

УДК 539.182

О КАРТИНАХ КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДА

Г.А. ЕГИАЗАРЯН, Ж.Б. ХАЧАТРЯН, Э.С. БАДАЛЯН,
Э.И. ТЕР-ГЕВОРКЯН, В.Н. ОГАНИСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 18 августа 2000 г.)

Исследованы условия, при которых на поверхности катодов разряда с осциллирующими электронами образуются картины ионного распыления различных форм. Предлагается механизм образования этих картин.

Наблюдение картин ионного распыления на катодах ячейки Пеннинга иногда показывает существование пересеченных или звездных форм распыления [1-6]. В настоящей статье найдены и изучены условия горения разряда с осциллирующими электронами, когда на поверхности его катодов образуются своеобразные „картины” ионного распыления различных форм. Предлагается механизм образования этих картин.

Изучение картин катодного распыления дает новые сведения о механизме разряда, в частности, о формировании ионных потоков и их распределении по поверхности катода, и тем самым, является дополнительным методом диагностики разряда Пеннинга. Визуальное исследование катодов показывает, что „картины” ионного распыления можно систематизировать следующим образом:

- 1) Вся поверхность катода чистая, с металлическим блеском,
- 2) только центральная часть катода светлая, остальная площадь темная (она покрыта окисями металла и продуктами разложения газов в разряде),
- 3) небольшой центральный участок катода не распыляется, вся остальная часть бомбардируется ионами,
- 4) аксиально-симметричные пояса (кольца) различной ширины и оттенков на поверхности катода. Ширина колец уменьшается по мере удаления от центра. Имеет место очеречность и периодичность цветности колец (желтое, зеленое, красное,...),
- 5) на катодах наблюдаются картины распыления ромбических или звездных форм.

Интенсивность распыления материала катода зависит от плот-

ности ионного тока в данной точке катода. Следовательно, поверхность катода формы 1) почти равномерно бомбардируется ионами. Пространственный заряд внутри трубки представляет из себя однородное электронное облако, которое обеспечивает попадание ионов по всей поверхности катода. Форма 2) получается в условиях, когда на центральную часть катода попадает значительно большее количество ионов, чем на периферию (режим коллимированного ионного пучка). Форма 3) получается в условиях, когда большая величина электронного пространственного заряда снижает потенциал на оси трубки и существенно уменьшается приосевая ионизация. К тому же радиально движущиеся ионы все же подвергаются воздействию внешнего магнитного поля, вследствие чего траектории ионов несколько искривляются. В результате положительные ионы не попадают непосредственно в центр катода (они могут подойти к центру лишь на определенное расстояние). Однако в условиях, когда область максимальной ионизации сосредоточивается вблизи оси разряда, нераспыленный участок в центре катода отсутствует, потенциал на оси ячейки значителен и ионы больших энергий могут „просверлить” центр катода. Форма поверхности 4) получается, когда разряд стабильный (стационарный), однако большой пространственный заряд распределен по радиусу ячейки неравномерно и однородное электронное облако превращено в отдельные круговые пояса. Интенсивность ионизации в этих поясах различна. В частности, это заметно и по интенсивности их свечения [3]: на фоне общего голубого свечения отдельные пояса имеют различные оттенки. Образование картин (1-4) согласуется с результатами исследований распределения заряженных частиц по поверхности катодов [7,8]. В чем же причина образования картин ионного распыления формы 5), которая существенно отличается от вышеперечисленных?

Поверхность, бомбардируемая ионами, в сущности, является проекцией на катод областей интенсивной ионизации анода, где плотность ионов наибольшая. Поэтому в случае цилиндрического анода на катоде чаще всего образуются кольцевые пояса распыления. Если же используется ячейка с эллиптическим сечением, то на катоде образуются линии пересечения, совпадающие с большой и малой осями. Визуальное наблюдение показывает, что эти узоры распыления в действительности являются изображением такой же формы самого разряда [1].

В случае квадратного анода на катодах образуются восьмиконечные звездочки [1,4,5]. Здесь расстояние между областью ионизации и поверхностью анода зависит от азимута [4]. В углах электрическое поле слабее и разряд дальше отстоит от поверхности анода, чем в середине стороны квадрата.

