

На правах рукописи



СЕЛИВОНИН Игорь Витальевич

**МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДОВ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ
И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАЗРЯД**

Специальность 1.3.9 – «Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

Руководитель: **Моралев Иван Александрович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией плазменной аэродинамики и стимулированного горения, Объединенный Институт Высоких Температур РАН (ОИВТ РАН), г. Москва

Официальные оппоненты: **Александров Николай Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой прикладной физики, Московский физикотехнический институт (МФТИ), г.Долгопрудный

Петров Алексей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"), г. Троицк

Защита состоится “__” _____ 2022 г. в “__” час. на заседании диссертационного совета № Д 002.110.02 в ОИВТ РАН по адресу: 125412 Москва, Ижорская ул., 13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Объединённого института высоких температур РАН www.jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/
Отзыв на автореферат просьба присылать по адресу: г. Москва, 125412, ул. Ижорская д.13, строение 2, диссертационный совет ОИВТ РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н

Васильев М.М.

© Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Объектом исследований в данной работе является диэлектрический барьерный разряд в поверхностной конфигурации (пДБР). Такой разряд инициируется в системе, состоящей из двух электродов, разделенных диэлектриком. Разряд реализуется вдоль поверхности диэлектрика, формируясь на тонкой кромке одного из электродов, который называется открытым либо коронирующим. Поверхностный барьерный разряд используется в ряде приложений, например, для управления потоком газа, синтезе озона, обработке поверхностей и т.д.

ПДБР в воздухе атмосферного давления реализуется в виде областей нестационарного тлеющего разряда при падающем потенциале коронирующего электрода (в дальнейшем будем называть это отрицательной полярностью питающего напряжения) и стримеров при возрастании потенциала на нем (положительная полярность). Считается, что процессы образования и гибели отдельных микрозарядов, а значит и параметры разрядных систем, в первую очередь определяются геометрией электродов, свойствами диэлектрического барьера и параметрами возбуждающего разряд напряжения.

Зачастую в прикладных задачах предполагается длительная непрерывная работа электродной системы. В процессе горения разряда происходит разрушение и окисление открытых участков электродов, плавление и распыление диэлектрика. Изменения состояния и формы электродной кромки играют особенно важную роль, так как эти параметры отвечают за конфигурацию поля в области его максимума, а также за эмиссию электронов с катода. Это, в свою очередь, приводит к значительным изменениям параметров пДБР: режима горения, рассеиваемой в разряде мощности, характеристик отдельных микрозарядов и их статистики.

Несмотря на существование работ, посвященных изучению процессов деградации диэлектриков, систематических исследований модификации электродов в поверхностном барьерном разряде не проводилось. Не исследовано влияние состояния кромки на разрядные процессы и интегральные характеристики разряда. Существующие в данной области работы носят случайный характер, и, как правило, привязаны к тому или иному узкому приложению пДБР.

Актуальность таких исследований обусловлена необходимостью учитывать процессы модификации электродных кромок при длительном горении разряда, особенно при разработке устройств с повышенными требованиями к неизменности характеристик разряда. Исследование процессов модификации электродов позволяет выработать рекомендации по

выбору материалов при проектировании устройств на основе ДБР, а также прогнозировать качественные и количественные изменения параметров разряда, а, следовательно, и характеристик устройств на его основе.

Цель работы

Целью данной работы является исследование механизмов модификации электродных кромок в поверхностном барьерном разряде и обратного влияния структуры кромки на газоразрядные процессы. В ходе исследования решались следующие задачи:

- 1) Исследовать процессы модификации электродных кромок из различных материалов
- 2) Изучить влияние процессов модификации кромки на характеристики разряда: рассеиваемую в разряде мощность, режимы горения, самоорганизацию микрозарядов.. Исследовать влияние структуры кромки на характеристики и статистику отдельных микрозарядов.
- 3) Исследовать влияние деградации плазмообразующего электрода на структуру ионного ветра, генерируемого пДБР.
- 4) Сформулировать рекомендации по выбору материала электрода для использования ДБР-разряда в рамках аэродинамических приложений.

Используемые в работе методы

Диэлектрический барьерный разряд инициировался в поверхностной конфигурации кромка-плоскость. Разряд питался синусоидальным напряжением в диапазоне частот 10-100 кГц и амплитуд до 12 кВ. Рабочим газом выступал воздух (синтетический или комнатный) в диапазоне давлений 0.1 – 10 бар. В качестве диэлектрического барьера использовались пластины из алундовой керамики. Предполагается, что этот материал за счет термической стойкости и устойчивости к катодному распылению практически не подвержен эрозии в барьерном разряде. В качестве коронирующих электродов использовались алюминиевые и медные фольги, а также напыленные слои меди, алюминия и платины.

Во время горения разряда велась регистрация его электрических характеристик (осциллограмм тока и перенесенного заряда). Измерения тока проводились с использованием распределенного безындуктивного токового шунта, изготовленного специально для таких измерений. Созданная схема измерений разрядного тока позволяла регистрировать токовые импульсы микроамперных амплитуд с фронтами до 1 нс. Измерения перенесенного заряда проводились с применением метода емкостных зондов, чувствительными элементами которых выступали изолированные секции ответного электрода. Осциллограммы перенесенного в системе заряда позволили с применением метода вольт-кулонных

циклограмм получить значения рассеиваемой в разряде мощности и емкости разрядной системы.

Кроме регистрации электрических характеристик в процессе горения разряда также велась его оптическая регистрация. Для исследования режима горения разряда использовались цветные и монохромные ССD камеры с частотой непрерывной съемки 60 Гц. Для регистрации светимости отдельных микрозарядов использовалась ICCD камера с минимальной экспозицией в 2 нс.

Во время пауз в работе электродных системы исследовалась топология электродных кромок. Для этого использовался лазерный конфокальный микроскоп с разрешением 0.5 мкм по высоте и 1 мкм в плоскости, а также сканирующий электронный микроскоп с разрешением 1.5 нм. Кроме получения картин рельефа кромок выполнялся элементный EDAX анализ продуктов эрозии и материала электрода.

Исследование структуры генерируемых пДБР течений проводилось с применением метода трассерной визуализации PIV (particle image velocimetry). PIV-система позволяла получить двумерные поля скорости потока с пространственным разрешением порядка 100 мкм, а также вычислить интегральную тягу, генерируемую ДБР актуатором.

Для исследования статистики микрозарядов на разных электродах в среде MATLAB был создан автоматический обработчик осциллограмм тока. При реализации алгоритма обработчика осуществлялось детектирование отдельных импульсов на осциллограмме тока и их анализ. В результате вычислялось среднее количество импульсов за период питающего напряжения, среднее значение заряда, переносимого импульсом, и характерная форма импульса.

Научная новизна

1. Изучено влияние материала и состояния кромки коронирующего электрода на режим горения разряда. Показано, что на материалах с различными свойствами оксида реализуются различные режимы горения разряда: активное блуждание микрозарядных привязок в случае алюминиевого электрода и квазистационарный режим горения разряда на медном электроде. Модификация электродов приводит к дополнительной стабилизации микрозарядных факелов на медном электроде и стохастизации микрозарядов на алюминиевом.

2. Впервые проведено детальное изучение топологии коронирующих кромок в поверхностном барьерном разряде. Показано, что алюминиевый электрод покрывается однородным оксидным слоем, который пробивается при формировании микрозарядов, о чем свидетельствует наличие множества кратеров размерами 100-300 нм. На медном электроде наблюдается образование кратеров размерами 50-100 мкм, соответствующих долгоживущим

микроразрядным привязкам. Независимо от материала электрода наблюдается переосаждение продуктов эрозии и их накопление на участках электрода, с которых не происходит старта микроразрядов.

