

Отзыв официального оппонента на диссертацию 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

В работе И.В. Селивонина исследуется поверхностный барьерный разряд, проводится исследование механизма поверхностного барьерного разряда, процессов деградации электродов, а также связанные с поверхностным барьерным разрядом гидродинамические явления.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью учитывать процессы деградации электродных кромок при длительном горении разряда, при разработке устройств с требованиями к неизменности характеристик разряда. Исследование процессов деградации электродов позволяет выработать рекомендации по выбору материалов при проектировании устройств на основе барьерного разряда, а также прогнозировать качественные и количественные изменения параметров разряда, и характеристик устройств на его основе.

**Научная новизна** заключается в следующем:

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 микрократерных привязок в случае алюминиевого электрода и квазистационарный режим горения разряда на медном электроде.

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

3. Обнаружено, что деградация 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 70% от начального уровня, в то время как на медном электроде, напротив, наблюдается ее рост на 20-25 %. 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.

4. Впервые проведено детальное исследование влияния состояния кромки на статистику, параметры и форму токовых импульсов в пДБР. В результате деградации электрода разрядом наблюдается значительное уменьшение среднего значения переносимого импульсом заряда. Показано, что на переднем фронте импульсов в отрицательном полупериоде на новых (не подвергавшихся воздействию разряда)

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. На алюминиевых электродах короткий пик в начале импульса наблюдается всегда.

5. Впервые было проведено исследование влияния деградации электродов плазменных актуаторов на структуру генерируемого ими ионного ветра. Показано, что изменение режима горения разряда влияет на трехмерную структуру индуцируемого течения.

**Научная значимость** состоит в том, воздействие 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.

Материал диссертации изложен в 6 главах. **Во Введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования

**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. 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 барьерном разряде, а также 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.

**В третьей главе** представлены результаты исследования процессов деградации кромки коронирующего электрода 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 четвертой главе представлены результаты исследований параметров и статистики токовых импульсов микроразрядов в случае алюминиевых и медных электродов и их изменения при деградации кромок.

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

Продемонстрировано, что вследствие изменения режима горения разряда, обусловленного деградацией электродных кромок, происходят значительные изменения структуры ионного ветра, генерируемого поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом.

В заключении приведены основные выводы работы:

1. Установлено, что деградация коронирующего электрода оказывает существенное влияние на режим горения и организацию поверхностного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Деградация кромок происходит в результате действия 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 частотой рождения микроразрядов, которая растет с частотой и амплитудой питающего напряжения для синусоидального ДБР.

2. Установлено, что вследствие различной стойкости оксидов материала электрода к распылению в катодном слое микроразрядов наблюдается принципиально различные изменения топологии кромок при воздействии на них разряда. При малой энергии связи ( $\epsilon(\text{CuO}) \sim 1.7$  эВ) на электроде формируется эрозионный кратер с чистым материалом электрода, диаметр которого соответствует нормальной площади катодного пятна типичного микроразряда в отрицательном полупериоде питающего напряжения. Между кратерами происходит осаждение и накопление оксида материала электрода, что приводит к блокированию старта микроразрядов с этих областей. При большой энергии связи ( $\epsilon(\text{Al}_2\text{O}_3) \sim 17.3$  эВ) формируется равномерный по длине кромки слой оксида шириной порядка 100 мкм и толщиной 1 мкм, в котором наблюдаются кратеры диаметром  $\sim 100$  нм, образуемые в результате электрического пробоя слоя при прохождении одиночных микроразрядов.

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

3.а). При питании ПДБР напряжением с параметрами 100 кГц и 3.4 кВ на медном электроде наблюдается увеличение мощности на 20-25 %, на алюминиевом – снижение до уровня 70% от начальных значений. Деградация кромки как алюминиевого, так и медного электродов приводит к увеличению пороговых значений зажигания и контракции разряда на  $\sim 100-400$  В (5-10 %) в диапазоне давлений 0.2-10 бар. В бескислородной атмосфере на предварительно очищенных от оксида электродах режим горения разряда не различается.

