

Использование электродных систем с поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом в качестве эмиттеров тока¹

ЛАЗУКИН А.В., КРИВОВ С.А.

Представлены результаты экспериментальных исследований токовых характеристик объемно-поверхностного разряда в электродных системах с дополнительными электродами. Установлено, что ток на высоковольтный коллектор в рассматриваемых условиях слабо зависит от влажности атмосферного воздуха (в пределах от 15 до 55%) и диэлектрической проницаемости барьера (от 2 до 16, толщина диэлектрического барьера 1 мм). Приведены результаты исследования токовых характеристик плазменного листа в трехэлектродной и четырехэлектродной системах. Показано, что плазменный лист может служить эффективным источником объемного заряда в случае расположения над ним дополнительного электрода, находящегося под положительным постоянным напряжением. Предложен ряд рекомендаций по организации электродных систем с поверхностным разрядом, используемых в качестве эмиттеров тока.

Ключевые слова: поверхностный разряд, ионный ток, диэлектрический барьер, многоэлектродная система, плазменный лист

В 2012 г. группа ведущих мировых ученых, представляющих различные направления исследований по газовому разряду, опубликовала «Плазменную» дорожную карту [1]. В обзорной работе были изложены представления авторов на основании их исследовательского опыта о вероятных перспективах применения плазмы газового разряда в различных областях науки и техники. Среди прочих видов разряда внимание было уделено и барьерному разряду.

Закономерности развития разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика впервые привлекал внимание исследователей более 200 лет назад — в 1777 г. Г. Лихтенберг получал следы скользящих разрядов на слое пудры, нанесенной на заряженную поверхность диэлектрика. Немного более поздней является работа [2], посвященная развитию разряда по поверхности диэлектрика, в том числе влиянию влажности и качеству подготовки поверхности. Менее чем через 50 лет свет увидела работа [3], посвященная выводу выражения для расчета мощности барьерного разряда для промышленного синтеза озона. Окончательное представление о применении барьерного разряда в технологических целях сформировали работы, посвященные физике процессов в оригинальной конструкции зарядного устройства на поверхностном разряде, которое широко известно как *Voxyer-Charger* [4] и исследования по применению барьерного разряда для управления газовыми потоками [5].

В целом число публикуемых в настоящее время работ по данному направлению возрастает почти

экспоненциально [6]. Однако, даже обладая полноценным доступом к ресурсам сетевых библиотек, сложно вынести из массива опубликованных экспериментальных и теоретических результатов рекомендации о применении поверхностного диэлектрического барьерного разряда в электротехнологиях. При этом за прошедшие десятилетия накопилась значительная информация, которую необходимо учитывать при проектировании высоковольтных электротехнологических устройств (систем с поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом для использования в качестве эмиттеров тока).

Классическая электродная система для создания поверхностного разряда представляет собой пару электродов, разделенных диэлектриком [7]: к одному из них приложено высокое переменное напряжение, а второй, соответственно, заземлен. Развития разряда с обеих сторон диэлектрика, как правило, не требуется [8], а разряд на обратном электроде исключается, в основном, за счет расширения площади электрода. Система, состоящая из двух электродов, не всегда оказывается пригодной для решения некоторых технологических задач, например при осаждении аэрозоля. Так, в работах [9–11] используется дополнительный третий электрод, на который подается постоянное напряжение. В плоскопараллельной системе, когда третий электрод находится над плазмогенерирующим электродом параллельно поверхности диэлектрического барьера, принято использовать терминологию, в которой коронирующий электрод называется эмиттером ионов, а находящийся под постоянным напряжением третий электрод — коллектором ионов [12]. Третий электрод может находиться не

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-04384).

только над плазмогенерирующим электродом, но и в его плоскости на поверхности диэлектрического барьера [13]. Такая геометрия при приложении к третьему электроду отрицательного постоянного напряжения приводит к образованию «плазменного листа» [14, 15]. Подобная конфигурация использовалась в системе накачки лазеров [16]. Плазменный лист представляет собой стационарную форму незавершенного скользящего разряда. Развитие плазменного листа не замыкает электроды накоротко (сопротивление 10–60 Ом/см) и не приводит к перегреву рабочей зоны устройства. Как отмечается в [16], сформированный лист может использоваться в качестве катода, в [17] получены плазменные листы длиной до 40 мм. Таким образом, современная электродная система с поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом может состоять из четырех электродов – плазмогенерирующего электрода, его обратного электрода, нормально и тангенциально расположенных дополнительных электродов. В статье рассматриваются результаты исследования развития поверхностного разряда и его токовых характеристик в подобных электродных конфигурациях в различных условиях для разработки технологических рекомендаций. Коаксиальная электродная система использовалась только в экспериментах с дополнительным электродом и четырехэлектродной системой, в остальных случаях использовалась плоскопараллельная система.

