

УДК 537.525

Р. Ш. Исламов

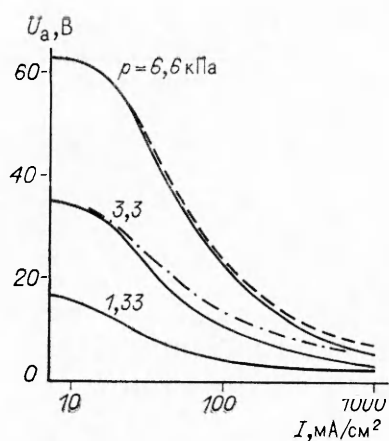
**РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОЙ ОБЛАСТИ
ПРОДОЛЬНОГО РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ**

Устойчивый интерес к продольным разрядам при повышенных давлениях поддерживается расширением области применения таких разрядов для накачки активных сред квантовых генераторов. В данной работе рассматривается численная модель разряда с учетом диффузионных потоков. Главное внимание уделено анодной области разряда — основному поставщику положительных ионов в положительный столб разряда. Пренебрежение диффузией в [1] ограничило область расчетов вольт-амперной характеристики (ВАХ) анодного слоя величиной плотности тока $I/\rho^2 \leq 4 \text{ мА/см}^2 \cdot \text{кПа}^2$. В [2] экспериментально показано, что на аноде при повышенных давлениях может реализовываться закон нормальной плотности тока с существенно большими значениями. В настоящей работе для более адекватного описания пространственных неоднородностей используется одномерная модель с учетом диффузионных потоков [3]

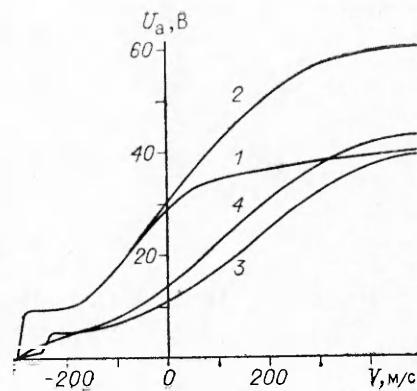
$$\begin{aligned} \rho/\partial t + \partial\Gamma_0/\partial x &= 0, \quad \Gamma_0 = (D_L - D_i)\partial n_i/\partial x - D_L\partial\rho/\partial x - n_i(\mu_e + \mu_i) \times \\ &\quad \times \partial\phi/\partial x + \rho\mu_e\partial\phi/\partial x + \rho V, \\ \partial n_i/\partial t + \partial\Gamma_i/\partial x &= (n_i - \rho)(\nu - \beta n_i), \quad \Gamma_i = -D_i\partial n_i/\partial x - n_i\mu_i\partial\phi/\partial x + \\ &\quad + n_i V, \\ \partial^2\phi/\partial x^2 &= -4\pi e\rho, \quad I = e\Gamma_0, \end{aligned}$$

где n_i , $e\rho$ — концентрации ионов и заряда; μ_e , μ_i — подвижности электронов и ионов; D_L , D_i — их коэффициенты продольной диффузии; ϕ — потенциал электрического поля; V — скорость газа ($V > 0$ при прокачке от анода); ν — частота ионизации; β — коэффициент электрон-ионной рекомбинации. На аноде ($x = 0$) принималось $\phi|_a = 0$, $\Gamma_i|_a = 0$, на положительном столбе ($x = d$) ставились условия $\rho|_{\text{пс}} = 0$, $\phi|_{\text{пс}} = -U < 0$. Учет диффузии повышает порядок уравнений, и кроме этих традиционных граничных условий, требуются еще два. Они выбраны в виде $\partial\rho/\partial x|_{\text{пс}} = \partial n_i/\partial x|_{\text{пс}} = 0$. Для плазмы азота в расчетах задавались следующие значения констант [4, 5]: $\mu_e N = 1,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-1}/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_i = \partial \ln \mu_e / \partial \ln E = -0,14$, $\mu_i N = 5,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-1}/\text{В} \cdot \text{с}$, $D_i N = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}/\text{с}$, $D_L N = 1,0 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-1}/\text{с}$, $\beta = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$, $\nu = A \exp(-B/E)$, где $A/N = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$; $B/N = 8,01 \cdot 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{см}^2$; $E = -\partial\phi/\partial x$; N — плотность газа.