В [1] предполагается, что эти картины могут возникать из-за не-

которых возможных нестабильностей разряда. Для случая квадратичного анода, механизм образования звездочек автор [4] связывает с азимутально неоднородным постоянным электрическим полем. Тем не менее действительный механизм образования симметричных картин распыления для общего случая оставался неизвестным.

Для выяснения этого вопроса нами было изучено множество катодов, работавших в различных условиях разряда в цилиндрических анодах. Оказалось, что картины в виде звездочек получаются при динамическом режиме, когда в разрядном токе присутствуют гармоники основной частоты диокотронной неустойчивости и комбинационные колебания. На рис.1 представлены фотографии поверхностей катодов ячеек Пеннинга, работавших в различных условиях динамического режима разряда.

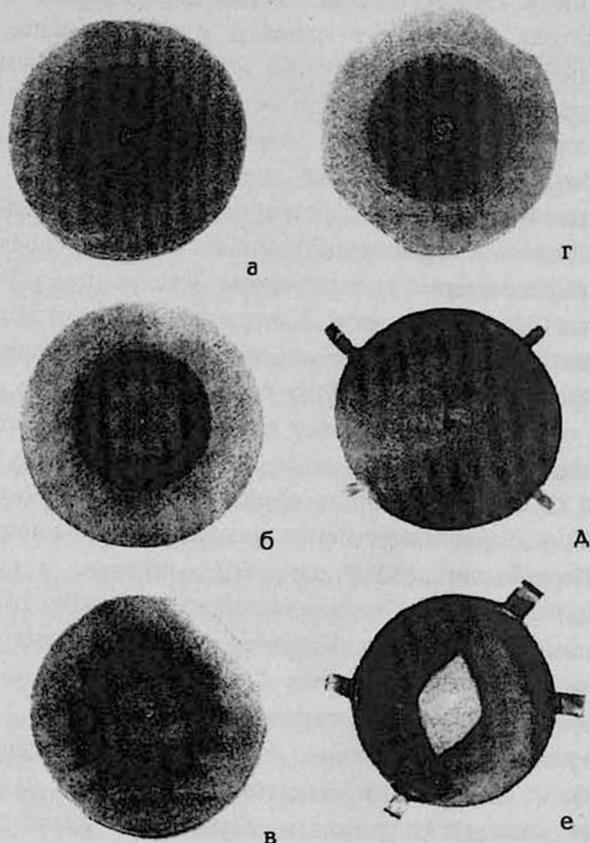


Рис.1. Поверхности катодов, полученные в различных условиях разряда Пеннинга. а) $B=1275$ Гс, $V_a=1.5$ кВ, $p=9 \cdot 10^{-6}$ Тор, $d_a=31$ мм, $l_a=2.5$ см; б) $B=825$ Гс, $V_a=2$ кВ, $p=1.2 \cdot 10^{-5}$ Тор, $d_a=31$ мм, $l_a=2.5$ см; в) $B=1500$ Гс, $V_a=1.5$ кВ, $p=8.5 \cdot 10^{-6}$ Тор, $d_a=31$ мм, $l_a=2.5$ см; г) $B=825$ Гс, $V_a=1.75$ кВ, $p=1.2 \cdot 10^{-5}$ Тор, $d_a=31$ мм, $l_a=2.5$ см; д) $B=615$ Гс, $V_a=2.3$ кВ, $p=1.5 \cdot 10^{-5}$ Тор, $I_p=0.25$ мА, $d_a=40$ мм, $l_a=6$ см; е) $B=950$ Гс, $V_a=2.25$ кВ, $p=5 \cdot 10^{-5}$ Тор, $d_a=31$ мм, $l_a=4$ см.