Методика проведения экспериментов. Для исследования токовых характеристик поверхностного разряда было подготовлено два вида электродных систем – коаксиальная и плоскопараллельная (рис. 1). Электродные системы размещались в герметичных камерах. Подобные конфигурации были использованы в [14] в коаксиальном исполнении и в [18] – в плоскопараллельном.

Конструкция герметичной камеры позволяет контролировать проток газа через рабочую зону и предотвратить поступление озона в общелaborаторное пространство. Коаксиальное исполнение электродов позволяет исключить нежелательные краевые эффекты при исследовании характеристик четырехэлектродной системы. Стенд кроме герметичной камеры и электродов включает в себя компрессор с фильтром, удаляющим грубые загрязнения в воздухе, систему измерительных ротаметров и регулятор протока, измеритель влажности и температуры ИВА-6. Для питания системы с набором дополнительных электродов были использованы три независимых высоковольтных источника – два источника постоянного напряжения различной полярности и источник стабилизированного синусоидального напряжения с возможностью изменения частоты от 50 Гц до 50 кГц.

Измерение ионного тока в цепи высоковольтного коллектора. Для оценки интенсивности ионообразования используется метод измерения ионного тока по ВАХ при исследовании коронного разряда [19, 20] и при исследовании внешней зоны поверхностного разряда в электродных системах с дополнительными электродами [18]. Постоянное напряжение, приложенное к высоковольтному коллектору, приводит к формированию объемного заряда в промежутке, следовательно – к протеканию ионного тока в цепи высоковольтного коллектора, который легко поддается измерению. Для приведения сравнения между токовыми характеристиками различных электродных систем результаты измерений представлены в виде удельного ионного тока (отношения ионного тока к длине плазмогенерирующего электрода).

Измерение мощности разряда. Для определения мощности барьерного разряда в данном случае используется метод вольт-кулонных характеристик (ВКХ) [3]. Схема измерений включает интегрирующую

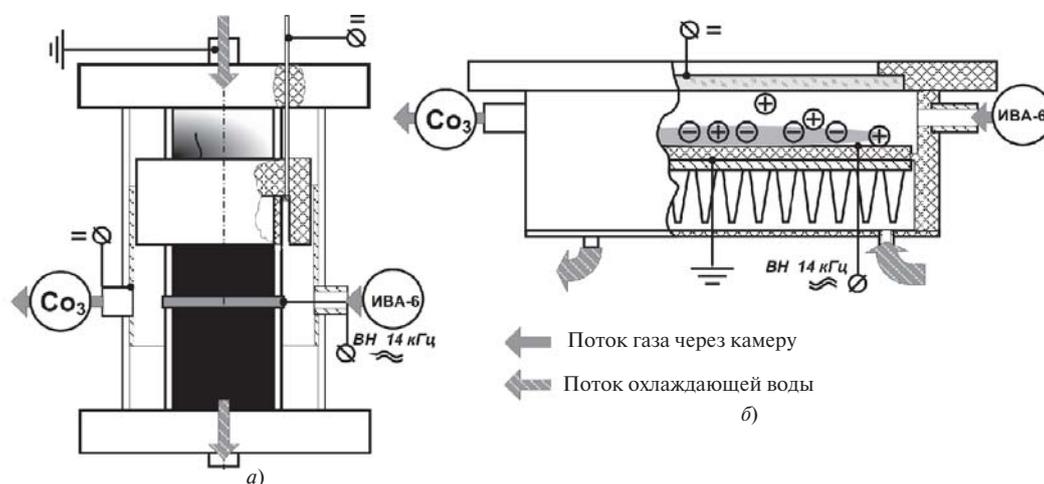


Рис. 1. Электродные системы, использованные в исследовании: а – коаксиальная система; б – плоскопараллельная

щую емкость (8,07 нФ) и высоковольтный делитель (Tektronix P6015 А). Площадь получаемых ВКХ и соответствующая ей энергия определяются математическими методами на основании данных собранной системой цифрового осциллографа TDS 3054.

Подготовка и отбор образцов диэлектрических барьеров. В электротехнике используется большое количество диэлектрических материалов, различающихся по основным свойствам. Многие из этих материалов могут быть использованы в качестве барьера, разделяющего электроды. В [5] рассмотрен достаточно широкий набор материалов для устройств управления газовыми потоками, и автор склоняется в пользу фторопласта и отмечает достоинства корундовых керамик. С учетом результатов этих исследований в качестве материалов барьера выбраны: керамика на основе оксида алюминия ХС-22 ($\epsilon=9$), керамика на основе оксида титана МТ-16 ($\epsilon=16$), оксида кремния Ф-7 ($\epsilon=7$), кислородосодержащий полимер – поликарбонат ($\epsilon=3$), бескислородные полимеры – сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и фторопласт ($\epsilon=2$). Подобный набор материалов позволяет сформировать ряд по увеличивающимся значениям диэлектрической проницаемости – от 2 до 16. Толщина диэлектриков в исследовании – 1 мм. В каждом измерении использовалось не менее трех образцов.