3. Обнаружено, что модификация электрода является важным фактором, определяющим динамику мощности, рассеиваемой в разряде при длительной экспозиции электрода. Показано, что при частоте питающего напряжения 100 кГц в случае алюминиевого электрода наблюдается падение мощности до 25-30% от начального уровня, в то время как на медном электроде, напротив, наблюдается ее рост на 30-40 %. Для электродов из обоих материалов такие изменения происходят в течение первых 2 часов горения разряда. Динамика мощности определяется конкурирующими процессами накопления продуктов эрозии на электроде и эрозионной очисткой кромки. Соотношение скорости этих процессов, в свою очередь, определяется стримерной частотой разряда, определяемой амплитудой и частотой приложенного напряжения.

4. Впервые проведено детальное исследование влияния состояния кромки на статистику, параметры и форму токовых импульсов в пДБР. После модификации электрода разрядом наблюдается значительное уменьшение среднего значения переносимого импульсом заряда. Этот эффект характерен как для меди, так и для алюминия. Для меди количество импульсов за полупериод также уменьшается; для алюминия, наоборот, наблюдается увеличение их количества. Кроме того, обнаружено, что на медном электроде в отрицательном полупериоде часть перенесенного заряда (~ 30%) связана с непрерывной составляющей тока, предположительно, образованной перекрытием длинных импульсов с временем спада тока порядка 100 нс.

Показано, что на переднем фронте импульсов в отрицательном полупериоде на новых электродах наблюдается пик длительностью менее 2 нс, предположительно, ассоциированный с эмиссией электронов при разрушении оксидной пленки на поверхности электрода. В случае меди в процессе горения разряда этот пик исчезает, что объясняется эрозионной очисткой электрода в точке привязки микроразряда.

5. Впервые было проведено исследование влияния модификации электродов плазменных актуаторов на структуру генерируемого ими ионного ветра. Показано, что изменение режима горения разряда влияет на трехмерную структуру индуцируемого течения. В случае с алюминиевым электродом изначально трехмерная структура течения, состоящая из отдельных струй и системы продольных вихрей, при модификации электрода преобразуется в однородную двумерную (плоская струя вдоль поверхности барьера). В случае медного электрода поле течения, напротив, становится еще более неоднородным.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты исследования влияния процессов модификации электродов в поверхностном барьерном разряде имеют как прикладное, так и фундаментальное значение.

Результаты исследований воздействия разряда на кромки коронирующих электродов представляют интерес для физики приэлектродных процессов и физики взаимодействия плазмы с поверхностью. Изменения статистики и параметров микроразрядов свидетельствуют об изменении механизмов электронной эмиссии и процессов зарядки и накопления заряда на поверхности. Результаты исследования таких эффектов позволят лучше понять особенности развития поверхностного барьерного разряда и представляют интерес для физики газового разряда и физики плазмы.

С практической точки зрения, полученные результаты могут быть использованы при разработке газоразрядных устройств на основе пДБР, в том числе плазменных актуаторов для управления внешним потоком и промышленных озонаторов. Эти данные позволят оценивать и прогнозировать скорость и особенности деградации электрода, что, в свою очередь, позволит точнее оценивать срок службы таких устройств.

Достоверность и надежность результатов исследований

Научная достоверность и надежность результатов исследования обеспечивается использованием проверенных диагностических методик, применяемых для измерения и контроля различных параметров плазмы барьерного разряда при исследованиях в рамках иных приложений. Доработка классических методов диагностики в целях адаптации к описанным в работе экспериментам проводилась с апробацией и оценкой робастности таких методов.

Достоверность полученных экспериментальных результатов косвенно может быть проконтролирована их сравнением с результатами экспериментальных и теоретических исследований, полученными другими научными коллективами в смежных исследованиях.

Личный вклад автора

Автором были созданы экспериментальные стенды для исследования поверхностного барьерного разряда в конфигурации кромка-плоскость в воздухе при напряжениях 1-12 кВ и частотах 10-100 кГц питающего напряжения, диапазоне давлений от 0.1 до 10 бар, скоростью внешнего потока до единиц м/с в разрядной области. Были созданы разрядные ячейки, доработаны или созданы измерительные схемы и методики, требуемые для измерения интересующих параметров разряда.

Автором были выполнены экспериментальные работы по исследованию модификации электродов в пДБР в неподвижном воздухе и в потоке. Выполнены измерения интегральных электрических характеристик разряда и проведена оптическая регистрация разряда при

коротких и длительных экспозициях. Был разработан и применен алгоритм обработки токовых осциллограмм, в результате чего были получены данные по характеристикам и статистике токовых импульсов в пДБР. Проведены исследования трехмерных гидродинамических течений, генерируемых актуаторами с алюминиевыми и медными электродами с различным состоянием коронирующих кромок.

Постановка задач, обсуждение результатов и формулировка выводов проводилась совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. Моралевым И.А. и сотрудником НИУ МЭИ Лазукиным А.В. Исследования топологии электродных кромок с помощью конфокального лазерного микроскопа, а также изготовление и подготовка электродных систем с напыленными электродами проводились Лазукиным А.В. Исследования топологии кромок с помощью сканирующего электронного микроскопа и выполнение элементного анализа продуктов эрозии проводилось сотрудником ОИВТ РАН Вальяно Г.Е.

Объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 161 странице текста, включая 90 рисунков и 3 таблицы. Список литературы насчитывает 173 наименования.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- 1) Механизм самоорганизации диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления на медных и алюминиевых электродах, связь модификации электрода в процессе горения разряда и режима горения разряда.
- 2) Данные о динамике средних электрических характеристик разряда в процессе модификации электродной кромки, статистике и характеристиках индивидуальных токовых импульсов, соответствующих микрозарядам.
- 3) Механизм формирования трехмерной структуры ионного ветра, генерируемого пДБР для электродов из различных материалов
- 4) Метод измерения и обработки осциллограмм токовых импульсов, а также получения характеристик одиночных микрозарядов и их статистики.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи, приведены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** представлен обзор работ, посвященных физике диэлектрического барьерного разряда. Описываются основные физические процессы в поверхностном барьерном разряде, процессы развития разряда при положительной и отрицательной полярности коронирующего электрода, его электрические характеристики. Описывается механизм генерации ионного ветра в ДБР.

Детально описывается развитие отдельных микрозарядов в коронном и барьерном разрядах на электродах с модифицированными поверхностями. Описывается влияние различных параметров плазмообразующего газа и электродной системы на характеристики микрозарядов

Приводится обзор механизмов эрозии электродных систем в слаботочных разрядах. Описывается влияние этих процессов на характеристики коронного и барьерного разрядов.

Обзор литературы завершается выводами по текущему состоянию исследований деградации электродов в пДБР, а также развитию разряда в условиях реальных (покрытых оксидным слоем) электродов и постановкой задачи.

Во **второй главе** описываются экспериментальные установки и диагностическая аппаратура, а также методики измерения и вычисления различных параметров разряда. Описывается технология изготовления и подготовки электродных систем, а также схема питания разряда. Описывается газовая система, необходимая для контроля состава и давления воздуха. Приводятся описания схем оптической регистрации разряда. Описываются методики измерения переносимого заряда и тока в ДБР, вычисления рассеиваемой в нем мощности, алгоритмы анализа характеристик токовых импульсов. Приводится описание средств измерения и регистрации электрических сигналов. Приводится описание средств диагностики течения, индуцированного пДБР.

Барьерный разряд инициировался в конфигурации кромка плоскость, показанной на рисунке 1. Коронирующие электроды, представляющие собой алюминиевые и медные фольги толщиной 20 мкм, наклеивались на поверхность диэлектрического барьера с толщиной адгезивного подслоя 2-4 мкм. Также исследовались конфигурации с напыленными электродами из алюминия, меди и платины толщиной 0.5-1 мкм. Качество коронирующей кромки перед проведением эксперимента контролировалось визуально на отсутствие острий,

заломов и неоднородностей по высоте с применением оптического стереомикроскопа МБС-10, позволяющего регистрировать дефекты размерами порядка 10 мкм. Ответный электрод был заключен в диэлектрический компаунд с целью предотвращения развития разряда на обратной стороне диэлектрика. В качестве диэлектрика использовалась алундовая керамика марки ВК-94 с $\epsilon = 10.4$ толщиной 1 мм.

