

Физика

УДК 537.525

Г. Г. АРУТЮНЯН, Л. СКАЛАК, П. ТАРАБЕК,
 Л. Б. ТАВАКАЛЯН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР НЕЙТРАЛЬНОГО
 ГАЗА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
 ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ

В работе дана теоретическая модель положительного столба тлеющего разряда в диффузионном режиме, которая позволяет быстро определять концентрацию электронов по температуре нейтрального газа и тока разряда. Модель была проверена экспериментально в неоне и аргоне в области давлений 2,8—15 Па·м и токов разряда в интервале 0,6—30 А/м.

Разработка моделей, учитывающих радиальные изменения температуры в цилиндрической разрядной трубке, дала возможность их применения для диагностических целей [1—5]. В данной работе рассматривается теоретическая модель положительного столба тлеющего разряда в диффузионном режиме с учетом радиального изменения температуры и температурных зависимостей величин, входящих в уравнения баланса. Показано, что эта модель может быть использована как метод расчета концентрации электронов по температуре нейтрального газа (около стенки или на оси разрядной трубки), интенсивности продольного электрического поля E , току разряда I и давлению P .

1. Функция распределения электронов f_0 была вычислена по скалярному уравнению Больцмана [6]:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{v}{3} \nabla f_1 + \frac{1}{3v^2} \frac{\partial(v^2 a f_1)}{\partial v} + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial(v^2)} \left[v^2 v_m \xi \left(f_0 + \frac{2kT_g}{m} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial(v^2)} \right) \right] + (F-S)f_0 = 0, \quad (1)$$

где f_1 —второй член разложения функции распределения f , $f_1 = f_0 + f \cdot \frac{v}{v} +$

..., $a = \frac{e}{m} \cdot E$ —интенсивность продольного электрического поля, $\xi = 2 \frac{m}{M}$

—коэффициент, определяющий среднюю потерю энергии электронов при упругих столкновениях с атомом массы M , m —масса электрона, v —хаотическая скорость электрона, k —постоянная Больцмана, T_g —температура нейтрального газа, v_m —частота упругих столкновений электронов с атомами, F —функция, учитывающая влияние неупругих столкновений на быстрые электроны в функции распределения («хвост» функции распределения), S —влияние неупругих столкновений на медленные электроны. Для создания теоретической модели положительного столба тле-

ющего разряда в диффузионном режиме были взяты следующие уравнения.

а) Уравнение баланса электронов при условии аксиальной и угловой изотропности положительного столба и его квазинейтральности [4, 5, 7, 8]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{d}{dr} (D_a n_e) \right] + z n_e - \delta n_e^2 = 0, \quad (2)$$

где r —расстояние от оси разрядной трубки, n_e —концентрация электронов, D_a —коэффициент амбиполярной диффузии, z —частота ионизации, δ —коэффициент объемной рекомбинации (уравнение было выведено при условии, что подвижность электронов значительно выше подвижности ионов и $\frac{dT_g}{dr} \ll \frac{dn_e}{dr}$).

б) Уравнение энергетического баланса нейтральных частиц (теплопроводность к стенке разрядной трубки):

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \kappa \frac{dT_g}{dr} \right] + \xi (\overline{U v_m}) n_e = 0. \quad (3)$$

где $U = \frac{mv^2}{2}$ —энергия электронов, κ —коэффициент теплопроводности нейтрального газа.

в) Пренебрегая теплопроводностью электронов, уравнение энергетического баланса электронов приведем к виду

$$e \mu_e n_e E^2 = \xi (\overline{U v_m}) n_e + U_{e0} \nu_{ex} n_e, \quad (4)$$

где μ_e —коэффициент подвижности электронов, ν_{ex} —частота возбуждения нейтралов электронами, U_{e0} —первый потенциал возбуждения.

Концентрация электронов получена из выражения для разрядного тока:

$$I = 2 \int_0^R e \mu_e n_e E r dr, \quad (5)$$

где R —диаметр цилиндрической разрядной трубки.

Температура нейтрального газа в разрядной трубке измерялась бусинковыми термисторами, укрепленными на металлических держателях и изолированными Al_2O_3 . Зависимость сопротивления термисторов от их температуры измерялась импедансным мостом. Возникшая при измерениях систематическая ошибка вычислялась по уравнению теплового баланса термистора или соответственно целого термисторного датчика:

$$w + Q_p + Q_r + Q_d = Q_v + Q_z, \quad (6)$$

где $w = \rho i^2$ —количество тепла, возникшее в термисторе, сопротивление которого ρ , когда через него протекает ток i ; Q_p —перенос количества тепла из нейтрального газа на измерительный элемент (термистор + проводники); Q_r —количество тепла, необходимое для нагрева измерительного элемента благодаря рекомбинации заряженных частиц на его поверхности; Q_d —количество тепла, идущее на нагрев измерительного элемента благодаря релаксации возбужденных атомов на его поверхности; Q_v —отвод тепла через металлические проводники и их изоляцию;

Q_7 —отвод тепла от измерительного элемента посредством излучения. Ввиду данного геометрического расположения измерительного элемента уравнение (6) нужно было решить для двух различных случаев: 1) для бусинкового термистора размером $5 \cdot 10^{-4}$ м с платиновыми проводниками длиной $5 \cdot 10^{-4}$ м и 2) для металлических проводников термистора.

