

УДК 537.523.2

Особенности электрических характеристик объемно-поверхностного разряда в трехэлектродной системе в воздухе при импульсно-периодическом питании

М. В. Соколова, А. М. Никитин, С. А. Кривов, А. В. Лазукин,
И. Е. Ребров, М. В. Малашин, С. В. Небогаткин

Изложена методика измерения и результаты измерения вольт-кулоновых и вольт-амперных характеристик (ВКХ и ВАХ) объемно-поверхностного диэлектрического барьерного разряда в системе трех электродов при питании коронирующего электрода высоковольтными периодическими импульсами наносекундной длительности и при постоянном потенциале на третьем электроде (высоковольтном коллекторе). Показано, что при импульсно-периодическом питании коронирующей системы полярность и значение постоянного потенциала третьего электрода может влиять на вольт-кулоновые характеристики объемно-поверхностного разряда и на значения тока, «вытягиваемого» полем третьего электрода из плазмы поверхностного разряда

PACS: 52.80.Tn

Ключевые слова: объемно-поверхностный разряд, ВАХ, ВКХ, импульсно-периодическое напряжение, мощность.

Введение

Приводимые в литературе результаты экспериментальных исследований поверхностного барьерного и барьерного разрядов при питании не синусоидальным, а импульсным напряжением с наносекундной длительностью импульсов показывают ряд важных преимуществ при использовании поверхностного разряда в технологических устройствах. Это, в первую очередь, относится к данным по снижению энергозатрат на получение озона из воздуха или кислорода [1]. Дополнение электродной системы третьим электродом, имеющим постоянный потенциал и расположенным над слоем плазмы, создаваемой поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом, позволяет получать существенные плотности тока в газовом

промежутке над коронирующим электродом, а также плотности заряда, выносимого из промежутка газовым потоком [2]. Заметим, что основной объем приводимых в литературе экспериментальных данных по характеристикам объемно-поверхностного разряда относится к случаю питания коронирующего электрода синусоидальным напряжением.

Целью представленной работы является рассмотрение особенностей измерения вольт-кулоновых характеристик (ВКХ) и вольт-амперных характеристик (ВАХ) объемно-поверхностного разряда при питании коронирующего электрода импульсно-периодическим напряжением с импульсами длительностью в единицы микросекунд. Под ВАХ далее понимается зависимость тока на третий электрод («вытягиваемого» тока) от потенциала третьего электрода.

Исследование интегральных характеристик объемно-поверхностного разряда позволяет получить информацию не только о процессах, протекающих в плазме разряда вблизи коронирующего электрода, но и определить потребляемую при разряде активную мощность. Мощность, требуемая на поддержание тока в зоне дрейфа заряженных частиц над слоем поверхностной плазмы, может быть определена из ВАХ, а мощность, требуемая для создания плазменного слоя, определяется по площади ВКХ. Знание активной мощности разряда позволяет оценить такую характеристику разрядной плазмы как эффективность производства заряда и его вывод на высокопотенциальный третий электрод.

Соколова Марина Владимировна, ведущий научный сотрудник.
Никитин Алексей Михайлович, ведущий специалист.
Кривов Сергей Анатольевич, профессор.
Лазукин Александр Вадимович, научный сотрудник.
Национальный исследовательский университет «МЭИ».
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Тел.: 8 (903) 732-51-85. E-mail: mvsokolova@mail.ru
Ребров Игорь Евгеньевич, старший научный сотрудник.
Малашин Максим Владимирович, ст. научный сотрудник.
Небогаткин Сергей Вячеславович, мл. научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергии РАН (ИЭЭ РАН).
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.
Тел. 8 (495) 339-19-46. E-mail: re_i@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 28 августа 2015 г.