На рис.1а показана поверхность катода, полученного после 2.5 часовой работы ячейки Пеннинга при магнитной индукции $B = 1275$ Гс, анодном напряжении $V_a = 1.5$ кВ, давлении остаточного воздуха $p = 9 \cdot 10^{-6}$ Тор. При этом разрядный ток был $I_p = 50$ мкА, диаметр цилиндрического сплошного анода ячейки $d_a = 31$ мм, длина разрядного промежутка $l_a = 2.5$ см, а в спектре переменной составляющей разрядного тока наблюдались колебания с частотами $\nu = 13, 26, 39$ МГц. Последнее означает, что разряд находится в переходном режиме, т.е. внутри анода сформирован неустойчивый электронный слой. На поверхности катода (рис.1а) видны пояса распыления со слабо выраженной азимутальной асимметрией.

На рис.1б показана поверхность катода после пятичасовой работы в условиях разряда $B = 825$ Гс, $V_a = 2$ кВ, $p = 1.2 \cdot 10^{-5}$ Тор, $I_p = 50$ мкА, $\nu = 23.7$ МГц. Почти вся поверхность катода чистая, однако, присутствие прианодного неустойчивого электронного слоя приводит к тому, что на периферии наблюдается серый пояс с извилистыми краями.

На рис.1в катод бомбардировался в течение 2.5 часов в условиях $B = 1500$ Гс, $V_a = 1.5$ кВ, $p = 8.5 \cdot 10^{-6}$ Тор, $I_p = 40$ мкА, $\nu = 12.6; 25$ МГц. С ростом магнитной индукции появляется несколько поясов интенсивной ионизации и соответственно на катодах – несколько поясов распыления с заметной азимутальной асимметрией.

Поверхность рис.1г получена при условиях $B = 825$ Гс, $V_a = 1.75$ кВ, $p = 1.2 \cdot 10^{-5}$ Тор, $I_p = 70$ мкА, $\nu = 22$ МГц. Время распыления 5.5 часов. Отчетливо видно множество круглых поясов напыления различной ширины и цветовых оттенков. Хорошо бомбардируется в основном центральная часть катода. Азимутальная асимметрия незначительна.

На рис.1д показана поверхность катода, работавшего в ячейке с проволочным анодом цилиндрической формы в условиях $B = 615$ Гс, $V_a = 2.3$ кВ, $p = 1.5 \cdot 10^{-5}$ Тор, $I_p = 0.25$ мА, $l_a = 6$ см, $d_a = 40$ мм. Время распыления 2 часа. Частотный спектр очень богат, присутствуют комбинационные колебания ($\nu' = n\nu \pm \nu_2$ [9]): $\nu' = 6; 13.8; 25.1; 28.4; 31.1; 39.3; 42.3; 45.5; 48.8; 56.9; 67.6; 70.6; 74.1; 77.1; 84.3$ МГц. Отчетливо видно, что центр катода не бомбардируется ионами (первый треугольник), затем на центральной части катода образована чистая, блестящая картина звездной формы (значительная азимутальная асимметрия); остальная (большая) часть катода сероватого цвета, т.е. этот участок поверхности почти не бомбардируется ионами и покрывается соединениями распыленного материала катода и рабочего газа.

Ромбическая чистая поверхность рис.1е получена в ячейке со сплошным цилиндрическим анодом при $d_a = 31$ мм, $l_a = 4$ см, $B = 950$ Гс, $V_a = 2.25$ кВ, $p = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор, $I_p = 1$ мА, $\nu = 9; 31.5; 40.6; 62.7; 71.8$ МГц. Время распыления – 2.5 часа.

На основе анализа полученных экспериментальных результатов

и сопоставления теоретических предпосылок [3,4,9,10] ниже предлагается механизм образования азимутально-асимметричных картин ионного распыления на поверхности катодов для цилиндрических анодов.