Температура стенки разрядной трубки измерялась бусинковыми термисторами, запаянными в стеклянный капилляр. Систематическая ошибка вычислялась по уравнению теплового баланса, соответствующему переносу тепла через стенку разрядной трубки.

Интенсивность продольного электрического поля измерялась в ходе измерений двойным электрическим зондом. Для контроля данных, полученных из теоретической модели, концентрация электронов измерялась при помощи простого электрического зонда. При этом использовались соотношения для расчета величин, указанных в [9—11, 13].

2. Теоретические исследования радиальных зависимостей концентрации электронов от температуры нейтрального газа, полученных решением уравнений баланса, указало обширную область давлений и токов разряда в диффузионном режиме, в которой возможно вычислить концентрацию электронов по относительно легко измеряемым параметрам разряда, а именно по току разряда, давлению, интенсивности продольного электрического поля и температуре нейтрального газа [7]. Этот метод расчета концентрации электронов исходит из уравнения для тока разряда (5), которое после некоторых преобразований даст соотношение для концентрации на оси:

$$n_e(0) = \frac{3\pi v_{e0} \sigma_{m0}}{2\pi e^2 k} \cdot \frac{I}{R^2 \cdot \frac{E}{P} \cdot T_g(0) \cdot Y_p(\epsilon_0) Y_1}$$

где σ_{m0} —эффективное сечение переноса момента движения упругими столкновениями электронов с атомами при энергии электронов, равной первому потенциалу возбуждения; v_{e0} —скорость электронов с энергией, равной первому потенциалу возбуждения атомов; P —давление газа; $T_g(0)$ —температура нейтрального газа на оси разрядной трубки; параметр $\epsilon_0 = 2,73$, $E/P_0 = \epsilon_0 = 1,33 \cdot 10^{-2}$ (E/P); $T_g(0)/P_0$ — приве д е н н о е

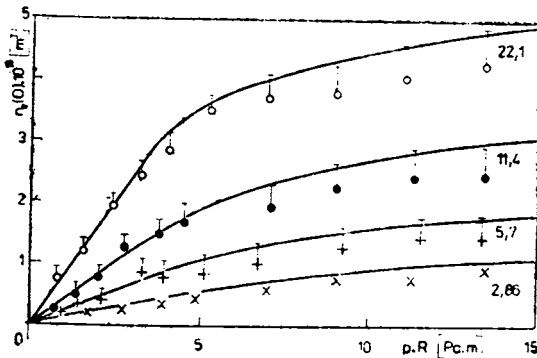


Рис. 1. Зависимости концентрации электронов на оси разрядной трубки $n_e(0)$ от давления для Ne-разряда. Сплошные кривые — теоретические значения. Точки — экспериментальные значения. Параметром является I/R в А/м. Отрезки ограничивают систематическую ошибку, вызванную влиянием конечной величины электрического зонда.

давление [12]. Функции $Y_p(\epsilon_0)$ и Y_1 табулированы в работе [7]. Метод применялся для разряда в неоне и аргоне, причем границы применимости распространяются на область низких давлений: у неона для $PR > 0,9$ и у аргона для $PR > 1,6$ Па·м. Применимость метода, кроме того, ограничена граничными значениями параметра: $\epsilon = 1,33$ (E/P) $T_g < 25$ для Ar и $\epsilon < 16$ для Ne. Далее, из теоретического анализа следует, что действительность метода ограничена областью мощ-

ностей для Ar $0,2 < IE < 85$ и для Ne $0,7 < IE < 251$ Вг/м. Верхняя граница давлений и токов соответствует контрагированному состоянию положительного столба, а нижняя—переходу из диффузионного состояния в бесстолкновительный режим. Теоретически рассчитанные по этому методу значения концентрации на оси сравнивались с экспериментальными значениями концентрации, полученными с помощью зондовых измерений. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 20% (рис. 1 и 2), что находится в рамках ограничений, данных