© Соколова М. В., Никитин А. М., Кривов С. А., Лазукин А. В.,
Ребров И. Е., Малашин М. В., Небогаткин С. В., 2015

Интерес к использованию питания электродов периодически повторяющимися импульсами во многом связан с развитием твердотельной преобразовательной техники, в т. ч. с разработкой твердотельных коммутаторов для источников высоковольтного питания, способных формировать короткие (наносекундные и микросекундные) импульсы с частотами следования до десятков кГц [3]. Подобный генератор импульсного напряжения использован в предлагаемой работе.

Экспериментальная часть

Основная схема эксперимента представлена на рис. 1. Электрические характеристики измерялись для объемно-поверхностного разряда, происходящего в системе трех электродов, два из которых, а именно, 1 и 2 служат для создания плазменного слоя поверхностного барьерного разряда, а третий электрод 3 служит для «вытягивания» зарядов из плазменного слоя в область газового промежутка, находящегося над слоем плазмы.

Электроды помещены в разрядную ячейку, позволяющую создавать проток газа (осушенного воздуха, влажность 12 %) в газовом промежутке между коронирующим и третьим электродами. Коронирующий электрод представляет собой систему соединенных между собой параллельных полос из никеля, шириной 1 мм и длиной 80 мм и толщиной 30 мкм. Расстояние между полосами составляет 4 мм. Полосы расположены на одной стороне диэлектрического барьера (пластина керамики 22ХС толщиной 1 мм), на обратной стороне которого располагается сплошной электрод из никеля, служащий для подвода высокого потенциала от импульсного генератора и обеспечивающий охлаждение разрядной зоны. Следует отметить, что для работы был взят коронирующий электрод, длительно (порядка 10 часов) работавший в разрядном режиме. Это было сделано для того, чтобы изменения свойств поверхности барьера и края электрода, которые наблюдаются при работе с новым электродом и обычно ведут к изменению характеристик разряда, не влияли на работу и измеряемые характеристики при импульсном питании.

Электрическая схема вместе с разрядной ячейкой полностью представлена на рис. 1. Высокий потенциал от генератора импульсов подводится к сплошному электроду, коронирующий многополосный электрод заземляется через шунт $R_{ш} = 7,4$ Ом или измерительную емкость $C_{изм} = 44$ нФ, показанную на рисунке как позиция 4 и подключаемую вместо $R_{ш}$ при измерении ВКХ. Сигнал с измерительной емкости подается на осциллограф

Tektronix TDS 2012. Емкость всей электродной системы, подключенной к генератору, составляет 130 пФ. Высокое напряжение от генератора измеряется высоковольтным делителем P6015 (коэффициент деления 1000, Tektronix), с нижнего плеча которого сигнал подается на осциллограф. Третий электрод, имеющий постоянный потенциал, располагается на расстоянии 1 см от поверхности барьера. «Вытягиваемый» ток в цепи источника постоянного напряжения измеряется микроамперметром. Импульсный генератор создает униполярные импульсы высокого напряжения до 12 кВ длительностью 5 мкс и с частотой 14 кГц. Длительность фронта положительного униполярного импульса (0,1/0,9) составляет 70 нс, спада — 100 нс. Длительность фронта отрицательного униполярного импульса — 150 нс, спада — 180 нс.

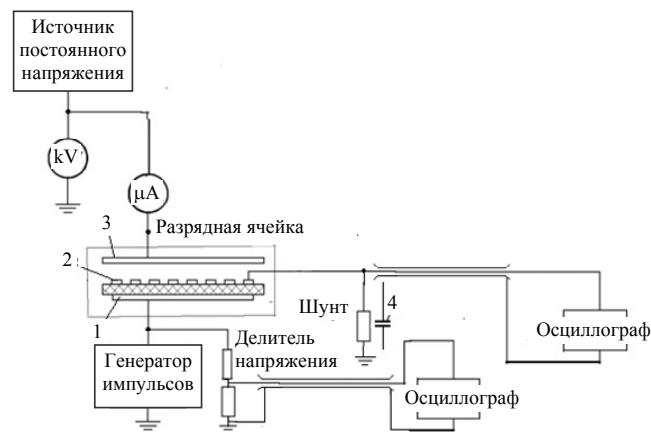


Рис. 1. Схема измерений с разрядной ячейкой: 1 — высоковольтный электрод, 2 — коронирующий электрод, 3 — третий электрод, 4 — измерительная емкость

