

04

Экспериментальное исследование переноса вещества с поверхности сферической капли воды при обтекании плазменным каналом искрового разряда

© И.А. Шорсткий

Лаборатория передовых электрофизических технологий и новых материалов,
Кубанский государственный технологический университет,
350072 Краснодар, Россия
e-mail: i-shorstky@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 марта 2023 г.

В окончательной редакции 23 мая 2023 г.

Принято к публикации 25 мая 2023 г.

Представлены результаты экспериментального исследования переноса молекул воды (пара) с поверхности сферической капли по направлению к аноду при обтекании плазменным каналом искрового разряда в воздухе атмосферного давления. В экспериментах использовались дистиллированная вода и водный раствор хлорида натрия. С использованием высокоскоростного амплитудного усилителя с выходом „monitor“ получены осциллограммы тока разряда и напряжения для четырех опытов: искровой разряд, искровой разряд с каплей дистиллированной воды, искровой разряд с каплей водного раствора хлорида натрия и искровой разряд с многоостриевой структурой анода и каплей дистиллированной воды. Для подтверждения механизма переноса вещества и нахождения молекул воды в зоне замыкания электрического тока плазменного канала искрового разряда на алюминиевой подложке плоского анода получены данные микроструктурного и энергодисперсионного анализа.

Ключевые слова: плазменный канал искрового разряда, перенос вещества, капля воды, диссоциация молекул, ионный канал, эффект кенгуру.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55972.38-23

Введение

Влияние внешнего электрического поля на процессы испарения микрокапель воды привлекает внимание многих исследователей из-за широкого спектра практического применения в электрических микро- и нанoeлектромеханических системах. Электрическое поле оказывает существенное влияние во многих случаях, начиная от теплопереноса при кипении пленок [1], заканчивая манипуляциями ультрамалых капель с помощью ионного ветра коронного разряда [2]. К примеру, наличие электрического поля оказывает существенное влияние на местные процессы теплообмена за счет образования пузырьков воздуха и испарения при кипении [3]. Установлено, что практическое применение электрического поля к капле воды применяется в различных областях, таких как микроэлектроника, электростатическая покраска, электроспрей, наноимпринтинг и другие [4–7]. В направлении „зеленого“ развития базовых отраслей пищевой промышленности развивается применение низкотемпературной плазмы, в которой происходит взаимодействие электрического разряда с пищевым продуктом, основным компонентом которого является влага [8,9]. Для таких технологий процессы переноса тепла и влаги в условиях электрофизического воздействия являются основополагающими. Поэтому как с научной, так и с практической стороны необходимо отчетливо понимать

влияние электрического разряда на процессы переноса вещества с поверхности капли воды.

Несмотря на большое количество работ по исследованию поведения капли воды в электрическом поле, механизмы переноса вещества при нахождении капли воды в электрическом разряде до конца не изучены [2,5–7]. Основные сложности, с которыми исследователи сталкиваются при выполнении подобного рода научных изысканий:

а) высокая скорость распространения газового разряда и малые масштабы эксперимента, в которых сложно получить реалистичные экспериментальные данные;

б) невозможно рассматривать одни и те же модели в макро-, микро- и наномасштабе.

Как правило, в современной литературе для решения подобных задач прибегают к средствам моделирования молекулярной динамики. Работы некоторых авторов продемонстрировали возможность использования последних при рассмотрении вопросов создания спреев и испарения [10]. Однако моделирование проводилось без наличия электрического поля или электрического разряда. Ретроспективный поиск показывает, что при постановке задачи влияния электрического поля на каплю воды рассматривается система, в которой капля воды находится на твердой подложке, выступающей в качестве электрода.

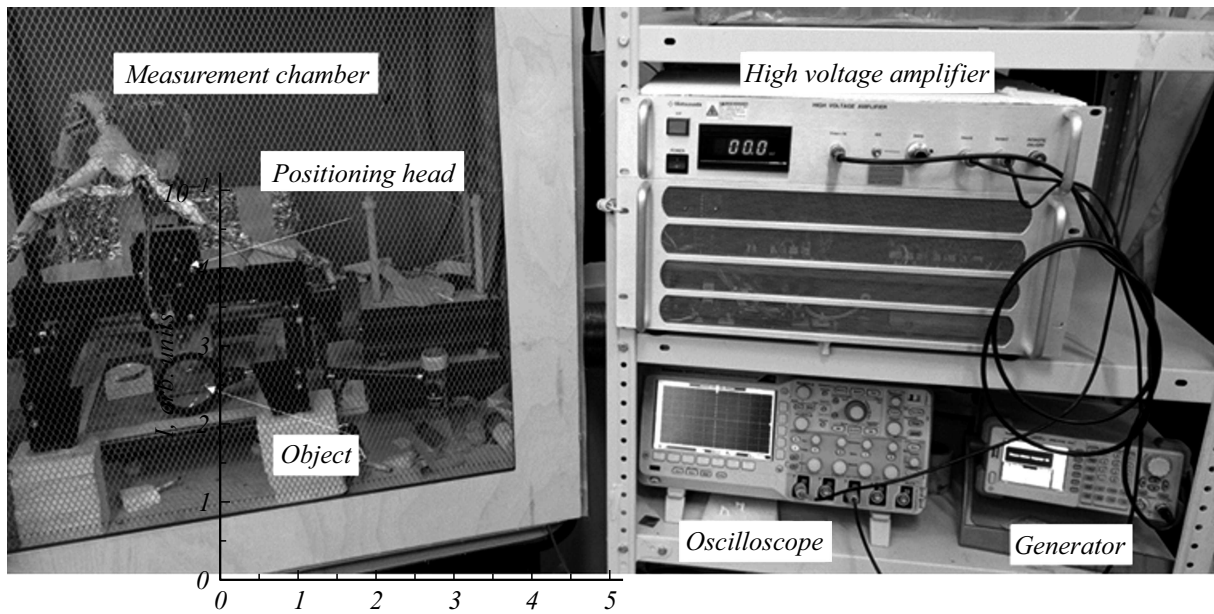


Рис. 1. Лабораторная установка на базе высоковольтного усилителя Matsusada.

