

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ БАРЬЕРНОЙ КОРОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

© 2013 О.А. Журавлев¹, А.В. Ивченко¹, И.А. Бакулин², Х.Д. Ламажапов³

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

²Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева РАН

³Самарский государственный университет путей сообщения

Поступила в редакцию 19.06.2013

Предложена электродная система для физического моделирования процессов возбуждения в воздухе атмосферного давления однородных форм объемного и поверхностного разрядов барьерной короны постоянного тока. Выявлены источники повышения устойчивости разрядов, связанные с предьонизацией воздушной среды в приповерхностном слое подвижного электрода за счет отлипания электронов и освобождения поляризационных зарядов диэлектрика

Ключевые слова: газовый разряд, электродная система, диэлектрический слой, низкотемпературная плазма.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным решением проблемы увеличения мощности коронного разряда постоянного тока в воздухе атмосферного давления явилось применение электродной системы с движущимся диэлектрическим слоем, предназначенным для адсорбции пространственного заряда и переноса его на заземленный электрод (рис. 1) [1]. Введение подвижного электрода 1, 2 (ПЭ), связывающего коронирующий 3 и заземленный 4 электроды, способствовало усилению ионизационных процессов и получению новых форм барьерно-стабилизированных газовых разрядов [2, 3] в барьерной короне постоянного тока (БКТП) [4].

Схематично можно представить, что в рассматриваемой электродной системе отрицательная корона, сформированная на электроде 3, преобразуется с помощью переносимого на ПЭ заряда в однородный поверхностный разряд (ОПР), который возбуждается в промежутке h с заземленным электродом 4 и далее при повышении напряжения U на электроде 3 распространяется по поверхности диэлектрической пленки 2 вверх против направления движения ПЭ. При увеличении уровня перенапряжения на коротро-

не $\beta = U/U_3 \geq 1,5$ ток разряда I_p в промежутке между электродами 3,4 начинает превышать величину составляющей I , заданной предельно допустимой плотностью s переносимых диэлектрической пленкой зарядов

$$I_p > I = \sigma V l, \quad (1)$$

где V – скорость движения поверхности ПЭ, l – ширина коронирующего электрода. При дальнейшем увеличении перенапряжения β полоса ОПР может перекрывать всю ширину рабочего промежутка квазиоднородным полем свечения (рис. 2).

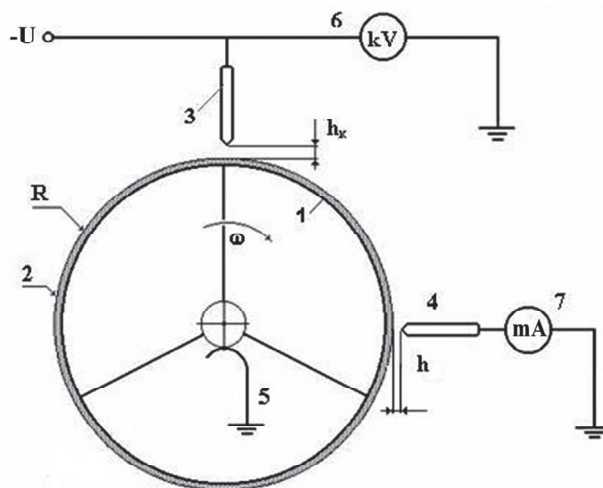


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1, 2 – подвижный электрод (1 – токопроводящий цилиндр – ротор; 2 – диэлектрическая пленка); 3 – коронирующий электрод; 4 – заземленный электрод; 5 – заземление ротора; 6 – киловольтметр; 7 – миллиамперметр; h_k и h – рабочие зазоры электродов; $h \approx 0,1 h_k$; $R=50$ мм; $\omega \geq 2,5 \times 10^3$ об/мин

Журавлев Олег Анатольевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: Guracle@ssau@yandex.ru

Ивченко Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: fgtr@yandex.ru

Бакулин Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: bi205@fian.smr.ru

Ламажапов Хубита Доржиевич, кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: hubitalamazhapov@gmail.com

