

на правах рукописи
УДК 533.9

ПЕТРОВ Алексей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ КАТОДА В ОТРИЦАТЕЛЬНОМ
КОРОННОМ РАЗРЯДЕ**

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении российской академии наук
Объединенном институте высоких температур РАН

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Амиров Равиль Хабибулович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Василяк Леонид Михайлович

д.ф.-м.н. Синкевич Олег Арсеньевич

Ведущая организация: Государственный научный центр
Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных
исследований.

Защита состоится “29” декабря 2010 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 ОИВТ РАН.

Автореферат разослан “__” ноября 2010 г.

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



А.Л. Хомкин

© Учреждение российской академии наук Объединенный институт высоких
температур РАН, 2010

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Интерес исследования отрицательной короны обусловлены тем, что разряд является источником неравновесной плазмы атмосферного давления, а также источником отрицательных ионов. Отрицательный коронный разряд применяется в электрофильтрах, плазмохимических системах для синтеза озона и обработки поверхностей, системах зарядки аэрозолей. Излучение разряда и генерация ионного ветра используются в газоразрядных лазерах. Исследование коронного разряда необходимо для предотвращения формирования отрицательной короны в системах высоковольтной газовой изоляции, а также предотвращения контрагирования плазмы в прикатодном объеме газоразрядных лазеров.

Несмотря на широкое применение отрицательной короны, нет точных данных о механизме ряда процессов в разряде: так однозначно не установлен механизм импульсов Тричела, механизм эрозии катода, механизм формирования наноаэрозоля в промежутке.

Исследование механизма эрозии катода в отрицательной короне является важным для понимания общей картины процессов, протекающих в отрицательном коронном разряде, включающих в себя процессы в разрядной плазме, газовом промежутке и на поверхности катода.

Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью учета эрозионных процессов на катодной поверхности при проектировании газоразрядных устройств, использующих отрицательную корону: электрофильтров, плазмохимических реакторов атмосферного давления, газоразрядных лазеров. Исследование особенностей эрозии катода в отрицательном коронном разряде необходимо для разработки методов улучшения электрохимических и автоэмиссионных свойств поверхностей, а также технологий напыления тонких пленок и генерации потоков наноразмерных аэрозолей. Новые данные по механизму эрозии представляют интерес для развития физики газового разряда и теории приэлектродных процессов.

Цель работы

Основной целью работы является определение механизма эрозии катода в отрицательном коронном разряде. Ставятся следующие задачи:

1. Исследовать динамику привязки разрядного факела на катодной поверхности и установить влияние свойств промежутка (напряжения, межэлектродного расстояния, давления воздуха, кривизны катода) на амплитуду импульсов Тричела и межимпульсный интервал. Результаты микровидеосъемки разрядного факела и электрической регистрации разряда сопоставить с результатами топографического анализа эрозионной поверхности.
2. Исследовать топографию эрозионной поверхности катодов из различных материалов (Cu, Ag, C, W, Al), в импульсном и безимпульсном режиме разряда.
3. На основе результатов измерения параметров импульсов Тричела и топографического анализа поверхности установить механизм эрозии катода.
4. Исследовать процесс рециклинга катодного материала.

Используемые методы исследований

Отрицательный коронный разряд исследовался в воздухе в электродной конфигурации острие-плоскость в режиме импульсов Тричела и в безимпульсном режиме. Во время разряда проводится регистрация электрических характеристик разрядного тока с наносекундным разрешением и синхронная фронтальная и боковая видеосъемка разрядного факела и катода с пространственным разрешением 1 мкм. Катоды изготавливались из материалов, существенно различающихся по своим электрическим и термодинамическим свойствам (температура плавления, критическое значение величины интеграла удельного действия, возможность формировать диэлектрические пленки и др.) – меди, графита, алюминия, вольфрама, серебра. При изготовлении катодов использовались методики химического и электрохимического травления поверхности.

Проводился топографический анализ поверхности катодов при помощи растровой электронной и оптической микроскопии с разрешением 10 нм, а также компонентный анализ с точностью 0,1 ат.% – использовались методики исследования поверхности во вторичных и упругоотраженных электронах, а также анализ рентгеновского характеристического излучения.

С целью исследования процесса рециклинга (осаждения продуктов эрозии на катодной поверхности) проводился численный расчет динамики продуктов эрозии катода в межэлектродном промежутке.