3.б). На деградировавших электродах при напряжении 10 кГц и 2.9 кВ наблюдается уменьшение среднего значения переносимого микроразрядом заряда в 1.5-2 раза, при этом на медном электроде количество микроразрядов падает, на алюминии – растет. Уменьшение количества импульсов на медном электроде сопровождается

удлинением заднего фронта импульсов и возникновением в отрицательном полупериоде непрерывной компоненты разрядного тока, что объясняется наработкой отрицательных ионов  $O_2^-$ , выступающих дополнительным источником электронов при их отлипании. В случае медного электрода эффект проявляется наиболее сильно вследствие локализации разряда в квазифиламентированном режиме. Этот эффект, предположительно, ответственен за увеличение средней вложенной в разряд мощности при длительном горении разряда при питании ПДБР напряжением с параметрами 100 кГц и 3.4 кВ.

4. Вследствие изменения режима горения разряда, обусловленного деградацией 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 деградации кромки; на новых электродах неоднородный вдоль кромки разряд генерирует ионный ветер с трехмерной структурой.

#### **К работе имеется ряд замечаний.**

1. Значительная часть литературного обзора посвящена коронному разряду. Автор описывает барьерный разряд как множество микроразрядов, аналогичных коронному. Однако, между данными типами разрядов есть различия, например, в коронном разряде межимпульсный интервал определяется процессами дрейфа ионов в дрейфовой области, вызывающими перераспределение поля в промежутке. В барьерном же разряде распределение поля зависит не только от дрейфа ионов, но также и от других процессов, например стекания пространственных зарядов с поверхности диэлектрика, а также изменения потенциала электрода. Необходимо более четкое обоснование границ применимости такой аналогии. Например, при рассмотрении межимпульсного интервала провести оценки, указать на временной шкале характерные времена процессов, приводящих к перераспределению поля в электродной системе.
2. Авторы связывают различие топографии эрозионной поверхности на медном и алюминиевом катоде с энергией связи молекул оксида. Данный подход не вполне обоснован. Подверженность оксидной пленки к распылению может быть не напрямую связана с энергией связи оксида. Такой подход был бы справедлив, если бы мы имели дело с химическим травлением, однако есть еще механизм бомбардировки. Кроме того различное строение пленки, различная толщина, различие в механизмах накопления и стекания поверхностного разряда, может привести к эффектам, связанным с особенностями деградации электродной поверхности. Накопление поверхностного разряда изменяет распределение поля в разрядном промежутке, изменяя, пространственно-временное распределение заряженных частиц в промежутке, приводя к различию энергии бомбардирующих ионов. Вывод о прямой связи энергии связи оксида и топографии

поверхности преждевременный. Тем более что параметры разряда действительно зависят от материала электрода, согласно представленным автором результатам.

3. Коронный разряд – эффективный метод очистки газа от пыли. Использование метода PIV должно подтверждаться численными оценками кинетики зарядки частичек. Автор получает распределение плотности частичек в два последующих момента времени, вычисляя поле скорости ионного ветра. Данный подход для поверхностного барьерного разряда не вполне обоснован, и оценки его применимости даны для тлеющего разряда, и не рассмотрена применимость в случае зарядки частичек в генерационной области микроуазряда, где концентрация ионов может быть на несколько порядков выше, чем в тлеющем разряде. В этом случае динамика частичек определяется не гидродинамическим потоком, вызванным ионным ветром, а электростатическими силами, действующими на заряженные частицы.

Тем не менее, перечисленные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы Селивонина И.В. Работа проведена на высоком уровне с использованием как общепринятых так и оригинальных методик. Получены новые экспериментальные результаты о механизме разряда, которые могут представлять существенный вклад в развитие физики газового разряда.

Результаты **полно опубликованы**, опубликовано 6 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК, а также 16 тезисов конференций. Диссертация и автореферат оформлены хорошо, личный вклад автора хорошо обоснован, автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

С учетом вышесказанного считаю, что диссертационная работа **соответствует** всем критериям, установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013, а ее автор, Селивонин И.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Отзыв составил научный сотрудник лаборатории Вакуумной и плазменной электроники отдела Физической электроники ФИАН, к.ф.-м.н., Петров Алексей Алексеевич.

В.к.н.с. ОФЭ ФИАН, к.ф.м.н.,



Петров А.А.  
30.11.22

Подпись руки Петрова А.А. заверяю,  
Ученый секретарь ФИАН, к.ф.м.н.  
199991 Москва, Ленинский пр. 53,  
office@lebedev.ru, +7 (495)668-88-88



Колобов А.В