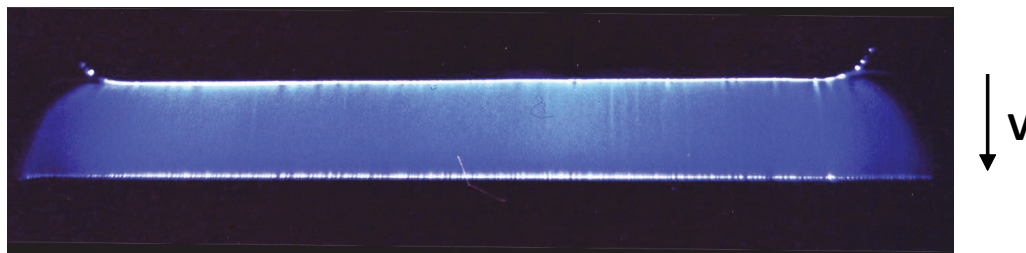


Рис. 2. Свечение завершенной фазы однородного поверхностного разряда на подвижном электроде в промежутке шириной 28 мм между коронирующим 1 и заземленным 2 электродами при напряжении на коротроне $U = -19$ кВ, скорости $V \cong 5$ м/с и толщине диэлектрической подложки $d = 875$ мкм

Такие качества БКПТ, как стабильность возбуждения поверхностно распределенных областей низкотемпературной плазмы в воздухе атмосферного давления, возможность широкого масштабирования параметров электродной системы позволяют говорить о перспективности применения ОПР в бескамерных технологиях газоразрядной обработки материалов и сред, а также в электрофизических устройствах типа плазменных электродов, радиоотражающих зеркал, функциональных элементов в плазменной аэродинамике [5]. В то же время можно указать на отсутствие единства представлений о физике процессов развития БКПТ, которое является следствием недостаточной наработки экспериментальных данных по электрическим и физическим характеристикам разряда.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Физическое моделирование режимов горения БКПТ требует учета большого числа параметров, определяющих условия протекания основных стадий разряда, включая характеристики диэлектрика и подвижного электрода в целом, уровни рабочих зазоров и геометрию острых электродов. Специфика выбора электродной системы в БКПТ рассматриваемой модели определяется необходимостью одновременного возбуждения газоразрядных процессов в рабочих зазорах h_k и h (см. рис. 1) соответственно коротрона и заземленного электрода с поверхностью ПЭ. Следует учитывать, что определяющую роль в формировании ОПР играет стадия развития несамостоятельного газового разряда (типа положительной короны), возбуждаемого электрическим полем, индуцированным зарядами на поверхности диэлектрика ПЭ в промежутке h относительно заземленного электрода. В связи с малой величиной зазора ($h \cong 0,5$ мм) напряженность электрического поля E можно оценить как $E = \varphi / h$, где φ - потенциал поля на поверхности ПЭ, определяемый в приближении неподвижной диэлектрической подложки известным выражением:

$$\varphi = \frac{\sigma d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad (2)$$

Здесь d – толщина диэлектрического слоя на ПЭ, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Учет движения поверхности ПЭ требует расширения представления о происходящих в рассматриваемой электродной системе газоразрядных процессах. Анализ ранее полученных результатов показывает, что уменьшение d пленки при заданных скорости V движения ПЭ и напряжения U на коротроне приводит к увеличению электрической емкости подвижного электрода и характеризуется повышением интенсивности ионизационных процессов в промежутках h_k и h . Однако происходящее при этом увеличение I_p разряда не сопровождается заметным продвижением внешней границы области свечения ОПР. Более того, увеличение перенапряжения $\beta \geq 1,6$ для пленок толщиной $d \leq 200$ мкм, выполненных из такого материала, как лавсан и полиимид ($\varepsilon \geq 3$), приводит к периодической генерации в межэлектродном промежутке каналов искрового пробоя, что говорит о снижении устойчивости ОПР.

С другой стороны, повышение толщины d подложки, как показано на рис. 2, обеспечивает увеличение устойчивости ОПР и достижение при $\beta \geq 3$ завершенной фазы без контрагирования разряда. Основным недостатком ОПР на толстых диэлектрических пленках является малая величина линейной плотности тока, не превышающая 0,3 мА/см.