Научная новизна

1. Обнаружено соответствие между электрическими характеристиками отрицательного коронного разряда, динамикой привязки разрядного факела и свойствами поверхности. Установлено три режима импульсов Тричела: устойчивый, неустойчивый и стохастический. Устойчивый режим импульсов Тричела реализуется в случае катодов диаметром острия менее 20 мкм, в случае оплавления поверхности, или в случае стабильной привязки разрядного факела на катодной поверхности. Неустойчивый режим наблюдается на катодах диаметром острия более 40 мкм, или при частичном окислении поверхности.
2. Установлено независимое влияние параметров промежутка (напряжения, давления, расстояния, диаметра катода) и кривизны острия в области локализации привязки разрядного факела на амплитуду импульсов Тричела и межимпульсный интервал. Увеличение напряжения, уменьшение межэлектродного расстояния, уменьшение давления, уменьшение диаметра катодного острия, а также увеличение кривизны поверхности в области локализации привязки разрядного факела вызывает уменьшение межимпульсного интервала и приводит к уменьшению амплитуды импульсов Тричела.
3. Обнаружено, что минимальный размер эрозионного кратера на поверхности катода в отрицательном коронном разряде в режиме импульсов Тричела составляет 40 нм в случае меди и 80 нм в случае графита. Показано, что кратеры микронных размеров формируются в результате многократного воздействия разряда при неизменном положении области привязки разрядного факела.
4. Исследована топография эрозионной поверхности графитовых и медных катодов в безимпульсном режиме отрицательного коронного разряда. Обнаружено, что в безимпульсном режиме кратеры микронных размеров объединены в эрозионные следы шириной 1 мкм и длиной 10 мкм.
5. Обнаружено осаждение продуктов эрозии медного катода на катодной поверхности в виде нанокристаллов CuO_2 . Длина кристаллов 1–10 мкм, толщина 1–100 нм.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Результаты экспериментального исследования режимов импульсов Тричела и связи режимов разряда с динамикой привязки разрядного факела, свойствами и топографией эрозионной поверхности катода.
- 2) Результаты исследования параметров импульсов Тричела для катодов, изготовленных из меди, графита, вольфрама, алюминия и серебра при варьировании диаметра острия катода от 20 мкм до 2 мм, давления воздуха от 40 до 100 кПа, напряжения от 8 до 15 кВ, межэлектродного расстояния от 10 до 40 мм.
- 3) Результаты исследования топографии эрозионной поверхности катодов в режиме импульсов Тричела и безимпульсном режиме разряда.
- 4) Вывод о том, что основным механизмом эрозии катода в отрицательном коронном разряде является электровзрывной механизм.
- 5) Результаты исследования рециклинга эрозионного материала.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты исследования импульсов Тричела, эрозии катода и рециклинга эрозионного материала могут быть использованы при разработке газоразрядных устройств и технологий, использующих отрицательную корону: электрофильтров, плазмохимических реакторов. Измеренные зависимости амплитуды импульсов Тричела и межимпульсного интервала позволяют проектировать газоразрядную установку с заданными наперед параметрами разряда. Результаты измерения удельной скорости эрозии позволяют прогнозировать ресурс электродов и выбирать наиболее подходящий материал для изготовления электродов. Результаты исследования эрозии и рециклинга эрозионного материала полезны для контроля чистоты газоразрядного промежутка и в технологиях генерации пучков нанодисперсных аэрозолей. Данные по механизму эрозии представляют интерес для физики приэлектродных процессов и физики взаимодействия плазмы с поверхностью.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на VI Международной конференции по прикладной электростатике (Шанхай, 2008), XIV Международном конгрессе по физике плазмы (Фукуока, 2008); XXII, XXIV Международной конференции “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество” (Эльбрус, 2007, 2009); XLVII – LI Научной конференции МФТИ

“Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Москва, 2004 – 2008), XIII школе молодых ученых “Актуальные проблемы физики” (Звенигород, 2010), научных семинарах МФТИ, ОИВТ РАН, ФИАН.

Личный вклад автора

Создана экспериментальная установка для исследования отрицательного коронного разряда в электродной конфигурации острие-плоскость в воздухе при напряжении от 8 до 15 кВ, межэлектродном расстоянии от 10 до 40 мм, давлении от 40 до 100 кПа. Диаметр острия катодов из W, C, Cu, Al, Ag варьировался в пределах 20 мкм - 2 мм. При изготовлении катодов применялись методики химической и электрохимической полировки поверхности.

При помощи телемикроскопии разряда, регистрации электрических характеристик разрядного тока и электронной микроскопии исследована взаимосвязь между динамикой привязки разрядного факела, параметрами импульсов Тричела и свойствами катодной поверхности в случае катодов, изготовленных из различных материалов при варьировании давления воздуха, напряжения, межэлектродного расстояния, диаметра острия катода.

Проведен топографический микроанализ поверхности катодов в импульсном и безимпульсном режиме разряда. При исследовании эрозии применялся разработанный микросекундный выключатель напряжения. Измерен размер элементарного кратера на катодах, изготовленных из различных материалов. Измерена удельная скорость эрозии катодов. Проведены оценки плотности тока на катодной поверхности и величины интеграла удельного действия импульса Тричела.

При помощи оптической и электронной микроскопии проведено исследование рециклинга эрозионного материала на катодах, изготовленных из меди, серебра, алюминия, вольфрама и графита. Проведен расчет динамики продуктов эрозии катода в межэлектродном промежутке.

Постановка задач, обсуждение полученных результатов и формулировка выводов проводилась совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Амировым Р.Х., а также к.ф.-м.н. Самойловым И.С.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 137 страницах текста, содержит 73 рисунка и 9 таблиц. Список литературы насчитывает 110 наименований.

Содержание диссертации

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

В **первой главе** представлен литературный обзор. Рассматриваются режимы и ВАХ отрицательной короны, численные модели и результаты экспериментальных исследований импульсно-периодического и безимпульсного режима разряда, пространственная структура разрядного факела. Также рассматриваются нерегулярные явления на катодной поверхности – динамика привязки разрядного факела, нерегулярность эрозионной картины и параметров импульсов Тричела. Приведен краткий обзор возможных механизмов катодной эрозии в отрицательном коронном разряде, а также в других разрядах – стримерном, искровом, дуговом, тлеющем и в положительной короне. Приведены основные положения теории электровзрыва проводников. Также рассматриваются современные представления о составе и динамике эрозионных продуктов в электродном промежутке. Завершается литературный обзор постановкой задачи исследований.