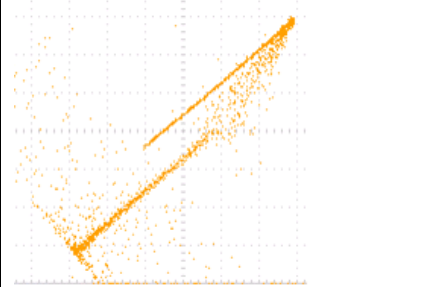
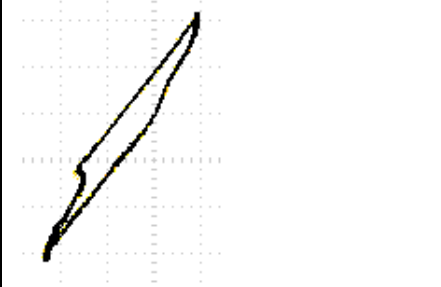
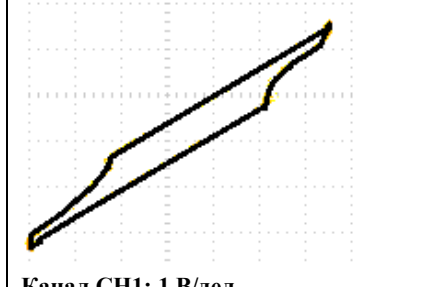
Все измерения проведены в потоке осушенного воздуха при атмосферных условиях. Расход воздуха через ячейку составлял 0,5 л/мин, что соответствует скорости движения газа вдоль поверхности коронирующего электрода 0,04 м/с. Расход охлаждающей воды 0,4 — 0,5 л/мин.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В таблице в качестве примера приведены формы ВКХ, соответствующих поверхностному барьерному разряду в одной и той же системе электродов при воздействии переменного синусоидального напряжения частотой 14 кГц и при воздействии импульсного напряжения разной полярности импульсов. Приведены осциллограммы и указаны чувствительности по разным каналам. СН1 и СН2 соответствуют горизонтальной и вертикальной разверткам по экрану осциллографа, U_m — амплитуда импульса напряжения, $U_{пн}$ — значение постоянного напряжения.

Таблица

Формы ВКХ при разных видах воздействующих напряжений

ВКХ при синусоидальном напряжении $U = 2,7 \text{ кВ}$, $U_{ПН} = -7 \text{ кВ}$	ВКХ при положительном импульсном напряжении $U_m = +6,5 \text{ кВ}$, $U_{ПН} = 0$	ВКХ при отрицательном импульсном напряжении $U_m = -6,5 \text{ кВ}$, $U_{ПН} = 0$
		
Канал CH1: 2 В/дел Канал CH2: 2 В/дел	Канал CH1: 2 В/дел Канал CH2: 5 В/дел	Канал CH1: 1 В/дел Канал CH2: 5 В/дел

Приведенные в таблице осциллограммы были получены с помощью осциллографов с разной полосой пропускания: синусоидальные напряжения и мощности измерялись осциллографом DPO 7325 с полосой пропускания 3,5 ГГц, позволявшим видеть сигналы единичных микрозарядов. При работе с импульсным генератором измерения велись с помощью осциллографа Tektronix TDS 2012 с полосой пропускания 100 МГц и измерительной емкостью 44 нФ, интегрирующий эффект которых дает сглаженный край ВКХ. Различие в способе измерения не мешает видеть стадии процесса горения разряда при разных питающих напряжениях. При импульсном питании область горения разряда на кривой приложенного напряжения существенно меньше, чем на синусоиде.

