Известия НАН Армении, Физика, т.35, №3, с.155-161 (2000)

УДК 537.531

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ИОНОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Р.П. БАБЕРЦЯН, Э.С. БАДАЛЯН, Г.А. ЕГИАЗАРЯН, Э.И. ТЕР-ГЕВОРКЯН, В.Н. ОГАННИСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 5 апреля 1999 г.)

Экспериментально исследовано влияние длины ячейки на ионный ток и выявлены некоторые особенности в его распределении по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами. При низких давлениях $P \leq 5 \cdot 10^{-5}$ Тор во всем интервале значений изменения длины анода $\ell_a = 0,5+11$ см распределение плотности ионного тока по радиусу катода $j_i(r)$ имеет единственный максимум в центре с быстрым спадом по расстоянию от оси. При давлениях $P = (1+4) \cdot 10^{-4}$ Тор распределение $j_i(r)$ для коротких анодов ($\ell_a < 6$ см) аналогично предыдущему, однако для длинных анодов ($\ell_a = 6+10$ см) обнаружены новые максимумы с большими значениями j_i .

В связи с многочисленными применениями разряда с осциллирующими электронами в различных устройствах и приборах (источники заряженных частиц, вакуумные насосы, при получении тонких пленок и т.д.) представляет большой интерес исследование распределения заряженных частиц по поверхности катода ячейки.

В известных исследованиях по данному вопросу [1-6] показано, что максимальная плотность ионного тока на катод достигается в его центре, и при $P = 2 \cdot 10^{-4}$ Тор уже на расстоянии 0,5 мм от оси разряда плотность ионного тока уменьшается вдвое. Максимальная плотность ионного тока составляла от 0,1 до 15 мкА/мм² (в интервале давлений $P = 10^{-6} \pm 10^{-4}$ Тор) и до 30 мкА/мм² (при $P = 2 \cdot 10^{-3}$ Тор). В этих работах обнаружено также, что при некоторых условиях максимум плотности ионного тока несколько смещается от центра катода. Для первого режима горения в [6] выведена формула распределения плотности ионного тока по радиусу катода. В работе [7] получено распределение плотности частиц по поверхности катода в зависимости от длины анода для ячейки с диаметром анода $d_q = 20$ мм.

Данная статья является продолжением работ [7,8] для ячейки с диаметром d_a = 31 мм. Измерения проводились на установке, электродная система которой показана на рис.1. Внутри цилиндрического анода 1, на неподвижном катоде 2 сделаны центральное и 8 радиальных отверстий с диаметром 2 мм, за которыми вмонтированы изолированные друг от друга плоские молибденовые диски 4 одинакового диаметра (1,2 мм) для выделения токов, идущих из отверстий. Подвижный катод 3 дает возможность плавно менять длину разрядного промежутка la от 0,5 до 11 см без нарушения вакуума.

На рис.2а представлены кривые зависимостей плотности ионного тока в данной точке поверхности катода от расстояния г до центра катода $j_{0}(r)$ при давлении остаточного газа $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор. Магнитная индукция B = 300 Гс, анодное напряжение $U_a = 3$ кВ. Параметром является длина анодного цилиндра la. Одновременно снимались зависимости разрядного тока Ip(la) и велось наблюдение за его переменной составляющей с помощью анализатора спектров и осциллографа. Видно, что по форме кривые подобны результатам работ [1-6], однако величина плотности ионного тока здесь значительно больше. Отметим, что в [1-6] электродные системы ячеек имели фиксированные геометрические размеры и это затрудняло нахождение наиболее оптимальных условий работы разряда.

Анализ зависимостей перечисленных электрических характеристик разряда показывает, что полученные результаты рис.2а соответствуют условиям горения разряда с однородным электронным пространственным зарядом низкой плотности (первый режим). В этом режиме горения разряда плотность ионного тока [6] в центральной части катода определяется выражением

1

Rection Contract

$$j_i(r \le \Delta r_k) = \frac{\nu_i \cdot n_e \cdot e}{\pi \cdot \Delta r_k^2} \Omega'_0, \qquad (1)$$