Во **второй главе** приведено описание техники и методики экспериментов. Описана схема экспериментальной установки, электродная система, система высоковольтного питания, схема микросекундного выключателя напряжения, система напуска и откачки воздуха, система регистрации электрических характеристик разряда, методики анализа осциллограмм импульсов Тричела, методики изготовления катодов, методики микровидеосъемки разряда и методики измерения удельной скорости эрозии. Также описаны используемые методики топографического и компонентного микроанализа катодной поверхности при помощи растровой электронной микроскопии.

Отрицательный коронный разряд исследовался в воздухе в электродной конфигурации острие-плоскость. Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Установка состояла из электродной системы, системы высоковольтного питания, системы регистрации электрических характеристик разряда, системы напуска и откачки воздуха, системы оптической регистрации.

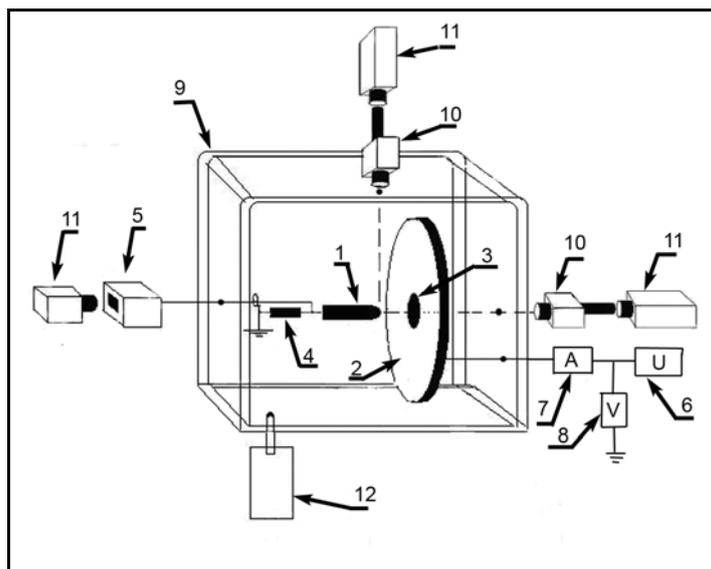


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – катод; 2 – анод; 3 – отверстие диаметром 1 мм в центре анода; 4 – нагрузочное сопротивление 50 Ом; 5 – осциллограф С1-75; 6 – источник питания БПМ-52, оснащенный микросекундным выключателем; 7 – амперметр М-906; 8 – электростатический вольтметр С-196; 9 – разрядная камера с плоскими окнами объемом 8 дм³; 10 – бинокулярный микроскоп МБС-12.; 11 – видеокамера Canon w705i; 12 – система вакуумирования и контроля давления ВУП-4

Катоды в виде острий изготавливались из Cu, W, C, Al, Ag путем механической обработки проволок и стержней диаметром от 20 мкм до 2 мм. Материалы подбирались таким образом, чтобы их свойства максимально различались (температура плавления, критическая величина интеграла удельного действия и др.). Катоды из меди полировались при помощи химической обработки в разбавленном растворе шестихлорного железа и при помощи электрохимической обработки в ортофосфорной кислоте. Вольфрамовые катоды изготавливались из спеченого вольфрама. Графитовые катоды изготавливались из электродного графита С-3 с характерным размером зерна 1 мкм. С поверхности алюминиевых катодов оксидная пленка не удалялась. В качестве анода использовалась медная пластина. Межэлектродное расстояние варьировалось в пределах 10 – 40 мм.

В качестве высоковольтного источника напряжения использовался источник БПМ-52. Напряжение положительной полярности подавалось на анод, катод был заземлен. Источник питания стабилизирован высоковольтным конденсатором емкостью 0,1 мкФ и микросекундным выключателем. Использование микросекундного выключателя напряжения позволяет избежать влияние плавного изменения напряжения на параметры разряда, и, следовательно, на характер эрозии. Напряжение измерялось высоковольтным

электростатическим вольтметром С-196, а средний ток разряда – микроамперметром М-906.

Электродная система располагалась в разрядной камере объемом 8 дм³. Для откачки и напуска воздуха, а также контроля давления, использовался вакуумный пост ВУП-4, присоединенный к разрядной камере.

Осциллографирование разрядного тока проводилось при помощи осциллографа С1-75 с рабочей полосой 250 МГц. Проводилась видеосъемка экрана осциллографа при помощи видеокамеры Canon w705i – 25 кадров в секунду, время экспозиции отдельного кадра от 0,5 до 40 мс. Нагрузочное сопротивление 50 Ом было включено между катодом и землей. Осциллографирование проводилось в режиме непрерывной развертки, а также в режиме разового запуска осциллограммы.

Проводилась фронтальная и боковая микровидеосъемка катодного острия с пространственным разрешением 1 мкм при помощи телемикроскопа МБС-12. Расстояние от объектива микроскопа до катода 30 – 50 мм в зависимости от увеличения. Видеосъемка проводилась при помощи камеры Canon W705i. Длительность экспозиции отдельного кадра от 0,5 до 40 мс.

После разряда катоды исследовались при помощи растровых электронных микроскопов FEI Quanta 200 и Jeol JSM-840. Проводился топографический анализ поверхности с разрешением не хуже 10 нм и компонентный анализ поверхности с разрешением 0,1 ат. %.

Удельная скорость эрозии измерялась путем сравнения снимков катода, выполненных до и после разряда.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния динамики привязки разрядного факела на импульсы Тричела и топографию эрозионной поверхности. Разряд в импульсно-периодическом и безимпульсном режиме исследовался на катодах, изготовленных из меди, графита, вольфрама и алюминия. Исследована форма импульса Тричела для W катода и эрозия катода в безимпульсном режиме разряда.

