



«УТВЕРЖДАЮ»

И.О. Генерального директора
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

А.А. Петунин

« 29 » ноября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Селивонина Игоря Витальевича
«Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики
поверхностного барьерного разряда» на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.9 — физика плазмы

Исследуемым объектом диссертационной работы является синусоидальный поверхностный барьерный разряд (ПБР) в воздухе при атмосферном давлении в асимметричной электродной конфигурации кромка-плоскость. Такой разряд широко используется в качестве актуатора для контроля газовых потоков за счет генерации поверхностным разрядом ионного ветра. Диссертация посвящена экспериментальному исследованию процессов деградации кромки пластинчатых коронирующих электродов и обратной связи топологии кромки со свойствами поверхностного барьерного разряда.

В ПБР активным участком разряда, подвергающимся наибольшему энергетическому воздействию, является кромка высоковольтного пластинчатого электрода, лежащего на диэлектрическом барьере. Мощное локальное энергетическое воздействие обусловлено приэлектродным слоем, который формируется на кромке электрода и характеризуется высокой плотностью тока. Вследствие этого при работе в воздухе возникает эрозия тонкой кромки и формирование оксидных слоев на электроде, что в итоге приводит к сокращению срока службы высоковольтного электрода.

Диссертантом впервые показано, что при использовании в ПБР коронирующих электродов в форме тонких пластин из металлов с различной энергией связи оксида наблюдается разные сценарии процессов деградации кромок под действием разряда. На медном электроде с малой энергией связи оксида происходит образование регулярной структуры в виде эрозионных кратеров, на алюминиевом электроде с большой энергией связи оксида образуется однородный по размаху кромки пористый оксидный слой. Продемонстрировано, что в результате изменения состояния кромок происходят значительные изменения пространственной структуры разряда. Например, показано, что наличие оксидных включений на кромке электрода приводит к изменению количества микроразрядов и их характеристик. Кроме того, изменение формы и поверхностных свойств кромок сказывается как на средней рассеиваемой в разряде мощности, так и на пространственной структуре ионного ветра, индуцированного поверхностным разрядом. Описываются основные механизмы, ответственные за медленное изменение параметров разряда в процессе его эксплуатации. Приводятся рекомендации по выбору материала коронирующих электродов ПБР при использовании плазменных актуаторов для управления потоком.

Актуальность темы диссертации.

При исследованиях поверхностного барьерного разряда, как правило, априори предполагается, что материал коронирующего электрода и его состояние не оказывают существенного влияния на характеристики разряда. Кроме того, обычно не учитывается изменение состояния кромки при длительном горении разряда. В то же время, существуют отдельные работы, в которых после длительной эксплуатации ПБР демонстрируется различная структура разряда на электродах из разных материалов, а также работы, в которых отмечается дрейф характеристик разряда при длительной непрерывной работе.

Хотя на сегодняшний день существует консенсус среди исследователей относительно того, что ресурс электродов ПБР определяется их эрозией под действием разряда, однако полная и детальная картина деградации электродов в настоящее время в литературе отсутствует, как отсутствует и детальная информация о влиянии состояния коронирующей кромки на характеристики разряда. В то же время, во многих приложениях, основанных на использовании ПБР, необходимо поддержание горения разряда в течение длительного времени с сохранением постоянства его параметров (управление воздушным потоком, генерация озона, обработка поверхностей и т.п.). По этой причине исследование деградации электродных систем ПБР является не только фундаментальной, но и прикладной задачей, решение которой поможет при разработке новых электродных систем, устойчивых к воздействию барьерного разряда и обладающих предсказуемым поведением при их длительной эксплуатации. Сказанным определяется несомненная актуальность диссертационной работы Селивонина Игоря Витальевича.

Научная новизна работы.

Результаты, вынесенные в основные положения диссертационной работы, имеют научную новизну и представляются фундаментально и практически значимыми.

Автор впервые продемонстрировал влияние выбора материала коронирующего электрода на поведение разрядной системы при длительной ее работе. В работе впервые проводится детальное исследование изменения морфологии коронирующих кромок в ПБР с применением различных методов диагностики поверхности. В работе впервые было экспериментально доказано, что материал электрода при длительной работе разряда оказывает существенное влияние на основные характеристики ПБР: однородность разряда, рассеиваемую в нем мощность, структуру генерируемого ионного ветра, а также пространственную и временную статистику микрозарядов и их характеристики. Кроме того, в рамках диссертационной работы был разработан метод для измерения токовых импульсов в ПБР при атмосферных давлениях, позволяющий анализировать не только интегральные характеристики разряда, такие как переносимый в импульсе заряд, количество микрозарядов, но и форму токовых импульсов, соответствующих различным поколениям микрозарядов, развивающихся с коронирующей кромки.