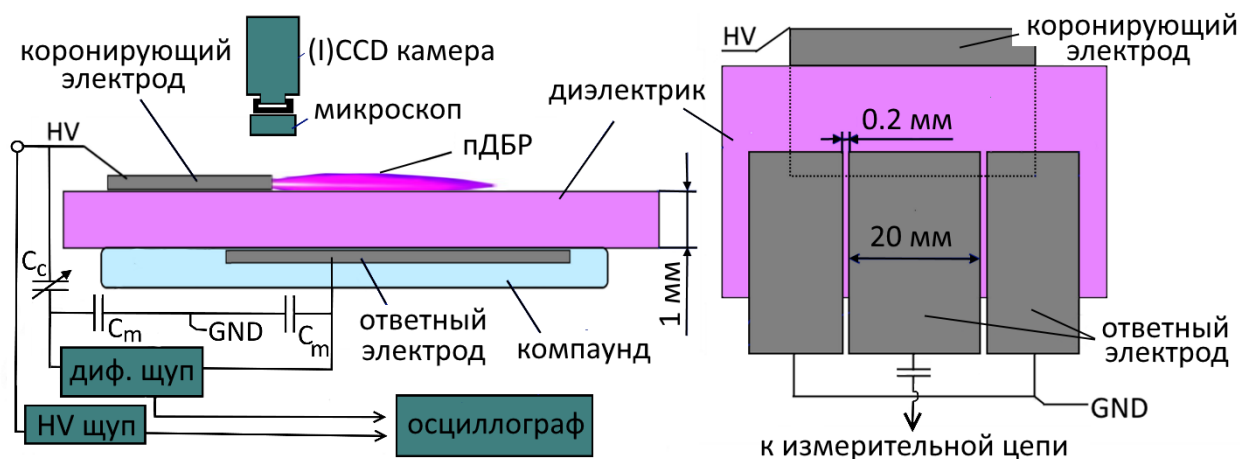


Рис.1. Разрядная ячейка и схема измерений

Питание разряда осуществлялось с помощью высокочастотного инвертора с подключенным на выходе резонансным контуром. Такой источник высокого напряжения обеспечивал питание электродной системы в диапазоне частот 10-100 кГц и амплитуде питающего напряжения 1-12 кВ.

С целью предотвращения значительного нагрева электродная система помещалась на радиатор. При исследовании эрозии электродов в неподвижном воздухе эксперимент проводился в комнатном воздухе. При исследованиях контракции разряда электродная система помещалась в газовую камеру, позволяющую создавать внутри давление от 0.1 до 10 бар. При исследовании эрозии электродов в потоке, электродная система помещалась в малую аэродинамическую трубу, которая позволяла создавать внутри скорость потока до 20 м/с.

Измерения электрических характеристик разряда проводились с использованием самодельных малоиндуктивных токовых шунтов и емкостных датчиков. Регистрация электрических сигналов велась с помощью осциллографа Tektronix DPO7054c с полосой пропускания 500 МГц, частотой дискретизации до 20 Гвыб. в секунду и длиной записи до 50М точек.

Оптическая регистрация разряда велась с применением CCD камеры, а также с применением ICCD-камеры Andor iStar DH720 с длительностью экспозиции до 2 нс.

Синхронизация ICCD камеры могла осуществляться как по фазе питающего напряжения, так и по сигналу с токового шунта.

Структура генерируемых ДБР течений изучалась с помощью системы трассерной визуализации PIV (particle image velocimetry). Система позволяла получать двумерные поля скорости течения с пространственным разрешением порядка 100 мкм и погрешностью на уровне 0.1 м/с.

В **третьей главе** представлены результаты исследования процессов модификации кромки коронирующего разряда в поверхностном барьерном разряде.

Приводятся результаты исследований морфологии разрядных кромок из алюминия, меди и платины. Демонстрируется, что различная динамика окисления и эрозионной очистки алюминиевого и медного электродов приводит к разной морфологии электродной кромки.

В случае **алюминиевого** электрода происходит образование равномерного по толщине диэлектрического слоя у кромки электрода, толщина которого постепенно растет со временем и достигает нескольких микрон при воздействии разряда длительностью 4 часа. На поверхности диэлектрического слоя можно наблюдать множество кратеров диаметром 100–400 нм, которые, предположительно, образуются за счёт разрушения диэлектрического слоя в результате старта одиночных микрозарядов (рис. 2).

В случае **медного** электрода на электродной кромке формируется неоднородная вдоль кромки структура, состоящая из «глухих» участков, покрытых толстым слоем переосажденных окислов, и кратеров размерами в десятки мкм с очищенным материалом электрода в центре (рис. 3).

Такие различия морфологии кромок обусловлены различной стойкостью оксидов металлов к распылению в катодном слое микрозарядов, стартующих с металлического катода. Используя данные энтальпии образования оксидов, можем оценить энергию их связи $E_{св}(\text{CuO}) = 1.68$ эВ/молекулу, $E_{св}(\text{Cu}_2\text{O}) = 1.80$ эВ/молекулу и $E_{св}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 17.42$ эВ/молекулу. Таким образом, при сопоставимых энергиях бомбардирующих электрод ионов, распыление оксида происходит значительно менее интенсивно, чем медного. В подтверждение гипотезы об эрозионной очистке для кратера на медной кромке можно привести оценку нормальной плотности тока в факеле микрозаряда. Такая оценка дает значение $j = 2 \cdot 10^6$ А·м⁻². Это значение можно сравнить с приведенной в литературе оценкой нормальной плотности тока для атмосферных условий $j_{est} = 1.4 \cdot 10^6$ А·м⁻², что хорошо соответствует значению, полученному в эксперименте. Принимая во внимание точность оценки, можно предположить, что удаление оксидов происходит в области катодного пятна во время существования микрозаряда.

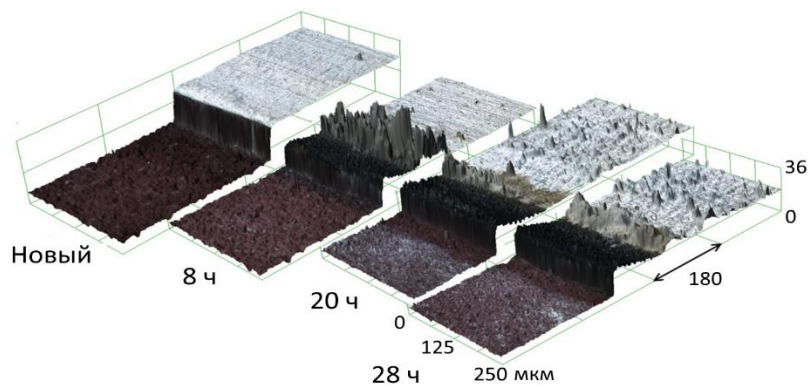
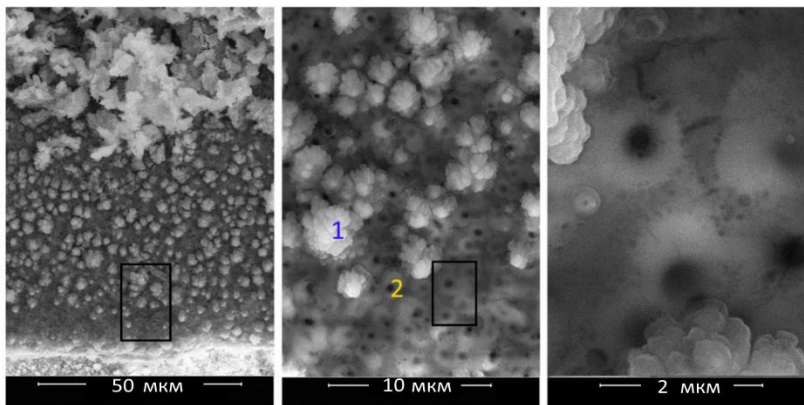