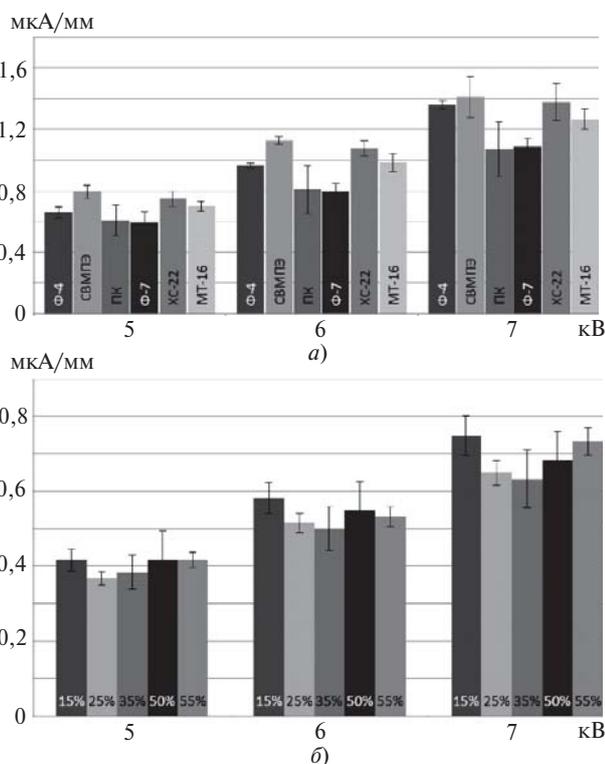


Рис. 2. Зависимость удельного ионного тока в цепи высоковольтного коллектора от напряжения на коллекторе: *а* – для различных материалов диэлектрического барьера; *б* – при различной влажности воздуха

Воздействие поверхностного разряда приводит к постепенному разрушению барьеров. Деструкция барьера может оказывать влияние на интегральные характеристики разряда [18]. Для исключения подобных эффектов проводилась замена образцов, отработавших более 1 ч. В качестве электродов использованы полосы длиной алюминиевой фольги толщиной 50 мкм.

Результаты. Влияние диэлектрической проницаемости на ионный ток. На рис. 2 приведены результаты измерения ионного тока для подобранного ряда диэлектрических барьеров. К коллектору (расстояние от барьера до коллектора 1 см) приложено постоянное напряжение положительной полярности (5–7 кВ). К плазмогенерирующему электроду приложено переменное напряжение 3 кВ (действующее значение, частота 14 кГц).

В рассматриваемых условиях ионный ток не зависит от диэлектрической проницаемости барьера. При этом хорошо известны результаты исследований барьерного разряда, в которых выход озона в поверхностном разряде пропорционален диэлектрической проницаемости барьера [21]. Таким образом, в зависимости от технологических целей можно подобрать материал, обеспечивающий высокие токовые характеристики в сочетании с низким выходом озона.

Влияние влажности газа рабочей зоны на ионный ток. Можно было ожидать, что ионный ток в промежутке проявит устойчивость к влажности среды, что важно с точки зрения переноса результатов лабораторных исследований на реальные технологические установки. Влажность в протоке воздуха измерялась на входе реактора (проточный термогигрометр ИВА-6). Входящий газ осушался продувкой через объем силикагеля. Влажность в экспериментах изменялась в пределах от 55 до 15% (без конденсации влаги). Расход воздуха через рабочий объем реактора составлял 1 л/мин. Результаты измерения токов для разной влажности (барьер ХС-22, напряжение на коронирующем электроде 3 кВ, напряжение на коллекторе 7 кВ положительное, частота питания электрода 5 кГц) приведены на рис. 2,б. Как видно из результатов эксперимента, ионный ток не зависит от влажности в указанных пределах (15–55%) и при заданной геометрии электродов.

Этот эффект требует отдельного внимания. Известно, что влажность газа оказывает заметное влияние на развитие стримера в воздухе [22], в частности, реакция прилипания электрона к молекуле воды идет на порядок быстрее реакции прилипания к атому кислорода. Таким образом, если в состав тока на коллектор входит электронная составляющая, то она должна была подавляться.

Оценки эффективного коэффициента ударной ионизации для рассматриваемых напряженностей [23] указывают на отсутствие свободных электронов в промежутке. Другой возможный вариант — образование кластерных ионов в промежутке, вследствие чего с ростом влажности должна будет снижаться подвижность кластеров по сравнению с одиночными атомами. В [20] указывается, что подвижность не зависит от напряженности электрического поля вплоть до 16 кВ/см. На образование кластеров в умеренно сильных полях уходит время, сравнимое с единицами миллисекунд, в рассматриваемом случае — длительность половины периода, составляет несколько десятков микросекунд. Оценим время, необходимое ионам, чтобы достичь высоковольтного коллектора. Проведем расчет для средней силовой линии; в таком случае, следуя принципу суперпозиции электрических полей, выражение для расстояния, которое преодолевает группа ионов за половину периода:

$$l = \int_0^{p/w} (mE_{\Pi} + mE_m \sin(\omega t)) dt, \quad (1)$$

где E_{Π} — напряженность поля, создаваемая высоковольтным коллектором; E_m — максимальное значение напряженности поля, создаваемого плазмогенерирующим электродом.

