

УДК 537.525

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КАТОДНОМ СЛОЕ
АНОМАЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

В. С. Болдасов, А. У. Кузьмичев

Представлен расчет катодного слоя аномального тлеющего разряда, учитывающий в кинетическом приближении резонансную перезарядку ионов, эмиттируемых плазмой отрицательного свечения. Результаты расчета распределения электрического поля хорошо согласуются с экспериментом при разрядном напряжении в киловольтовом диапазоне.

Аномальный тлеющий разряд низкого давления с напряжением порядка нескольких киловольт широко применяется в ионно-плазменной технологии и электронно-лучевой технике из-за возможности получения с его помощью потоков высокоэнергетических частиц. Основные процессы, обеспечивающие формирование этих потоков, протекают в катодном слое, падение напряжения U на котором практически равно разрядному. При этом на катоде получают высокоэнергетичные тяжелые частицы - ионы и нейтралы перезарядки, а на аноде - электроны с энергией eU , где e - заряд электрона. Проектирование устройств на аномальном тлеющем разряде требует знания толщины катодного слоя и ее взаимосвязи с плотностью тока и другими параметрами разряда, а также энергетических спектров частиц, бомбардирующих катод. Эти характеристики зависят от распределения электрического поля в катодном слое, поэтому измерение и расчет поля представляют особый интерес.

В высоковольтных разрядах низкого давления может иметь место широкий круг элементарных процессов, включая ионизационные с участием тяжелых частиц [1 - 4]. Расчеты, выполняемые по моделям с учетом всех этих процессов, сложны, требуют знания сечений процессов и многочасовой работы ЭВМ, поэтому такие модели невозможно вводить в состав систем автоматизированного проектирования. Цель настоящей работы - показать на примере He и Ar, что для корректного расчета электрического поля в катодном слое аномального тлеющего разряда с напряжением в киловольтовом диапазоне (~ 5 кВ) достаточно учесть только резонансную перезарядку ионов, эмиттируемых плазмой отрицательного свечения (ОС), и движение последних в

самосогласованном поле, пренебрегая при этом ионизационными процессами в катодном слое.

Измерения [5] указывают на существенную неоднородность поля в катодном слое, поэтому движение заряженных частиц носит неустановившийся характер, а расчет поля должен быть основан на совместном решении уравнения Пуассона и кинетических уравнений для частиц. Используем следующую систему уравнений:

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0}, \quad E(x) = -\frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad E(d) = 0, \quad \varphi(0) = 0, \quad \varphi(d) = U,$$

$$\rho(x) = e \int f_1(x, v') dv',$$

$$v \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{eE}{M} \frac{\partial f_1}{\partial v} = 2nv\delta(v^2) \int f_1(x, v') \sigma(v') v' dv' - n f_1(x, v) \sigma(v) v,$$

$$f_1(0, v) \Big|_{v>0} = 0, \quad f_1(0, v) = \frac{2j_1}{e} \delta(v^2), \quad n = \text{const},$$

$$f_0(x, v) = n \int_x^d f_1(x', v) \sigma(v) dx', \quad f_0(0, v) \Big|_{v>0} = 0,$$

$$j_e = e \int [f_1(0, v') \gamma_1(v') + f_0(0, v') \gamma_0(v')] v' dv', \quad j = j_e + j_1,$$

где x - координата, отсчитываемая от катода, d - толщина катодного слоя, φ и E - потенциал и напряженность электрического поля, ϵ_0 - электрическая постоянная, v - скорость частиц, M - масса иона, n - концентрация молекул газа, f_1 и f_0 - функции распределения ионов и нейтралов перезарядки соответственно, δ - дельта-функция Дирака, σ - сечение резонансной перезарядки, j_e - плотность тока вторичной эмиссии катода, γ_1 и γ_0 - коэффициенты вторичной эмиссии электронов при бомбардировке ионами и нейтралами перезарядки соответственно, j_1 - плотность тока ионов, эмиттируемых из ОС, j - плотность разрядного тока.