Для численного решения системы уравнений использовались неявные конечно-разностные схемы второго порядка точности по пространственной координате и первого по времени. Учитывая отсутствие каких-либо процедур сглаживания результатов расчетов, такой выбор схем существенно устранил влияние «счетной диффузии» на найденные методом установления стационарные решения. На каждом временном шаге рассматриваемая нелинейная краевая задача решалась неявным двухслойным итерационным методом с выбором оптимального итерационного параметра [6].

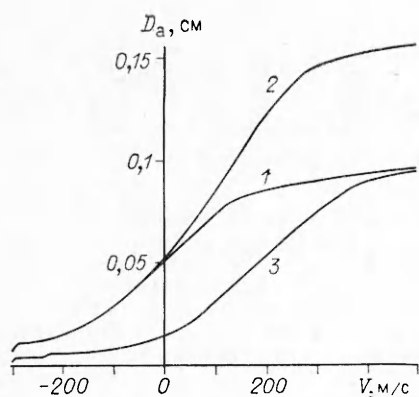


Р и с. 1

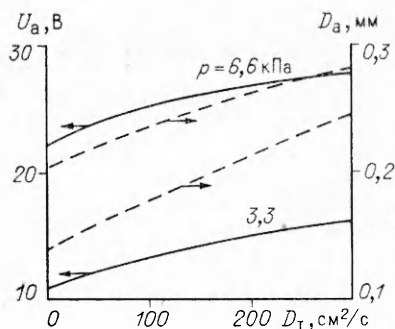


Р и с. 2

Проанализируем особенности анодной области разряда. Характерный размер отрицательного объемного заряда между анодом и электро-нейтральной плазмой положительного столба постоянного тока $l_E = \mu_e E^2 / 4\pi I$ [7]. Диффузионным процессам в разряде постоянного тока соответствует длина $l_u = D_L / \mu_e E$. Следовательно, для положительного столба плазмы азота $l_u / l_E \approx 0,057 I / p^2$ кПа²·см²/мА. При $l_u / l_E \ll 1$ почти во всем слое изменения характеристик обусловлены нарушением нейтральности и для описания приэлектродного слоя применимо дрейфовое приближение — квазинейтральные уравнения без диффузионных потоков (см., например, [1]). Штрихпунктирная кривая на рис. 1 (D_L увеличен в 3,7 раза) показывает сравнительно слабое влияние диффузии на величину анодного падения потенциала U_a при выполнении этого условия. Полученные результаты хорошо согласуются с данными расчетов [1] в дрейфовом приближении для небольших плотностей тока. Когда $l_u / l_E \geq 1$, диффузия заметно увеличивает U_a . Тем не менее при $I/p^2 = 24$ мА/см²·кПа², соответствующей нормальной плотности тока на аноде для азота в диапазоне давлений $0,7 \leq p \leq 4$ кПа, U_a в 1,5–2 раза меньше экспериментальных значений из [2]. В этих условиях характерные масштабы неоднородности L становятся сопоставимыми с l_u , и, в принципе, следует учитывать также нелокальность функции распределения электронов, что в условиях газоразрядной плазмы сильно усложняет задачу. Оценка влияния нелокальности функции распределения на коэффициенты плазмы в линейном приближении по параметру l_u / L приводит к появлению в выражении для потока Γ_0 диффузионного потока $D_E(n_i - \rho) \partial \ln E / \partial x$ [8] и ионизационного амбиполярного дрейфа со скоростью $v \sqrt{D_L} / \mu_e E$ [9]. Согласно расчетам [8], для азота в интересующей нас области $E/N D_E / D_L \leq 0,3$. Следовательно, влияние первого слагаемого относительно невелико. Влияние учета ионизационного амбиполярного дрейфа показано пунктирной кривой на рис. 1. По результатам расчетов, заметный рост напряженности электрического поля из-за нарушения квазинейтральности начинается на расстояниях, намного превышающих l_E . При малых плотностях тока анодная область может занять практически все межэлектродное пространство. Тогда определение анодного падения потенциала по формуле $U_a = U - dE|_{x=d}$ приводит к существенной зависимости U_a от выбора величины межэлектродного расстояния d . На кривых рис. 1, полученных при $d = 0,5$ см, это проявилось в эффекте насыщения при уменьшении плотности тока. Эффект особенно существен при наличии прокачки газа от анода (кривые 1 ($d = 0,5$ см) и 2 ($d = 1$ см) на рис. 2, 3 для $p = 3,3$ кПа, $I = 20$ мА/см²). В качестве толщины анодного слоя D_a на рис. 3 принималось расстояние, на котором напряженность поля равна полусумме напряженностей полей при $x = 0$ и $x = d$. Эксперимент [10], где U_a находилось аналогичным