Установлено, что импульсно–периодическая корона реализуется в одном из трех режимов: устойчивом, неустойчивом или стохастическом.

Устойчивый режим разряда характеризуется неизменным значением амплитуды импульсов Тричела и межимпульсного интервала. Боковая фотография разряда, синхронно выполненная осциллограмма разряда и снимок катодной поверхности в устойчивом режиме представлены на рис.2.

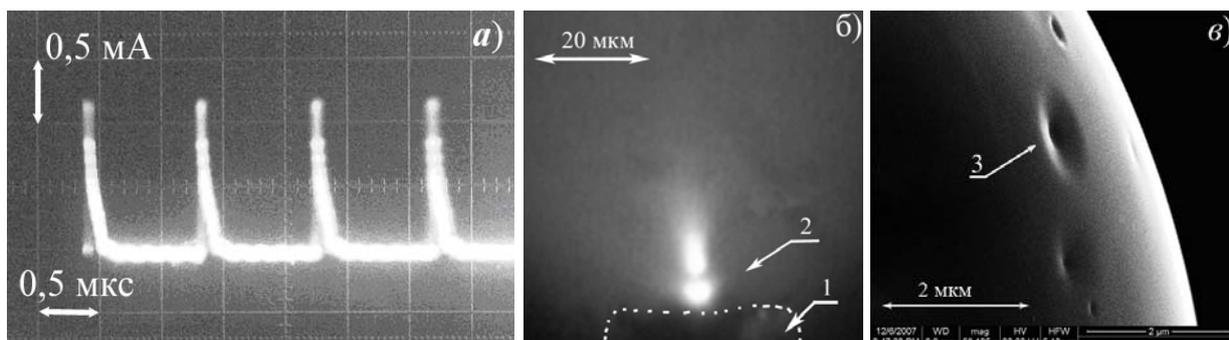


Рис. 2. Разряд в устойчивом режиме импульсов Тричела:

a) – осциллограмма разряда; *б)* – боковая фотография разряда, (*1* – катод, *2* – разряд); *в)* – эрозионная поверхность медного катода после разряда в устойчивом режиме импульсов Тричела, (*3* – кратер диаметром 1 мкм, сформировавшийся в области локализации привязки разрядного факела)

Устойчивый режим реализуется, если диаметр катода менее 20 мкм, или происходит оплавление поверхности, или если разрядный факел локализован на катодной поверхности в малой области размером порядка 1х1 мкм. В области локализации разряда формируется кратер размером ~1 мкм.

Неустойчивый режим разряда является последовательностью быстро сменяющихся устойчивых режимов, каждый из которых характеризуется своим значением амплитуды импульсов Тричела и межимпульсного интервала. При этом длительность каждой из устойчивых последовательностей менее 10 мс. Фронтальная фотография разряда, синхронно выполненная осциллограмма и эрозионная поверхность катода для неустойчивого режима разряда представлены на рис.3.

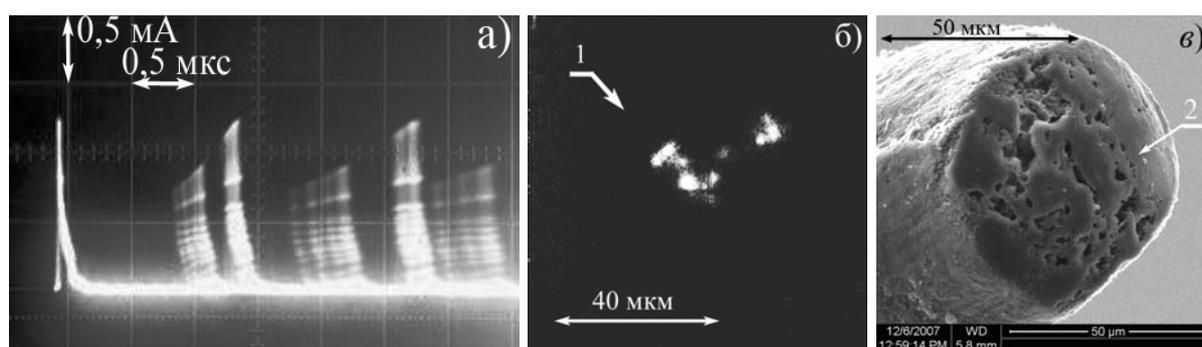


Рис. 3. Разряд в неустойчивом режиме импульсов Тричела:

a) – осциллограмма разряда; *б)* – фронтальная фотография разряда (*1* – разрядный факел за 40 мс много раз изменил положение своей привязки на катодной поверхности); *в)* – эрозионная поверхность графитового катода после разряда в неустойчивом режиме импульсов Тричела (*2* – эрозионные кратеры размером до 10 мкм)

Неустойчивый режим реализуется на катодах диаметром более 40 мкм, или в случае частичного окисления катодной поверхности. При этом на поверхности катода формируются эрозионные кратеры различных размеров – от 40 нм до 10 мкм.

В стохастическом режиме разряда амплитуда импульса Тричела и межимпульсный интервал, а также положение привязки разрядного факела на катодной поверхности меняются после каждого импульса. При этом амплитуда импульса не зависит от межимпульсного интервала. Стохастический режим реализуется в случае алюминиевых катодов, покрытых диэлектрической оксидной пленкой. Осциллограмма разряда, фронтальная фотография разряда и микроснимок эрозионной поверхности в стохастическом режиме представлены на рис.4.