Научная и практическая значимость работы

Воздействие ПБР на электроды представляет интерес как для физики приэлектродных процессов, так и для физики взаимодействия низкотемпературной плазмы с поверхностью.

Измерение формы токовых импульсов микрозарядов свидетельствуют об изменении в процессах развития микрозаряда на начальной стадии и на стадии их распада. Исследование этих эффектов представляет большой интерес при исследовании развития заряда на электродных кромках с различной структурой и составом.

С практической точки зрения, полученные результаты могут быть полезны при разработке различных устройств на основе ПБР, когда существует необходимость длительной работы электродных систем при стабильных параметрах заряда и/или их предсказуемых изменениях. Использование представленных в работе данных позволит оценивать срок службы разрабатываемых устройств и учесть особенности изменения характеристик заряда при деградации кромок. Полученные данные могут представлять интерес и быть использованными в таких учреждениях как физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Центральный Аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, КНИТУ КАИ им. А.Н. Туполева.

Содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 162 страницах печатного текста, включая 90 рисунков и 3 таблицы. Список литературы насчитывает 173 наименования.

Во Введении дано краткое обоснование актуальности работы, сформулированы цели и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиты. Обозначена научная новизна работы, ее научная и практическая ценность. Представлен список основных публикаций и докладов автора по теме диссертационной работы. Содержание Введения полностью соответствует требованиям ВАК.

В первой главе дан литературный обзор основных положений физики барьерных и коронных зарядов. Приводится описание процессов развития заряда при различной полярности коронирующего электрода, режимов горения ПБР. Детально описываются механизмы развития индивидуальных микрозарядов в сильно неоднородных электрических полях. Приводятся результаты опубликованных исследований эрозии электродов в слаботочных разрядах. В заключении литературного обзора сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе подробно описываются используемые в работе электродные конфигурации, схемы установок и используемая диагностика. Так, ПБР в воздухе возбуждался синусоидальным напряжением при частотах 10 и 100 кГц и амплитудах 2.9 и 3.4 кВ. Давление воздуха варьировалось в диапазоне 0.1 – 4 бар. Диэлектрическим барьером служили пластины из алундовой керамики. Этот материал удобен для экспериментов, т.к. он термически стоек и практически не подвержен эрозии в барьерном разряде. В качестве коронирующих электродов использовались в основном алюминиевые и медные фольги. Во время экспериментов велась регистрация электрических характеристик заряда, а также его оптическая съемка цветными и монохромными CCD камерами с частотой непрерывной съемки 60 Гц. Съемка отдельных микрозарядов проводилась ICCD камерой с минимальной экспозицией в 2 нс. Изменение рельефа электродных кромок исследовалось во время перерывов в работе ПБР с использованием лазерного конфокального микроскопа с разрешением 0.5 мкм по высоте и 1 мкм в плоскости, а также сканирующего электронного микроскопа с разрешением 1.5 нм. Исследовался также элементный EDAX анализ

продуктов эрозии и материала электрода. Приводятся алгоритмы обработки измеренных данных. Детальное описание использованных экспериментальных методик снабжено оценкой их применимости при диагностике ПБР.

В *третьей главе* приводятся результаты исследования изменения топологии электродных кромок из алюминия и меди. При этом обращалось внимание на то, что ПБР в воздухе в процессе работы формирует озон, который является сильным окислителем. Чтобы упростить картину процессов деградации электродной кромки, озон из рабочей области удалялся с помощью вытяжки. В результате проведенных исследований показано, что картина газоразрядной деградации электродов из алюминия и меди принципиальна различна.

В случае алюминиевого электрода деградация его кромки начинается с почернения небольших участков, совпадающих с местами привязок микрозарядов. Со временем области почернения распространяются по всей кромке электрода. Интересным оказалось то, что оксидный слой образуется не на поверхности электрода. Вместо этого, происходит окисление приповерхностных слоев, которое с течением времени затрагивает все более и более глубокие участки материала электрода.

В случае медного электрода горение разряда сопровождается образованием большого количества оксида как на электроде, так и на диэлектрическом барьере. Деградация кромки электрода происходит в результате образования кратеров с размерами 100-200 мкм. При этом оксид осаждается преимущественно вокруг этих кратеров, образуя бортик на поверхности электрода высотой 1–10 мкм.

Описываются основные механизмы, ответственные за процессы деградации и различное поведение кромок из меди и алюминия. Сделан вывод, что главным принципиальным различием, ответственным за различное поведение алюминиевых и медных электродов при воздействии на них разряда, является стойкость оксидов меди и алюминия к распылению. Что касается влияния ПБР на поверхность диэлектрического барьера, то материаловедческий анализ показал практическое отсутствие потери его толщины. В то же время, на поверхности барьера происходит образование регулярной шероховатости, связанной с отложением продуктов эрозии, состоящих преимущественно из оксида материала электродов.

