



УДК 621.387.3

А. С. Киселев, Е. А. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние разрядных условий на коэффициент аккомодации электронов в плазме инертных газов

Найдены зависимости продольного градиента потенциала плазмы в положительном столбе от давления при различных диаметрах разрядных трубок. Получены зависимости коэффициента аккомодации электронов при различных диаметрах, давлениях и газовых наполнениях разрядных промежутков. Показана возможность применения изложенной методики для расчета параметров плазмы лазеров тлеющего разряда.

Тлеющий разряд, градиент потенциала, электронная температура, коэффициент аккомодации

Поведение газоразрядных приборов в токовой цепи, включая газоразрядные лазеры, в существенной мере определяется видом вольт-амперных характеристик (ВАХ) разрядных промежутков. ВАХ позволяют судить о состоянии их активной среды, в том числе, о степени натекания атмосферных газов [1]. Импеданс плазмы, влияющий на динамическую устойчивость токовой цепи разряда, в существенной мере зависит от статического и дифференциального сопротивлений, определяемых ВАХ. Кроме того, вид ВАХ оказывает существенное влияние на динамические свойства разряда. Вид вольт-амперных характеристик определяется в значительной мере поведением продольного градиента потенциала. Продольный градиент потенциала (E_z) в положительном столбе (ПС) тлеющего разряда пропорционален корню квадратному из коэффициента аккомодации электронов (χ), под которым понимается средняя суммарная доля энергии электрона (W_e), теряемая при различных соударениях с частицами газа. Эти потери связаны с нагревом и излучением газа за счет упругих и неупругих процессов, передачей энергии стенкам, ограничивающим разряд. Продольный градиент потенциала в ПС связан с коэффициентом аккомодации следующим выражением [2]:

$$E_z = \frac{1.5kT_e\sqrt{\chi}}{e\lambda_e}, \quad (1)$$

где T_e – электронная температура; $\lambda_e = \lambda_{e0}/p$ – средняя длина свободного пробега электронов (p – давление газа).

Коэффициент аккомодации является сложной функцией условий разряда, что в обобщенном виде характеризуется его зависимостью от электронной температуры. Строгий расчет χ для условий разрядов в узких протяженных трубках, реализуемых в лазерах, затруднителен в силу многообразия и сложности процессов, протекающих в плазме. В литературе имеются экспериментальные сведения о χ , относящиеся к ряду чистых газов [2], [3]. Они отражают зависимость $\chi = f(W_e)$ для весьма узкого диапазона разрядных условий, из-за чего использование при расчетах значений χ из справочной литературы представляется затруднительным.

В экспериментах использовался макет с четырьмя разрядными трубками с внутренним диаметром 1.1; 2; 3.4; 5.2 мм, с подвижными анодами, перемещаемыми с помощью магнитных приводов в пределах изменения длины ПС 0.1...0.25 м. Макет соединялся с вакуумной системой откачки и наполнения, позволяющей варьировать газовое наполнение и рабочее давление. В работе исследу-

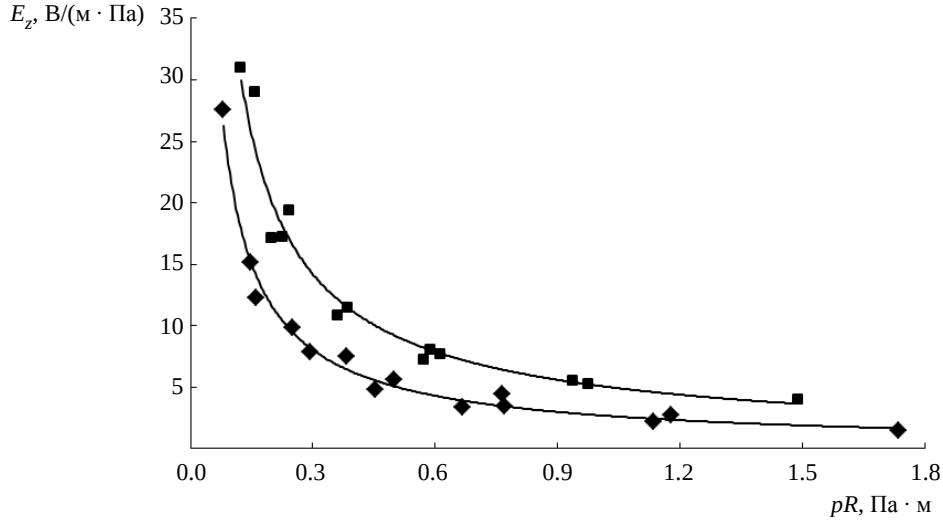


Рис. 1

довались характеристики разряда в чистых гелии и неоне. С целью увеличения точности расчетов параметров плазмы ПС в работе была предпринята попытка уточнения значений коэффициента аккомодации. Идея уточнения χ основывалась на использовании полукоспериентального подходо к проблеме, суть которого заключается в следующем. Первоначально на основе экспериментальных ВАХ получали информацию о поведении E_z в широком диапазоне изменения разрядных условий. Поскольку $T_e = T_e(pR)$ и $\lambda_e \sim 1/p$, то из (1) следует, что $E_z/p = f(pR)$, экспериментальные значения градиента потенциала удобно представить именно в таком виде (рис. 1).