Так, авторы отметили значимое влияние угла контакта воды, размера капли воды и полярность применяемого электрического поля на процессы испарения [11]. Другой коллектив авторов рассмотрел поведение ионсодержащей капли воды в электрическом поле, в которой происходили процессы внутренних завихрений [12].

Целью настоящей работы является экспериментальное рассмотрение особенностей переноса вещества с поверхности сферической капли воды, при взаимодействии с набегающим потоком дрейфующих и диффундирующих электронов, эмитируемых источником термоэлектронной эмиссии, входящих в состав плазменного канала искрового разряда. Автор выдвигает гипотезу об „эффекте кенгуру“, как о способности нитевидной плазмы искрового разряда на одном из этапов своего эволюционного развития транспортировать молекулярный ион воды H_2O^+ в непосредственной близости от своей боковой поверхности, вдоль вектора внешнего электрического поля до подложки анодной плоскости, по аналогии переноса детеныша кенгуру в сумке матери.

1. Методика измерений и аппаратура

1.1. Электродная конфигурация и экспериментальная установка

Для реализации поставленного эксперимента используется лабораторная установка с электродной системой, представленной на рис. 1. В качестве источника положительных прямоугольных импульсов использовали систему, состоящую из функционального генератора Agilent 33220A (Agilent Technologies, USA) и высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20 (Matsusada Precision Inc, Japan). Максимальное напряжение на

выходе усилителя составляет 20 kV. Высоковольтный усилитель снабжен возможностью мониторинга величины тока и напряжения через выход „monitor“. Контроль характеристик формы, амплитуды и длительности импульсной компоненты тока и напряжения разряда проводили с использованием цифрового осциллографа Tektronix TDS 220.

Характеристика подаваемого импульса — прямоугольный положительный импульс, длительностью 1 ms с частотой следования 1 Hz. Для всех опытов использовали рабочий газ — воздух при атмосферном давлении. Все проводимые эксперименты проводились при наличии источника термоэлектронной эмиссии. Величина активного сопротивления нити накала (источника термоэлектронной эмиссии) соответствовала 2Ω , а величина приложенного напряжения 1 V. Нить накала одним концом соединена электрической цепью с потенциалом земля и катодом лабораторной установки. Анод выполнен из неодиомового магнита цилиндрической формы и токопроводящей подложки из алюминиевой пластины. Согласно правилу поведения заряженных частиц, в продольных электрических и магнитных полях лабораторной установки при ориентации полюсов постоянных магнитов (электродов) в конфигурации S–N заряженные частицы движутся по винтовой линии.

Для реализации поставленной задачи было рассмотрено 4 опыта (рис. 2):

— Опыт А. Система плоский анод и плоский катод с источником термоэлектронной эмиссии (ТЭ) в виде витка нити накала. Расстояние между источником ТЭ и анодом 9.0 mm.

— Опыт В. Система плоский анод, капля воды и плоский катод с источником ТЭ в виде витка нити накала. Расстояние между источником ТЭ и анодом 9.0 mm.