Определим границы интегрирования для (1). Конечное время определяется длительностью периода. Расчет проведем для частоты питания 14 кГц, период, соответственно, равен 71,4 мкс; половина периода — 35,7 мкс. Нижняя граница интегрирования определяется возникновением разрядных явлений, а именно, начальным напряжением. Для рассматриваемой геометрии и типа электродов начальное напряжение составляет 1,6 кВ (определено экспериментально, слабо зависит от полярности). В рассматриваемом расчете пренебрежем изменением напряжения зажигания разряда под влиянием объемного заряда. Таким образом, располагая данными об амплитуде напряжения питания ($3\sqrt{2} = 4,2$ кВ), получаем

$$\int_0^{p/w} (mE_{\Pi} + mE_m \sin(\omega t)) dt. \quad (2)$$

$$\frac{1}{w} \arcsin \frac{\partial U}{\partial U_m} \frac{\partial}{\partial t}$$

Напряженность поля высоковольтного коллектора не зависит от времени, как и от подвижности ионов m . Примем, что высоковольтный коллектор находится под положительным потенциалом в 7 кВ. К коллектору движутся отрицательные ионы, подвижность которых составляет $2,1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [23]. Расстояние между коллектором и эмиттером 1 см.

После необходимых математических преобразований, подставив заданные значения постоянных,

получаем, что за половину периода до изменения полярности напряжения отрицательные ионы преодолевают расстояние в 0,65 см. Таким образом, учитывая условия — напряжение на коллекторе выше напряжения на плазмогенерирующем электроде — дрейф ионов в сторону коллектора продолжится и на противоположной полярности напряжения. Следовательно, за два периода группа ионов достигнет коллектора — ионы находятся в промежутке немногим более 100 мкс (143 мкс), что на порядок меньше минимального времени возникновения кластерных ионов в воздухе атмосферного давления, которое оценивается в 1 мс.

Проведенный расчет также показывает, что дрейф проходит, в основном, за счет поля коллектора — пройденное расстояние 0,46 см (0,19 см за счет второго слагаемого формулы (2)). То, что ионы не покидают промежуток за тот полупериод, на котором они возникают, приводит к потерям заряда на рекомбинации — при смене полярности питания, несмотря на то, что объемный заряд будет способствовать развитию начальных микроразрядов.

Условия питания и геометрия электродов должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить дрейф заряда в такой степени, чтобы образовавшаяся за период группа ионов «успела» в максимально возможной степени покинуть промежуток.

Известно, что рост напряжения, приложенного к плазмогенерирующему электроду, приведет к неоправданному росту мощности, введенной в разряд. К тому же принятое допущение о расчете вдоль средней силовой линии сильно искажает роль второго слагаемого в формуле (2).

При увеличении потенциала коллектора выше 10 кВ весь заряд будет покидать промежуток, что должно отразиться на зависимости тока на коллектор от напряжения на коллекторе. В частности должна возрасти интенсивность развития разряда, что подтверждается экспериментом. Вольт-кулонные характеристики, полученные при приложении к коллектору 10 кВ (сплошная линия) и при отсутствии напряжения на коллекторе (штриховая линия) приведены на рис. 3. Расстояние до коллектора 1 см, частота питания 14 кГц. К плазмогенерирующему электроду приложено напряжение 3 кВ (действующее значение). При более низких потенциалах коллектора подобный эффект не проявляется.

Влияние частоты. При заданной геометрии промежутка (в рассматриваемом случае 1 см) можно обеспечить очистку промежутка от объемного заряда не только за счет увеличения скорости его дрейфа путем увеличения напряженности, но и увели-

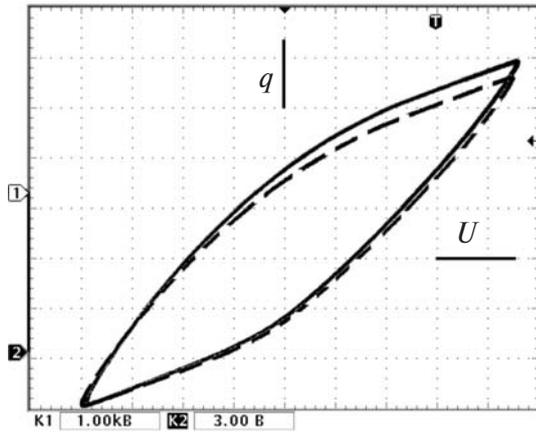


Рис. 3. Вольт-кулонная характеристика разряда при наличии (—) и отсутствии (- - -) напряжения на высоковольтном коллекторе

чивая длительность полупериода, в течение которого это напряжение действует и не возникает обратный разряд.