где и - частота ионизации, n. - концентрация электронов, е - заряд электрона, Δr_k - радиус круга в центре катода, куда попадают осевые ионы из-за разброса их начальных скоростей, Ω₀ - суммарный объем всех областей, из которых ионы идут в центр катода. С ростом расстояния от центра катода уменьшается ширина области, откуда ионы могут попасть на его данный участок. На периферийные части катода попадает некоторая часть ионов, рожденных в небольшой прианодной области интенсивной ионизации. Из-за большой скорости ухода ионов концентрация n, здесь меньше. Соответствующая плотность ионного тока [6] выражается формулой

$$j_i(r > \Delta r_k) = \frac{4e\nu_i \cdot n_s \cdot \ell_a}{\pi^2} \cdot (r_a^2 / r^2 - 1)^{1/2} \cdot \Omega_0'.$$
(2)

Согласно (2) на периферии катода плотность *j*_i должна уменьшаться. Кривые рис.2а подтверждают этот вывод.



Рис.1. Электродная система ячейки.

Таким образом, для пеннинговской трубки с диаметром 31 мм при давлении $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор и значениях анодного напряжения и магнитной индукции, соответствующих первому режиму горения разряда, изменение длины анодного цилиндра ℓ_a заметно отражается как на величине разрядного тока, так и на плотности ионного тока. Использование подвижного катода дает возможность плавно, непрерывно менять длину анода и найти оптимальные условия для формирования центрального ионного пучка большой плотности (до 70 мкA/мм²). Форма же $j_i(r)$ остается неизменной для всего интервала значений разрядного промежутка $\ell_a = 0,5+11$ см с максимумом в центре катода.

Изучение траєкторий ионов в различных условиях разряда подсказывает, что установив локализацию отдельных пучков ионов по поверхности катода, можно ориентировочно определить области их формирования, т.е. воссоздать области интенсивной ионизации внутри анода. Наши опыты показывают, что связь эта лучше проявляется в условиях повышенного давления $P = (2+4)\cdot 10^4$ Тор и длинных анодов ($6 \le l_a \le 10$ см). На рис.26-д приведены кривые распределения плотности тока по радиусу катода $j_i(r)$ при $P = 2\cdot 10^4$ Тор. Как видно, зависимость $j_i(r)$ по форме достаточно похожа на ход кривых при $P = 5\cdot 10^{-5}$ Тор для коротких анодов ($l_a = 2+4$ см, кривые 1 и 2, рис. 26-д). Однако для трубок с длинными анодами распределение $j_i(r)$ существенно изменяется как по форме, так и по величине: плотность ионного тока резко увеличивается почти по всей поверхности катода, в $j_i(r)$ возникают новые максимумы (кривые 4,5; рис.26-д).

Одновременные измерения $I_p(\ell_a)$ показывают, что кривые с новым распределением $j_i(r)$ соответствуют условиям второго максимума зависимости разрядного тока от длины анода $I_p(\ell_a)$. С увеличением давления газа и ростом частоты столкновений электронов с нейтралами растет и частота ионизации v_i . При этом из-за роста скорости ухода электронов на анод отношение n_i/n_i уменьшается. Тем самым увеличивается влияние ионов на пространственный заряд и соответственно меняется распределение потенциала внутри трубки U(r,z). В



Рис.2. Плотность ионного тока в зависимости от расстояния до центра катода при: а) U_d =3 кВ, B=300 Гс, P=5·10⁻⁵ Тор. 1– ℓ_a =12, 2– ℓ_a =3, 3– ℓ_a =6, 4– ℓ_a =8 см; б) U_d =1,5 кВ, B=750 Гс, 1– ℓ_a =2, 2– ℓ_a =4, 3– ℓ_a =10, 4– ℓ_a =8, 5– ℓ_a =7 см; в) U_d = 1,5кВ, B=1350 Гс, 1– ℓ_a =4, 2– ℓ_a =5, 3– ℓ_a =10, 4– ℓ_a =8 см; г) U_d = =2кВ, B=300 Гс, 1– ℓ_a =6, 2– ℓ_a =2, 3– ℓ_a =4, 4– ℓ_a =10, 5– ℓ_a =9 см; д) U_d =2 кВ, B=600 Гс, 1– ℓ_a =1, 2– ℓ_a =4, 3– ℓ_a =10, 4– ℓ_a =7 см. Для (б-д) давление газа P=2·10⁻⁴ Тор.