Рис.2. Рельеф алюминиевой кромки при различных временах непрерывной работы электрода (сверху) и SEM изображения после 20 часов ее непрерывной работы (снизу)



Al электрод, At, %		
зона #	1	2
Al	41.2	56.2
O	55.6	43.08
Si	1	0.7
Fe	1	
S	1.35	

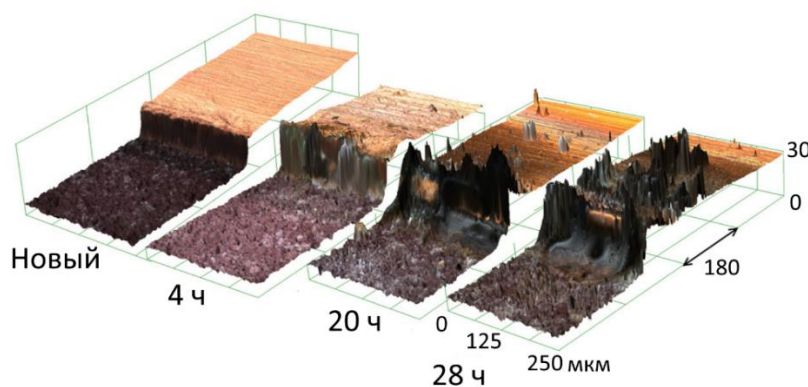
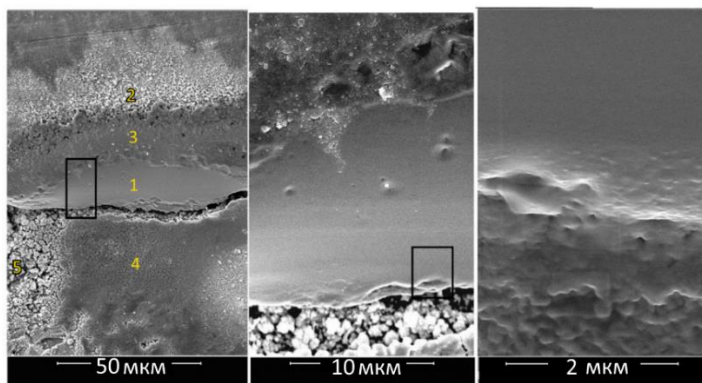


Рис.3. Рельеф медной кромки при различных временах непрерывной работы электрода (сверху) и SEM изображения после 20 часов ее непрерывной работы (снизу)



Cu электрод, At, %					
зона #	1	2	3	4	5
Cu	89.24	50.2	55.6	54.8	35.09
O	7.55	49.8	44.4	44.7	48.6
Al	3.21			0.33	12.22
Si					3.02
Ca					1.03

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что баланс между реакциями окисления и эрозионной очистки оказывается сдвинут в сторону окисления в случае алюминиевого электрода и в сторону эрозионной очистки в случае медного.

Также в главе 3 приводятся описания различных режимов горения разряда на алюминиевом и медном электродах и эволюции режима горения при длительной работе электродной системы. Показано, что изменение морфологии электродной кромки оказывает существенное влияние на самоорганизацию разряда.

В случае **алюминиевого** электрода при образовании оксидной пленки на поверхности электрода происходит стохастизация микроразрядов, из-за чего на интегральных снимках разряд выглядит как диффузная область свечения. Блуждание микроразрядов на кромке электрода обусловлено зарядкой поверхности окисла и аналогично процессам, наблюдаемым в коронном разряде на оксидированных электродах. Такие изменения режима горения разряда сопровождаются спадом рассеиваемой в разряде мощности на 25–30% (рис. 4).

В случае **медного** электрода при образовании крупных кратеров на кромке происходит привязка к ним микроразрядов и стабилизация разрядных факелов. При достаточно высокой стримерной частоте такие изменения режима горения разряда приводят к существенному росту вложенной в разряд средней мощности (рис. 4). Увеличение может достигать 40% от начального значения. Следует отметить, что при низкой стримерной частоте происходит закисление электрода и падение средней мощности разряда.

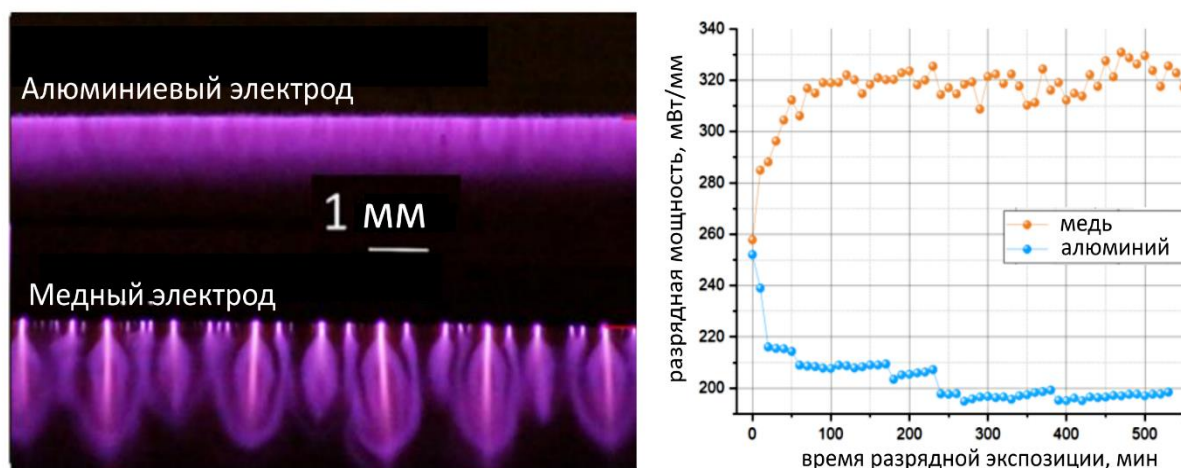


Рис. 4. Изображения разряда на медном и алюминиевом электродах после длительной их работы (слева) и динамика рассеиваемой в разряде мощности (справа)

Кроме того, демонстрируется, что в инертном газе в условиях отсутствия процессов окисления и химического травления кромки после очистки электродов от пассивационной оксидной пленки устанавливается одинаковый режим горения разряда на кромках из Al и Cu.

Если электроды достаточно тонкие (порядка единиц микрон, что характерно для напылений), возможно окисление электрода на всю толщину (рис. 5). Такие изменения сопровождаются изменениями холодной емкости электродной системы, обусловленными изменением площади перекрытия электродов ячейки (рис. 6).