Измерения концентрации озона на выходе реактора (измерение по поглощению в полосе Хартли, прибор Циклон 5.31) показывают, что выход озона в данных условиях пропорционален отношению частот питающего напряжения (при условии надлежащего охлаждения барьера). Отношение ионных токов для разных частот питания не соответствует отношению этих частот. На рис. 4 приведена зависимость отношения ионных токов на различных частотах к ионному току на частоте 14 кГц. На графике показаны также кратности частот.

При снижении частоты питания разница между двумя этими величинами все сильнее возрастает. Граничная частота для рассматриваемой геометрии составляет около 9 кГц.

Дополнительный тангенциальный электрод. Рассмотрим токовые характеристики электродной системы, когда третий электрод расположен в плоскости барьера и находится под постоянным отрицательным напряжением (вид плазменного листа показан на рис. 5).

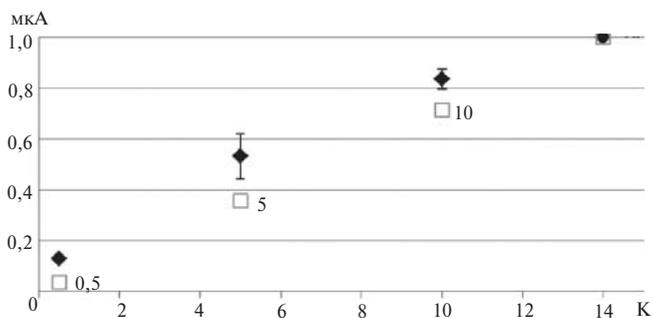


Рис. 4. Зависимость отношения ионных токов на различных частотах к ионному току на частоте 14 кГц: \blacklozenge — отношение тока к току при 14 кГц; \square — отношение частот к частоте 14 кГц

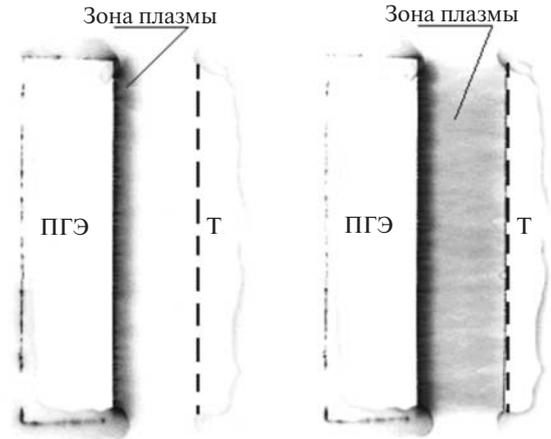


Рис. 5. Электродная система при отсутствии (слева) и наличии напряжения (справа) на тангенциальном электроде (Т); ПГЭ — плазмогенерирующий электрод находится под напряжением в обоих случаях

Сравнение токовых характеристик плазменного листа будем проводить с двумя отдельными половыми электродами. Зависимости ионного тока на дополнительный электрод для отрицательного напряжения приведены на рис. 6. Поскольку плазменный лист располагается только вблизи поверхности барьера, плотность ионного тока в листе не играет существенной роли с точки зрения использования её для устройств зарядки. Однако значение ионного тока и потенциал третьего электрода однозначно определяют мощность, требуемую для поддержания разряда. Перегрев плазменного листа либо превышение значения ионного тока над пороговым значением в 1 мА приводит к контрагированию разряда и распаду плазменного листа. Полученные при перемещении дополнительного электрода различные напряжения возникновения плазменного листа позволяют оценить значения начальной напряженности — 5 кВ/см, что совпадает с данными [17].

Четырехэлектродная система. Как отмечалось ранее, плазменный лист может выступать в качестве катода, поставляя в промежуток отрицательный

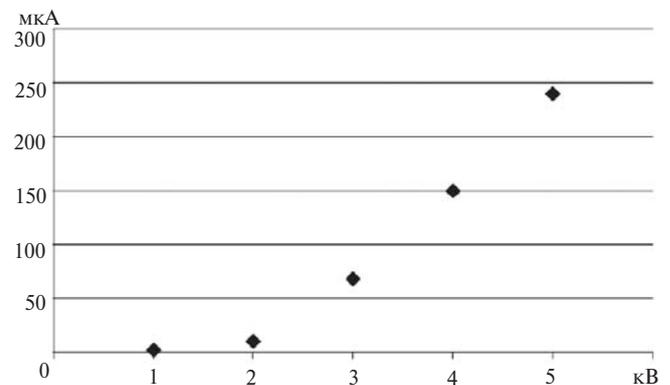


Рис. 6. Зависимость ионного тока в плазменном листе от напряжения на дополнительном электроде

