легкий компонент. Таким образом, при распылении оксидных слоев в случае, когда металл является более тяжелым по отношению к кислороду, непосредственно на поверхности слоя оксид преобразуется в форму с

меньшей степенью окисления, если такая существует, либо происходит металлизация поверхности.

Плотность ионного тока на поверхность электрода для всех рассмотренных в работе материалов в момент первого зажигания разряда приблизительно одинакова, так как значения рассеиваемой в разряде мощности в начальный момент совпадают, и структура разряда сходная. Скорости имплантации ионов вглубь материала и омический нагрев электрода предположительно также различаются незначительно. Однако удаление кислорода с поверхностных областей существенно зависит от энергии связи атомов в оксидах, поэтому при ее увеличении баланс действующих механизмов будет смещаться от локальной эрозионной очистки к оксидированию поверхности.

Организация филаментированного режима горения разряда приводит к увеличению рассеиваемой мощности. Это объясняется локальным нагревом газа в области стабилизации канала. Разряд развивается в тепловой каверне, что приводит к увеличению его длины и соответственно заряжаемой площади поверхности барьера. Кроме того, в работе [17] было продемонстрировано, что стабилизация канала приводит к увеличению роли механизмов отлипания электронов от отрицательных ионов кислорода, что влечет за собой существенное увеличение длительности протекания токов в микроразрядах.

При недостаточной интенсивности распыления оксида с поверхности после организации филаментированного режима горения разряда может наблюдаться постепенное угасание каналов. Это приводит к снижению рассеиваемой мощности, что и наблюдается в случае никелевого электрода, а также было продемонстрировано для медного электрода при сниженных параметрах питающего напряжения (меньшей амплитуде и частоте) [17,39].

Поведение электрода из молибдена не укладывается в рамки описанных закономерностей. Его оксиды обладают высокой энергией связи, поэтому процессы модификации электрода должны быть схожи с процессами на алюминиевом электроде. Однако заметных изменений в структуре разряда с течением времени не наблюдается, а рассеиваемая в разряде мощность растет. Это можно объяснить аномально высокой для оксида величиной электрической проводимости MoO_2 [44]. При модификации электрода из молибдена эффекта памяти, связанного с зарядкой оксидного слоя, не возникает. На разряд оказывает влияние только изменение геометрии кромки (высота над поверхностью барьера и дефекты кромки электрода). При образовании и переосаждении оксидов на кромке электрода образуются дендритоподобные структуры [25]. Они работают как обострители поля, что приводит к снижению напряжения старта микроразрядов, и могут приводить к возникновению механизма взрывной электронной эмиссии, что дает увеличение тока микроразрядов [51]. В среднем это приводит к увеличению переносимого заряда и энерговклада в разряд.

Следует отметить, что на интенсивность катодного распыления влияют такие факторы, как энергия падающих ионов и частота следования микроразрядов. Поэтому изменение давления среды, а также амплитуды и частоты питающего напряжения может сдвигать баланс протекающих процессов в сторону распыления или оксидирования кромки.

Заключение

Исследовано влияние материала и состояния коронирующей кромки электрода в ПБР на структуру разряда и величину рассеиваемой в разряде мощности. Проведено сравнение структуры и динамики мощности разряда при непрерывной работе в течение 200 min в воздухе на электродах из меди, никеля, молибдена и алюминия.

При горении разряда электрод подвергается локальной ионной бомбардировке в катодных пятнах микроразрядов. При этом происходит имплантация ионов кислорода вглубь материала электрода, а также кинетическое и химическое катодное распыление поверхностных слоев. Первый механизм приводит к накоплению кислорода в поверхностных слоях, и его скорость слабо зависит от свойств материала электрода и его оксидов. Второй механизм, напротив, способствует очистке и металлизации электрода в местах привязок микроразрядов, причем скорость распыления сильно зависит от энергии связи оксида.

На основе полученных результатов можно сформулировать основные тенденции модификации электролов в барьере разряда и связанную с этим динамику характеристик разряда. При малой энергии связи оксидов (médный электрод) доминирует механизм локальной эрозионной очистки электрода в катодных пятнах микроразряда. Это приводит к образованию на кромке структуры в виде кратеров субмиллиметровых размеров, в центре которых на чистом от оксида участке формируется катодный слой последующих микроразрядов. В результате организуется стабильный филаментированный режим горения разряда с локальным нагревом газа в местах стабилизации каналов, что сопровождается заметным увеличением рассеиваемой в разряде мощности. При больших значениях энергии связи оксида материала электрода (никелевый электрод) также формируется структура в виде кратеров, но интенсивность эрозионной очистки оказывается недостаточной для того, чтобы удалять оксид с электрода, в результате чего с течением времени наблюдается угасание отдельных каналов. В этом случае после незначительного увеличения рассеиваемой мощности, соответствующего первичному изменению структуры разряда, наблюдается ее снижение при угасании каналов и снижении эффективной площади электрода. При больших значениях энергии связи оксида (алюминиевый и молибденовый электроды) заметной эрозионной очистки кромки от оксида не наблюдается, поэтому на электроде в результате имплантации ионов

создается измененный поверхностный слой. Если материал слоя непроводящий (оксид алюминия), то его поверхностная зарядка способствует пространственной и временной стохастизации микроразрядов и заметному снижению рассеиваемой в ПБР мощности. Если поверхностный слой обладает высокой проводимостью (оксид молибдена), то заметных изменений свойств разряда не наблюдается.

