

О ДИАГРАММАХ СОСТОЯНИЙ РАЗРЯДА С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ, Г. В. СМИРНЦКАЯ, Г. А. ЕГИАЗАРЯН

С помощью совместных измерений радиального распределения электрического потенциала, зондовых токов и различных типов высокочастотных излучений при разных значениях параметров получены диаграммы состояний, характеризующие распределение пространственного заряда, при различных режимах разряда типа Пеннинга.

Полученные зависимости дают возможность детально проследить переход разряда от одного режима в другой при изменении его параметров и выявить роль колебаний в механизме разряда.

Для построения диаграмм состояний, характеризующих распределение заряда в разряде с осциллирующими электронами, совместно измерялись радиальное распределение потенциала в плоскости симметрии $V(r, 0)$, частоты различных типов высокочастотных колебаний и зондовые токи при разных значениях параметров разряда. $V(r, 0)$ определялся ионно-кинетическим методом [8]; излучение из разряда измерялось анализатором спектра С4—8 и снималось как с согласованной нагрузки, так и с антенн разной формы.

На рис. 1 приведены кривая зажигания разряда $V_3 = f(H \cdot r_a)$ (кривая 1), ряд областей, соответствующих различным режимам горящего разряда 1, 2, 3, ..., и распределение $V(r, 0)$ при различных режимах разряда.

При значениях V_a и $H \cdot r_a$, лежащих в области 1 (рис. 1а), высокочастотное излучение из разряда не наблюдается, что свидетельствует о равномерном распределении отрицательного пространственного заряда внутри анода [1—3] и о квадратичной зависимости $V(r, 0)$ в этих условиях (рис. 1г). На этом же рисунке пунктиром изображено распределение $V(r, 0)$ при отсутствии разряда, полученное в электролитической ванне.

В [4] выведена формула распределения концентрации электронов по r :

$$n_e(r) = n_a \left(\frac{r}{r_a} \right)^{- \left\{ 2 - \bar{w}_1 \left(\frac{1+\gamma^*}{M} \right) \right\}}, \quad (1)$$

где

$$M = \left\{ \frac{\sqrt{2\omega^2} + \sqrt{2\omega^2 - \beta^2}}{2\sqrt{2(\omega^2 - \beta^2)}} - 1 \right\},$$

$$\omega = \frac{eH}{2mc}, \quad \beta^2 = \frac{2e(V_a - V_0)}{m \cdot r_a^2},$$

n_a — концентрация электронов вблизи поверхности анода, V_a — потенциал анода, V_0 — потенциал центра разрядного промежутка, r_a —

радиус анода, γ^* — эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии, \bar{W}_l — средняя вероятность ионизации по r .

Из (1) в [4] получена формула, определяющая величину V_0 при равномерном распределении $n_e(r, 0)$ в области анода (I режим, область 1, рис 1). Согласно (1) n_e нарастает с приближением к поверхности анода, если

$$\frac{\bar{W}_l (1 + \gamma^*)}{M} > 2. \quad (2)$$

Из (2), зная \bar{W}_l и γ^* , можно определить значение H , выше которого для данного V_a в разряде устанавливается неравномерное распределение $n_e(r, 0)$ (кривая 2').

Образование прианодного электронного слоя большой плотности приводит к развитию диокотронной неустойчивости, установлению неоднородного азимутального распределения n_e , вследствие чего появляются колебания с частотой ν , связанные с вращательным движением электронного слоя [1—3, 5—7],

$$\nu = n c \frac{V_a - V_0}{\pi H r_a^2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Для каждого значения V_a экспериментально получена величина $(H r_a)$, при которой в разряде наблюдаются колебания частоты ν (кривая 2, рис. 1а).

Прианодный слой отрицательного пространственного заряда большой плотности экранирует поле анода, поэтому в области 2 $V \simeq 0$. При этом электроны, вышедшие под действием ионной бомбардировки из центральной части катода и не испытавшие соударения с атомами газа, совершают колебательное движение около плоскости симметрии ($z = 0$) с частотой ν_z

$$\nu_z = \frac{n}{2\pi} \sqrt{\frac{2eV_0}{md^2}}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где $2d$ — расстояние между катодами.

Таким образом, область 2 характеризуется неоднородным распределением n_e по r и θ и образованием вблизи оси пучка электронов. В этом режиме (переходная область) можно пренебречь компенсирующим действием положительного пространственного заряда.