заряд со всей своей площади. Высоковольтный коллектор под положительным напряжением располагается в 10 мм над плоскостью плазменного листа, дистанция до тангенциального электрода составляет 10 мм, ширина плазменного листа, с которой вытягивается объемный заряд, также 10 мм. В качестве барьера выступает кварцевое стекло толщиной 1 мм. Открытая зона плазменного листа, доступная для сбора тока высоковольтным коллектором, составляет 5 мм. К плазмогенерирующему электроду приложено 3 кВ, частота 14 кГц. На графике рис. 7 приведена зависимость ионного тока на дополнительный электрод, расположенный над поверхностью плазменного листа (напряжение на дополнительном электроде 7 кВ, положительное), в зависимости от напряжения на тангенциальном электроде (отрицательное). При визуальной регистрации возникновения плазменного листа (около 3 кВ) ток значительно возрастает.

Площадь, с которой вытягивается ток, составляет 50 мм² или с полосы шириной 10 мм (10 мм — ширина электрода и 5 мм — ширина открытой зоны бокового развития разряда).

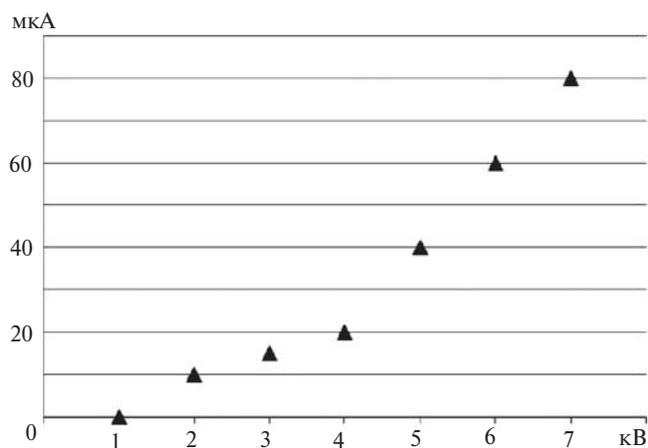


Рис. 7. Ток на дополнительный электрод, расположенный над плазменным листом в зависимости от напряжения на тангенциальном электроде

Следовательно, отношение ионного тока к длине разрядной зоны в рассматриваемой системе электродов составляет $80/10 = 8$ мкА/мм или на площади $80/0,5 = 160$ мкА/см².

Аналогичным расчетом можно определить плотность вытягиваемого тока в полосовой электродной системе при расстоянии между полосами 10 мм. Например, для полос на керамике ХС-22 длиной 60 мм — вытягиваемый ток при напряжении на положительном дополнительном электроде 7 кВ — составляет 160 мкА. С учетом расстояний между электродами и их длины получаем $160/6 = 27$ мкА/см² с площади или $160/120$ (два коронирующих края по 60) = 1,3 мкА/мм. Мощность, затрачиваемая на формирование разряда в полосовой

системе при 3 кВ, 14 кГц, составляет 3 Вт. Для системы с двумя дополнительными электродами при 3 кВ на коронирующем, 5 кВ на тангенциальном электроде и 7 кВ на нормальном электроде получаем 2,8 Вт. Линейная плотность токов отличается примерно в 6 раз, мощность, затрачиваемая на формирование разряда в сравниваемых системах, одинакова. Таким образом, применение многоэлектродных систем в зарядных устройствах на поверхностном разряде является перспективным.

Выводы. 1. Материалы для барьеров в зарядных устройствах должны иметь минимальную диэлектрическую проницаемость. Низкая диэлектрическая проницаемость барьера обеспечит снижение диэлектрических потерь и выхода озона.

2. Влажность воздуха атмосферного давления от 15 до 55% не влияет на ионный ток в трехэлектродной системе.

3. Подбором частоты питающего напряжения и значения постоянного напряжения на высоковольтном коллекторе можно добиться наиболее эффективного выхода объемного заряда из зоны плазмы поверхностного разряда.