Далее с помощью разработанной компьютерной программы рассчитывались функции электронной температуры для диапазонов изменения условий разряда: давления (p), диаметра разрядного канала (d), состава газовой смеси, соответствующих экспериментальным условиям. Методика расчета T_e базируется на основе решения трансцендентного уравнения баланса ионизации. В экспериментах плазма заключена в цилиндрическую трубку с внутренним радиусом R . Предполагалось, что рекомбинация в объеме газа незначительна, а нейтрализация зарядов в основном происходит за счет амбиполярной диффузии с последующей рекомбинацией на стенках. Тогда с учетом выражения для коэффициента амбиполярной диффузии частота ионизации определяется как [2]

$$v_i = \frac{b_i k (2.405)^2 T_e}{R^2 e}, \quad (2)$$

где $b_i = b_{i0}/p$ – подвижность ионов.

С другой стороны, средняя частота ионизации записывается как

$$v_i = n_a \int_0^{\infty} q_i(U) v(U) f(U) dU, \quad (3)$$

где n_a – концентрация атомов; q_i – сечение ионизации; $v(U)$ – скорость электронов; $f(U)$ – функция распределения электронов по энергиям, которое принималось максвелловским. Приравнявая (2) и (3), получаем трансцендентное уравнение относительно T_e . После интегрирования выражение для частоты ионизации будет иметь вид [4]

$$v_i = n_a \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{0.5} \alpha_i \exp \left(-\frac{eU_i}{kT_e} \right) \left(U_i + \frac{2kT_e}{e} \right).$$

На основе аналитического соотношения (1) между E_z и T_e и приравнивания расчетного продольного градиента потенциала экспериментальному получили семейства зависимостей $\chi = f(p, d)$ для каждого рода газа. На основе полученных таким образом значений коэффициентов аккомодации были найдены эмпирические выражения для расчета, являющиеся функциями двух переменных – давления и диаметра разрядного промежутка: $\chi(p, d) = (ad + b) p^{-c \ln(kd)}$ – для неона; $\chi(p, d) = a \ln(bd) p^{-c \ln(kd)}$ – для гелия, где $a, b, c, k > 0$ – постоянные. На рис. 2 показаны экспериментальные и рассчитанные по формулам зависимости коэффициента аккомодации для неона.

На рис. 3 представлены аналогичные зависимости для гелия. Хорошее согласование выбранной модели аппроксимации с экспериментальными данными позволяет использовать полученные выражения для автоматизированного расчета коэффициентов аккомодации.

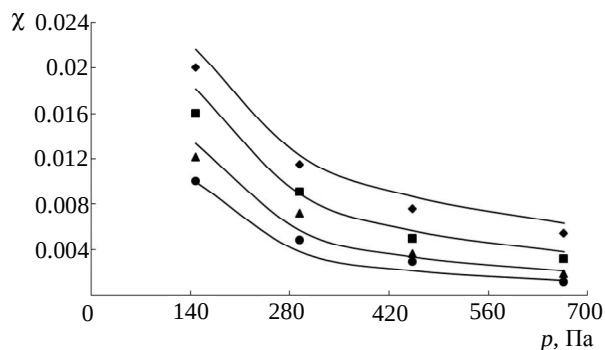


Рис. 2

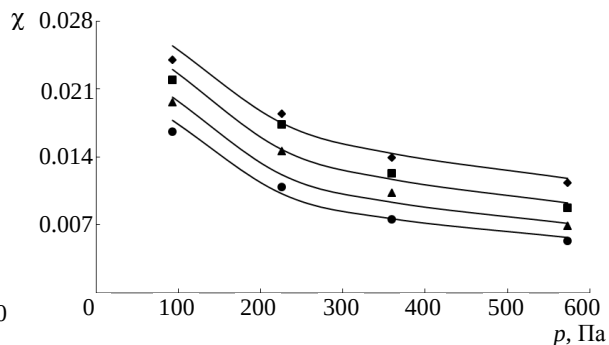


Рис. 3

Допустимость полуэмпирического подхода к оценке χ подтверждается совпадением с точностью 10–15 % результатов, полученных для чистых гелия и неона, с данными, известными из литературы [2]. Хорошее согласование экспериментальных и справочных данных позволяет сделать вывод о применимости методики определе-

ния коэффициента аккомодации для разряда не только в чистых газах, но и в их смесях, характерных для лазеров тлеющего разряда. В дальнейших исследованиях предполагается расширить диапазоны изменения разрядных условий и набор газовых смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Е. А., Морозов С. С., Тимошичев А. А. Регенерация активных элементов лазеров тлеющего разряда // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 39–48.
2. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. 490 с.
3. Левитский С. М. Сборник задач и расчетов по физической электронике. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1964. 178 с.
4. Киселев А. С., Смирнов Е. А. Методика расчета параметров плазмы тлеющего разряда // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 56–59.

A. S. Kiselev, E. A. Smirnov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INFLUENCE OF THE DISCHARGE CONDITIONS ON THE COEFFICIENT OF ELECTRONS ACCOMMODATION IN THE INERT GASES PLASMA

Dependences of a longitudinal gradient of potential of positive column plasma from pressure with various diameters of the discharge tubes are found. Dependences of the coefficient of electrons accommodation with various diameters, pressure and gas fillings of the discharge intervals are received. The possibility of application of the discussed technique for calculation of the plasma parameters of the glow discharge lasers is shown.

Glow discharge, gradient of the potential, electron temperature, coefficient of accommodation