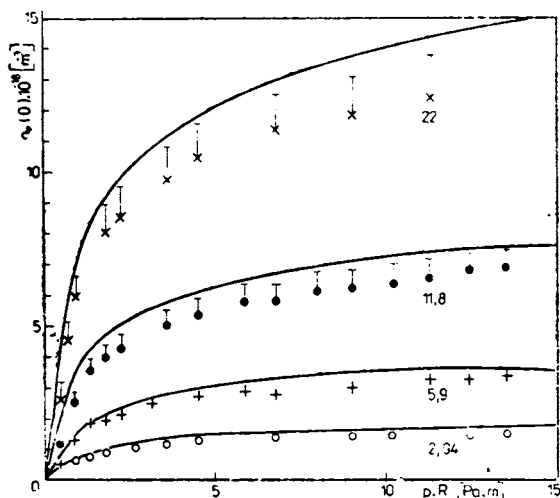


Рис. 2. Зависимости концентрации электронов на оси разрядной трубки $n_e(0)$ в разряде аргона от давления. Сплошные кривые—теоретические значения, точки—экспериментальные значения. Отрезки ограничивают систематическую ошибку, вызванную влиянием конечной величины электрического зонда. Параметром является $1/R$ в А/м.

как конечной величиной электрического зонда (снимающего вольтамперные характеристики не точно на оси, но вблизи оси), так и ошибками измерения температуры термисторами. Теоретическое рассмотрение систематической ошибки измерения температуры газа в разряде показало, что для области температур $300\text{--}350$ К разница между температурой термистора и температурой нейтрального газа вызвана, прежде всего, теплопроводностью металлических держателей термистора. Выше 500°K на систематическую ошибку начинает влиять тепловое излучение измерительного элемента, что находится в согласии с данными других авторов [7].

3. Диагностический метод вычисления концентрации электронов по измеренным значениям интенсивности продольного электрического поля, давления газа, тока разряда и температуры нейтрального газа, разработанный в этой работе, вместе с освоением методики измерения температуры газа с помощью термисторов дает возможность непрерывного измерения концентрации при плавно изменяющихся условиях разряда, что пригодно для изучения элементарных процессов в плазме положительного столба в диффузионном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Г. Г., Галечян Г. А., Тавакалян Л. Б. Влияние ламинарного течения на распределение концентрации заряженных частиц по радиусу положительного столба в тлеющем разряде с продольным потоком газа.—Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1980, т. 15, с. 286.
2. Каган Ю. М., Христов Н. Н. Об использовании атомных температур при диагностике плазмы средних давлений.—Оптика и спектроскопия, 1969, т. 27, в. 4, с. 573.
3. Berger E., Heisen A. The determination of electron energy distribution in discharges with plasma parts.—J. Phys. D: Appl. Phys., 1975, v. 8, № 6, p. 629.
4. Skalák L., Tarabek P., Veis Š. Štúdium parametrov kladneho stĺpca a využitie tepelôt pri diagnostike plazmy.—AFRN UK Physica, 1980, т. 21, с. 171.
5. Тарабек П., Скалак Л., Юрик В., Оравцова Н. Быстрое определение концентрации заряженных частиц в положительном столбе в этилене по температуре нейтрального газа.—AFRN UK Physica, 1983, т. 23, с. 101.
6. Skharovski I. P., Bachynski M. P. The particle Kinetics of Plasmas. Adisson—Wesley: 1966.
7. Tarabek P. Štúdium tepelných parametrov kladneho stĺpca a využitie tepelôt neutrálneho plynu pri diagnostike plazmy. Kandidátska dizertačná práca, Ustav fyziky a biofyziky UK, Bratislava: 1983.
8. Ružiča T., Rohlena K. A theory of the positive column constriction in the noble gas discharge at medium pressures.—Czech J. Phys., 1976, т. 26, с. 282.
9. Huddleston. Plasma Diagnostic Techniques —Academic Press., New York: 1965.
10. Козлов Л. Электрический зонд в плазме, М.: Атомиздат, М., 1969.
11. Tarabek P. Štúdium tepelných parametrov neutrálneho plinu.—AFRN UK Physica, 1975, т. 15, с. 83.
12. Mc Daniel F. W. Collision Phenomena in Ionized Gases., Willey. New York 1964.
13. Mouwen C., Hölscher J. Thermocouple measurements of the gas temperature in a constricted column discharge.—Physica, 1974, v. 74, № 2, p. 403.

Գ. Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Լ. ՍԿԱԼԱԿ, Պ. ՏԱՌԱԲԵԿ, Լ. Բ. ԹԱՎԱԲԱԼՅԱՆ

ԶԵՉՈՔ ԳԱԶԻ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ՊԼԱՉՄԱՅՈՒՄ
ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՑԻԱՆ ԶԱՇՎԵԼՈՒ ԶԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Աշխատանքում սոված է դիֆուզիոն ուժիմում մարմրող պարպման դրական սյան տեսական մոդելը, որը թույլ է տալիս արագ որոշել էլեկտրոնների կոնցենտրացիան շեղոք գազի ջերմաստիճանի և պարպման հոսանքի միջոցով: Մոդելը ստուգված է փորձնականորեն նեոնում և արգոնում 2,8—15 Պա. մ ճնշումների և 0,6—30 Ա/մ պարպման հոսանքների տիրույթներում: