

УДК 537.523.3,537.523.9

ИНИЦИАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРИМЕРОВ БАРЬЕРНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АРГОНЕ

© 2019 г. Б. Б. Балданов¹*, А. П. Семенов¹, Ц. В. Ранжуров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: baibat@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований отрицательной короны постоянного напряжения, возбуждаемой металлическим острием над плоскостью, покрытой диэлектриком. Показано, что при повышении напряжения на поверхности диэлектрика формируются яркие поверхностные разряды — стримеры, при этом имеется как контрагированная, так и диффузная формы разряда.

DOI: 10.1134/S036767651911005X

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия наблюдается значительный научный и практический интерес к способам генерации низкотемпературной неравновесной плазмы атмосферного давления, что связано с широким применением неравновесной плазмы для решения различных научных и производственных задач (контроль загрязнений, удаление летучих органических соединений, контроль выхлопных газов автомобилей, генерация озона, очистка воды, обработка поверхности полимеров) [1].

Одним из наиболее эффективных и технологичных методов улучшения контактных свойств поверхности полимеров является воздействие на нее низкотемпературной неравновесной плазмы [2]. При этом важной особенностью процесса плазмохимической модификации полимерных материалов является то, что изменениям подвергается только поверхность полимера и тонкий поверхностный слой толщиной 10–1000 нм [2]. Структурно-химические превращения в поверхностном слое, вызванные воздействием плазмы, ведут к изменениям электрофизических, физико-механических, оптических и других свойств поверхности полимера [3–8].

В настоящее время известен ряд газоразрядных методик, используемых при создании технологий обработки поверхности полимеров: коронный, барьерный, тлеющий низкочастотный (НЧ, 1 кГц), высокочастотный (ВЧ, 13.56 МГц), микро-

волновый (СВЧ, 2.45 ГГц) разряды, скользящая дуга [9–15]. Однако несмотря на целый ряд достигнутых положительных эффектов взаимодействия системы плазма-полимер, в т.ч. реализованных в промышленности, механизм и соответственно технология плазменной обработки полимеров разработаны недостаточно.

Особое место среди плазменных способов обработки полимеров занимают слаботочные поверхностные разряды, которые характеризуются малой плотностью тока (не более 10 мА/см²) на поверхности и невысокой плотностью энергии (не более 10 Вт/см²), что является важным условием при плазменной обработке поверхности термически чувствительных полимерных материалов. Поверхностные разряды реализуются в диффузной или стримерной формах в различных газовых средах, и в широком диапазоне токов и напряжений: в классических барьерных разрядах, в переходных разрядах (“surface partial discharges”), кратковременно возникающих на диэлектрической поверхности при наложении импульса какой-либо одной полярности, а также в барьерной короне переменного тока [9, 15].

Целью данной работы является изучение слаботочного поверхностного разряда в аргоне атмосферного давления с диэлектрическим барьером на аноде, инициированного отрицательным коронным разрядом постоянного напряжения.

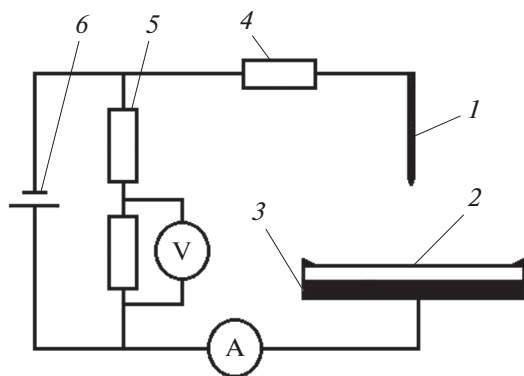


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – острие; 2 – плоский электрод; 3 – диэлектрический барьер из полимерной пленки; 4 – балластное сопротивление; 5 – делитель напряжения; 6 – источник питания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 [16–18]. Исследования проводили в разрядной камере ($150 \times 100 \times 100 \text{ мм}^2$) с вмонтированными электродами острие-плоскость. Катод 1 – острие представляет собой стальной стержень с радиусом закругления вершины конуса $r = 25 \text{ мкм}$. Плоский электрод 2 представляет собой конструкцию из стальной пластины площадью $S = 96 \text{ см}^2$. На плоский электрод помещается диэлектрик – полимерная пленка (политетрафторэтилен, толщина $d = 60 \text{ мкм}$), которая удерживается на краях специальными зажимами. Расстояние от вершины острия до диэлектрической пленки составляет 30 мм.