При определенных соотношениях значений анодного напряжения V_a и магнитной индукции B , в зависимости от значений давления газа и геометрических параметров, разряд переходит в неустойчивое состояние; образованные в нем радиальные пояса интенсивной ионизации становятся азимутально неоднородными (диокотронная неустойчивость [3,9,10]). В этих условиях аксиально-симметричные области интенсивной ионизации „деформируются“ как по радиусу, так и по азимуту ячейки. Круговые пояса ионизации становятся извилистыми, по свободным поверхностям бегут поверхностные волны, которые при достижении определенной критической толщины электронного слоя, взаимодействуя друг с другом, образуют стоячие волны по азимуту. В узком электронном слое в азимутальном направлении возникают пучности и узлы, координаты которых (при неизменных значениях параметров разряда) со временем не меняются. Электронный слой становится асимметричным по азимуту, внутри цилиндрического анода электрическое поле также становится азимутально неоднородным (как это всегда имеет место в случаях анодов прямоугольной формы независимо от режима разряда). Последнее приводит к азимутальной перегруппировке положительных ионов: они внутри анода в поперечном сечении по азимуту распределяются неравномерно. Тем самым ионные потоки, бомбардирующие поверхности катодов, не остаются аксиально симметричными при аксиальной симметрии электродов трубки. Азимутальное распределение плотности ионного тока по поверхности катода становится неравномерным. В результате распыление катодов становится азимутально асимметричным и на их поверхности образуются картины распыления звездной формы.

Эксперименты показывают, что картины звездной формы на катодах появляются лишь в тех условиях диокотронной неустойчивости разряда, когда в спектре колебаний присутствуют гармоники основной частоты и комбинационные частоты. В стационарном режиме разряда в цилиндрическом аноде вышеизложенные процессы отсутствуют и на катодах картины звездной формы не наблюдаются.

Таким образом, общей причиной образования на поверхностях катодов картин ионного распыления звездной формы является действие азимутально неоднородного электрического поля внутри анода. Причем, если в ячейках с анодом квадратного сечения азимутальная неоднородность электрического поля обеспечивается изначально, то в ячейках с анодом круглого сечения азимутальная неоднородность электрического поля возникает в определенных условиях диокотронной неустойчивости разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.C.Helmer, R.L.Jepson. Proc. IRE, 49, 1920 (1961).
2. Ю.Е.Крейндель. ЖТФ, 35, 314 (1965).
3. W.Knauer, R.L.Poeschel. Proc. 7th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Belgrad, v.2, 719 (1965).
4. Г.А.Васильев. Магниторазрядные насосы. М., Энергия, 1970.
5. D.Andrew, D.R.Sethna, G.F.Weston. Vacuum, 18, 136 (1968).
6. Н.О.Бойко, Л.В.Марголина, О.В.Опанасенко, Д.Б.Палець, Л.И.Раманюк, В.М.Слободян. Укр. Физ. Ж., 43, 1223 (1998).
7. Г.В.Смирницкая, Нгуен-Хыу-Ти. ЖТФ, 39, 1625 (1969).
8. Р.П.Баберцяи, Э.С.Бадалян, Г.А.Егиазарян, Э.И.Тер-Геворкян, В.Н.Оганисян. ЖТФ, 70, 24 (2000).
9. Э.М.Рейхрудель, Г.В.Смирницкая, Г.А.Егиазарян. ЖТФ, 43, 130 (1973).
10. Р.П.Баберцяи, Э.С.Бадалян, Г.А.Егиазарян, Э.И.Тер-Геворкян. Изв. НАН Армении, Физика, 34, 183 (1999).

ՊԵՆՆԻՆԳՑԱՆ ՊԱՐՊՍԱՆ ԿԱՏՈՂԱՅԻՆ ՓՈՇԻԱՅՍԱՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՍԱՍԻՆ

Գ.Ա. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, Ժ.Բ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Է.Ս. ԲԱԴԱԼՅԱՆ,
Է.Ի. ՏԵՐ-ԳԵՎՈՐԿՅԱՆ, Վ.Ն. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Հետազոտված են օսցիլյացվող էլեկտրոններով պարպման այն պայմանները, երբ կատոդների մակերևույթների վրա առաջանում են իոնային փոշեցրման զանազան պատկերներ: Առաջարկված է այդ պատկերների ձևավորման մեխանիզմը:

ON THE PATTERNS OF CATHODE SPUTTERING IN PENNING DISCHARGE

G.A. EGIAZARYAN, J.B. KHACHATRYAN, E.S. BADALYAN,
E.I. TER-GEVORKYAN, V.N. HOVHANNISYAN

Conditions under which ionic sputtering patterns of various shapes are formed on the cathode surfaces in a discharge with oscillating electrons are investigated. A mechanism of formation of these patterns is proposed.