

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛАБОТОЧНОГО РАЗРЯДА
В ТРУБКАХ МАЛОГО ДИАМЕТРАА.Х.МУРАДОВ, Т.Х.ГУСЕЙНОВ
Бакинский Государственный Университет

Изучены динамические свойства положительного столба капиллярного разряда в неоне. Измерены статическая и динамическая вольтамперные характеристики. Получена расчетная динамическая характеристика для соответствующих условий с учетом инерционности процесса ионизации. Динамическое сопротивление носит индуктивный характер. В соответствии с режимом прямой ионизации и плоским характером статической ВАХ диаграмма импеданса имеет простую структуру. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых свидетельствует о применимости предложенной модели для расчета динамического сопротивления слабых капиллярных разрядов.

§1. Введение

Широкое использование капиллярных разрядных трубок в газовых лазерах связано с тем, что в этих трубках, в отличие от традиционных разрядных трубок, имеющих диаметр порядка одного или нескольких см, при обычных давлениях газа ($10^{-2} \div 1 \text{ Торр}$) уход заряженных частиц на стенки осуществляется в режиме свободного падения [1, 2]. Из-за малого поперечного размера трубки режим амбиполярной диффузии заменяется более быстрым режимом ухода. В результате этого концентрация заряженных частиц устанавливается на более низком уровне, что в свою очередь приводит к росту напряженности продольного электрического поля и электронной температуры. Поэтому капиллярные трубки характеризуются более высокой электронной температурой и низкой концентрацией заряженных частиц. Высокая электронная температура приводит к режиму более интенсивного возбуждения атомных уровней. В результате этого капиллярные разрядные трубки отличаются от традиционных трубок более высокой яркостью спектральных линий и являются наиболее оптимальной активной средой, с точки зрения генерации [3].

Следует отметить, что в отличие от традиционных широких разрядных трубок, в которых уже начиная от давления в несколько десятых Торр, возбуждение и ионизация осуществляется ступенчато, а гибель заряженных частиц определяется амбиполярной диффузией, в капиллярных трубках из-за высокой электронной температуры в образовании заряженных частиц преобладают прямые процессы, а уход осуществляется в режиме свободного падения. Это позволяет применить к капиллярному разряду метод динамической характеристики в наиболее простой форме с учетом одного фактора инерционности – процесса

ионизации принимая во внимание свободную диффузию и переход в амбиполярную диффузию, описываемых эффективным коэффициентом диффузии.

Настоящая работа посвящена изучению динамических свойств положительного столба капиллярного разряда в неоне. Измерены статическая и динамическая ВАХ разряда, получена расчетная динамическая характеристика для соответствующих условий с учетом инерционности процесса ионизации, дана интерпретация полученных результатов.

§2. Результаты измерений статической и динамической характеристик

Измерения проводились в стандартной разрядной трубке с внутренним диаметром 2мм и длиной 40см. Катод и анод были изготовлены заводским способом из нержавеющей стали, что позволяло менять полярность разряда. Наполнением служил спектрально чистый неон при давлении 130Па. При этих условиях исследование собственных колебаний разряда показало, что область малых разрядных токов до 10 мА свободна от флуктуаций. Увеличение тока свыше 10мА вызывало появление регулярных колебаний в диапазоне 20 – 30кГц, основные свойства которых позволяют отождествлять их с бегущими стратами. Рост тока свыше 20мА приводил к переходу регулярных страт в шумовые при одновременном увеличении глубины модуляции тока и напряжения, которые не превышали 3 – 4%.

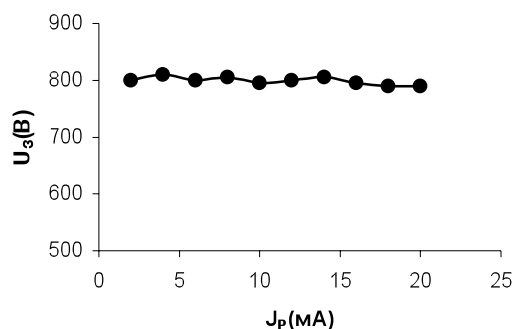


Рис. 1. Измеренная статическая вольтамперная характеристика (Ne, $P = 130$ Па, $d = 2$ мм).