Максимальное напряжение регулируемого высоковольтного источника ВС-20-10 составляло 20 кВ. Для стабилизации разряда острие нагружали регулируемым балластным сопротивлением $R_b > 1 \text{ МОм}$. Плазмообразующий газ аргон прокачивается через разрядную камеру. Расход аргона G измеряется с помощью ротаметра РМ-А-0.16 ГУЗ до $5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отрицательная корона с диэлектрическим барьером на аноде реализуется путем подачи постоянного напряжения U на электродную структуру острие-плоскость. Разряд инициируется повышением напряжения до некоторого критического значения, соответствующего напряжению зажигания U^* . Визуальная картина свечения отрицательной короны с барьером качественно соответствует общепринятому определению короны и характеризуется слабовыраженным свечением зоны генерации, которая располагается вблизи острия, при этом дрейфовая область остается практически темной [19]. На рис. 2 представлены фотографии, иллюстрирующие эволюцию развития поверхностного разряда, возбуждаемого коронирующим острием отрицательной полярности над полимерной пленкой. При дальнейшем повышении напряжения на поверхности диэлектрика начинают формироваться яркие поверхностные разряды – стримеры.

Как видно, стримеры формируются на краю диэлектрической пленки, при этом имеется как контрагированная, так и диффузная форма разряда (рис. 2а). Первичные стримеры, зарождающиеся на краю диэлектрика, имеют контрагированную форму разряда, которые при дальнейшем распространении по поверхности диэлектрика начинают сильно ветвиться. На расстоянии $l = 1.5\text{--}2 \text{ см}$ на поверхности диэлектрика относительно оси острие-плоскость стримеры полностью распадаются, и на площади $S = 3 \text{ см}^2$ формируется объемная диффузная плазменная область. Дальнейшее повышение напряжения U приводит к увеличению частоты следования поверхностных стримеров, одновременно при этом усиливается свечение и сужается площадь, занимаемая диффузной плазменной областью. В данном режиме формирования разряда стримеры характеризуются сложной пространственной структурой, однако при этом имеют выраженную периодичность формирования и частоту следования (рис. 3). Отметим, что слаботочные поверхностные разряды характеризуются

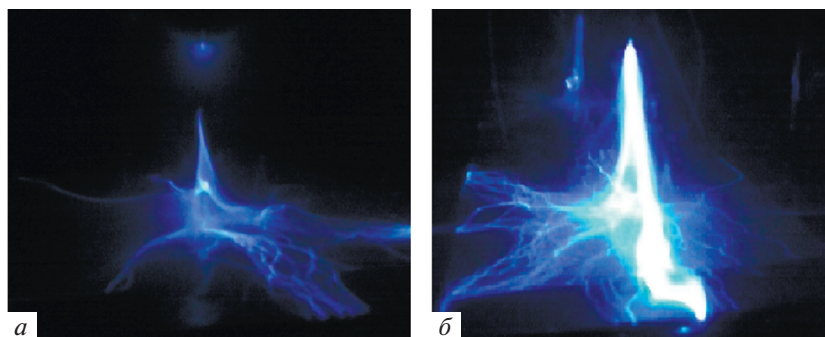


Рис. 2. Стадии горения отрицательной короны с диэлектрическим барьером – пленка ПТФЭ, толщиной $d = 60 \text{ мкм}$.

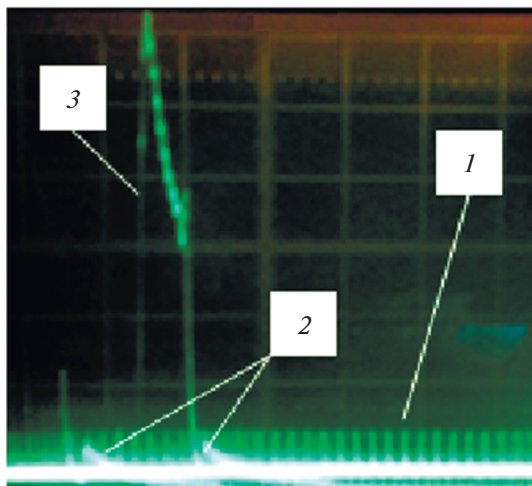


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока: 1 – импульсы тока отрицательной короны; 2 – импульсы тока поверхностного разряда; 3 – импульсы тока стримерного разряда ($I = 1.4$ мА, $t = 0.3$ мс).