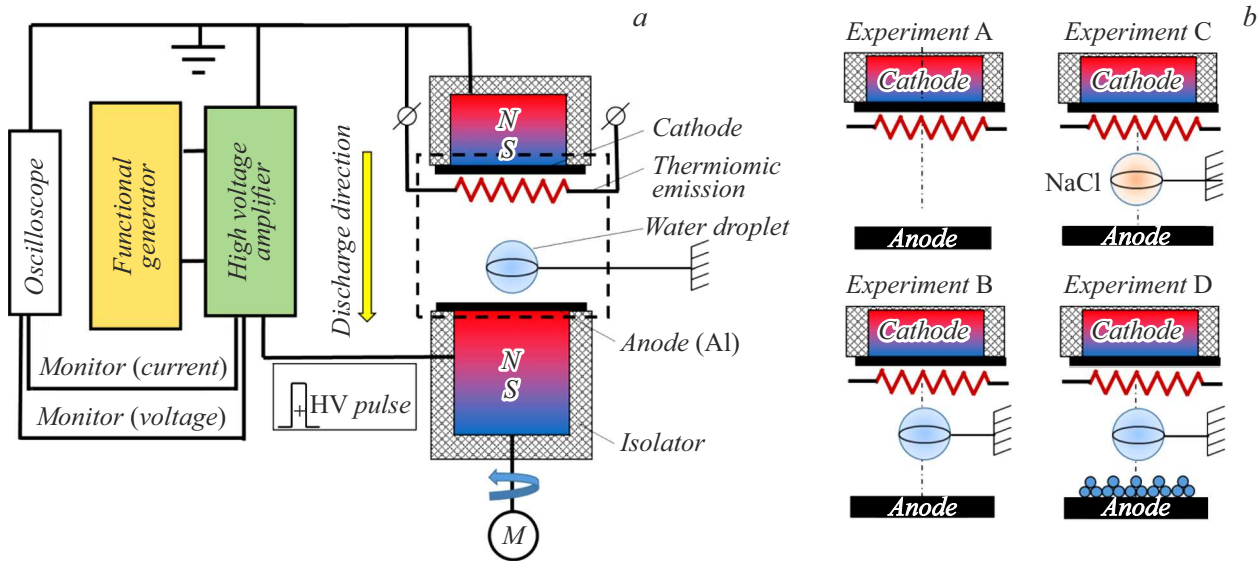


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (не в масштабе) (а), и вариация постановки экспериментов (b).

Центр капли воды расположен на расстоянии 4.5 mm от поверхности анода.

— Опыт С. Система плоский анод, капля раствора хлорида натрия и плоский катод с источником ТЭ в виде витка нити накала. Расстояние между источником ТЭ и анодом 9.0 mm. Центр капли воды расположен на расстоянии 4.5 mm от поверхности анода.

— Опыт D. Система многоострый анод по технологии [13], капля воды и плоский катод с источником ТЭ в виде витка нити накала. Особенность формируемой многоострийной поверхности состоит в наличие острых окончаний, сформированных магнитоуправляемыми частицами Fe и вращением постоянного магнита с остаточной магнитной индукцией 0.8 T с помощью мотора (обозначен как M на рис. 2) и удерживаемых постоянным магнитным полем диполя. Расстояние между источником ТЭ и анодом 9.0 mm. Центр капли воды расположен на расстоянии 4.5 mm от поверхности анода.

В предложенных опытах капля воды с помощью дозатора помещалась в круглую петлю из полимерной нити, где под действием сил поверхностного натяжения принимала сферическую форму. Внутренний диаметр каркаса составлял 3 mm. Интегральные фотографии свечения разряда были получены с помощью скоростной камеры Nikon.

При замыкании электрического тока плазменного канала (суммарный ток проводимости и смещения) на алюминиевую подложку анода, в точке замыкания выделяется джоулево тепло. Результатом джоулевого тепла является образование микрократера. После воздействия плазменного канала искрового разряда на каплю воды в зоне анодной плоскости провели исследование микроструктуры поверхности алюминиевой подложки анода для определения геометрических размеров микрократера. Анализ распределения химических элемен-

тов в контрольных точках на алюминиевой подложке проводили на сканирующем электронном микроскопе EVO HD 15 (Zeiss, Великобритания/Германия), оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа Aztec. Исследование структур поверхности алюминиевой подложки вели при ускоряющем напряжении 10.0–30.0 kV.

2. Сценарии развития процессов

Для описания процессов переноса молекул воды в анодную плоскость рассматривается гипотеза о возможности нахождения молекулярного иона H_2O^+ на боковой поверхности плазменного канала и одновременному перемещению последнего к аноду вдоль вектора внешнего электрического поля (рис. 3, этап 1). Ситуация, аналогичная данной, была описана при дрейфе пылевой частицы Al с зарядом электрона в сторону анода в предыдущей работе [14]. Таким образом, процесс переноса молекул воды подразумевает нахождение молекул воды на подложке анода в зоне радиуса микрократера.

Для описания процессов возникновения пространственной структуры ионного канала, рассматриваются два наиболее вероятных сценария.

Сценарий 1. Диссоциативное возбуждение молекул воды термализованными электронами, обладающими энергией термализации, соразмерной с энергией ионизации молекулы воды

При столкновении с термализованными электронами (рис. 3, этап 2), обладающими энергией термализации, соразмерной с энергией ионизации, молекула воды H_2O , доставленная на анод, распадается на атом водорода H, который остается в основном электронном состоянии

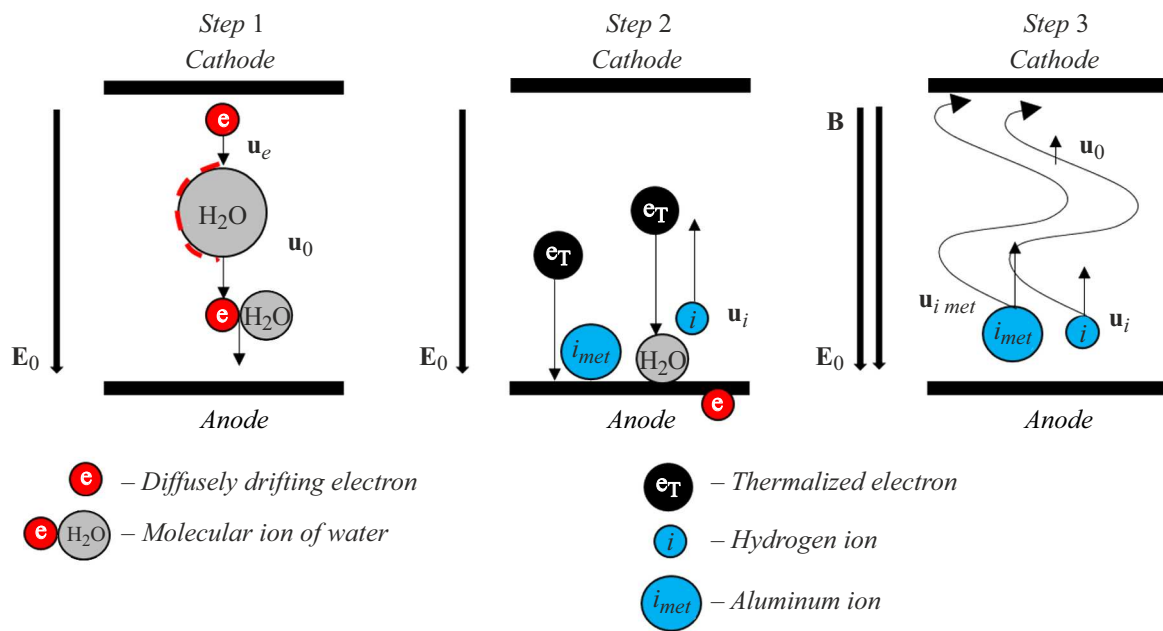
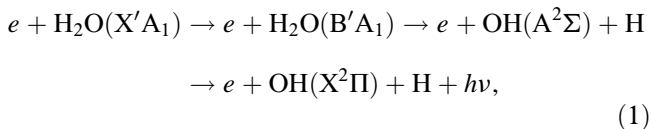