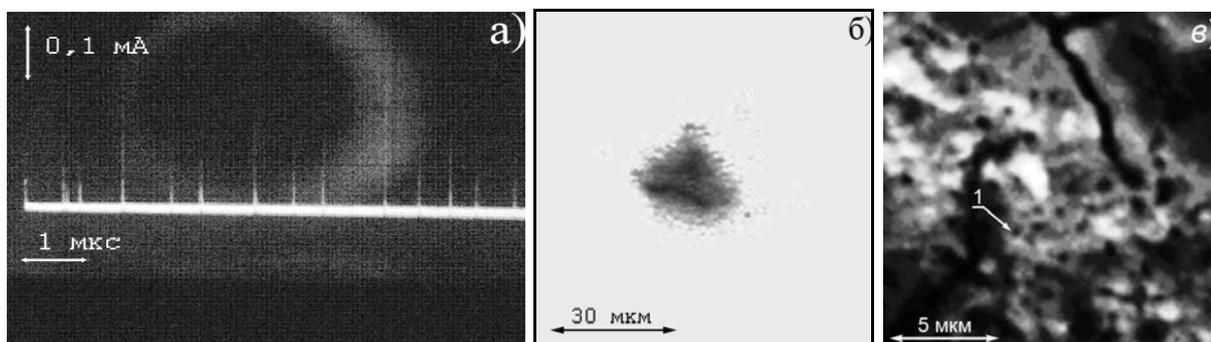


Рис. 4. Стохастический режим разряда:

а) – осциллограмма; *б)* – фронтальный снимок разряда (негатив); *в)* – эрозионная поверхность алюминиевого катода после разряда в стохастическом режиме импульсов Тричела (*1* – эрозионные поры диаметром 200 нм)

Результаты исследования разряда в устойчивом и неустойчивом режиме представлены в виде графиков зависимости амплитуды импульсов Тричела от межимпульсного интервала. Пример такого графика для графитовых катодов диаметром 50 и 300 мкм приведен на рис.5. Экспериментальные точки, объединенные одной прямой, измерены при неизменных значениях среднего тока, диаметра катода, межэлектродного расстояния, напряжения и давления. Обнаружено, что изменение положения экспериментальной точки в пределах прямой вызвано изменением положения привязки разрядного факела на катодной поверхности. Изменение положения прямой вызвано изменением геометрии и параметров промежутка.

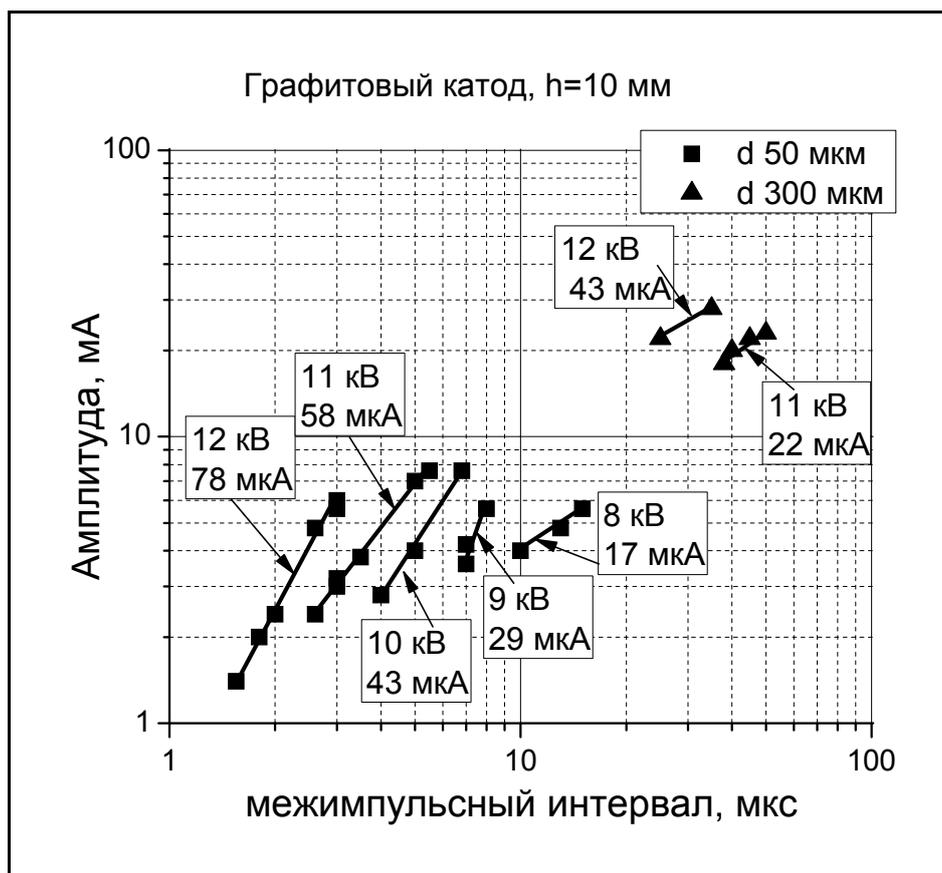


Рис. 5. Зависимость амплитуды импульсов и межимпульсного интервала от напряжения для графитовых катодов диаметром острия 50 и 300 мкм в воздухе при атмосферном давлении. Значения среднего тока и напряжения для соответствующих прямых указаны на графике:
 h – межэлектродное расстояние; d – диаметр острия катода

Подобные графики были построены для медных, графитовых и вольфрамовых катодов при варьировании напряжения от 8 до 15 кВ, межэлектродного расстояния от 10 до 40 мм, давления воздуха от 40 до 100 кПа и диаметра катода от 20 мкм до 2 мм. Во всех случаях данные графики демонстрирует независимое влияние динамики привязки разрядного факела на катодной поверхности и свойств разрядного промежутка на амплитуду импульсов Тричела и межимпульсный интервал.