4. Плазменный лист является эффективной (по показателям мощности, затрачиваемой на достижение плотности тока) электродной системой для зарядных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutsol A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U. and Mason N. — The 2012 Plasma Roadmap. J. Phys. D: Appl. Phys., 2012, No. 45, 253001, 37 p.
- Toepler M. Zur Kenntnis der Gesetze der Gleitfunkenbildung. — Annalen der Physik, 1906, vol. 326, iss. 12, pp. 193—222.
- Manley T.C. The electrical characteristics of the ozonator discharge. — Trans. of the electrochemical society, 1943, vol. 84, pp. 83—96.
- Masuda S., Mizuno A., Nakatani H. Application of Boxer-Charger in Pulsed Electrostatic Precipitators. — Conf. Rec. of IEEE/IAS, 1979 Annual Conf., pp. 131—138.
- Roth J., Dai X. Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device. — 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2006, No. 19, pp. 14604—14631.
- <http://www.scopus.com/>
- Соколова М.В., Кривов С.А., Темников А.Г. Поверхностный электрический разряд в электротехнологических устройствах и изоляционных конструкциях: Учебное пос. — М.: Изд. дом МЭИ, 2012, 84 с.
- Laurentie J. C., Jolibois J., Moreau E. Surface dielectric barrier discharge: Effect of encapsulation of the grounded electrode on the electromechanical characteristics of the plasma actuator. — Journal of Electrostatics, 2009, No. 67, pp. 93—98.
- Senich M., Masao W., Akira M., Kensuke A. Boxer-Charger a novel charging device for high resistivity powders. — Conf. Rec. of IEE/IAS 1978 (Annual Conf.), pp. 16—22.
- Wild M., Meyer J. and Kasper G. The drained DBD electrode as a charger for highly concentrated aerosols. — European Aerosol Conference 2009 (Karlsruhe). Abstract T062A02.

11. Zevenhoven C.A.P., Wierenga R.D.J., Scarlett B., Yamamoto H. An evaluation of Masuda «Boxer Charger». — Journal of Electrostatics, 1994, No. 32, pp. 133–155.
12. Мошкунев С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямшиков В.А. Электродинамический эффект, получаемый при высокочастотном барьерном разряде в газе. — Прикладная физика, 2011, No. 6, pp. 32–38.
13. Moreau E., Sosa R. and Artana G. Electric wind produced by surface plasma actuators: a new dielectric barrier discharge based on a three-electrode geometry. — J. Phys. D: Appl. Phys., 2008, No. 41, 115204, 12 p.
14. Zouzou N., Mizuno A., Moreau E., Takashima K., Touchard G. Sliding discharge study in axisymmetric configuration. — 28th ICPIG, 2007, July 15–20, Prague (Czech Republic) Topic number: 10, 1007–1010.
15. Sosa R., Kelly H., Grondona D., Marquez A., Lago V. and Artana G. Electrical and plasma characteristics of a quasi-steady sliding discharge. — J. Phys. D: Appl. Phys. 2008, No. 41, 035202, 8 p.
16. Andreev S.I., Belousova I.M., Dashuk P.N., Zaruslov D.Yu., Zobov E.A., Karlov N.V., Kuz'min G.P., Nikiforov S.M., Prokhorov A.M. Plasma-Sheet C02 Laser/Kvant. electron., 1976, vol. 3, Number 8, pp. 1721–1726.
17. Bayoda K.D., Benard N., Moreau E. Elongating the area of plasma/fluid interaction of surface nanosecond pulsed discharges. — Journal of Electrostatics, 2015, No. 74, pp. 79–84.
18. Sokolova M.V., Kozlov K., Mitin A. and Tatarenko P. The role of barrier surface properties in barrier surface discharge behavior. — Eur. Phys. J. Appl. Phys., 2013, No. 61: 24312.
19. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. — Алма-Ата: Наука, 1984, 206 с.
20. Попков В.И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. — М.: Наука, 1990, 253 с.
21. Hulka L., Pietsch G.J. On the ozone production with coplanar dielectric barrier discharge arrangements. — IX Intern. Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. — HAKONE IX, Padova (Italy), 23–27 August, 2004, 50–02.
22. Александров Н.Л., Базелян Э.М., Новицкий Д.А. Влияние влажности на свойства длинных стримеров в воздухе. — ПЖТФ, 1998, т. 24, вып. 9, с. 86–91.
23. Куффель Е., Цаенгль В., Куффель Дж. Техника и электрофизика высоких напряжений/Пер. с англ. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011, 520 с.

[01.07.15]

А в т о р ы : Лазукин Александр Вадимович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ) — ныне Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ» в 2011 г. Научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

Кривов Сергей Анатольевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1980 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости» в МЭИ. Профессор кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp 4–11.

Recommendations to Use Electrode Systems with Dielectric Barrier Surface Discharge as a Current Emmiter

LAZUKIN Aleksandr Vadimovich (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) — Scientific researcher

KRIVOV Sergei Anatol'yevich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

Experimental results of investigation of current characteristics of volume-surface discharge in electrode systems with an additional electrodes are presented. It is found experimentally that there is weak dependence of the current to the high voltage collector on the humidity of the atmospheric air (in the range from 15 % to 55 %) and on the dielectric constan of the barrier (in the range from 2 to 16, thinkness 1 mm). Results of investigation of current characteristics of plasma sheet formed in the three and four electrodes systems are given. The experimental show that plasma sheet may be an effective source of volume charge in case of an additional electrode with positive potential placed about the plasma sheet. Arrange of recommendations are given to organized the electrode systems with surface discharge used as a current emmitter.