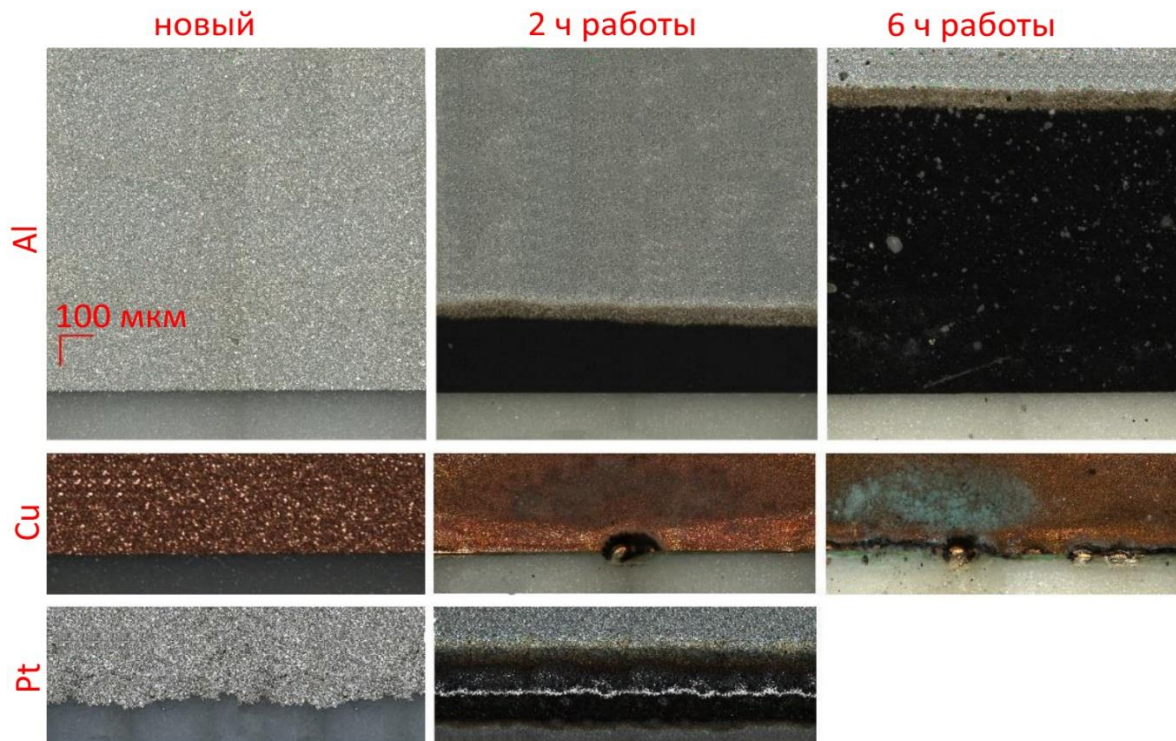


Рис. 5. Изображения кромок алюминиевого, медного и платинового электрода при различных длительностях их работы. Толщина электродов 0.5 - 1 мкм

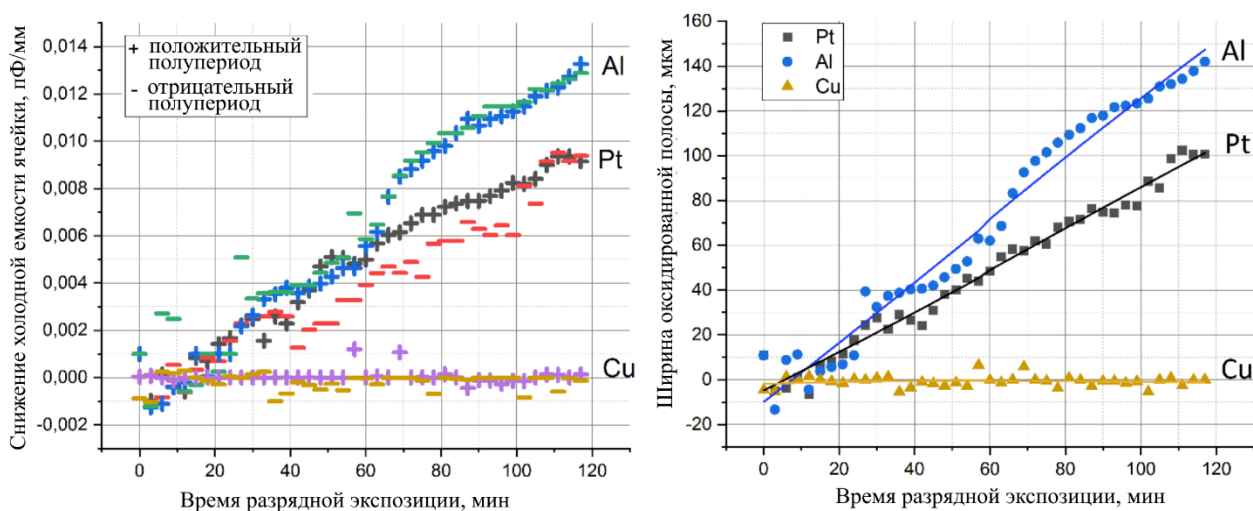


Рис. 6. Уменьшение емкости напыленной электродной системы (слева) и ширина окисленной области напыленных электродов (справа)

В четвертой главе представлены результаты исследований параметров и статистики токовых импульсов микроразрядов в случае алюминиевых и медных электродов и их

изменения при эрозии кромок. В связи с необходимостью разрешать отдельные импульсы, данная часть работы выполнена при частоте питающего напряжения 10 кГц. Гистограммы перенесенного единичным импульсом заряда в различные фазы питающего напряжения показаны на рисунке 7.

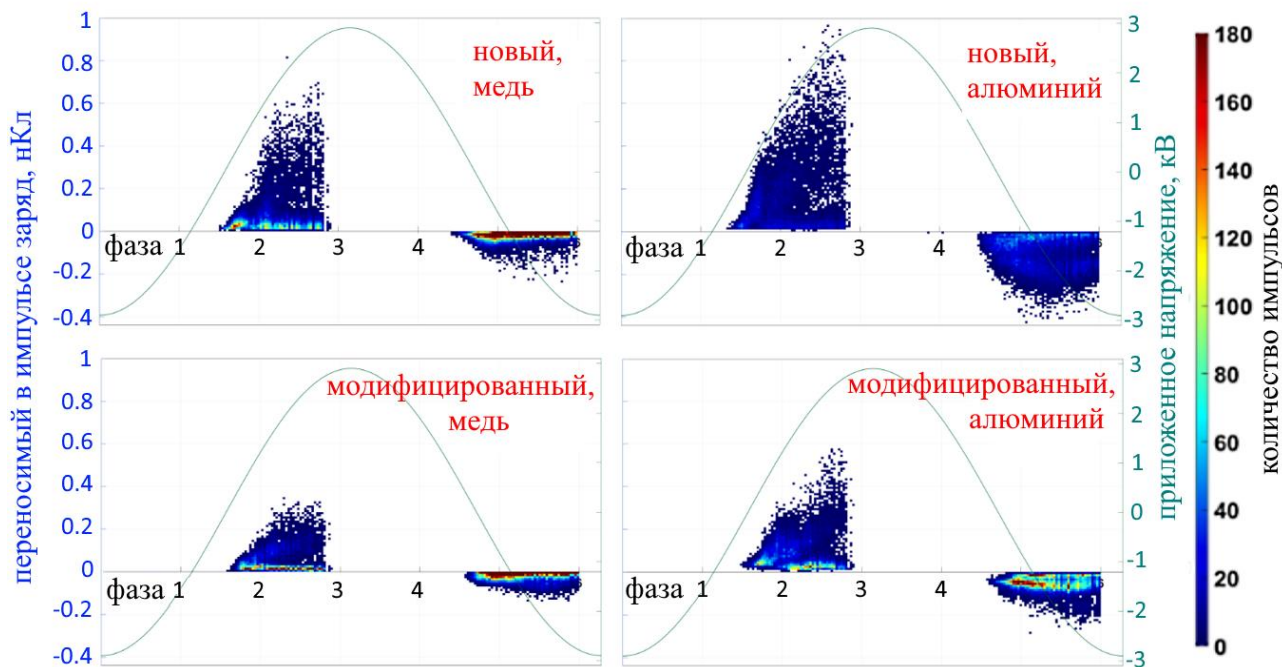


Рис.7. Q-U гистограмма для разряда на разных электродах. Цветом показано количество импульсов с перенесенным зарядом в пределах интервала в 0.01 нКл

Демонстрируется, что хотя общий вид гистограммы перенесенного микроразрядами заряда схож для всех электродов, наблюдаются некоторые особенности, обусловленные различной динамикой развития разряда на электродах из различных материалов. Можно видеть, что, начиная с момента зажигания в каждом полупериоде питающего напряжения, средний заряд растет как в отрицательном, так и в положительном полупериоде, причем в положительном полупериоде средний заряд выше.