В случае вольфрамовых катодов обнаружено, что начальная фаза импульса Тричела не зависит от положения привязки разряда на катодной поверхности, а форма заднего фронта импульса определяется положением привязки. Таким образом, можно сделать вывод, что начальная фаза импульса Тричела обусловлена объемными процессами в промежутке, а на заднем фронте импульса существенную роль играют процессы на поверхности катода.

Безимпульсный режим отрицательного коронного разряда исследовался на катодах, изготовленных из меди и графита. В безимпульсном режиме на

катодной поверхности наблюдается формирование кратеров диаметром 40 нм в случае меди и 100 нм в случае графита. Эрозионные кратеры микронных размеров, как правило, объединены в эрозионные следы длиной до 10 мкм (рис.6), что объясняется особенностями динамики привязки разрядного факела на поверхности катода.

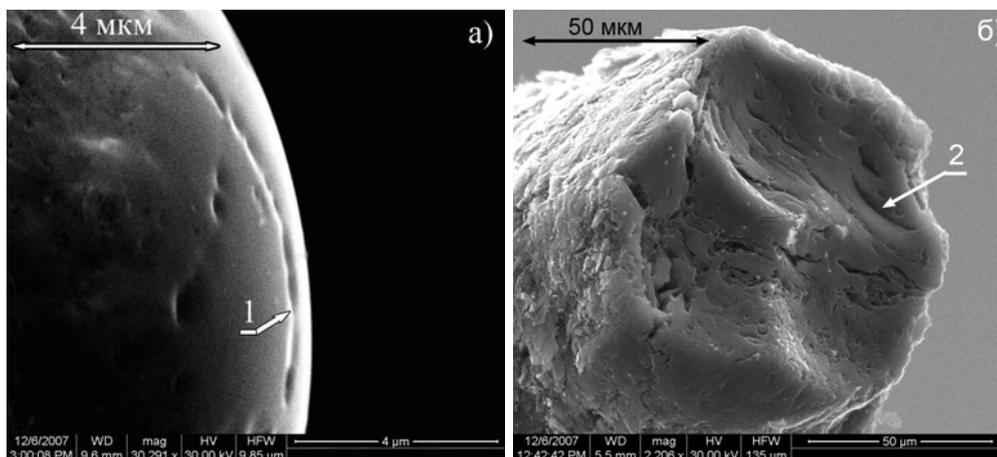


Рис. 6. Эрозионная поверхность катода после разряда в безимпульсном режиме: *а)* – медный катод (*1* – эрозионный след длиной 10 мкм); *б)* – графитовый катод (*2* – эрозионный след длиной 20 мкм)

В **четвертой главе** представлены результаты исследования механизма эрозии катода и рециклинга эрозионного материала.

Исследуется топография эрозионной поверхности катодов, изготовленных из меди, графита, вольфрама, алюминия и серебра в импульсно-периодическом и безимпульсном режиме разряда. Для оценки критического значения величины интеграла удельного действия проведен расчет температуры катодной поверхности. Исследован процесс рециклинга (частичного возврата на катодную поверхность) эрозионных продуктов в межэлектродном промежутке.

Согласно результатам измерений, удельная скорость эрозии для меди и серебра составляет 10^{-6} – 10^{-5} г/Кл, для графита – 10^{-5} – 10^{-4} г/Кл.

Обнаружено, что если поверхность катода не оплавляется, то на поверхности формируются кратеры, минимальный размер которых 40 нм в случае меди, 100 нм в случае графита или алюминия. Элементарные эрозионные кратеры на поверхности медного катода изображены на рис.7. Каждый элементарный кратер формируется в результате одного импульса Тричела. Эрозионный объем, приходящийся на один импульс Тричела, измерен как отношение полного эрозионного объема катода к количеству

импульсов Тричела за время эксперимента и совпадает с размером элементарного кратера. При этом если ток импульса Тричела замыкается через поверхность кратера, то плотность тока в момент импульса достигает значения 10^8 А/см^2 . Значение величины интеграла удельного действия импульса Тричела составляет $10^6 - 10^8 \text{ А}^2\text{с/см}^4$ для графитовых катодов и $10^9 \text{ А}^2\text{с/см}^4$ для медных или серебряных катодов, что соответствует значениям интеграла удельного действия импульса тока при электровзрыве проволок.