Рис. 3. Схематичное представление переноса вещества с поверхности сферической капли воды при обтекании плазменным каналом искрового разряда в продольном электрическом и магнитном полях: перенос молекулярного иона воды по направлению к аноду диффузными дрейфующими электронами, эмитируемых термоэлектронной эмиссией (этап 1), диссоциация молекул воды от взаимодействия с джоулевым теплом, выделенного при замыкании электрического тока плазменного канала на подложке анода (этап 2) и дрейф ионов по спиралеобразной траектории в продольном электрическом и магнитном полях по направлению к катоду, как результат совместной эрозии металла подложки анода и диссоциации молекул воды (этап 3).

(не возбужденный) и радикал гидроксил OH в возбужденном состоянии ($A^2\Sigma$). Описанный сценарий описывается уравнением [15,16]:



где $X'A_1$ — нормальное состояние молекулы воды при комнатной температуре, $B'A_1$ — линейное состояние молекул воды, $A^2\Sigma$ — возбужденное состояние молекулы воды, $X^2\Pi$ — одно из промежуточных состояний, при переходе из возбужденного состояния $A^2\Sigma$.

Сценарий 2. Омическое нагревание анода в зоне эрозионного кратера от замыкания электрического тока плазменного канала искрового разряда

В данном сценарии рассматривается возможность диссоциации молекул воды за счет количества теплоты, выделяемого вследствие локального плавления металла анода в зоне эрозионного кратера от замыкания электрического тока плазменного канала искрового разряда. Для образования микрократера на поверхности подложки анода необходимо, чтобы через токоприемный участок анодной поверхности протекал электрический ток, который совершит работу, направленную на локальное плавление металла подложки анода (рис. 3, этап 2). Соответствующий энергетический баланс плавления металла анода на 1 микрократер при адиабатических условиях

имеет следующий вид [17,18]:

$$V_{mc}\rho Q_m = \left(\frac{I}{N}\right)^2 R\Delta t, \tag{2}$$

где $V_{mc} = \pi r^2 l_{mc}$, r — радиус микрократера, l_{mc} — его эффективная глубина, ρ — плотность материала электрода, Q_m — удельная теплота плавления металла анода, I — ток, N — количество микрократеров, $R = \rho_e l_{mc} / \pi r^2$ — сопротивление элемента объема будущего микрократера, ρ_e — удельное сопротивление материала плоского электрода, Δt — время. Теплопроводность воздуха более чем на два порядка меньше теплопроводности материала анода и на рассматриваемых длительностях воздействия передачи тепла от нагретого газа из прилегающих к микрократеру областей можно пренебречь [18]. Поэтому в рамках выполненных оценок, в качестве основного фактора нагрева учитывался только омический нагрев.

Их выражения (2) можно определить радиус микрократера [18]:

$$r = \sqrt[4]{\frac{\rho_e I^2 \Delta t}{\pi^2 \rho Q_m N^2}}. \tag{3}$$

Радиус микрократера является своего рода мишенью, куда доставляются молекулярные ионы воды H_2O^+ , дрейфующие во внешнем электрическом поле в непосредственной близости от тела плазменного канала. Таким образом, в зоне радиуса микрократера на поверхности анода возможна диссоциация молекулы воды

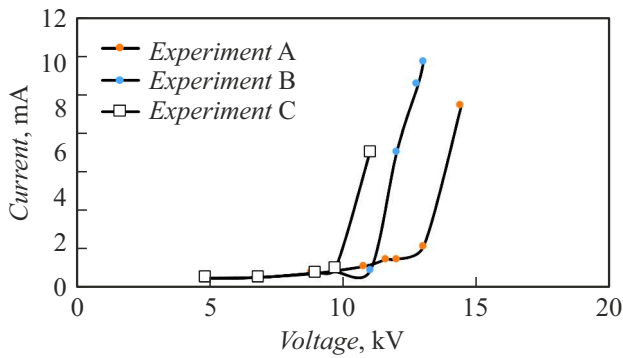


Рис. 4. ВАХ плазменного канала искрового разряда в атмосферном воздухе для опытов А–С.

согласно сценариям 1 и 2. Регистрация свечения оценивается визуально в виде свечения, лежащего в видимой области спектра согласно выражению (1).