малой плотностью тока (не более 10 мА/см²) на поверхности и невысокой плотностью мощности (<10 Вт/см²).

По мере роста напряжения в сформировавшейся плазменной диффузной области зарождаются отдельные стримеры, которые затем вытягиваются из плазменной области в сторону коронирующего острия (рис. 2а). При замыкании разрядного промежутка острие-плоскость стримерами разряд переходит в режим контрагированного плазменного разряда, характеризуемого ярким однородным свечением в пределах плазменного канала. В режиме плазменного контрагированного разряда поверхность диэлектрика практически полностью заполняется поверхностным разрядом, состоящим из множества стримеров различного диаметра и диффузной плазмы, заполняющей пространство между стримерами (рис. 2б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований отрицательной короны постоянного напряжения, возбуждаемой металлическим острием над плоскостью покрытой диэлектриком. Установлено, что при повышении напряжения на поверхности диэлектрика формируются яркие поверхностные разряды – стримеры. Стримеры формируются по краю диэлектрической пленки, при этом имеется как контрагированная, так и диффузная форма разряда. Экспериментально показано, что в режиме контрагированного разряда поверхность диэлектрика практически полностью заполняется поверхностным разрядом, состоящим из множества стримеров различного диаметра и

диффузной плазмы, заполняющей пространство между стримерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fridman A., Chirokov A., Gutsol A. // J. Phys. D. 2005. V. 38. Art. № R1.
2. Гильман А.Б. Взаимодействие химически активной плазмы с поверхностью полимерных материалов. В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. Фортова В.Е. Вводный т. IV. М.: Наука, 2000. С. 393.
3. Гильман А.Б. // Хим. выс. энергий. 2003. Т. 37. № 1. С. 20. Gilman A.B. // High Energy Chem. 2003. V. 37. № 1. P. 17.
4. Гильман А.Б., Потапов В.К. // Прикл. физ. 1995. № 3–4. С. 14.
5. Рычков А.А., Малыгин А.А., Трифонов С.А. и др. // Журн. прикл. хим. 2004. Т. 77. № 2. С. 280; Rychkov A.A., Malygin A.A., Trifonov S.A. et al. // Russ. J. Appl. Chem. 2004. V. 77. № 2. P. 276.
6. Pelagade S.M., Singh N.L., Rane R.S. et al. // J. Surf. Engin. Mater. Adv. Techn. 2012. № 2. P. 132.
7. Kim S.R. // J. Appl. Polymer Sci. 2000. V. 77. № 9. P. 1913.
8. Guzman L., Man B.Y., Miotello A. // Thin Solid Film. 2002. V. 420. P. 565.
9. Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Каральник В.Б. и др. // Физ. плазмы. 2004. Т. 30. № 12. С. 1088; Akishev Yu.S., Aponin G.I., Karal'nik V.B. et al. // Plasma Physics Reports. 2004. V. 30. № 12. P. 1012.
10. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Монич А.Е. и др. // Хим. выс. энергий. 2003. Т. 37. № 5. С. 330; Akishev Yu.S., Grushin M.E., Monich A.E. et al. // High Energy Chem. 2003. V. 37. № 5. P. 286.
11. Njatawidjaja E., Kodama M., Matsuzaki K. // Surf. Coatings Techn. 2006. V. 201. № 3–4. P. 699.
12. Lui C.Z., Wu J.Q., Ren I.Q. et al. // Mater. Chem. Phys. 2004. V. 85. P. 340.
13. Jie-Rong C., Wakida T. // J. Appl. Polym. Sci. 1997. V. 63. № 13. P. 1733.
14. Xu H., Hu Z., Wu S. et al. // Mater. Chem. Phys. 2003. V. 80. P. 278.
15. Шемякин И.А., Королев Ю.Д., Касьянов В.С. и др. // Изв. вузов. Физ. 2014. Т. 57. № 10/3. С. 312.
16. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. // Прикл. физ. 2014. № 2. С. 26.
17. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. // Усп. прикл. физ. 2014. Т. 2. № 2. С. 112.
18. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. // Хим. выс. энергий. 2016. Т. 50. № 1. С. 64; Baldanov B.B., Ranzhurov T.V. // High Energy Chem. 2016. V. 50. № 1. P. 60.
19. Дандарон Г.-Н.Б., Балданов Б.Б. // Физ. плазмы. 2007. Т. 33. № 3. С. 273; Dandaron G.-N.B., Baldanov B.B. // Plasma Phys. Rep. 2007. V. 33. № 3. P. 243.