На интенсивность катодного распыления, кроме свойств оксида, влияет энергия приходящих на электрод ионов и интенсивность локального нагрева электрода, поэтому изменение давления среды, а также амплитуды и частоты питающего напряжения может сдвигать баланс протекающих процессов в сторону распыления или оксидирования кромки по сравнению с продемонстрированными в работе результатами. Поэтому описанные закономерности являются качественным сравнением поведения разряда при разных материалах электродов при схожих прочих условиях.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-79-00168.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli. J. PHYS IV Fr., **7**, 4 (1997). DOI: 10.1051/jp4:1997405
- [2] R. Brandenburg. Plasma Sources Sci. Technol., **26** (5), 053001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa6426
- [3] V.I. Gibalov, G.J. Pietsch. J. Phys. D. Appl. Phys., **33** (20), 2618 (2000). DOI: 10.1088/0022-3727/33/20/315
- [4] N. Bednar, J. Matović, G. Stojanović. J. Electrostat., **71**, 1068 (2013). DOI: 10.1016/j.elstat.2013.10.010
- [5] J. Mikeš, S. Pekárek, I. Soukup. J. Appl. Phys., **120**, 173301 (2016). DOI: 10.1063/1.4966603
- [6] Y. Park, S.K. Oh, J. Oh, D.C. Seok, S.B. Kim, S.J. Yoo, M.-J. Lee, C.Y. Park. Plasma Process Polym., **15** (2), 1 (2016). DOI: 10.1002/ppap.201600056
- [7] A.V. Lazukin, Y.A. Serdyukov, I.A. Moralev, I.V. Selivonin, S.A. Krivov. J. Phys. Conf. Ser., **1147** (1), 012124 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012124
- [8] E.J. Moreau. Phys. D. Appl. Phys., **40** (3), 605 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/S01
- [9] T.C. Corke, E.J. Jumper, M.L. Post, D. Orlov, T.E. McLaughlin. 40th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib.(c), (2002). DOI: 10.2514/6.2002-350
- [10] L. Bónová, A. Zahoranová, D. Kováčik, M. Zahoran, M. Mičušík, M. Černák. Appl. Surf. Sci., **331**, 79 (2015). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.01.030
- [11] D. Minzari, P. Møller, P. Kingshott, L.H. Christensen, R. Ambat. Corros. Sci., **50** (5), 1321 (2008). DOI: 10.1016/j.corsci.2008.01.023
- [12] G. Borcia, C.A. Anderson, N.M.D. Brown. Plasma Sources Sci. Technol., **12** (3), 335 (2003). DOI: 10.1088/0963-0252/12/3/306
- [13] K.G. Donohoe, T.J. Wydeven. Appl. Polym. Sci., **23** (9), 2591 (1979). DOI: 10.1002/app.1979.070230905
- [14] D.J. Upadhyay, N.Y. Cui, C.A. Anderson, N.M.D. Brown. Appl. Surf. Sci., **229**, 352 (2004). DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.02.012
- [15] R. Brandenburg. Plasma Sources Sci. Technol., **26** (5), 053001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa6426
- [16] T. Hoder, P. Synek, J. Vorac. Plasma Sources Sci. Technol., **28** (10), 105016 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab4b91
- [17] I.V. Selivonin, I.A. Moralev. Plasma Sources Sci. Technol., **30** (3), 035005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6595/abe0a1
- [18] M. Šimor, J. Ráhel', P. Vojtek, M. Černák, A. Brablec. Appl. Phys. Lett., **81** (15), 2716 (2002). DOI: 10.1063/1.1513185
- [19] J. Pons, L. Oukacine, E. Moreau, J.M. Tatibouët. IEEE Trans. Plasma Sci., **36** (4), 1342 (2008). DOI: 10.1109/TPS.2008.926856
- [20] A.R.H. Rigit, K.C. La, D.B.L. Bong. Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater., **569** (2009). DOI: 10.1109/ICPADM.2009.5252365
- [21] R.E. Hanson, J. Kimelman, N.M. Houser, P. Lavoie. 51st AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo. 2013 (January), **1** (2013). DOI: 10.2514/6.2013-397
- [22] W. Changquan, H. Xiangning. Appl. Surf. Sci., **253** (2), 926 (2006). DOI: 10.1016/J.APSUSC.2006.01.032
- [23] E. Pescini, M.G. De Giorgi, L. Franciosi, A. Taurino, M.C. Martucci, Ph. Lavoie. 54th AIAA Aerosp. Sci. Meet. (January), 1 (2016). DOI: 10.2514/6.2016-0196
- [24] I. Selivonin, A. Lazukin, I. Moralev, S. Krivov, I.J. Roslyakov. Phys. Conf. Ser., **1394**, 012027 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1394/1/012027
- [25] I.V.Selivonin, A.V. Lazukin, I.A. Moralev, S.A. Krivov. Plasma Sources Sci. Technol., **27** (8), 085003 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aacbfb5
- [26] A.V. Lazukin, I.V. Selivonin, I.A. Moralev, S.A. Krivov. J. Phys. Conf. Ser., **927**, 012028 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/927/1/012028
- [27] I. Selivonin, I. Moralev. J. Phys. Conf. Ser., **2100**, 012014 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2100/1/012014
- [28] N.M. Houser, L. Gimeno, R.E. Hanson, T. Goldhawk, T. Simpson, P. Lavoie. Sensors Actuators A. Phys., **201**, 101 (2013). DOI: 10.1016/j.sna.2013.06.005
- [29] И.В. Селивонин, С.Е. Кувардин, И.А. Моралев. Вестник ОИВТ РАН, **11**, 4 (2023).
- [30] X. Yao, N. Jiang, B. Peng, Y. Xia, N. Lu, K. Shang, J. Li, Y. Wu. Vacuum, **166**, 114 (2019). DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.04.035
- [31] M. Černák, T. Hosokawa, S. Kobayashi, T.J. Kaneda. Appl. Phys., **83** (11), 5678 (1998). DOI: 10.1063/1.367422
- [32] P.P. Budenstein, P.J. Hayes. J. Appl. Phys., **38** (7), 2837 (1967). DOI: 10.1063/1.1710011
- [33] Г.В. Самсонов. *Физико-химические свойства окислов* (Металлургия, М., 1978)
- [34] J. Kriegseis, B. Möller, S. Grundmann, C. Tropea. J. Electrostat., **69** (4), 302 (2011). DOI: 10.1016/j.elstat.2011.04.007
- [35] М.А. Аронов, В.П. Ларионов (ред.) *Электрическая изоляция высокочастотных установок высокого напряжения* (АО „Знак“, М., 1994)