Р и с. 3



Р и с. 4

образом из зондовых измерений (в воздухе), при $I = 9 \div 20 \text{ mA/cm}^2$ также показал слабую зависимость U_a от плотности тока и его рост с увеличением межэлектродного расстояния. При прокачке газа с $V = -\mu_i E_{nc}$ квазинейтральный положительный столб простирается вплоть до самого анода, и анодного падения потенциала в данном случае нет. Интересно отметить, что из-за амбиполярного дрейфа, связанного с зависимостью коэффициента подвижности электронов от электрического поля, существуют скачки в зависимостях U_a и D_a от скорости при прокачке газа от катода (кривые 2, 3 на рис. 2, 3 для $p = 3,3 \text{ кПа}$, $I = 100 \text{ mA/cm}^2$, $d = 0,5 \text{ см}$). Если положить $\mu_e = 0$ (кривая 4 на рис. 2), то скачки пропадают. В достаточно быстрых потоках течение может стать турбулентным и существенно повлиять на диффузионные процессы в разряде. Учет коэффициента турбулентной диффузии D_T , которая в расчетах добавлялась к D_L и D_i , приводит к росту анодного падения потенциала и толщины анодного слоя (рис. 4, $I = 100 \text{ mA/cm}^2$, $d = 0,5 \text{ см}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Акишев Ю. С., Высикайло Ф. И., Напартович А. П., Пономаренко В. В. Исследование квазистационарного разряда в азоте // ТВТ.— 1980.— Т. 18, вып. 2.
2. Акишев Ю. С., Напартович А. П., Перегатько П. И., Трушкин П. И. Приэлектродные области тлеющего разряда и нормальная плотность тока на аноде // ТВТ.— 1980.— Т. 18, вып. 4.
3. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов.— М.: Наука, 1980.
4. Дыхне А. М., Напартович А. П., Таран Т. В. и др. Численное исследование двумерного электрического разряда.— М., 1981.— (Препр./АН СССР, Ин-т прикл. математики; № 164).
5. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах.— М.: Мнр, 1977.
6. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений.— М.: Наука, 1978.
7. Блохин В. И., Бреев В. В., Двуреченский С. В., Пашкин С. В. Исследование анодной области газового разряда, контролируемого объемными процессами // ТВТ.— 1981.— Т. 19, вып. 5.
8. Александров Н. Л., Кончаков А. М., Напартович А. П., Старостин А. Н. Явления переноса заряженных частиц в слабоионизованной плазме // Химия плазмы.— М., 1984.— Вып. 11.
9. Высикайло Ф. И. Амбиполярный дрейф слабоионизованной плазмы, обусловленный нелокальностью функции распределения электронов // Физика плазмы.— 1987.— Т. 13, № 2.
10. Блохин В. И., Пашкин С. В. Исследование анодного падения в высоковольтном диффузионном разряде в поперечном потоке воздуха // ТВТ.— 1976.— Т. 14, вып. 2.

г. Москва

Поступила 10/IV 1989 г.