На рис. 2 приведены значения энергии разряда, соответствующей одному периоду воздействующего напряжения, поступающего от импульсного генератора и соответствующего 14 кГц. Все данные соответствуют положительному импульсному напряжению от генератора на коронирующем электроде. Значения энергии получены при разных амплитудах импульсов напряжения и разных значениях постоянного потенциала на третьем электроде. Кривые *B*, *C*, *D* построены для разряда при положительном потенциале на третьем электроде, кривые *E*, *F* соответствуют отрицательному потенциалу. Основными факторами, определяющими значения энергии, являются амплитуда импульсов напряжения и полярность потенциала третьего электрода. Вплоть до значений постоянного напряжения 4—6 кВ значения энергии практически не меняются, и лишь при значениях постоянного напряжения выше 4—5 кВ наблюдается во всех случаях некоторый рост энергии, что предположительно связано с изменением интенсивности разряда при наличии постоянного потенциала на третьем электроде [4].

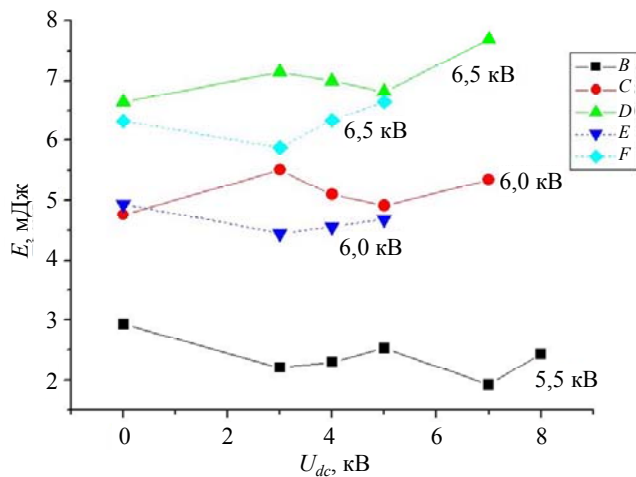


Рис. 2. Влияние постоянного напряжения на третьем электроде U_{dc} на энергию разряда E за период, включающий импульс напряжения и время между последовательными импульсами

Наибольший интерес, по мнению авторов, представляют полученные данные по «вытягиваемому» току (см. рис. 3). Видно сильное влияние значения и полярности потенциала третьего электрода. Это отражается и в значениях удельной энергии разряда, $E_{y0} = E/I$, где E — полная энергия, определенная по ВКХ, а I — «вытягиваемый» ток, определяемый энергией, затрачиваемой на создание заряженных частиц. С ростом потенциала третьего электрода (в особенности отрицательного) происходит снижение удельной энергии на создание «вытягиваемого» тока. При этом влияние амплитуды импульсов напряжения, создающего поверхностный разряд, невелико.

Полученный результат позволяет говорить о высокой эффективности использования импульсного питания для организации поверхностного разряда как источника заряженных частиц.

В свою очередь, следует отметить еще одну особенность, связанную с использованием им-

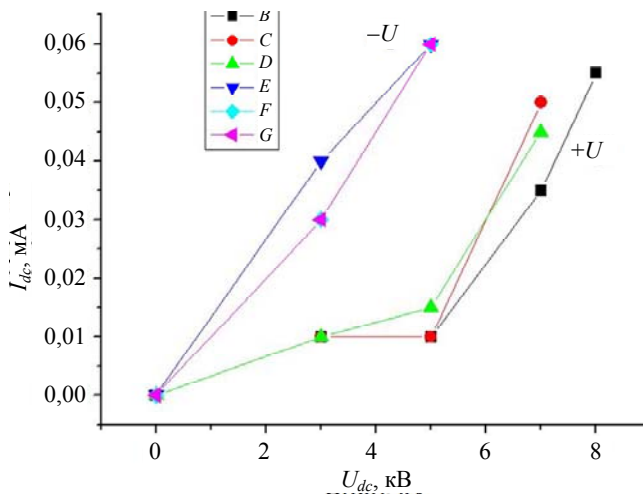


Рис. 3. Влияние значения и полярности постоянного потенциала на третьем электроде на «вытягиваемый» ток. Кривые B и E соответствуют амплитуде импульсов 5,5 кВ, C и F — 6 кВ, D и G — 6,5 кВ