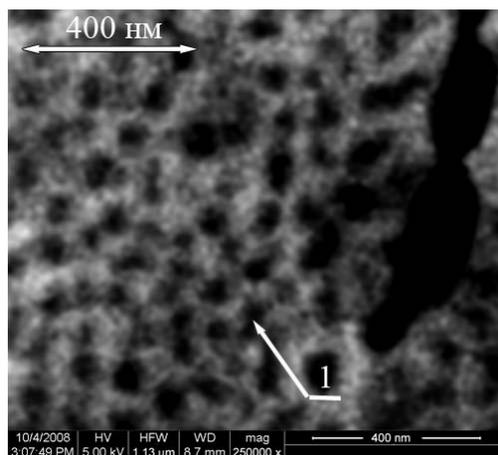


Рис. 7. Эрозионная поверхность медного катода после разряда в режиме импульсов Тричела:

1 – элементарный эрозионный кратер диаметром 40 нм

В пользу электровзрывного механизма эрозии также свидетельствует то, что удельная скорость эрозии катодов в случае графитовых катодов составляет 10^{-4} г/Кл и не может быть достигнута за счет бомбардировки поверхности положительными ионами. Эрозия происходит в случае любых материалов катода, поэтому химический механизм эрозии не может являться основным. Согласно литературным данным, продуктами эрозии катода в случае отрицательного коронного разряда и в случае электровзрыва проволок являются кластеры диаметром $\sim 10 \text{ нм}$ – это свидетельствует в пользу того, что механизм разрушения в обоих случаях одинаковый. Таким образом, доминирующим механизмом катодной эрозии в отрицательном коронном разряде является электровзрывной механизм.

Согласно результатам топографического анализа эрозионной поверхности графитовых катодов, кратеры микронных размеров формируются в результате многократного воздействия разряда при неизменном положении привязки разрядного факела на катодной поверхности.

В случае катодов из меди и серебра в импульсно-периодическом и безимпульсном режиме разряда был обнаружен частичный возврат эрозионных продуктов на катодную поверхность и оседание в виде нанокристаллов. Согласно результатам компонентного анализа, в случае медного катода кристаллы состоят из меди и кислорода в пропорции 1:2. Характерная длина кристаллов 1-10 мкм, а поперечный размер – 1-100 нм - рис.8.

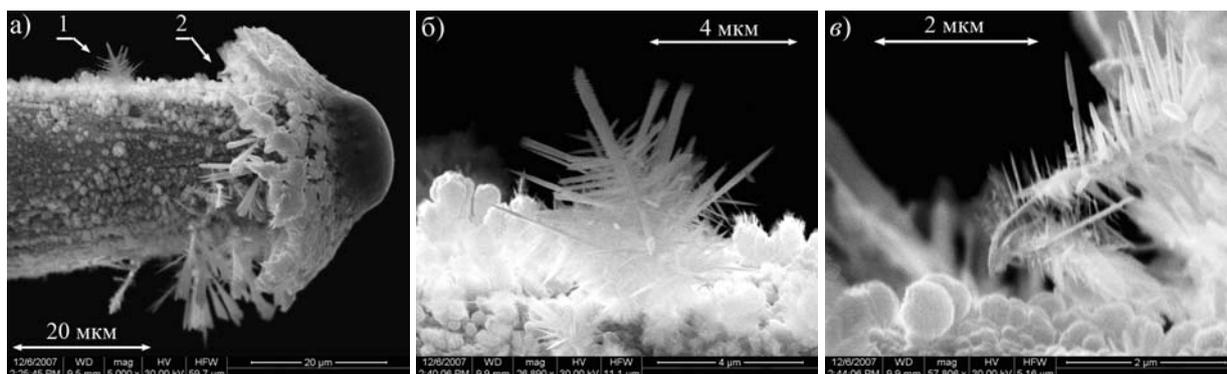


Рис. 8. Медный катод после разряда:

а) – общий вид катода (*1, 2* – нанокристаллы, формирующиеся на поверхности медного катода в результате рециклинга продуктов эрозии, изображенные на фрагментах *б* и *в*); *б)* – кристалл, сформировавшийся на расстоянии 30 мкм от торца катода; *в)* – кристаллы на “воротнике”

Рециклинг не был обнаружен в случае вольфрамовых, графитовых и алюминиевых катодов. Был проведен расчет динамики эрозионных кластеров в электродном промежутке. Согласно результатам расчетов, рециклинг объясняется зарядкой эрозионных кластеров и электростатическим притяжением. Зарядка происходит в результате прилипания ионов и электронной термоэмиссии. Избирательное свойство рециклинга по отношению к материалу катода объясняется различием начальной скорости, размера и температуры эрозионных кластеров в случае катодов, изготовленных из различных материалов.

Основные результаты и выводы диссертации

1. Создана экспериментальная установка для исследования отрицательного коронного разряда в воздухе в конфигурации острие-плоскость при давлении от 40 до 100 кПа, напряжении от 8 до 15 кВ, межэлектродном расстоянии от 8 до 40 мм в режиме импульсов Тричела и в безимпульсном режиме. Исследованы электрические характеристики разряда и характер

эрозии в случае катодов диаметром от 20 мкм до 2 мм изготовленных из Cu, C, Ag, Al, W.

2. Обнаружено соответствие между электрическими характеристиками разряда, динамикой привязки разрядного факела и характером эрозии. Установлено, что в режиме импульсов Тричела разряд реализуется в устойчивом, неустойчивом или стохастическом режиме. При токе 100 мкА устойчивый режим импульсов Тричела реализуется в случае катодов диаметром острия менее 20 мкм, в случае оплавления поверхности, или в случае стабильной привязки разрядного факела на катодной поверхности. Неустойчивый режим наблюдается на катодах диаметром острия более 40 мкм, или при частичном окислении поверхности. Стохастический режим реализуется в случае алюминиевых катодов.
3. Исследована зависимость амплитуды импульсов Тричела и межимпульсного интервала от напряжения, давления, межэлектродного расстояния, диаметра катода. Обнаружено независимое влияние условий промежутка и динамики привязки разрядного факела на амплитуду импульсов Тричела и межимпульсный интервал. Увеличение межэлектродного расстояния, уменьшение напряжения, увеличение давления, увеличение диаметра острия или уменьшение кривизны поверхности катода в области локализации привязки разрядного факела приводят к увеличению амплитуды импульсов Тричела и межимпульсного интервала.
4. Обнаружено, что эрозия катода в импульсно-периодическом и безимпульсном режиме отрицательного коронного разряда происходит в виде формирования элементарных кратеров размером 40 нм в случае медного катода и 80 нм в случае графитового. Кратеры микронных размеров формируются в результате многократного воздействия импульсов Тричела при неизменном положении области привязки разрядного факела. Формирование элементарного кратера объясняется электровзрывными процессами. Удельная скорость эрозии для катодов из меди и серебра составляет 10^{-6} – 10^{-5} г/Кл, для графитовых катодов – 10^{-5} – 10^{-4} г/Кл.