Подтверждением отсутствия плазмы вблизи оси в области 2 являются вольт-амперные характеристики зонда (рис. 3б). Зонд-диск ($\varnothing \sim 3$ мм), плоскость которого была перпендикулярна к магнитным силовым линиям, мог перемещаться вдоль оси ячейки. Когда зонд находился вблизи плоскости симметрии, разрядный ток сильно уменьшался и колебания частоты ν_z пропадали. На рис. 3а приведена зависимость разрядного тока от потенциала зонда V_z относительно анода при значениях параметров, соответствующих области 2.

С увеличением H частота вращения прианодного слоя ν (ν при $n=1$) уменьшается и приближается к частоте ν_z ; при некотором значении наступает резонанс [7]; разряд скачком переходит во 2-й режим, в котором становится существенным компенсирующее действие заряда положительных ионов на распределение потенциала (область 2'). На рис. 1а кривая резонанса 3 получена из условия равенства частот (3) и (4) при предположении $V_0 \approx V_1$ (V_1 — потенциал ионизации газа); здесь же показаны экспериментальные точки, соответствующие наступлению резонанса. После небольшого участка 2', в котором наблюдается лишь излучение (3) меньшей частоты, в спектре излучения появляются колебания типа пучок — плазма с частотой ν'_z и комбинационные частоты $\nu' = \nu \pm \nu'_z$ [7].

Кривая 4 — начало области существования таких колебаний. Эти колебания свидетельствуют о наличии вблизи оси области отрицательного пространственного заряда (виртуального катода), что согласуется с измерениями $V(r, 0)$. Значение V_{01} (внешней границы виртуального катода) определяет величину катодного падения потенциала разряда. На некотором расстоянии от оси разряда возможно образование плазменного цилиндрического слоя ограниченных размеров, простреливаемого быстрыми электронами и ионами. Большое положительное анодное падение потенциала и перпендикулярное магнитное поле приводят к образованию на внешней границе плазмы тонкого слоя отрицательного пространственного заряда, частоту вращения которого ν мы наблюдаем. При еще больших H плазменная область расширяется, потенциал V_0 повышается (рис. 1г, 4), виртуальный катод пропадает, что сопровождается исчезновением излучений с частотами ν'_z и ν' (рис. 1а, кривая 5).

В области 4 в разряде сохраняются лишь колебания частоты ν , свидетельствующие о наличии большого анодного падения потенциала и слоя отрицательного пространственного заряда вблизи анода. В этих условиях область катодного падения потенциала приближается к катоду и ионизация в разряде осуществляется как за счет радиального, так и осевого движения электронов.

При дальнейшем увеличении H анодное падение потенциала уменьшается, прианодный электронный слой и колебания с частотой ν исчезают, квазинейтральная плазма заполняет область внутри анода. В этом режиме кривая $V(r, 0)$ идет выше кривой, снятой в электролитической ванне (рис. 1г, 5). Положение границ рассмотренных областей (режимов) зависит от давления p , рода газа, геометрических параметров разряда. С уменьшением r_a при $H \leq 2000$ э не наблюдается переход к области 3' (рис. 1б).

В газе с большим по сравнению с N_2 молекулярным весом, например, в Хе границы всех областей смещаются в сторону меньших значений H (рис. 1б).

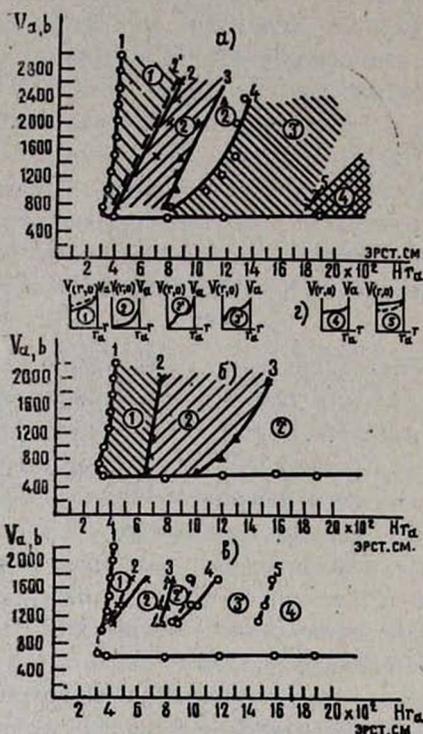


Рис. 1.