Результат измеренной статической ВАХ приведен на рис.1. Видно, что в пределах значений разрядного тока от 2 до 20мА падение напряжения на разрядной трубке остается около 800В и практически не меняется. Наличие плоской ВАХ свидетельствует о том, что прямая ионизация является основным механизмом образования заряженных частиц, и что режим свободного падения на стенку сохраняется во всем диапазоне измерений [4].

На рис. 2 приведен пример динамической характеристики при силе разрядного тока $J_p = 10$ мА. В соответствии с плоским характером статической ВАХ, кривая начинается с начала координат при низких частотах. Импеданс носит индуктивный характер, с ростом частоты реактивная составляющая увеличи-

вается, достигает своего максимального значения при частоте порядка 10^4 Гц , затем спадает. Активная составляющая с ростом частоты монотонно возрастает. Модуль импеданса во всем диапазоне измерений монотонно возрастает и при предельно высоких частотах имеет преимущественно активный характер и стремится к значению, равному удельному сопротивлению столба постоянному току.

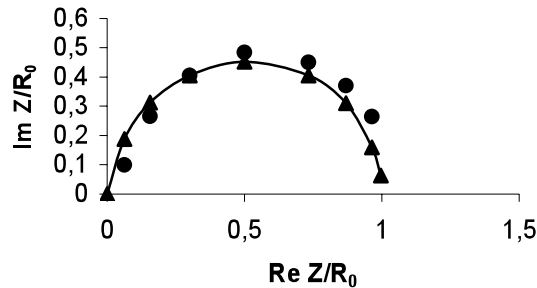


Рис.2. Годограф динамической вольтамперной характеристики разряда (сплошная кривая с треугольниками – расчет, точки – измеренные значения. ($N_e, P = 130 \text{ Па}$, $v = 2 \text{ мм}$, $J_p = 10 \text{ мА}$, $R_0 = 80 \text{ кОм}$).

В процессе исследования динамического сопротивления наблюдалась синхронизация страт внешним модулирующим сигналом. Зона синхронизации при силе разрядного тока 10 мА составляла $4,2 \text{ кГц}$. При глубине модуляции тока разряда внешним сигналом 5% частота стратовых колебаний при этом составляла 27 кГц . С увеличением глубины модуляции зона синхронизации расширялась. В зоне синхронизации наблюдались периодические изменения модуля динамического сопротивления и разности фаз переменных составляющих напряжения на трубке и тока с частотой модуляции.

§3. Расчет динамической характеристики и интерпретация полученных результатов

Расчет произведен на основе системы уравнений, характеризующей положительный столб капиллярного разряда. Линеаризация и последующее решение полученной системы относительно комплексного динамического сопротивления единицы длины столба позволяет определить частотные зависимости действительной и мнимой частей сопротивления.

Уравнение баланса электронов можно записать в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_a \Delta n + zn, \quad (1)$$

где n концентрация электронов, D_a - коэффициент амбиполярной диффузии, z – скорость ионизации. Для Максвелловского распределения электронов с достаточной точностью z выражается как:

$$z = Ve \frac{-eV_i}{kT_e}, \quad (2)$$

где B - коэффициент, выражающийся через эффективное сечение и потенциал ионизации V_i , а также и электронную температуру T_e .

Двумя другими уравнениями служат уравнение, определяющее электронную температуру [4]

$$T_e = 0,63 \cdot \frac{\lambda_e E}{\frac{m}{M} \cdot P}, \quad (3)$$

и выражение силы тока разряда

$$J = enSbE, \quad (4)$$

где b – подвижность электронов, S – сечение разряда.

Концентрация электронов есть функция координаты и времени: $n = n(\vec{r}, t)$. Предположим, что ее можно представить как произведение двух отдельных функций от этих переменных.

$$n = n_0(t)J_0(\mu_1 r) \quad (5)$$

Уравнение (1) после подстановки в него (5) переходит в

$$\frac{dn_0}{dt} = (r - \mu_1^2 D_a)n_0 \quad (6)$$

Комбинируя уравнениями (3, 4, 6) получаем уравнение

$$\frac{1}{J} \frac{dJ}{dt} - \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = Be^{-\frac{V_i}{eGU}} - DU, \quad (7)$$

где постоянные G и D зависят от давления газа P и межэлектродного расстояния ℓ .