- [36] J. Kriegseis, S. Grundmann, C. Tropea. *J. Appl. Phys.*, **110**, 013305 (2011). DOI: 10.1063/1.3603030
- [37] Н.Ю. Лысов. Электричество, **10**, 28 (2016).
- [38] М.М. Пашин, Н.Ю. Лысов. Электричество, **12**, 21 (2011).
- [39] И.В. Селивонин. Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики поверхностного барьера разряда (Канд. дисс. 1.3.9., М., 2022), 162 с.
- [40] F. Massines, G. Gouda. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **31** (24), 3411 (1998). DOI: 10.1088/0022-3727/31/24/003
- [41] H.E. Wagner, R. Brandenburg, K.V. Kozlov, A. Sonnenfeld, P. Michel, J.F. Behnke. *Vacuum*, **71** (3 SPEC.), 417 (2003). DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00765-0
- [42] I. Moralev, V. Bityurin, A. Firsov, V. Sherbakova, I. Selivonin, M. Ustinov. *Proc IMechE Part G J. Aerosp. Eng.*, **234** (1), 42 (2020). DOI: 10.1177/0954410018796988
- [43] V.R. Soloviev, I.V. Selivonin, I.A. Moralev. *Phys. Plasmas*, **24**, 103528 (2017). DOI: 10.1063/1.5001136
- [44] Р. Бериш. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой* (Мир, М., 1984), в. I.
- [45] Н.В. Плещивцев. *Катодное распыление* (Атомиздат, М., 1968)
- [46] Р. Бериш. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой* (Мир, М., 1986), в. II.
- [47] S. Izman, M.R. Abdul-Kadir, M. Anwar, E.M. Nazim, R. Rosliza, A. Shah, M.A. Hassan. *Titanium Alloys — Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications* (IntechOpen, 2012), DOI: 10.5772/1928
- [48] L. Ben-Dor, Y. Shimon. *Mater. Res. Bull.*, **9** (6), 499 (1974). DOI: 10.1016/0025-5408(74)90120-2
- [49] R.B. Bennie, C. Joel, A.N.P. Raj, A.J. Antony, S.I. Pillai. *J. Solid State Electrochem.*, **27** (1), 271 (2023). DOI: 10.1007/s10008-022-05319-3
- [50] С.А. Козюхин, С.А. Бедин, П.Г. Рудаковская, О.С. Иванова, В.К. Иванов. *ФТП*, **52** (7), 745 (2018). DOI: 10.21883/ftp.2018.07.46046.8719
- [51] Г.А. Месяц. *УФН*, **165** (6), 601 (1995).