При постановке опыта возникающий ионный ток замыкается на токособирающей поверхности катодной плоскости. Таким образом, термоэлемент является зондом и характеризуется площадью поверхности, на которой происходит замыкание ионного тока [15]. Возникновение электрического ионного тока в межэлектродном пространстве приводит к формированию объемного спиралеобразного ионного канала. Концентрация ионного тока характеризуется величиной, при которой наблюдается насыщение ионного тока и определяется по

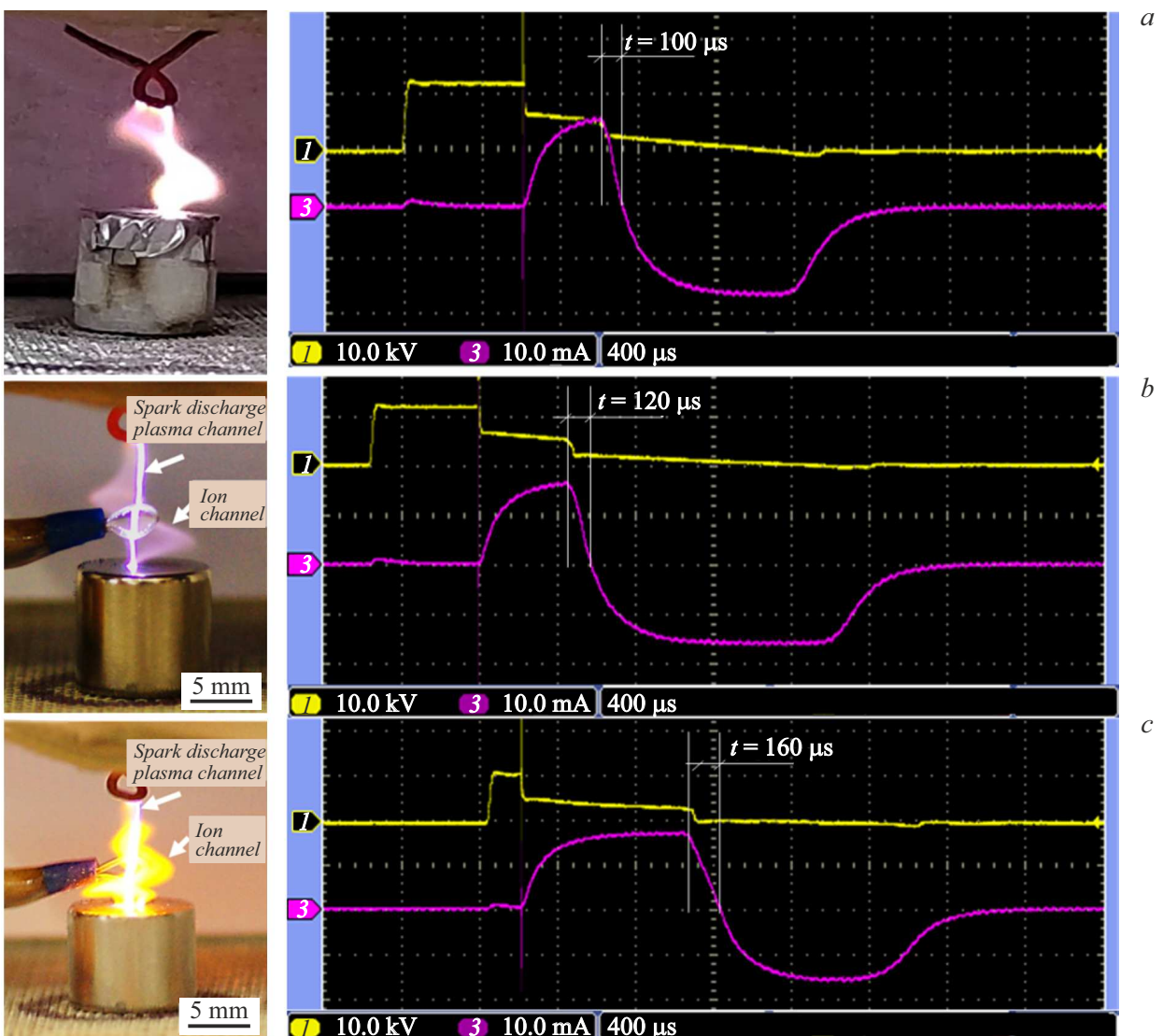


Рис. 5. Визуализация плазменного канала искрового разряда для опытов А (а), В (b) и С (c). Для опытов В и С визуализация представлена в момент обтекания сферической капли воды плазменным каналом искрового разряда (яркий шнур нитевидной формы) и ионным каналом (свечение спиралеобразной формы). Масштаб по вертикали: напряжения — 10 kV/div (кривая 1), тока — 10 mA/div (кривая 3); по горизонтали 400 μs/div.

формуле [17]:

$$i_+ \approx 0.52 S e n_0 \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}, \quad (4)$$

где $e n_0$ — концентрация электронов на токособирающей поверхности катода, S — площадь зонда катода, T_e — температура электрона в энергетических единицах.

Из выражения (4) можно выразить концентрацию зарядов

$$n_0 \approx \frac{i_+}{0.52 S e v_+}, \quad (5)$$

где v_+ — скорость ионов под действием внешнего электрического поля.

