

И.Ш.Абдуллин, В.С.Желтухин\*, М.Ф.Шаехов

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ ВЧ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Казанский государственный технологический университет,  
420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68. E-mail: Abdullin\_i@kstu.ru

\* Казанский государственный университет,  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18. E-mail: Viktor.Zheltukin@ksu.ru

При обработке материалов различной физической природы в ВЧ плазме пониженного давления (1,33-133 Па) в окрестности обрабатываемых тел обнаружено наличие слоя, отличающегося от объемной плазмы. Для исследования свойств приповерхностной плазмы создан диагностический комплекс, включающий в себя миниатюрные магнитный зонд и пояс Роговского, зонд Ленгмюра, СВЧ-зонды, голографический дифракционный интерферометр и голограммный анализатор волновых фронтов, проточные калориметры, анализатор энергии ионов. С помощью диагностического комплекса проведены исследования распределений концентрации и энергии электронов, напряженности магнитного поля и плотности тока, оптических характеристик плазмы в окрестности тела, распределение потенциала плазмы, плотность ионного тока и энергия ионов, поступающих на поверхность тела.

Результаты исследований показали, что квазинейтральная плазма ВЧ разрядов пониженного давления в инертных газах характеризуется следующими параметрами: степень ионизации в плазменной струе  $10^{-7}$ - $10^{-4}$ , концентрация электронов  $10^{15}$ - $10^{18}$  м<sup>-3</sup>, электронная температура 1-4 эВ, температура тяжелых частиц  $(0,35-1,0) \cdot 10^3$  К, при этом на поверхность тела, помещенного в плазму, поступает поток ионов, обладающий энергией от 20 до 100 эВ при плотности ионного тока 0,5-25 А/м<sup>2</sup>. Значения энергии ионов и плотности ионного тока на поверхность тела зависят от типа разряда (индукционный, емкостный или комбинированный), давления, мощности разряда, расхода газа.

Анализ экспериментальных данных показал, что любое тело, независимо от его физической природы, помещенное в ВЧ плазму пониженного давления, становится дополнительным электродом. Поэтому у его поверхности, так же, как и в приэлектродной области ВЧ емкостного разряда, образуется слой положительного заряда (СПЗ). Толщина СПЗ составляет  $(0,5-2,5) \cdot 10^{-3}$  м. Однако, в отличие от приэлектродных слоев, СПЗ у поверхности изолированного твердого тела в ВЧ плазме пониженного давления, состоит из двух частей: «колебательный» слой, в котором электроны осциллируют вместе с изменением знака электрического поля, и «стационарный», или двойной электрический слой толщиной порядка дебаевской длины.

Построена математическая модель, описывающая распределение концентрации заряженных частиц и электрического поля в СПЗ с учетом его структуры и микрорельефа обрабатываемой поверхности. Результаты расчетов показали, что положительные ионы плазмообразующего газа, проходя сквозь СПЗ и ускоряясь в его электрическом поле, приобретают дополнительную энергию до 100 эВ и формируют ионный поток со средней плотностью тока 0,5-25 А/м<sup>2</sup>. При этом ионный поток концентрируется на неоднородностях микрорельефа поверхности, что приводит к локальной концентрации плотности потока энергии и избирательной обработке поверхности: модификации подвергаются в первую очередь наиболее крупные микронеровности. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными.

Таким образом, роль СПЗ, возникающего в окрестности изолированного тела в ВЧ плазме пониженного давления заключается в формировании потока ионов из плазмы и ускорении их до энергий 20-100 эВ, что делает этот вид газового разряда перспективным для проведения обработки материалов, критичных к температурному воздействию.

I.Abdullin, V.Zheltukhin\*, M.Shaekhov

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF LOW PRESSURE RF PLASMAS NEAR SURFACES**

Kazan State Technological University,  
68, K.Marx str., Kazan, Russia, 420015, E-mail: Abdullin\_i@kstu.ru

\*Kazan state university  
18, Kremlin str., Kazan, Russia, 420008. E-mail: Viktor.Zheltukin@ksu.ru

When materials of an arbitrary physical nature are treated in low-pressure RF plasmas (at 1.33-133 Pa), a sheath distinguished from volumetric plasma by characteristics is revealed in a neighborhood of specimen. For researching of sheath properties, the diagnostic complex including a miniature magnetic probe, Rogovski's belt, Lengmuir's probe, microwaves-probes, holographic diffraction interferometer and holographic evaluator of wave front sets, flowing calorimeters, evaluator of an energy of ions is set up.

Researches of electron density and energy, magnetic and current densities, optical performances of plasma in a neighbourhood of a specimen, plasma potential, ionic current and energy of ions acting on a specimen surface are carried out using the diagnostic complex. Results of researches have shown, that the quasineutral low-pressure RF plasmas in rare gases is characterized in the following ranges: the degree of ionization in a plasma jet is from  $10^{-7}$  up to  $10^{-4}$ , density of electrons is from  $10^{15}$  up to  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ , electronic temperature is from 1 up to 4 eV, temperature of atoms and ions is from 350 K up to  $10^3$  K, but energy of ions arriving to the specimen surface is from 20 up to 100 eV and an ionic current to the surface is from 0.5 up to  $25 \text{ A/m}^2$ . Values of ion energy and ionic current depend from kind of discharge coupling (either inductive or capacitive, or else hybrid), gas power, discharge power, and gas consumption.

The analysis of experimental data has shown, that any body in low-pressure RF plasmas becomes an adding electrode, irrespective of its material. Therefore the sheath of positive charge (SPC) near its surface is formed, the same as sheath that is formed near the electrodes in capacity coupled RF discharge. The depth of SPC is from 0.5 up to 2.5 mm. However, as against the electrodes sheath SPC near a surface of the isolated body in low-pressure RF plasmas, consists of two parts: an "oscillatory" layer, in which the electrons oscillate together with electric field sign reversal, and "stationary" layer, or double electrical layer by depth about Debye length.

The mathematical model of SPC is constructed. The model describes densities of charged particles and an electric field in SPC in view of its structure and a micro-relief of a specimen surface. The results of modeling have shown, that the positive ions of plasma-forming gas are accelerating in SPC electric field and gain energy up to 100 eV at average ionic current density  $0.5\text{-}25 \text{ A/m}^2$ . The ionic stream is concentrated on inhomogeneities of a micro-relief of a surface. This process reduces in local concentration of energy fluence and selective acting to surface: largest asperities is treated first of all. Results of simulation confirm by experimental data.

Thus, the role of SPC near the body in low-pressure RF plasmas consists in generating a stream of ions from plasma and acceleration them up to energies 20-100 eV. The effect makes this kind of gas discharge perspective for treating of materials that is prohibited to heat.