Далее приводятся данные по динамике мощности разряда на электродах из различных материалов и обсуждаются изменения в режимах горения разряда, обусловленные деградацией кромок электродов. Имеются в виду изменения структуры разряда, уменьшение со временем вложенной в разряд мощности, изменения емкости электродной системы, порогов зажигания и контракции разряда. Оказалось, что пороги зажигания разряда на алюминиевых и медных электродах примерно совпадают во всем диапазоне исследуемых давлений, в то время как для деградировавших электродов пороги оказываются выше примерно на 200-400 В.

Режим горения ПБР и его интегральные электрические характеристики определяются параметрами и статистикой отдельных микрозарядов, формирующихся на кромках электродов. Поэтому *четвертая глава* посвящена исследованию влияния состояния коронирующих кромок из меди и алюминия на пространственную и временную статистику микрозарядов, а также на форму их токовых импульсов. Показано, что пространственная структура микрозарядов в стримерной фазе зависит от материала электродов – в случае алюминиевого электрода стримеры оказываются менее разветвленными по сравнению с

медным электродом. Для отрицательных микрозарядов значительного изменения их формы не происходит. Отмечается, что различия в структуре ПБР более выражены для эродированных электродов.

Приводятся результаты исследований пространственной организации многоимпульсного ПБР в течение периода питающего напряжения для медного и алюминиевого электродов в различном морфологическом состоянии их кромок. В случае медного электрода места наиболее вероятного старта микрозарядов примерно совпадают с большими эрозионными кратерами размером $\sim 100-200$ мкм. В случае алюминиевого электрода микрозаряды всегда стартуют с новых областей кромки электрода. Другими словами, старт микрозаряда для любого участка кромки является равновероятным событием. Данное утверждение оказалось справедливым как для отрицательной, так и для положительной полярности электрода. Отмеченный факт объясняется зарядкой поверхности диэлектрической пленки, формируемой на кромке алюминиевого электрода.

Далее приводятся данные исследований по измерению количества микрозарядов, средних величин переносимого в одном импульсе заряда, Q-U гистограмм, формы токовых импульсов при деградации электродов. Исследования проводились для пониженной частоты питающего напряжения $f=10$ кГц и меньшего значения амплитуды $U_a = 2.9$ кВ, при которых энерговклад в разряд практически не меняется со временем, как на новых (не подвергавшихся воздействию разряда), так и на деградировавших электродных кромках.

В результате исследования токовых импульсов и Q-U гистограмм установлено, что во всех случаях в положительном полупериоде со стримерной фазой разряда токовые импульсы намного мощнее и переносят больший заряд, чем в отрицательном полупериоде с фазой тлеющего разряда. При этом в случае медного электрода микрозаряды в среднем намного слабее по сравнению со случаем алюминиевого электрода как в положительный, так и в отрицательный полупериоды. Кроме того, в случае медного электрода переносится меньший заряд в течение одного полупериода.

Важным для практики фактом, одинаковым как для случая медного, так и алюминиевого электрода, оказалось то, что после деградации электрода наблюдается значительное уменьшение заряда, переносимого средним токовым импульсом. При этом количество токовых импульсов за полупериод для ПБР с медным электродом уменьшается, а с алюминиевым электродом увеличивается.

В пятой главе приводятся результаты исследования влияния состояния коронирующих кромок на характеристики ионного ветра, т.е. течения воздуха над поверхностью барьера, индуцированного ПБР. Показывается, что ПБР как плазменный актуатор не стабилен во времени в своих характеристиках - он генерирует течения с различной структурой в зависимости от токовых режимов, которые меняются в зависимости от степени эродированности электродных кромок. Как оказалось, на новых электродах из обоих материалов в потоке возникают продольные вихри, локализованные в окрестности микрозарядных каналов. При деградации кромки медного электрода течение становится еще более неоднородным. Деградация кромки алюминиевого электрода приводит к возникновению практически однородного в среднем двумерного течения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Необходимо отметить следующие отличительные особенности диссертационной работы Селивонина И.В., характеризующие его как опытного экспериментатора.