частности, уменьшается радиальное падение Ug-Ug и увеличивается продольное падение потенциала Uo-Uk. Последнее обеспечивает увеличение числа вторичных электронов из-за увеличения энергии ионов, бомбардирующих поверхности катодов. Растет и энергия, набираемая приосевыми начальными электронами при их осцилляции между катодами, что приводит к увеличению роли прикатодных областей [8]. Продольная и радиальная ионизации, взаимно усиливая друг друга, протекают намного интенсивнее. В результате при относительно большем давлении (P=2.10⁻⁴ Top) для длинных анодов резко возрастают разрядный ток и плотность ионного тока на катод с появлением второго максимума в j_i(r). Неравномерность радиальной ионизации по ралиусу трубки становится значительной, вследствие чего внутри трубки формируются радиальные пояса интенсивной ионизации. Продольная же ионизация менее чувствительна к изменениям расстояния от оси трубки и поэтому на периферийные участки поверхности катода также попадает большое количество ионов (рис. 26-г). Как было отмечено выше, существует определенная связь между координатой образования иона и точкой его попадания на катод, поэтому можно угверждать, что именно рожденные в поясах интенсивной ионизации ионы достигают соответствующих точек поверхности катода и образуют второй максимум j_i(r). Механизм формирования центрального ионного тока аналогичен вышеизложенному для условий рис.24. Кривые, полученные при различных значениях магнитной индукции, показывают, что вышеизложенные закономерности сохраняются: в коротких трубках *і*(*r*) содержит один единственный максимум, в длинных – несколько максимумов. Критическая длина анода, при которой резко возрастает величина *j*_i и происходит переход *j*_i(r) от одной формы в другую, зависит от значений остальных параметров разряда. Однако это проявляется и становится заметным лишь при определенных значениях длинного анода и повышенного давления, когда в результате большого усиления ионизации вдоль трубки, в радиальных поясах интенсивность ионизации значительно возрастает, существенно растет концентрация ионов в них, и на поверхности катодов ионы этих поясов формируют соответствующий профиль распределения плотности ионного тока.

See. 2

С увеличением анодного напряжения ($U_a=1,5;2$ кВ) общая картина распределения $j_i(r)$ в целом не меняется, абсолютные же значения токов растут. С увеличением магнитной индукции центральный максимум плотности ионного тока $j_i(0)$ в длинных анодах ($\ell_a>7$ см) постепенно уменьшается, сравнивается со вторым максимумом, затем становится заметно меньше него. То есть плотность ионного тока на периферии катода становится больше, чем в его центре (кривые 4,5). На величине второго пика $j_i(r)$ изменение магнитной индукции отражается слабее. Это согласуется с вышеизложенным механизмом его образования. бее. Это согласуется с вышеизложенным механизмом его образования. В случае $\ell_a=10$ см, B=600 Гс на распределении $j_i(r)$ появляется и третий максимум (рис.2д), т.е. внутри анода присутствуют три пояса интенсивной ионизации. На наличие радиальных поясов интенсивной ионизации указывают кольцевые картины распыления на катодах. Ширина этих колец и их радиус определяются соотношением между U_a , B и ℓ_a .

Таким образом, в длинном аноде (6≤ ℓ ≤10 см) и при давлении P=2.10⁴ Тор перераспределение электрического потенциала таково, что ралиальной и продольной ионизаций становится соотношение оптимальным, общая ионизация максимальна, все токи достигают значительных величин. При этом распределение плотности ионного тока по поверхности катода ji(r) существенно видоизменяется, в нем формируются и побочные максимумы. Возникновение новых максимумов в распределении ji(r) связано с формированием внутри анола радиальных поясов со значительным усилением ионизации в них из-за существенного роста продольной ионизации. При давлениях Р<10-4 Тор побочные максимумы j_i(r) ослаблены или вовсе не проявляются. После достижения максимума разрядного тока в более длинных анодах оптимальное соотношение ионизаций нарушается и токи значительно палают. PE - HORDONNAGO