пульсного питания поверхностного разряда в трехэлектродной системе. Импульсный генератор выдает импульсы напряжения, длительность которых составляет менее 5 мкс. Пауза между импульсами при частоте повторения импульсов 14 кГц составляет порядка 70 мкс. При этом импульс имеет прямоугольную форму, амплитуда импульса не меняется в пределах его существования. При использованных значениях амплитуд импульсов (до 7—8 кВ) поверхностный разряд возникает вблизи максимума воздействующего импульса и длится вплоть до достижения амплитуды, что составляет не более 1 микросекунды. Таким образом, вся энергия, связанная с зажиганием и горением разряда на фронте импульса, составляющая до 6—7 мДж, выделяется практически за одну микросекунду, а соответствующая мощность раз-

ряда в течение этого времени горения разряда достигает нескольких киловатт. Однако, если учесть, что разряд горит только часть всего периода, то средняя за период мощность составляет порядка 1 кВт. Несмотря на короткое по времени воздействие, при работе с разрядом наблюдался нагрев (более 60 °С) токоограничивающего сопротивления в цепи питания электродов, создающих поверхностный разряд.

Заключение

Проведенные в работе измерения показали эффективность использования импульсного питания для создания заряженных частиц в поверхностном барьерном разряде. Методика измерений вольт-кулоновых характеристик, а также зависимости «вытягиваемого» тока от потенциала третьего электрода позволяют анализировать свойства поверхностного разряда при разных видах напряжений, приложенных к коронирующему электроду.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-08-04384.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашин М. М., Лысов Н. Ю. // Электричество. 2011. № 12. С. 21.
2. Соколова М. В., Кривов С. А., Скуратов М. В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 12. С. 24.
3. Мошкунев С. И., Небогаткин С. В., Ребров И. Е. и др. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32.
4. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. J. // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 162.

Electric characteristics of a volume-surface discharge in the three-electrode system for impulse-periodic voltage application

M. V. Sokolova¹, A. M. Nikitin¹, S. A. Krivov¹, A. V. Lazukin¹,
I. E. Rebrov², M. V. Malashin², and S. V. Nebogatkin²

¹National Research University MEI
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: mvsokolova@mail.ru

²Institute of Electrophysics and Electropower, RAS
18 Dvortsovaya Embankment, S-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: re_i@rambler.ru

Received August 28, 2015

Experimental methods to measure and measured Volt-Coulomb and Volt-Ampere characteristics (V-C and V-A characteristics) of a volume-surface dielectric barrier discharge in a three-electrode system are presented for a case of periodic nanosecond impulse voltage applied to the corona electrode and a d.c. voltage applied to the third electrode (high voltage collector). It is shown that the polarity of the third electrode potential and its value have effect on the Volt-Coulomb characteristics of the volume-surface discharge and on the amount of the current, “extracted” by the electric field of the third electrode from the surface discharge plasma layer, when a periodic impulse voltage is used to form the surface discharge.

PACS: 52.80.Tn

Keywords: volume-surface discharge, V-C characteristic, V-A characteristic, periodic impulse voltage, power.

REFERENCES

1. M. M. Pashin and N. Yu. Lysov, *Elektrichestvo*, No. 12, 21 (2011).
2. M. V. Solokova, S. A. Krivov, and M. V. Skuratov, *Tech. Phys. Lett.* **36** (12), 24 (2010).
3. S. I. Moshkunov, S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 32 (2011).
4. M. Sokolova, L. Hulka, and G. J. Pietsch, *Plasma Processes and Polymers*. **2**, 162 (2005).