Уравнение (7), связывающее $J, U, \frac{dJ}{dt}, \frac{dU}{dt}$ представляет собой уравнение динамической ВАХ тока в газовом промежутке при заданных условиях. Конкретный вид характеристики зависит от того, как именно меняются U и J с течением времени. Легко анализируются два предельных случая медленных и быстрых изменений. При весьма медленных изменениях тока $\frac{dJ}{dt} \approx 0, \frac{dU}{dt} \approx 0$; тогда из (7) следует $Be^{-\frac{V_i}{eGU}} - DU = 0$, представляющее собой плоскую статическую ВАХ в виде $U = const$. При очень быстрых процессах производные $\frac{dJ}{dt}$ и $\frac{dU}{dt}$ велики, в то время как правая сторона (7) от скорости процесса непосредственно не зависит. При достаточно высокой частоте колебаний или крутом фронте напряжения им можно пренебречь. Остающееся в этом случае уравнение

$$\frac{1}{J} \frac{dJ}{dt} - \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = 0 \quad (8)$$

интегрируется и дает линейную зависимость между J и U , соответствующую закону Ома.

Линеаризуя уравнение (7) находим динамическое сопротивление столба в виде

$$Z = R + jX, \quad (9)$$

где действительная часть R и мнимая часть X комплексного сопротивления выражаются через B , D и G . В силу громоздкости явные выражения R и X здесь не приводятся (см. например [5, 6]). Рассчитанные значения динамического сопротивления при разных частотах приведены в виде диаграммы на рисунке 2. Как следует из сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей, качественно ход годографов динамического сопротивления согласуются с общими закономерностями экспериментальных кривых, что свидетельствует в пользу применимости предложенной модели для расчета динамического сопротивления слаботоочного разряда в трубках малого диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Привалов В.Е., Шишов С.И. Радиотехника и Электроника. т.32, №8, 1987, стр. 1678-1685.
2. Привалов В.Е., Шишов С.И. ЖТФ, т.59, №7, 1989, стр.204-208.
3. Привалов В.Е., Смирнов Е.А. Оптика и Спектроскопия, том 48, №5, 1980, стр. 949-957.
4. Грановский В.А. Электрический ток в газе, М.: Наука, 1971.
5. Мурадов А.Х., Гусейнов Т.Х. Журнал Физика, том 13, №1, 2007, стр. 312-314.
6. Sobhanian S., Khorram S., Muradov A.. European J. of Physics, Appl. Phys.. 2005. v. 30. №3, p. 201-206.

KIÇIK DİAMETRLİ BORULARDA ZƏİF CƏRƏYANLI ELEKTRİK BOŞALMASININ DİNAMİK XASSƏLƏRİ

Ə.X.MURADOV, T.X.HÜSEYNOV

XÜLASƏ

Kapilyar boruda, neon qazında elektrik boşalmasının dinamik xassələri öyrənilmişdir. Boşalmanın statik və dinamik volt-ampere xarakteristikaları ölçülmüşdür. Uyğun şərait üçün ionlaşmanın inersiyası nəzərə alınmaqla dinamik xarakteristika hesablanmışdır. Dinamik müqavimətin induktiv xarakter daşdığı müəyyənləşdirilmişdir. Birbaşa ionlaşma rejiminə və doyma xarakterli statik volt-ampere xarakteristikasına uyğun olaraq impedans diaqramının sadə xarakterli olması alınmışdır. Ölçülmüş və hesablanmış impedans əyriələrinin müqayisəsi göstərir ki, kapilyar borularda elektrik boşalmasının dinamik müqavimətinin hesablanması üçün təklif olunan model yararlıdır.

DYNAMICAL PROPERTIES OF THE LOW CURRENT DISCHARGES IN CAPILLARY TUBES

A.X.MURADOV, T.KH.HUSEYNOV

SUMMARY

The dynamical properties of the positive column of low current discharges in capillary tubes were investigated. The static and dynamical characteristics were measured. It was computed the dynamical characteristics at the appropriate conditions taking into account ionization inertia. The impedance of the positive column have an inductive character. According to the direct ionization condition and plane type static characteristics the impedance diagram have a single looped shape. Comparison of measured and computed dynamical characteristics show that the offered model is available for calculation of the impedance of discharges in capillary tubes.