В работе ставится задача исследования механизмов повышения устойчивости низкотемпературной плазмы поверхностного разряда, возбуждаемого на тонких высокоомных диэлектрических пленках ($d \leq 200$ мкм) при умеренных перенапряжениях ($\beta \geq 2$) за счет введения физически обоснованных изменений в конфигурацию применяющихся электродов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Более детальное исследование картины процессов в электродных системах, подобных рис. 2, показывает, что коронный разряд в зазоре с ПЭ

уже при $\beta \geq 2$ имеет крайне неоднородную структуру, реализуясь в виде протяженных стримерных каналов, распространяющихся против \vec{V} движения ПЭ. Однако, как видно из рис. 2, неоднородности в структуре разряда под коротроном не отражаются на распределении поля свечения ОПР в промежутке электродов 1,2. Здесь следует отметить проявление характерного для БКПТ с отрицательным коротроном такого физического эффекта, как повышение проводимости газа в приповерхностном слое ПЭ, способствующего ускорению процесса выравнивания распределения плотности поверхностных зарядов. Это связано, по-видимому, с перекрытием ионизационных областей стримерных каналов вблизи коронирующего электрода, в том числе за счет взаимной фотоионизации. Как следствие, неравномерная картина свечения токовых каналов многостримерной короны переходит в однородное поле свечения ОПР. Высокая степень однородности ОПР появляется и в зоне заземленного электрода 2. Основным механизмом такого явления может быть связан с повышением уровня ионизации газа в поле поверхностных зарядов на ПЭ, обусловленный, например, отлипанием электронов от отрицательных ионов.

Важным этапом в процессе получения завершеного ОПР является финальная часть, связанная с замыканием внешней кромки поверхностного разряда на высоковольтный электрод. Повышение устойчивости разряда на данном этапе требует введения дополнительных механизмов обеспечения однородности ОПР. В частности, для исследования процессов усиления тока разряда и уверенного возбуждения ОПР при ограниченном перенапряжении $\beta < 2$ необходимо применение специализированной электродной системы, обеспечивающей возможность оптимизационного варьирования размеров электродных зазоров, межэлектродного промежутка на поверхности ПЭ, толщины диэлектрической подложки и т.д.

В качестве примера на рис. 3 представлена разработанная электродная система БКПТ с составным высоковольтным электродом (ВВЭ) 1,2 и дополнительным заземленным электродом 3. Присоединение к острейшему коротрому 1 медного насадка 2 шириной 5 мм с профилированным рабочим торцом позволило пространственно разделить функции ВВЭ, который должен иметь острейшую рабочую кромку для возбуждения объемного разряда 4 в зазоре h_k и сглаженный торец для безыскрового замыкания полосы ОПР 5, развивающейся от дополнительного электрода 3. Электрод 3 выполнен с возможностью перемещения в пространстве над ПЭ и регулирования угла наклона к поверхности ПЭ.

Перенос высокого напряжения с помощью насадка 2 в сторону дополнительного заземленного электрода 3 с образованием рабочего промежутка шириной 30 мм между электродами 2,3 позволяет расширить диапазон изменения тока ОПР. При этом на рис. 3 показано, что замыкание полосы свечения ОПР на профилированную кромку насадка 2 происходит непосредственно в зазоре с ПЭ. Дальнейшее увеличение U на ВВЭ приводит к повышению интенсивности свечения полосы ОПР, что характеризует возрастание эффективности ионизационных процессов.

Устойчивость процессов возбуждения однородных форм объемного 4 и поверхностного 5 разрядов в представленной на рис. 3 электродной системе говорит о необходимости рассмотрения дополнительного механизма повышения уровня предьонизации газа в приповерхностном слое ПЭ. Такой механизм повышения концентрации зарядов в газе связывается с зарегистрированным на рис. 3 сектором с устойчивой поляризацией диэлектрической подложки ПЭ в промежутке от коротрона 1 до рабочего торца насадка 2. Нарушение устойчивости поляризованного состояния связывается в [6] с воздействием таких факторов, как нагрев диэлектрика, радиационное облучение, резкое изменение внешнего электрического поля. Все указанные факторы сопутствуют рассматриваемым в работе формам газовых разрядов и должны стать предметом дальнейших исследований.