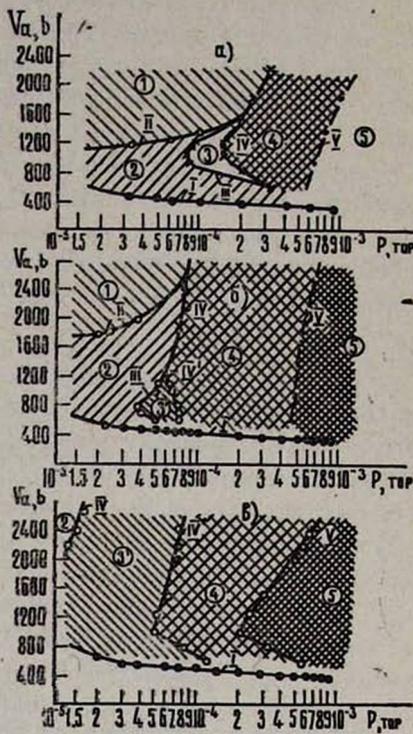


Рис. 2.

Рис. 1. Диаграммы состояний $V_a = f(H \cdot r_a)$. 1 — кривая зажигания $V_3 = f(H \cdot r_a)$; 2 и 2' — кривые возникновения колебаний, 2 — экспериментальная, 2' — теоретическая; 3 — кривая перехода разряда во второй режим (резонанс); 4 — кривая появления комбинационных частот и колебаний пучок—плазма; 5 — кривая исчезновения комбинационных частот и колебаний пучок—плазма. 1, 2, ..., 5 — области различных режимов разряда: а) $p = 1,5 \cdot 10^{-5}$ тор (воздух), $r_a = 2$, $d = 2$, $l_a = 2,5$ см; б) $p = 3,4 \cdot 10^{-5}$ тор (воздух), $r_a = 1$, $d = 2$, $l_a = 2,5$ см; в) $p = 3 \cdot 10^{-5}$ тор ($-N_2$, $-X_e$), $r_a = 2$, $d = 2$, $l_a = 2,5$ см; г) $V(r, 0)$ — кривые распределения потенциала в плоскости симметрии при различных параметрах разряда.

Рис. 2. Диаграммы состояний $V_a = f(p)$. I — кривая зажигания $V_3 = f(p)$; II — кривая возникновения колебаний с частотой ν ; III — кривая исчезновения частоты ν ; III' — кривая возникновения частот ν'_2 и ν'_1 ; IV—IV' — кривые исчезновения частот ν'_2 и ν'_1 ; V — кривая исчезновения частоты ν ; 1, 2, ..., 5 — области режимов разряда: а) $H = 220$ э, б) $H = 330$ э, в) $H = 660$ э.

На рис. 2 (а, б, в) приведены диаграммы $V_a = f(p)$, характеризующие различные режимы разряда при изменении V_a и p . Параметром является H . Кривая I дает зависимость $V_3 = f(p)$.

В области 1 колебания в разряде отсутствуют, пространственный заряд распределен равномерно. При слабых H и относительно малых V_a (рис. 2а, б) в области 2 наблюдаются высокочастотные излучения, связанные с вращательным движением электронного слоя и свидетель-

ствующие о неравномерном распределении n_e . При $V_a \sim 800-1200$ в, $H = 220$ э (рис. 2а) и значениях p , соответствующих кривой III, колебания с частотой ν пропадают; при этом происходит скачок тока как функции p [9]. В области 3 колебания отсутствуют — переходная область к плазменному режиму. В области 4 вновь появляются излучения (3) меньшей частоты, свидетельствующие об уменьшении радиального падения потенциала из-за компенсирующего действия положительных ионов.

При p больших, чем значения p , соответствующие кривой V, колебания пропадают; последнее связано с исчезновением большого анодного падения потенциала и слоя отрицательного заряда вблизи анода. Во всей области внутри анода образуется квазинейтральная плазма. Подтверждением образования плазмы внутри анода являются зондовые характеристики, снятые при значениях параметров, соответствующих области 5 (рис. 3в).