3. Результаты измерений

3.1. Электрические характеристики плазменного канала искрового разряда по опытам А–С

На рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) плазменного канала искрового разряда в рассматриваемой лабораторной системе. Полученные ВАХ демонстрируют характерную зависимость для плазменного канала искрового разряда при малых значениях силы тока. При сравнении ВАХ для опытов А–С, наблюдается снижение величины напряжения пробоя межэлектродного пространства между анодом и катодом в лабораторной установки, от величины 14.2 кВ для опыта А до величины 11.6 кВ для опыта В и 11.1 кВ для опыта С. Снижение величины напряжения пробоя обусловлено изменением электропроводности межэлектродного пространства за счет наличия капли воды (опыт В) и раствора хлорида натрия (опыт С).

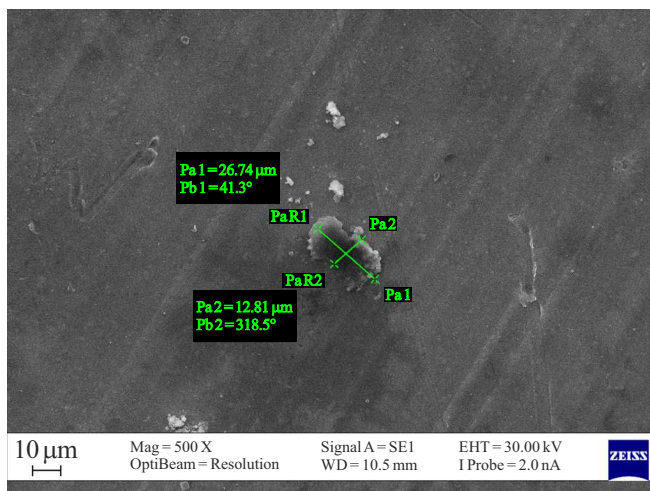


Рис. 6. Визуализация микрократера на поверхности алюминиевой подложки в результате проведенного эксперимента по опыту В.

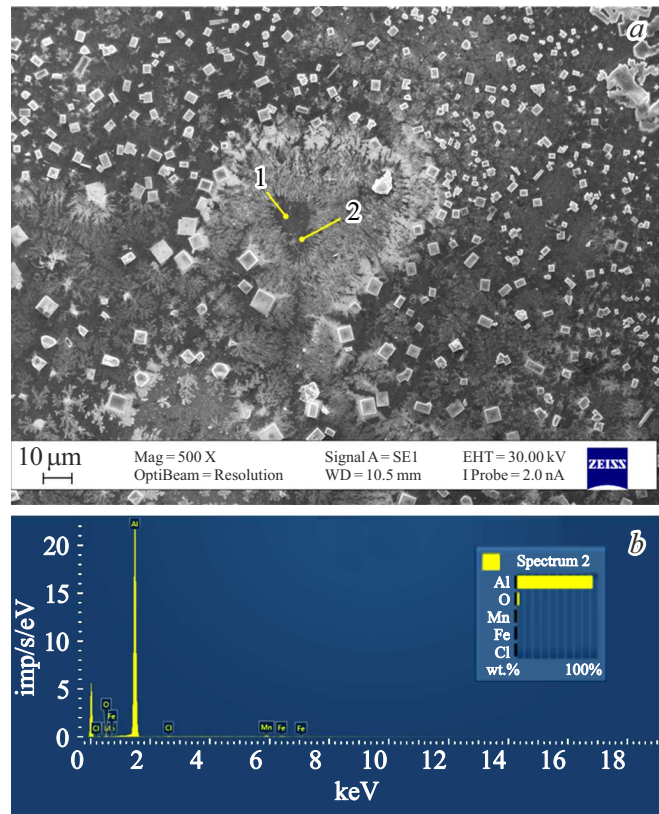


Рис. 7. Микроструктура алюминиевой подложки по результату опыта В для капли воды с хлоридом натрия (а) и спектр распределения химических элементов в точке 2 (b).

Количественный состав химических элементов в контрольных точках в соответствии с рис. 7

Название спектра	O	Al	Cl	Mn	Fe	Сумма
Спектр точки 1		97.72		1.34	0.94	100
Спектр точки 2	4.23	93.57	0.37	1.24	0.59	100

Для рассматриваемых опытов на рис. 5 представлены интегральные фотографии свечения разряда и соответствующие им осциллограммы тока и напряжения. На интегральной фотографии выделяются две области свечения: электронный ток и диффузное свечение спиралеобразной формы для всех поставленных экспериментов. Согласно закону движения заряженных частиц, в продольном электрическом и магнитном полях траектория движения частицы представляет собой винтовую линию. Стоит отметить, что наличие раствора хлорида натрия в межэлектродном пространстве вызвало изменение цвета диффузного свечения на ярко-желтый цвет.