Подбором значений физических и геометрических параметров U_a , *B*, *P*, ℓ_a можно добиться как образования коллимированного ионного пучка (режим ионного источника – рис.2а), так и достаточно равномерного распределения плотности ионного тока по всей поверхности катода (кривые 3-5, рис.2б), что очень важно для получения однородных тонких пленок различных материалов. Максимальная же плотность ионного тока достигается на втором диске при $U_a=2$ кВ, B=600 Гс, $\ell_a=7$ см и равна 110 мкА/мм² (рис.2п).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Ю.Е.Крейндель. ЖТФ, 33, 883 (1963).
- 2. Ю.Е.Крейндель, А.С.Ионов. ЖТФ, 34, 1199 (1964).
- 3. Ю.Е.Крейндель. ЖТФ, 35, 315 (1965).
- 4. О.К.Курбатов. ЖТФ, 36, 1665 (1966).
- 5. Е.М.Рудницкий. ЖТФ, 37, 927 (1967).

四日期 经 使真正

3 HH 34 - 1

- 6. Г.В.Смирницкая, *Нгуен Хыу Ти.* ЖТФ, 39, 1625 (1969).
- Р.П.Баберцян, Г.А.Егиазарян, В.Х.Гарибян, А.К.Чобанян. Изв. НАН Армении, Физика, 27, 103 (1992).
- 8. Р.П.Баберцян, Э.С.Бадалян, Г.А.Егиазарян, Э.И.Тер-Геворкян, ЖТФ, 68, 29 (1998).

11 200 .51.1

160

a left of the first

ՕՍՅԻԼՅԱՅՎՈՂ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐՈՎ ՊԱՐՊՄԱՆ ԿԱՏՈԴԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՎՐԱ ԻՈՆԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԱՌԱՆՉՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՄԻՆ

Ռ.Պ. ԲԱԲԵՐՅՅԱՆ, Է.Ս. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Գ.Ա.ԵՂՒԱԶԱՐՅԱՆ, Է.Ի. ՏԵՐ-ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Վ.Ն. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Փորձնականորեն հետազոտված է բջջի երկարության ազդեցությունը օսցիլյացվող էլեկտրոններով պարպման իոնային հոսանքի վրա և պարզարանված են կատողի մակերևույթի վրա նրա խտության րաշխման որոշ առանձնահատկությունները։ Ցածր ճնշումների դեպքում ($P \le 5 \cdot 10^{-5}$ Տոր) անոդի երկարության արժեքների փոփոխության ամրողջ տիրույթում ($L_a = 0,5+11$ ամ) իոնային հոսանքի խտության բաշխումը ըստ կատողի շատավոր $J_{a}(r)$ ունի միայն մեկ մաքսիմում նրա կենտրոնում, կտրուկ ընկներով առանցքից ունեցած հեռավորության հետ։ Շնշումների $P=(1+4)\cdot 10^{-4}$ Տոր արժեքների դեպքում $J_{a}(r)$ -ի բաշխումը կարճ անողների համար ($L_a < 6$ ամ) նախորդի նման է, սակայն երկար անողների համար ($L_a = 6+10$ ամ) հայտնաբերված են նոր մաքսիմումներ՝ J_{t} -ի զգալի արժեքներով։

ON THE PECULIARITIES OF ION CURRENT DISTRIBUTION UPON THE CATHODE SURFACE IN DISCHARGE WITH OSCILLATING ELECTRONS

R.P. BABERTSYAN, E.S. BADALYAN, G.A. EGIAZARYAN, E.I. TER-GEVORKYAN, V.N. HOVHANNISYAN

The influence of the cell length upon the ion current is investigated experimentally and certain peculiarities of the ion current density distribution on the surface of the cathode in discharge with oscillating electrons are revealed. At the low pressures $P \le 5 \cdot 10^{-5}$ Torr the distribution of the ion current density upon the cathode radius $j_i(r)$ depending on anode length $(\ell_a = 0, 5+11 \text{ cm})$ has the only maximum in the center of cathode with a rapid decrease along the distance of the center of cathode. At the pressures $P=(1+4)\cdot 10^{-4}$ Torr the distribution $j_i(r)$ for short anodes $(\ell_a < 6 \text{ cm})$ is analogous to the previous one. However, for long anodes $(\ell_a = 6+10 \text{ cm})$ new maxima with large values of j_i are obtained.

and the second states and

10.1

10

polistic et 25 million 11. October 1. 1911:

do slat 19 dia: a R91 dia: a R91

11 1 2 2 M 1

· micz-----