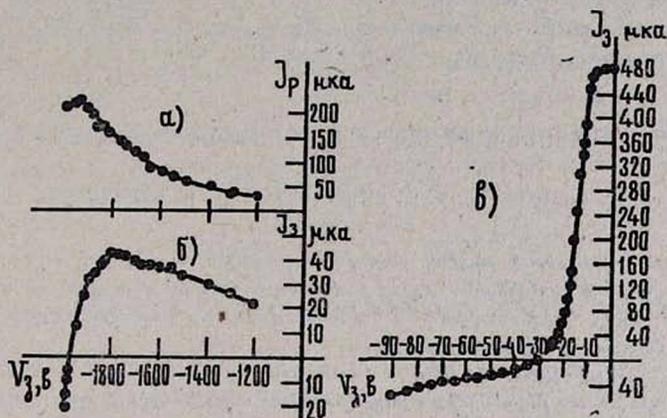


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики зонда $I_z = f(V_z)$. а) $V_a = 2$ кв, $p = 1,5 \cdot 10^{-5}$ тор (воздух), $H = 440$ э. Зонд на оси на расстоянии 1 см от катода. б) $V_a = 600$ в, $H = 580$ э, $p = 8 \cdot 10^{-3}$ тор. Зонд на оси на расстоянии 1 см от катода.

При больших значениях V_a ($V_a > 1600$ в) (рис. 2а) колебания с частотой ν появляются лишь после скачка тока (область 4) и перехода разряда во 2-ой режим.

С увеличением H (рис. 2б) область 1 смещается в сторону меньших p , область 2 расширяется к большим V_a , скачок $I_p = f(p)$ (кривая IV) и переход ко 2-ому режиму происходят при меньших p .

При низких V_a ($V_a < 1000$ в) в области 3' (рис. 2б) наряду с колебаниями частоты ν наблюдаются колебания типа пучок—плазма; последние при больших p (область 4) пропадают, что свидетельствует об исчезновении виртуального катода вблизи оси разряда.

При еще более сильных H (рис. 2в) область 2 смещается в сторону больших V_a , область 3' значительно расширяется, переход к квазинейтральной плазме (область 5) происходит при меньших p .

Таким образом, результаты измерений распределения потенциала и высокочастотных излучений в разряде взаимно согласуются; они позволяют выявить различные режимы разряда и наличие переходных областей.

Московский государственный университет
ИРФЭ АН АрмССР

Поступила 1.VII.1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R. H. Levy. Phys. Fluids, 8, 1288 (1965).
2. W. Klauser. J. Appl. Phys., 37, 602 (1966); 33, 2093 (1962).
3. А. В. Тимофеев. УФН, 102, 185 (1970).
4. Г. В. Смирницкая, Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 39, 1044 (1969).
5. Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая, Э. П. Шеретов. Радиотехника и электроника, 7, 1809 (1962).
6. Г. В. Смирницкая, И. А. Носырева. ЖТФ, 40, 2346 (1970).
7. Г. С. Смирницкая, Э. М. Рейхрудель, Г. А. Егiazарян. Вестник МГУ, Физика, № 5, 1972 (в печати).
8. Э. М. Рейхрудель, Г. М. Смирницкая, Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 39, 1052 (1969).
9. Г. В. Смирницкая, Нгуен Хыу Ти. Вестник МГУ, Физика, № 1, 3 (1969).

ՕՍՑԻԱՑՎՈՂ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐՈՎ ՊԱՐՊՄԱՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ԴԻԱԳՐԱՄԵՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Է. Մ. ՌԵՅԻՐՈՒԴԵԼ, Գ. Վ. ՍՄԻՐՆԻՑԿԱՅԱ, Գ. Ա. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ

Էլեկտրական պոտենցիալի ուղիղ բաշխման, զոնդային հոսանքների և տարբեր տեսակի բարձրհաճախային տատանումների միացյալ չափումների շնորհիվ ստացված են պարզման վիճակի դիագրամները, որոնք բնորոշում են Պեննինգի պարզման տարածական լիցքերի բաշխումը տարբեր ռեժիմներում:

Ստացված կախվածությունները թույլ են տալիս մանրամասն հետևել պարամետրերի փոփոխման ժամանակ պարզման մի ռեժիմից մյուսին անցման պրոցեսներին և պարզաբանում են տատանումների դերը պարզման մեխանիզմում:

ON STATE DIAGRAMS OF THE DISCHARGE WITH OSCILLATING ELECTRONS

E. M. REIKHRUDEL, G. V. SMIRNITSKAYA, G. A. EGIAZARIAN

On the basis of distribution measurements of different types of oscillations as well as of the electrical potential and currents, state diagrams of the discharge with oscillating electrons are built.