Key words: *surface discharge, ionic cirrent, dielectric barrier, multielectrode system, plasma sheet*

REFERENCES

1. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutsol A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U. And Mason N. — The 2012 Plasma Roadmap. J. Phys. D: Appl. Phys, 2012, No. 45, 253001, 37 p.
2. Toepfer M. Zur Kenntnis der Gesetze der Gleitfunkenbildung. Annalen der Physik, 1906, vol. 326, iss. 12, pp. 193–222.
3. Manley T.C. The electrical characteristics of the ozonator discharge. — Trans. of the electrochemical society, 1943, vol. 84, pp. 83–96.
4. Masuda S., Mizuno A., Nakatani H. Application of Boxer-Charger in Pulsed Electrostatic Precipitators. — Conf. Rec. of IEEE/IAS, 1979 Annual Conf., pp. 131–138.
5. R. Roth J., Dai X. Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device. — 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2006, No. 19, pp. 14604–14631.
6. <http://www.scopus.com/>
7. Sokolova M.V., Krivov S.A., Temnikov A.G. *Poverkhnostnyy elektricheskii razryad v elektrotehnologicheskikh ustroystvakh i izolyatsionnykh konstruksiyakh: uchebnoye posobiye* (Surface electrical discharge electro-technological devices and insulation designs: educational supplies). Moscow, Publishing House «Moscow Power Engineering Institute», 2012, 84 p.

8. **Laurentie J. C., Jolibois J., Moreau E.** Surface dielectric barrier discharge: Effect of encapsulation of the grounded electrode on the electromechanical characteristics of the plasma actuator. — *Journal of Electrostatics*, 2009, No. 67, pp. 93–98.
9. **Senich M., Masao W., Akira M., Kensuke A.** Boxer-Charger a novel charging device for high resistivity powders. — *Conf. Rec. of IEE/IAS 1978 (Annual Conf.)*, pp. 16–22.
10. **Wild M., Meyer J. and Kasper G.** The drained DBD electrode as a charger for highly concentrated aerosols. — *European Aerosol Conference 2009 (Karlsruhe)*. Abstract T062A02.
11. **Zevehoven C.A.P., Wierenga R.D.J., Scarlett B., Yamamoto H.** An evaluation of Masuda «Boxer Charger». — *Journal of Electrostatics*, 1994, No. 32, pp. 133–155.
12. **Moshkunov S.I., Nebogatkin S.V., Rebrov I.Ye., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.A.** *Prikladnaya fizika – in Russ. (Applied Physics)*, 2011, No. 6, pp. 32–38.
13. **Moreau E., Sosa R. and Artana G.** Electric wind produced by surface plasma actuators: a new dielectric barrier discharge based on a three-electrode geometry. — *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008, No. 41, 115204, 12 p.
14. **Zouzou N., Mizuno A., Moreau E., Takashima K., Touchard G.** Sliding discharge study in axisymmetric configuration. — 28th ICPIG, 2007, July 15–20, Prague (Czech Republic) Topic number: 10, 1007–1010.
15. **Sosa R., Kelly H., Grondona D., Marquez A., Lago V. and Artana G.** Electrical and plasma characteristics of a quasi-steady sliding discharge. — *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008, No. 41, 035202, 8 p.
16. **Andreev S.I., Belousova I.M., Dashuk P.N., Zaruslov D. Yu., Zobov E.A., Karlov N.V., Kuz'min G.P., Nikiforov S.M., Prokhorov A.M.** Plasma-Sheet CO₂ Laser/Kvant. electron., 1976, vol. 3, Number 8, pp. 1721–1726.
17. **Bayoda K.D., Benard N., Moreau E.** Elongating the area of plasma/?uid interaction of surface nanosecond pulsed discharges. — *Journal of Electrostatics*, 2015, No. 74, pp. 79–84.
18. **Sokolova M.V., Kozlov K., Mitin A. and Tatarenko P.** The role of barrier surface properties in barrier surface discharge behavior. — *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2013, No. 61: 24312.
19. **Bakhtayev Sh.A.** *Koronnyi razryad na mikroprovodakh (Corona discharge on microwires)*. Alma-Ata, Publ. «Nauka», 1984, 206 p.
20. **Popkov V.I.** *Koronnyi razryad i linii sverkhvysokogo napryazheniya (Corona discharge and ENV lines)*. Moscow, Publ. «Nauka», 1990, 253 p.
21. **Hulka L., Pietsch G.J.** On the ozone production with coplanar dielectric barrier discharge arrangements. — IX Intern. Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. — HAKONE IX, Padova (Italy), 23–27 August, 2004, 50–02.
22. **Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Novitskii D.A.** *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi fiziki – in Russ. (Letters in Journal of Technical Physics)*, 1998, vol. 24, iss. 9, pp. 86–91.
23. **Kuffel' Ye., Tsaengl' V., Kuffel' Y.** *Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazhenii/Per. s angl. (Technics and Electrophysics of High Voltage/Trans. from English)*. Dolgoprudnyi, Publ. Hause «Intellect», 2011, 520 p.