Сечение σ для гелия аппроксимируем следующим выражением, согласующимся с экспериментом [6] с точностью до 10%:

$$\sigma = \begin{cases} 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2, & 0 \leq |v| < 2,2 \cdot 10^6 \text{ см/с} \\ (1,03 \cdot 10^{-7} - 4,36 \cdot 10^{-9} \ln|v|)^2 \text{ см}^2, & |v| \geq 2,2 \cdot 10^6 \text{ см/с} \end{cases}$$

Здесь и ниже $|v|$ - скорость в см/с. Коэффициенты вторичной эмиссии

молибденового катода для ионов He^+ и атомов гелия He аппроксимируем следующими выражениями, согласующимися с экспериментом [7] с точностью до 10% :

$$\gamma_1 = \begin{cases} 0,25, & 0 \leq |v| < 2,1 \cdot 10^7 \text{ см/с} \\ 7,14 \cdot 10^{-10} |v|^{1,168}, & |v| \geq 2,1 \cdot 10^7 \text{ см/с} \end{cases}$$

$$\gamma_0 = \begin{cases} 0, & 0 \leq |v| < 2,1 \cdot 10^7 \text{ см/с} \\ 7,14 \cdot 10^{-10} |v|^{1,168} - 0,25, & |v| \geq 2,1 \cdot 10^7 \text{ см/с} \end{cases}$$

Система уравнений решалась итерациями с использованием метода "крупных частиц" [8]. Величина d задавалась и являлась параметром задачи. В процессе решения определяли ток эмиссии ионов из ОС. Для этого потенциал φ представлялся в виде суммы потенциалов внешнего поля $\varphi_B = Ux/d$ и поля пространственного заряда φ_3 , который определяли из решения задачи (1):

$$d^2 \varphi_3 / dx^2 = - \rho(x) / \epsilon_0, \quad \varphi_3(0) = 0, \quad \varphi_3(d) = 0. \quad (1)$$

Потенциал φ_3 линейно зависит от j_1 , если положить $d\varphi/dx \leq 0$ при любых $x \in [0, d]$. Это является следствием того, что (1) представляет собой линейную однородную задачу для φ_3 , а ρ линейно зависит от j_1 . В дальнейшем будем считать, что φ_3 - решение (1) для $j_1 = 1$. Тогда можно записать $\varphi = \varphi_B + j_1 \varphi_3$. С учетом нулевого поля на границе ОС имеем

$$j_1 = - \frac{d\varphi_B}{dx} / \frac{d\varphi_3}{dx} \Big|_{x=d} = - \frac{U}{d} / \frac{d\varphi_3}{dx} \Big|_{x=d}. \quad (2)$$

Это позволяет использовать следующий алгоритм расчета. Пусть m - номер итерации, для которой имеем $\varphi = \varphi_m$. В частности, при $m = 1$ можно взять $\varphi_1 = \varphi_B$. Схема расчетов выглядит следующим образом:

1) при $j_1 = 1$ решаем (1) совместно с кинетическим уравнением для функции распределения ионов;

2) определяем $j_{1,m}$ по формуле (2) и $\varphi_{m+1} = \varphi_B + j_{1,m} \varphi_{3,m}$, затем переходим к этапу 1 и повторяем вычисления до получения заданной точности расчета φ .

Краевую задачу для уравнения Пуассона решаем методом прогонки [9]. В данном алгоритме решение исходной задачи сведено к многократному решению более простой задачи о движении ионов в

заданном поле. Для повышения точности расчета вблизи границы области ОС взята сгущающаяся сетка.

В [5] приведены экспериментальные данные по распределению $E(x)$ в гелиевом разряде с молибденовым катодом, полученные методом лазерной спектроскопии для двух режимов: $U = 5,1$ кВ, давление $p = 64,4$ Па, $d = 1,06$ см и $U = 4,97$ кВ, $p = 90$ Па, $d = 0,72$ см. Величина давления была приведена к 273 К. Для первого режима расчетная величина $j = 4,2$ мА/см², а экспериментальная - 4,35 мА/см². Во втором режиме расчетное значение $j = 7,28$ мА/см², а экспериментальное - 8,7 мА/см². На рис. 1 приведены расчетные (сплошная линия) и экспериментальные значения (значки) $E(x)$. Цифры на кривых указывают номер режима. Как видно, получено хорошее совпадение расчета и эксперимента. Аналогичные результаты получены при расчете толщины и тока для аргонового разряда с напряжением 2 - 6 кВ [10].