Обнаружено существование двух групп микроразрядов для каждой фазы питающего напряжения, которые соответствуют двум максимумам на гистограммах. Наблюдаемые импульсы первой группы соответствуют перенесенному заряду до 30-50 пКл, при этом их параметры слабо зависят от фазы питающего напряжения. Напротив, во второй группе импульсов амплитуда перенесенного заряда возрастает в активной части полупериода с увеличением фазы приложенного напряжения. Можно предположить, что разные группы микроразрядов соответствуют зарядке разных областей диэлектрической поверхности. Импульсы тока 2-ой группы соответствуют микроразрядам, заряжающим дальние области диэлектрика. Их длина увеличивается с увеличением фазы, что приводит к большей

покрываемой ими площади барьера и большему переносимому заряду. Между тем, некоторые области диэлектрика рядом с электродом между проходящими микроразрядами остаются незаряженными. Предполагается, что импульсы 1 группы соответствуют коротким МР, заряжающим поверхность диэлектрика в этих областях. Следует также отметить, что переносимый заряд для этих импульсов может быть ниже значения, соответствующего критерию образования стримера Рэтера-Мика ($\sim 10^8$ электронов = 16 пКл). В качестве альтернативных гипотез, описывающих формирование микроразрядов первой группы, можно привести релаксацию заряженных доменов на диэлектрике или объемные процессы в области у коронирующего электрода.

По гистограммам можно определить характерные статистические параметры импульсов в рамках одного полупериода. Эти характеристики представлены в таблице 1.

<i>Материал электрода</i>	Q^+ , нС	Q^- , нС	N^+	N^-	$\langle q \rangle^+$, нС	$\langle q \rangle^-$, нС	D , %
Al, новый	+0.86	0.84	5	8.7	+0.168	0.096	1.18
Al, модифицированный	+0.62	0.66	7.5	12.7	+0.082	0.052	-3.13
Cu, новый	+0.52	0.34	7.2	16.8	+0.072	0.022	20.93
Cu, модифицированный	+0.30	-0.22	6.7	14.5	+0.044	0.015	15.38

Таб. 1. Осредненные параметры токовых импульсов для всех электродов. Q^\pm – суммарный перенесенный за \pm полупериод заряд; N^\pm – количество импульсов за \pm полупериод; $\langle q \rangle^\pm$ – среднее значение заряда, переносимого \pm микроразрядом, D – расхождение в интегралах перенесенных в импульсах зарядов противоположных знаков

Анализируя представленные осредненные данные, можно сформулировать следующие закономерности в изменении характеристик:

- Среднее значение переносимого микроразрядом заряда, как и интегральное за полупериод значение, в случае медного электрода, оказывается существенно меньше, чем в случае алюминиевого. Это справедливо как для положительного, так и для отрицательного полупериода.
- При длительном горении разряда наблюдается значительное уменьшение среднего заряда, переносимым импульсом. Этот эффект характерен как для меди, так и для алюминия. Однако, если в случае меди число импульсов на полупериод также уменьшается, то в случае алюминия, наоборот, наблюдается увеличение их количества.
- В случае медного электрода наблюдается заметная разница величин перенесенного в импульсах заряда в положительном и отрицательном полупериоде питающего напряжения.

Перенесенный в отрицательных импульсах заряд оказывается приблизительно на 30% меньше. Несоответствие величин перенесенного заряда при различных полярностях медного электрода. Это явление связано с тем, что часть перенесенного в отрицательный полупериод заряда ($\sim 30\%$) переносится непрерывной составляющей тока, предположительно образованной перекрытием импульсов длительностью порядка 100 нс (см. рис. 8).

Существование таких длинных импульсов подтверждается анализом формы среднего импульса в различных фазах питающего напряжения. Разряд вблизи кромки происходит под значительным углом к поверхности, следуя линиям максимального усиления лавин. В этом случае на длительность импульса будет влиять кинетика отрицательных ионов. Организация квазифиламентированного режима горения разряда на медном электроде приводит к тому, что наработка отрицательных ионов происходит интенсивнее. Отрицательные ионы при отлипании от них электронов выступают как дополнительный источник электронов, компенсируя их прилипание и предотвращая преждевременное прекращение импульса. Как правило, отлипание может быть причиной слабого увеличения длительности импульса, наблюдаемого для всех исследованных материалов, однако для отрицательного фронта импульса на медном электроде эффект оказывается значительно усилен стабилизацией МР. Подтверждением данной гипотезы является оценка динамики отрицательных ионов в разрядной области. Снижение концентрации электронов вследствие прилипания к молекулам кислорода в e раз происходит за $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ с. Согласно литературным данным, скорость дрейфа электронов в воздухе при этих условиях составляет $\sim 6 \cdot 10^6$ см/с. В этом случае накопление отрицательного ионного заряда будет происходить на расстоянии около 1.8 мм от кромки электрода. Скорость дрейфа отрицательных ионов для O_2^- в этих условиях имеет верхнюю оценку $6 \cdot 10^4$ см/с, что дает максимальное смещение ионного заряда в 1 мм за время между отрицательными импульсами $\tau_p = 1.7$ мкс. Таким образом, отрицательные ионы не успевают покинуть разрядную область во время паузы между микрозарядами последовательных поколений и происходит кумулятивное увеличение их концентрации в течение активной фазы. Предполагается, что именно компенсация прилипания в области факела микрозаряда приводит как к стабилизации положения микрозарядов на медном электроде, так и к возникновению длинных токовых импульсов в поздних фазах отрицательного полупериода питающего напряжения.

Показано, что импульс тока в отрицательном полупериоде начинается с короткого пика длительностью менее 2 нс. В литературе обычно предполагается, что структура переднего фронта формируется как результат распространения катодонаправленной волной ионизации,

по аналогии с импульсом Тричела в отрицательной короне. Развитие этой волны поддерживается эмиссией электронов с катода. Для электродов с оксидным слоем формирование пика может происходить в результате пробоя диэлектрического слоя. Оценка напряженности электрического поля на оксидном слое микронной толщины в момент старта микрозаряда дает значение 4 МВ/см, что на 2 порядка превышает значение пробивного поля для оксида алюминия. При отрицательной полярности медного электрода на поздних фазах происходит исчезновение этого пика (рис. 8). Такой эффект обусловлен тем, что во время действия разряда в течение одного полупериода оксидная пленка разрушается стартовыми с одного и того же участка электрода последовательными поколениями микрозарядов.

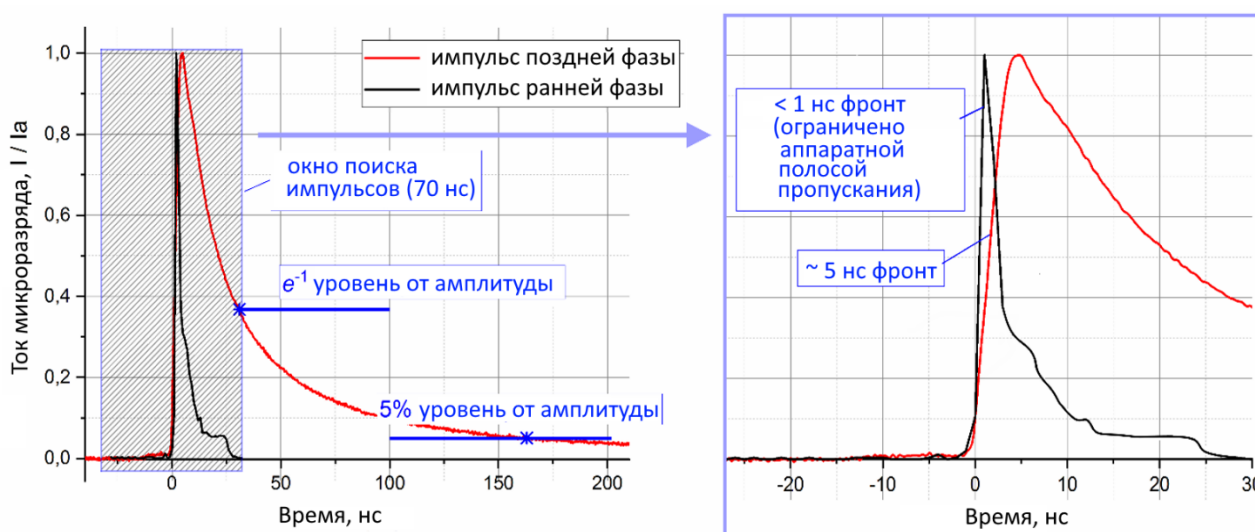


Рис. 8. Форма отрицательных токовых импульсов на модифицированном разрядом медном электроде в начале активной фазы разряда (первые поколения микрозарядов) и в поздние фазы (старшие поколения МР).

В пятой главе представлены результаты исследования влияния процессов модификации электродных кромок на характеристики плазменных ДБР-актуаторов.

Продемонстрировано, что вследствие изменения режима горения разряда, обусловленного эрозией электродных кромок, происходят значительные изменения структуры ионного ветра, генерируемого пДБР. Поля скорости течения в плоскости, перпендикулярной направлению развитию разряда на разных расстояниях от кромок алюминиевых и медных электродов представлены на рисунках 10 и 11, соответственно.

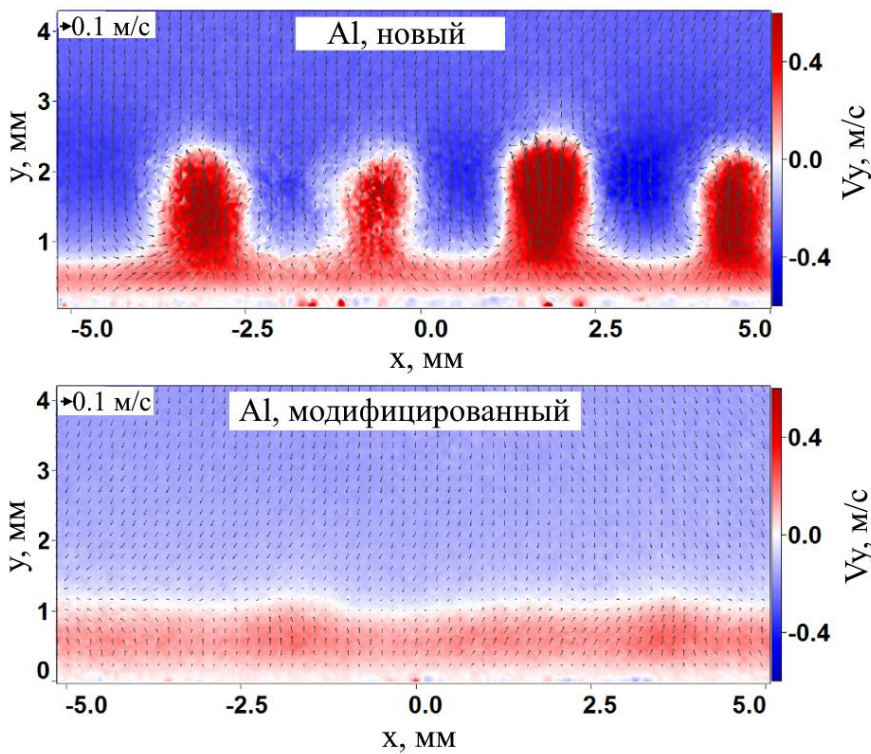


Рис. 9. Структура течения на удалении 6 мм от кромки электрода в перпендикулярной развитии разряда плоскости в случае алюминиевого электрода. Параметры разряда: $U_a = 3$ кВ, $f = 100$ кГц

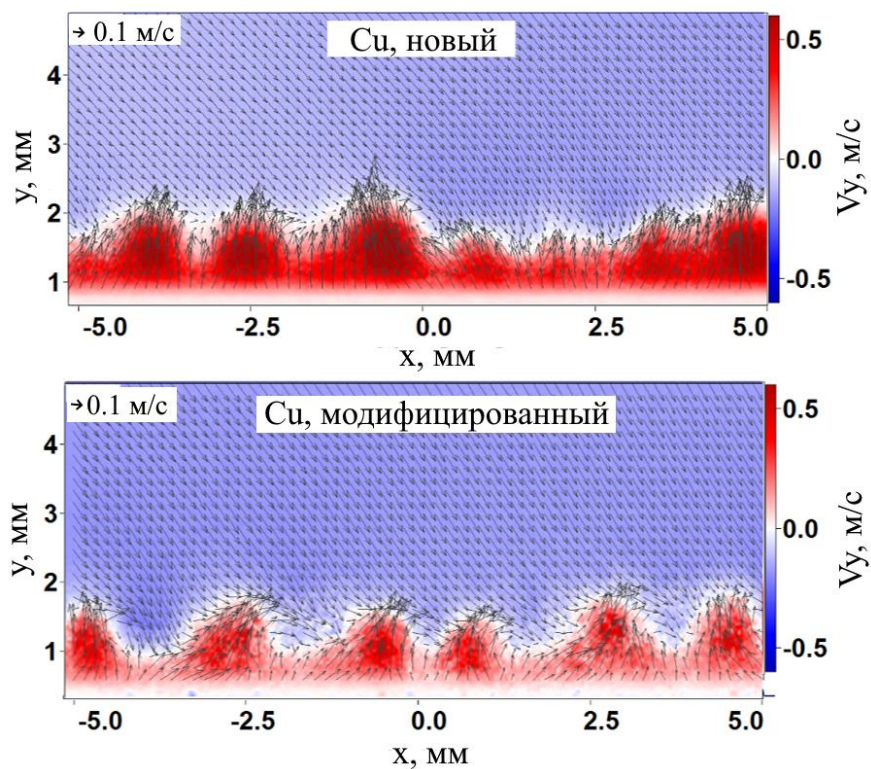


Рис. 10. Структура течения на удалении 6 мм от кромки электрода в перпендикулярной развитии разряда плоскости в случае медного электрода. Координате $x = 0$ соответствует долгоживущая привязка разрядного факела. Параметры разряда: $U_a = 3$ кВ, $f = 100$ кГц

Можно видеть, что структура ионного ветра коррелирует со структурой самого разряда. Формирование квазифиламентированного режима либо ограничение ширины активной зоны на электроде приводит к трехмерной структуре объемной силы, действующей на среду у кромки коронирующего электрода.

На новых электродах из обоих материалов разряд неоднороден вдоль кромки, что влечет за собой возникновение трехмерной структуры течения, генерируемого пДБР. Основными

особенностями этого течения являются пристенная струя, возникающая у каждой пары филаментов или групп микрозарядов, стартующих с небольшой области кромки электрода, и пара вихрей, образующихся на границах этой струи.

При модификации медного электрода течение становится еще более неоднородным, что соответствует стабилизации положения микрозарядных каналов. В случае с алюминием стохастизация микрозарядов приводит к возникновению практически однородного в среднем двумерного течения.

Результаты, изложенные в настоящем разделе, должны учитываться при использовании барьерного разряда в аэродинамических приложениях. В частности, видно, что для получения однородного по размаху воздействия на поток необходима стабилизация оксидного слоя на коронирующей кромке. Только в этом случае характеристики среднего течения, созданного плазменным актуатором, становятся хорошо прогнозируемыми.

В заключении излагаются основные результаты работы:

1. Установлено, что модификация коронирующего электрода оказывает существенное влияние на режим горения и организацию поверхностного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Модификация кромок заключается в действии конкурирующих процессов: накопления оксидов материала электрода, образующихся под воздействием разряда, и эрозионной очисткой кромки в катодных пятнах отрицательных МР. Направление протекания процесса определяется стойкостью оксидов к катодному распылению, а также от стримерной частоты, которая растет с частотой и амплитудой питающего напряжения для синусоидального ДБР.

2. Установлено, что вследствие различной стойкости оксидов алюминия и меди к распылению в катодном слое микрозарядов (энергия связи Al_2O_3 более чем на порядок превосходит энергию связи CuO и Cu_2O), наблюдается принципиально различные изменения топологии кромок при воздействии на них разряда.

В случае **алюминиевого** электрода происходит образование равномерного по толщине диэлектрического слоя у кромки электрода, толщина которого постепенно растет со временем и достигает нескольких мкм при воздействии разряда длительностью 4 часа. На поверхности диэлектрического слоя можно наблюдать множество кратеров диаметром 100–400 нм, которые образуются за счёт разрушения диэлектрической пленки в результате старта одиночных микрозарядов.

В случае **медного** электрода на электродной кромке формируется неоднородная вдоль кромки структура, состоящая из «глухих» участков, покрытых толстым слоем окислов, и кратеров размером в сотни мкм с очищенным материалом электрода в центре.

3. Обнаружено, что различия морфологии модифицированных алюминиевой и медной кромок приводят к существенным изменениям как интегральных характеристик разряда, так и характеристик отдельных микрозарядов.

3.а). В случае **алюминиевого** электрода зарядка однородной оксидной пленки приводит к хаотизации положения микрозарядов вдоль кромки электрода. В результате разряд в среднем оказывается более однородным. Изменения динамики микрозарядов сопровождаются снижением рассеиваемой в разряде мощности до 25–30% от начального значения. В случае **медного** электрода при образовании крупных кратеров на кромке происходит стабилизация положения микрозарядов как в рамках одного полупериода питающего напряжения, так и в течение длительного времени. В результате организуется трехмерный квазифиламентированный режим горения разряда. В результате таких изменений структуры разряда наблюдается существенный рост рассеиваемой в разряде мощности. Увеличение может достигать 40% от начальных значений. Модификация кромки как алюминиевого, так и медного электродов приводит к увеличению пороговых значений зажигания и контракции разряда на ~100-400 В (5-10 %) в диапазоне давлений 0.2-10 бар. В бескислородной атмосфере на предварительно очищенных от окисла электродах режим горения разряда не различается.

3.б). После модификации обоих электродов наблюдается снижение среднего значения переносимого импульсом заряда в 1.5 – 2 раза. При этом в случае **алюминиевого** электрода наблюдается увеличение количества микрозарядов за период питающего напряжения приблизительно на 50%, а в случае медного наблюдается снижение их количества на 10-20%.

4. Обнаружено, что формирование оксида на кромке электрода приводит к изменению формы микрозаряда. Структура импульса тока в отрицательном полупериоде питающего напряжения включает в себя узкий (шириной менее 2 нс) пик в начале импульса. Физическая природа пика, предположительно, связана с пробоем слоя окисла либо с катодонаправленной волной ионизации, поддерживаемой эмиссией электронов с оксидной кромки. Данный пик наблюдается всегда на алюминиевых электродах; на медных электродах он существует только

в начале полупериода и исчезает по мере удаления окисла из зоны привязки микроразряда. Кроме того, организация квазифиламентированного режима горения разряда на медной кромке приводит к удлинению токовых импульсов микроразрядов в отрицательном полупериоде питающего напряжения. Такие изменения, как и само установление квазифиламентированного режима, предположительно, обусловлены кинетикой отрицательных ионов.

5. Вследствие изменения режима горения разряда, обусловленного модификацией электродных кромок, происходят значительные изменения структуры ионного ветра, генерируемого пДБР. На алюминиевом электроде формируется однородная пристенная струя, направленная вдоль поверхности от кромки электрода. На медном электроде формируется ярко выраженная трехмерная структура течения: каждому факелу разряда соответствует пара продольных вихрей, и узкая пристенная струя в пространстве между факелами. Установление структуры ионного ветра происходит после модификации кромки; на новых электродах неоднородный вдоль кромки разряд генерирует ионный ветер с трехмерной структурой.

Апробация работы

Основные результаты работы изложены в 6 публикациях в рецензируемых журналах:

1. Selivonin I. V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Effect of electrode degradation on the electrical characteristics of surface dielectric barrier discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27, № 8. P. 085003.
2. Selivonin I. and Moralev I. Microdischarges properties in sDBD: the role of the exposed electrode oxidation // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30, № 3. P. 035005.
3. Moralev I., Sherbakova V., Selivonin I., Bityurin V., Ustinov M. Effect of the discharge constriction in DBD plasma actuator on the laminar boundary layer // Int. J. Heat Mass Transf. 2018. Vol. 116. P. 1326–1340.
4. Lazukin A.V., Selivonin I.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Modification of an aluminum electrode in a surface dielectric barrier discharge plasma // J. Phys. Conf. Ser. 927. 2017. Vol. 927. P. 012028.
5. Selivonin I., Lazukin A., Moralev I., Krivov S., Roslyakov I. Erosion of the sputtered electrodes in the surface barrier discharge // J. Phys. Conf. Ser. 1394. 2019. Vol. 1394. P. 012027.
6. Selivonin I. and Moralev I. Influence of the Condition of the Exposed Edge in the SDBD on the Discharge Operation Mode in Argon // J. Phys. Conf. Ser. 2100. 2021. Vol. 2100.

P. 012014.

По результатам работы было сделано 16 докладов на Российских и международных конференциях:

1. Лазукин А.В., Селивонин И.В., Моралев И.А., Кривов С.А. Модификация коронирующего электрода в поверхностном диэлектрическом барьере разряда // XLIV Звенигородская международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 13-17 февраля 2017
2. Lazukin A.V., Selivonin I.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Electrode and Dielectric barrier modification in a dielectric barrier discharge // 16th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, 5-7 April 2017, Moscow
3. Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Electrode and dielectric barrier modification in a dielectric barrier discharge // Aerospace Thematic Workshops, Saint-Peterburg, April 9-14, 2017
4. Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Electrode modification in a dielectric barrier discharge // The International Conference “The Physics of Low Temperature Plasma”, Kazan, Russian Federation, June 5-9, 2017
5. Селивонин И.В., Моралев И.А., Щербанев С.А., Алишериф М., Стариковская С.М. Зависимость порогов зажигания и контракции поверхностного барьерного разряда от давления и материала коронирующего электрода // XLIV Звенигородская международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2-6 апреля 2018
6. Moralev Ivan, Selivonin Igor, Lazukin Alexander, Krivov Sergey. Electrode erosion in DBD plasma actuators // Plasma-based actuators for flow control: recent developments and future directions, 14 March 2018 – 16 March 2018, Delft, Netherlands
7. Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Electrode erosion in DBD plasma actuators // 17th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, 17-19 April 2018, Moscow
8. Селивонин И.В., Лазукин А.В., Моралев И.А., Кривов С.А. Дegradация тонких коронирующих электродов в поверхностном диэлектрическом барьерном разряде // XLVI Звенигородская международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 18-22 Марта 2019
9. Селивонин И.В., Моралев И.А. Типы и статистика микрозарядов в поверхностном барьерном разряде // 18 Международное совещание по магнитоплазменной аэродинамике, Москва, 09-11 апреля 2019 г.

10. Селивонин И.В., Лазукин А.В., Моралев И.А., Кривов С.А. Эрозия тонких коронирующих электродов в поверхностном барьерном разряде // 18 Международное совещание по магнитоплазменной аэродинамике, Москва, 09-11 апреля 2019 г.
11. Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Erosion of the thin corona electrodes in surface barrier discharge // 18th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, 9-11 April 2019, Moscow.
12. Selivonin I.V., Moralev I.A. Statistics of current pulses in a surface barrier discharge on electrodes of various materials // XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG), Sapporo, Japan, July 14–19, 2019, PO16PM-055, 2019
13. Selivonin I.V., Moralev I.A. Statistics of current pulses in a surface barrier discharge on electrodes of various materials // XXXII International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, Russia, 2020
14. Selivonin I.V., Moralev I.A. The effect of the oxidation of the corona electrode on the filamentation thresholds of a nanosecond DBD, 15-18 September 2020, Moscow.
15. Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Erosion of the corona electrodes in surface barrier discharge: edge modification and its effect on discharge, 15-18 September 2020, Moscow.
16. Selivonin I., Moralev I., Lazukin A., Krivov S. Influence of the condition of the corona-forming edge in the DBD on the discharge operation mode in argon // 20th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, 25-27 May 2021, Moscow.