1. Одновременная регистрация оптического излучения разряда и измерения энерговклада в течение длительного непрерывного горения разряда, а также микроскопия электродных кромок в различные моменты работы ПБР позволили однозначно сопоставить изменения структуры кромки, режима горения разряда и изменений средних по времени электрических характеристик разряда.
2. Использование в работе синхронизированной с токовыми измерениями съемки на ICCD камеру с малыми экспозициями позволило изучить пространственную структуру многоимпульсного режима ПБР внутри одного полупериода питающего напряжения. Было продемонстрировано, что при образовании регулярных структур на медной кромке отрицательные микрозаряды всех поколений распространяются по одинаковым областям диэлектрика. Что касается локализации старта положительных стримеров, то она определяется не распределением плотности заряда по поверхности барьера, а структурой коронирующей кромки, что явилось неожиданным и новым эффектом.
3. Измерения тока в ПБР при атмосферном давлении является нетривиальной задачей вследствие субнаносекундных времен нарастания тока в импульсах и наличия различных типов микрозарядов в течение активной фазы питающего напряжения. Разработанные в рамках работы схемы для измерения тока ПБР позволили успешно решить эту задачу и проанализировать не только интегральные характеристики индивидуальных микрозарядов, но и особенности формы соответствующих им токовых импульсов, что открывает возможности для дальнейшего более глубокого анализа процессов развития микрозарядов на электродах со сложной морфологией.
4. Как правило, в плазменной аэродинамике выбору материала электрода при использовании ПБР не уделяется должного внимания, хотя при этом подразумевается применение ПБР-актуаторов в течение длительного времени. Благодаря представленным в работе результатам можно сформулировать основные критически важные рекомендации при выборе материала электрода, которые окажутся несомненно полезными для использования в работе соответствующими научными коллективами.

Апробация работы.

Материалы диссертации полно представлены на 16 российских и международных конференциях, а также обсуждались на семинаре ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова (протокол №10 от 4 мая 2022), на семинаре «Получение, исследование и применение низкотемпературной плазмы» им. проф. Л.С. Полака № 478 27.06.2022 и на заседании секции №6 «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах», АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 21.09.2022. Основные результаты работы изложены в 6 публикациях в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus.

Замечания и вопросы.

По содержанию диссертационной работы существует несколько вопросов и замечаний:

1. В обсуждении результатов главы 4 утверждается, что основным механизмом, ответственным за увеличение длительности токовых импульсов отрицательных микрозарядов в конце активной фазы напряжения на медном электроде, является накопление отрицательных ионов в области привязки разрядных каналов. При этом не принимается во внимание, что длина микрозарядов растет для последующих поколений, т.е. увеличивается индуктивность микрозаряда. Не может ли именно этот эффект привести к уширению импульса?

2. В качестве основных реакций гибели электронов и наработки отрицательных ионов O_2^- указываются трехчастичные реакции прилипания (33 и 34 в диссертации на стр. 138). Однако, в электродной конфигурации кромка-плоскость электрическое поле обладает большой неоднородностью, и вблизи кромки его напряженность может достигать высоких значений, при которых доминирующим кинетическим механизмом становится двухчастичная реакция с образованием атомарных ионов O^- , которые также будут выступать дополнительным источником электронов вследствие отлипания. Таким образом, при оценке влияния отрицательных ионов на распад плазмы необходимо учитывать эти реакции.

3. При использовании метода PIV газоразрядная область засеивается частицами трассерами. В работе приводятся оценки робастности метода в условии сильного электрического поля, а также на малых временах, однако, не комментируется возможное влияние засева на развитие разряда.

4. При измерении динамики рассеиваемой в разряде мощности в начальные моменты после инициирования разряда ее рост может быть связан с нагревом газа и элементов электродной системы, что не учитывается в работе. Этот эффект может оказывать существенное влияние на измерения при исследовании динамики мощности после пауз в разрядной экспозиции, когда анализируется изменение мощности разряда в первые несколько минут после инициирования разряда.

5. В работе сравнивается два материала коронирующего электрода (Cu и Al), которые различаются не только энергией связи оксида, но и по многим параметрам, например, температурой плавления и теплопроводностью, электропроводностью. Для того, чтобы более полно сформулировать выводы об особенностях поведения электродов из различных материалов, количество рассматриваемых материалов желательно увеличить, проварьировав различные их параметры.

Отмеченные выше недостатки и возникшие вопросы не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Селивонин Игорь Витальевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 — Физика плазмы.

Отзыв подготовлен профессором, доктором физико-математических наук (01.04.08 - физика плазмы) Акишевым Юрием Семёновичем.



/Акишев Юрий Семенович/

Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции №6 "Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах" АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, протокол № 19 от 21.09.2022.

Секретарь секции №6,

кандидат физико-математических наук



Кочетов Игорь Валерьянович

/Кочетов Игорь Валерьянович/

Подписи заверяю

Ученый секретарь Акционерного Общества "Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ")
Телефон: 8 495 8518827

кандидат физико-математических наук
Александр Александрович Ежов



29 ноября 2022г.