На осциллограммах тока для опытов А–С отчетливо заметно запаздывание возрастания электронного тока от момента подачи напряжения на 600, 560 и 200 мкс соответственно. Одной из характерных особенностей тока плазменного канала является длительное снижение

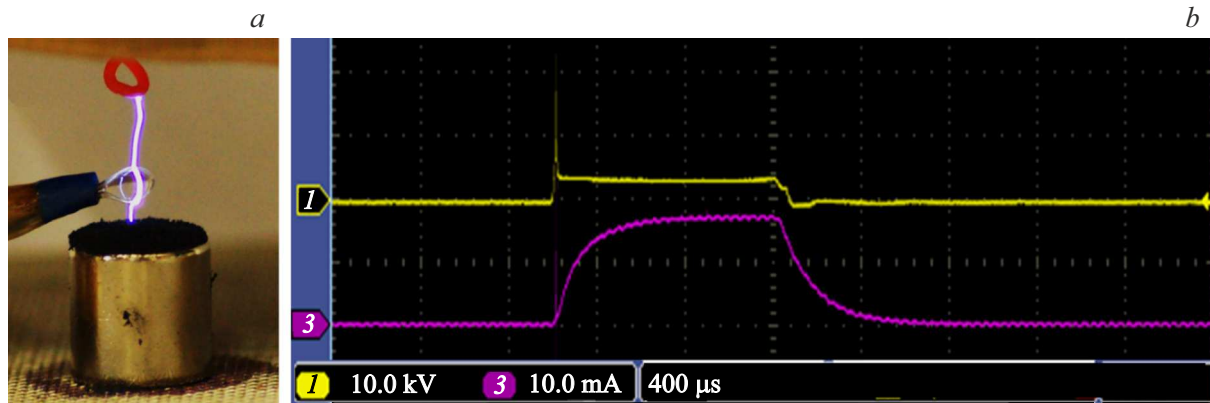


Рис. 8. Интегральная фотография плазменного канала искрового разряда при использовании многоостройной структуры анода (а) и осциллограмма тока проводимости и напряжения (b). Масштаб по вертикали: напряжения — 10 kV/div (линия 1), тока — 10 mA/div (линия 3); по горизонтали 400 μ s/div.

амплитуды тока по экспоненциальному закону. Начало роста ионного тока соответствует формированию диффузного свечения спиралеобразной формы. Длительное снижение амплитуды можно отнести к результату дрейфа молекулярного иона (H_2O^-) в непосредственной близости от плазменного канала искрового разряда во внешнем электрическом поле и замыкание электрического тока в пределах радиуса микрократера.

Для более детального анализа выдвигаемой гипотезы о наличии „эффекта кенгуру“ проведен анализ алюминиевой подложки в зоне замыкания плазменного канала на предмет наличия микроструктурных изменений. Поверхность алюминиевой подложки (анода) по опыту В со сканирующего электронного микроскопа представлена на рис. 6. Полагая для алюминия $\rho = 2.7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $Q_m = 3.9 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$, $\rho_e = 2.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $I = 14 \text{ mA}$ для $\Delta t = 240 \text{ ms}$ (при времени обработки 100 s), в соответствии с выражением (3) получаем $r = 4.3 \mu\text{m}$. При этом диаметр микрократера в результате оплавления металла на рис. 5 составляет 12.8 μm .

Учитывая тот факт, что зафиксировать наличие гидроксидов OH^- в зоне подложки является сложной технической задачей, была проанализирована подложка по опыту С. Для подтверждения „эффекта кенгуру“ по переносу молекул воды (H_2O^- молекулярный ион) в зону микрократера анодной плоскости опыт В был модифицирован. Для этого в состав исходной капли дистиллированной воды был добавлен хлорид натрия в количестве, соответствующем концентрации 10% (опыт С). На рис. 7 представлено изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа и спектральный анализ распределения компонентов в выбранных контрольных точках на поверхности анодной подложки.

Энергодисперсионный микроанализ показывает наличие хлора в зоне микрократера (см. таблицу) за счет реализации механизма переноса вещества плазменным каналом искрового разряда. За пределами зоны мик-

рократера присутствуют ярко выраженные кристаллы соли NaCl.

Для подавления возникновения ионного канала возможно применение многоостройной поверхности анода в виде магнитоуправляемых частиц оксида железа Fe_3O_4 [19] (рис. 8) по опыту D. Данная особенность создаст возможность проводить оценку переносимых на анодную подложку компонентов без последующего разрушения от возникающего ионного тока (рис. 8, b).

Заключение

Визуальное наблюдение за электрическим током (суммарный ток проводимости и ток смещения) плазменного канала искрового разряда и ионным током ионного канала при обтекании капли воды сферической формы, согласно полученной осциллограммы (рис. 5), показало отсутствие разрыва тока за время действия 2.4 мс, подаваемого с высоковольтного усилителя импульса.

За пределами геометрических границ сферической капли воды перенос молекул воды (пара) по направлению к аноду осуществляется „эффектом кенгуру“, когда диффундирующие и дрейфующие электроны транспортируют молекулы воды (H_2O^-) вдоль вектора внешнего электрического поля по направлению к аноду (рис. 3, этап 1). Формирование устойчивого молекулярного иона характеризуется эффектом прилипания электрона к молекуле воды. Флуктуации, связанные с ростом отрицательных молекулярных ионов, приводят к образованию доменов. Домен движется к аноду со скоростью, которая меньше, чем скорость дрейфа электронов, что приводит к росту длительности кривой электрического тока (рис. 5).

По достижению поверхности анода электроны отрицательного иона (H_2O^-) замыкаются на аноде в зоне эрозионного кратера, где джоулево тепло, выделяемое вследствие локального плавления металла от воздействия искрового разряда, позволяет осуществить

диссоциацию молекул воды. Результатом является образование молекулы водорода (H) и иона гидроксила (OH⁻) (рис. 3, этап 2). Диссоциация молекул воды возможна за счет тепловой энергии, выделившейся в результате образования микрократера при плавлении металла подложки анода. Диаметр кратера на поверхности подложки анода является своего рода мишенью, куда доставляются молекулы воды (H₂O⁻), дрейфующие во внешнем электрическом поле, находясь на боковой пограничной поверхности тела плазменного канала.