При расчете необходимо учитывать температуру газа для правильного определения концентрации газовых молекул и общего сечения перезарядки $\mu\sigma$. В [11] на это не было обращено внимание и расчетное d составляло 60% от измеренного.

Также были выполнены расчеты, аналогичные [1], с учетом всего комплекса ионизационных процессов в слое с участием электронов, ионов и быстрых нейтралов перезарядки; полученные распределения $E(x)$ для вышеуказанных режимов приведены на рисунке штриховыми линиями. Как видно, расчет по упрощенной модели с учетом только резонансной перезарядки ионов дает $E(x)$, мало отличающееся от расчета по модели,

дополнительно учитывающей ионизационные процессы в катодном слое. Наибольшее различие между расчетами наблюдается в прикатодной области, что обусловлено накоплением дополнительного положительного пространственного заряда в слое из-за ионизации газа.

Возможность правильного расчета $E(x)$ при учете только перезарядки ионов объясняется тем, что в катодном слое самостоятельного тлеющего разряда происходит около двадцати перезарядок на один эмиттированный из ОС ион, поэтому ионы и, соответственно, нейтралы

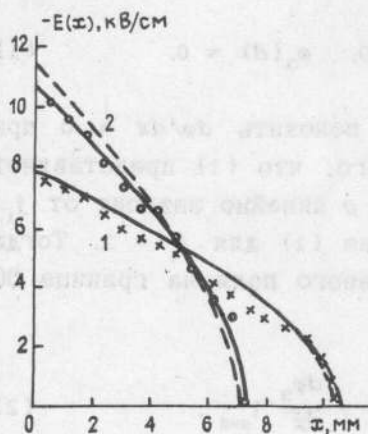


Рис. 1.

перезарядки не могут получить энергию, достаточную для эффективной ионизации газа. Ионизация электронами в слое незначительна, так как из-за их высокой энергии мало сечение ионизации. Поэтому в разряде с напряжением в киловольтовом диапазоне электрическое поле в слое определяется пространственным зарядом перезарядившихся ионов, первоначально эмиттируемых плазмой ОС, и мала роль ионов, образовавшихся в слое за счет ударной ионизации. В связи с этим отметим резкое падение E вблизи границы ОС, которое вызвано большим пространственным зарядом медленных ионов из ОС. Вблизи катода $E(x)$ изменяется линейно.

В заключение отметим, что применение кинетического подхода к расчету катодного слоя позволило избежать введения в уравнения слабообоснованных значений подвижности ионов [12]. Полученные данные служат обоснованием для включения построенной методики расчета катодного слоя аномального тлеющего разряда, требующей минимальных вычислительных затрат, в состав системы автоматизированного проектирования ионно-плазменных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдасов В. С., Кузьмичев А. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. N 7. С. 871.
2. Дзагуров Л. Ю., Жаринов А. В., Коваленко Ю. А. // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18. N 4. С. 682.
3. Пустынский Л. Н. // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. N 3. С. 441.
4. Ульянов К. Н. // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. N 6. С. 1121.
5. Lee S. A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 6. P. 409.
6. Allison S. K. // Rev. Mod. Phys. 1958. V. 30. N 4. P. 1137.
7. Ferron J. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. V. 14. N 9. P. 1707.
8. Болдасов В. С., Кузьмичев А. И., Филиппычев Д. С. // Вычислительные методы и программирование. 1983. Вып. 38. С. 128.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977.
10. Westwood W. D., Boyton R. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 6. P. 2691.
11. Gras-Marti A. et al. // Thin Solid Films. 1985. V. 124. N 1. P. 59.
12. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - М.: Наука, 1971.

Киевский политехнический институт

Поступила в редакцию
13 августа 1990 г.