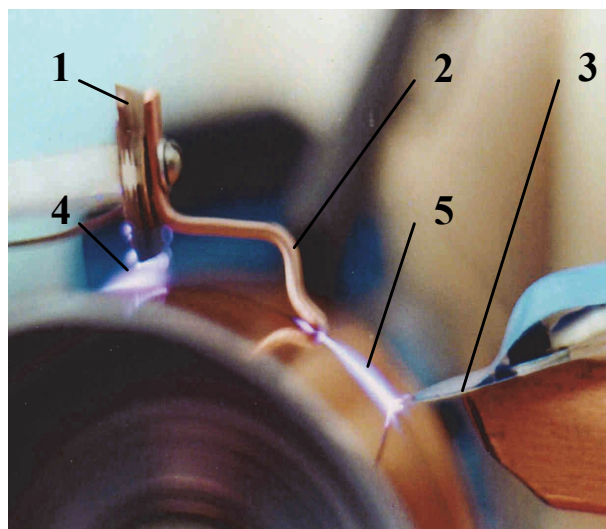


Рис. 3. Возбуждение разрядов в специализированной системе электродов при напряжении $U = -13$ кВ, ширине промежутка 30 мм, скорости поверхности подвижного электрода $V = 16,5$ м/с и толщине $d = 200$ мкм: 1, 2 – составной высоковольтный электрод (1 – лезвийный коротрон, 2 – профильный насадок); 3 – дополнительный заземленный электрод; 4 – объемный разряд; 5 – однородный поверхностный разряд

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена специализированная электродная система, обеспечивающая стабильное возбуждение однородных форм газового разряда в воздушных промежутках с подвижным электродом.

2. Введение насадка позволяет получать однородное поле свечения завершеного поверхностного разряда при меньшем напряжении на коротроне и умеренных скоростях V перемещения ПЭ. Насадок обеспечивает сохранение рабочей кромки коротрона от искрового пробоя. При этом достигается увеличение линейной плотности тока до 1 мА/см и более.

3. Анализ рабочих характеристик однородных форм объемного и поверхностного разрядов указывает на необходимость исследования дополнительных механизмов предьонизации, связанных с процессами инжекции электронов с рабочей поверхности ножевых электродов, динамикой их переноса в ловушках диэлектрического слоя, а также выхода из них.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-00992-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев О.А., Федосов А.И. Некоторые особенности разряда в газовом промежутке с диэлектриком на подвижном электроде // Тез. докл. VI конференции по физике газового разряда. Казань: КАИ, 1992.
2. Патент 2030046 МКИ Н01 S3/0977. Устройство возбуждения объемного разряда в плотных газах. / О.А. Журавлев. №4842699/25. Опубл. 21.02.95. Бюл. №6.
3. Патент 2106049 МКИ Н01 S3/097. Устройство возбуждения однородного поверхностного разряда в плотных газах / О.А. Журавлев, А.О. Ситкин, А.И. Федосов (РФ). №95101325/25. Опубл. 27.02.98. Бюл. №6.
4. Барьерная корона постоянного тока: процессы формирования и примеры применения / О.А. Журавлев, А.В. Ивченко, И.А. Бакулин и др. [под редакцией В.П. Шорина]. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2010.
5. Ивченко А.В., Журавлев О.А., Шахов В.Г. Газоразрядная генерация пристеночных течений / Вестник СГАУ. 2012. №5.
6. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989.

THE ELECTRODE SYSTEM IMPROVEMENT FOR BARRIER CORONA AT DIRECT CURRENT

© 2013 О.А. Zhuravliov¹, A.V. Ivchenko¹, I.A. Bakulin², H.D. Lamazhapov³

¹Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of RAS

³Samara State Railways University

The electrode system to the physical modeling of excitation processes in air at atmospheric pressure of uniform bulk and surface barrier corona discharges at direct current has been offered. The discharge stability sources increase are identified. It is associated with air pre-ionization in near-wall layer at movable electrode due to electron detachment and emission of accumulate charges from dielectric.

Key words: gas discharge, electrode system, dielectric layer, low-temperature plasma.

Oleg Zhuravliov, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: Guravlevssau@yandex.ru

Alexey Ivchenko, Candidate of Technics, Associate Professor.

E-mail: fgrrt@yandex.ru

Igor Bakulin, Candidate of Physics and Mathematics, Chief Research Fellow. E-mail: bi205@fian.smr.ru

Khubita Lamazhapov, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor. E-mail: hubitalamazhapov@gmail.com