На основе полученных экспериментальных данных обоснование „эффекта кенгуру“ определяется наличием молекул воды в зоне формирования кратера, как результат работы переноса вещества вблизи боковой поверхности плазменного канала. Данный факт дополнительно подтвержден микроструктурным анализом и спектром распределения химических компонентов (рис. 3) в контрольных точках при использовании хлорида натрия в составе капли воды. Диссоциация молекул воды с ярко выраженным оптическим излучением свидетельствует о том, что молекула воды получила порцию тепловой энергии в зоне микрократера, где свечение возбужденного иона гидроксила OH⁻ оценивается визуально в виде свечения, лежащего в видимой области спектра (этап 3, рис. 3). В состав излучения кванта света также входят кванты излучения, связанные с плавлением металла подложки анода.

Перспективным представляется, подавление возникновения ионного канала за счет применения многоострийной поверхности анода в виде магнитоуправляемых частиц Fe₃O₄. Данная особенность создаст возможность проводить оценку переносимых на анодную подложку компонентов без последующего разрушения.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда, ФГБОУ ВО „КубГТУ“ в рамках научного проекта № МФИ-П-20.1/40. Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП „Исследовательский центр пищевых и химических технологий“ КубГТУ (СКР_3111) развитие которого поддерживается Министерством науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-679).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Sharma, G. Diaz, E. Leal-Quirós. Intern. J. Thermal Sci., **68**, 119 (2013). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.01.003
- [2] A. Hens, G. Biswas, S. De. J. Chem. Phys., **143** (9), 094702 (2015). DOI: 10.1063/1.4929784
- [3] J. Kornev, N. Yavorovsky, S. Preis, M. Khaskelberg, U. Isaev, B.N. Chen. Ozone: Sci. Engineer., **28** (4), 207 (2006). DOI: 10.1080/01919510600704957
- [4] M. Damak, K.K. Varanasi. Sci. Adv., **4** (6), 5323 (2018). DOI: 10.1126/sciadv.aao5323
- [5] A.A. Fedorets, L.A. Dombrovsky, E. Bormashenko, M. Nosonovsky. Intern. J. Heat Mass Transfer., **113**, 712 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.160
- [6] P.M. Ireland, C.A. Thomas, B.T. Lobel, G.B. Webber, S. Fujii, E.J. Wanless. Frontiers Chem., **6**, 280 (2018). DOI: 10.3389/fchem.2018.00280
- [7] D.N. Gabyshev, A.A. Fedorets, O. Klemm. Aerosol Sci. Technol., **54** (12), 1556 (2020). DOI: 10.1080/02786826.2020.1804522
- [8] I. Bashkir, T. Defraeye, T. Kudra, A. Martynenko. Food Engineer. Rev., **12** (4), 473 (2020). DOI: 10.1007/s12393-020-09229-w
- [9] I. Shorstkii, E. Koshevoi. Chem. Engineer., **3** (4), 91 (2019). DOI: 10.3390/chemengineering3040091
- [10] B.B. Wang, X.D. Wang, Y.Y. Duan, M. Chen. Intern. J. Heat Mass Transfer., **73**, 553 (2014). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.034
- [11] V. Vancauwenberghe, P. Di Marco, D. Brutin. Colloids Surfaces A: Physicochem. Engineer. Aspects., **432**, 50 (2013). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.04.067
- [12] Q. Brosseau, P.M. Vlahovska. Phys. Rev. Lett., **119** (3), 034501 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.034501
- [13] И.А. Шорсткий, Н. Яковлев. Перспективные материалы, **3**, 49 (2020). DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-70-79 [I.A. Shorstkii, N. Yakovlev. Inorgan. Mater.: Appl. Research., **11** (5), 1236 (2020). DOI: 10.1134/S2075113320050317]
- [14] И.А. Шорсткий. ЖТФ, **91** (8), 1276 (2021). 10.21883/JTF.2021.08.51105.4-21 [I.A. Shorstkii. Tech. Phys., **91** (8), 1 (2022). 10.21883/JTF.2021.08.51105.4-21]
- [15] А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, О.Н. Афонин. Физика плазмы, **41** (9), 767 (2015). [A.V. Bernackij, V.N. Ochkin, O.N. Afonin. Fizika Plazmy, **41** (9), 767, (2015). (in Russ.)]
- [16] В.Н. Очкин. Спектроскопия низкотемпературной плазмы (Физматлит, М., 2010), 2-е изд. [V.N. Ochkin. Spectroscopy of Low Temperature Plasma (WILEY-VCH, Weinheim, 2009)]
- [17] Ю.П. Райзер. Физика газового разряда (Интеллект, М., 2009)
- [18] Е.Х. Бакшт, О.М. Блинова, М.В. Ерофеев, В.И. Карелин, В.С. Рипенко, В.Ф. Тарасенко, М.А. Шулупов. Физика плазмы, **42** (9), 859, (2016). [E.K. Bakshht, O.M. Blinova, M.V. Erofeev, V.I. Karelin, V.S. Ripenko, V.F. Tarasenko, M.A. Shulepov, Plasma Physics Reports, **42** (9), 876 (2016).]
- [19] И.А. Шорсткий, М.Д. Соснин. Патент РФ № 2789539.