5. В безимпульсном режиме отрицательного коронного разряда на поверхности катода формируются кратеры диаметром 40 нм в случае меди и 100 нм в случае графита, а образующиеся кратеры микронных размеров объединяются в эрозионные следы шириной 1 мкм и длиной 10 мкм.
6. Рециклинг эрозионных продуктов наблюдается на катодах из меди и серебра и не обнаружен в случае катодов из вольфрама, графита и алюминия. Оседание продуктов эрозии на катодной поверхности в случае меди происходит в виде нанокристаллов CuO_2 длиной 1-10 мкм и толщиной 1-500 нм.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Асиновский Э.И., Петров А.А., Самойлов И.С. Амплитудно-частотные характеристики импульсов Тричела и поведение катодного пятна в отрицательном коронном разряде // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 68, № 5. С. 354–355.
2. Асиновский Э.И., Петров А.А., Самойлов И.С. Эрозия медного катода в отрицательном коронном разряде // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 2. С. 137-139.
3. Petrov A.A., Amirov R.H., Samoylov I.S. On the Nature of Copper Cathode Erosion in Negative Corona Discharge // IEEE – Transactions on Plasma Sciences. 2009. V. 37, N. 7. P. 1146–1149.
4. Петров А.А., Амиров Р.Х., Самойлов И.С. Механизм эрозии катода в отрицательном коронном разряде // Физическое образование в вузах. 2009. Т. 15, № 1. Приложение. С. 40.

Статьи в других рецензируемых журналах:

5. Amirov R.H., Petrov A.A., Samoylov I.S. Effects of the Dynamics of Cathode Spot on Trichel Pulses // International Journal of Plasma Environmental Science and Technology. 2009. V. 3, N. 1. P. 35–38.
6. Petrov A.A., Amirov R.H., Asinovskii E.I. and Samoylov I.S. Electro-Explosive Mechanism of Carbon Cathode Destruction in Negative Corona Discharge in Trichel Pulse Regime // J. Plasma Fusion Res. Series. 2009. V. 8. P. 780–783.

Труды и тезисы конференций:

7. Асиновский Э.И., Петров А.А., Самойлов И.С. Эрозия медного катода в отрицательном коронном разряде // Сборник Трудов XXII международной конференции “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество”. Физика экстремальных состояний вещества. 2007. Эльбрус. С. 261–263.
8. Петров А.А., Асиновский Э.И., Самойлов И.С. Влияние материала катода на импульсы Тричела в отрицательной короне // Труды XLVII научной конференции МФТИ. 2004. Москва-Долгопрудный. Ч. IV. С. 89.
9. Асиновский Э.И., Петров А.А., Самойлов И.С. Эрозия медного катода в отрицательном коронном разряде // Сборник тезисов XXII международной конференции “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество”. 2007. Эльбрус. С. 191.
10. Петров А.А., Асиновский Э.И., Самойлов И.С. Об эрозии катода в безимпульсной отрицательной короне // Труды научной конференции МФТИ. 2007. Москва-Долгопрудный. Ч. IV. С. 158–160.
11. Amirov R.H., Petrov A.A. and Samoylov I.S. Effects of the Dynamics of Cathode Spot on Trichel Pulses // The Proceedings of the 6th Int. Conference on Applied Electrostatics. 2008. Shanghai, China. P. 8–11.
12. Amirov R.H., Petrov A.A. and Samoylov I.S. Mechanism of Cathode Erosion in Negative Corona Discharge // The Proceedings of the 6th Int. Conference on Applied Electrostatics. 2008. Shanghai, China. P. 12–15.
13. Petrov A.A., Asinovskii E.I. and Samoylov I.S. Electro-Explosive Mechanism of Carbon Cathode Destruction in Negative Corona Discharge in Trichel Pulse Regime // 14th International Conference on Plasma Physics. 2008. Fukuoka, Japan. P. 145.
14. Петров А.А., Амиров Р.Х., Самойлов И.С. О механизме эрозии катода в отрицательном коронном разряде // Труды 51-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, часть 4, Молекулярная и биологическая физика. 2008. Москва. С. 164–165.
15. Petrov A.A., Amirov R.H., Samoylov I.S. On the nature of cathode erosion in Trichel pulse negative corona // XXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. 2009. Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. P. 216–217.
16. Петров А.А., Амиров Р.Х., Самойлов И.С. Исследование эрозии катода в отрицательном коронном разряде // Сборник трудов XIII школы молодых ученых “Актуальные проблемы физики”, Звенигород, 2010. С. 46-50.

Петров Алексей Алексеевич
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ КАТОДА В ОТРИЦАТЕЛЬНОМ КОРОННОМ
РАЗРЯДЕ
Автореферат