

РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОЙ
РЕКОМБИНАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.Х.МУРАДОВ, Т.Х.ГУСЕЙНОВ
Бакинский Государственный Университет
htarlan@mail.ru

Получено выражение комплексного динамического сопротивления разряда в условиях, когда заряженные частицы возникают в результате ступенчатой ионизации и исчезают путем объемной рекомбинации. Годограф, построенный на основе вычислений, начинается с положительного действительного значения при низких частотах. Динамическое сопротивление имеет индуктивный характер. С ростом частоты индуктивность разряда возрастает, достигает своего максимального значения, затем уменьшается. При предельно высоких частотах индуктивность разряда уменьшается до нуля, динамическое сопротивление имеет активный характер и равняется сопротивлению единичной длины разряда постоянному току.

§1. Введение

Колебательные процессы в газоразрядных приборах заметно влияют на их электрические, оптические и эксплуатационные параметры. Поэтому они стали предметом изучения разрядов, находящихся в различных условиях образования и исчезновения заряженных частиц [1,2]. Динамические характеристики, определяемые из рассмотрения разрядов в колебательном режиме, содержат более полную информацию о процессах в разряде, в связи с чем они представляют не только научный, а также прикладной интерес. Для анализа динамики колеблющегося разряда часто пользуются понятием комплексного динамического сопротивления или импеданса, частотными зависимостями его амплитуды и фазы. Динамическое сопротивление разряда позволяет выяснить времена жизни частиц в плазме, составить эквивалентную схему разряда [3-5]. Знание последней дает возможность прогнозировать свойства собственных колебаний [5,6], находить методы их устранения.

Линейные колебания параметров разряда при низких давлениях с учетом прямой ионизации были изучены в работах [1,7]. Учет ступенчатой ионизации при более высоких давлениях привел к существенным изменениям частотных зависимостей электрических и оптических параметров разряда [8-10]. Однако с ростом давления наряду с увеличением доли ступенчатой ионизации в образовании заряженных частиц возрастает также роль объемной рекомбина-

ции. Увеличение силы разрядного тока также приводит к увеличению роли рекомбинации в гибели заряженных частиц. С ростом разрядного тока увеличивается концентрация заряженных частиц, в балансе метастабильных уровней увеличивается роль разрушения метастабильных атомов, ответственных за ступенчатую ионизацию, электронным ударом. Такие условия реализуются в лампах среднего и высокого давления с большой плотностью разрядного тока часто применяемых в целях освещения. Поэтому изучение динамических свойств разряда в условиях ступенчатой ионизации с учетом объемной рекомбинации имеет важное значение.

Задачей настоящей работы является вычисление комплексного динамического сопротивления единицы длины положительного столба разряда в режиме ступенчатой ионизации и рекомбинации. В разрушении метастабильных атомов, с которых идет ступенчатая ионизация, учитывается только переход на соседние уровни электронным ударом с последующим быстрым излучением. Рассмотрение проводилось на основе системы уравнений баланса с последующей линеаризацией и решением полученной системы относительно величины комплексного динамического сопротивления единицы длины столба разряда. Считалось, что функция распределения электронов по энергиям такая же, как и для стационарного столба и определяется только значением продольного электрического поля.

§2. Расчет динамического сопротивления

Рассмотрим систему уравнений ПС разряда в условиях ступенчатой ионизации и объемной рекомбинации. Она состоит из уравнений баланса заряженных частиц, возбужденных метастабильных атомов, с которых происходит ступенчатая ионизация и выражения плотности разрядного тока.

$$\frac{dn_e}{dt} = N_m \alpha_{mi} n_e - \beta n_e^2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_m}{dt} = N_0 \alpha_{0m} n_e - N_m \alpha_m n_e \quad (2)$$

$$j = n_e e b_e E \quad (3)$$

Здесь n_e , N_0 , N_m - концентрации электронов, нормальных и возбужденных метастабильных атомов, соответственно, α_{0m} , α_{mi} , α_m - скорости реакций прямого возбуждения, ступенчатой ионизации и разрушения метастабильных уровней электронным ударом, β - коэффициент рекомбинации, b_e - подвижность электронов, j - плотность разрядного тока, E - напряженность продольного электрического поля.

Предполагается, что электроны возникают только в результате ступенчатой ионизации метастабильных атомов электронным ударом, исчезают в результате объемной рекомбинации. Метастабильные атомы образуются в результате прямого возбуждения и разрушаются электронным ударом. Весь разрядный ток переносится электронами, концентрация нормальных атомов постоянна вдоль трубки и не модулируется.

Допустим, разрядный ток модулируется с малой глубиной модуляции

$$J(t) = j_0 + j_1 e^{i\omega t}, \quad j_1 \ll j_0 \quad (4)$$

Величины $n_e(t)$, $N_m(t)$, $E(t)$ также будут модулироваться.

Как правило, α_{mi} , β , α_m , b_e слабо зависят от напряженности продольного электрического поля и при линеаризации системы (1-3) этими зависимостями можно пренебречь. Величина α_{0m} сильно зависит от E , и ее можно разложить в ряд в виде:

$$\alpha_{0m}(t) = \alpha_{0m}(E_0) + \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_1 e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \frac{d^2\alpha_{0m}}{dE^2} E_1^2 e^{2i\omega t} + \dots \quad (5)$$

Подстановка (4,5) в (1-3) с последующей линеаризацией приводит к двум системам уравнений для стационарных значений параметров плазмы и комплексных амплитуд колебаний концентраций электронов, метастабильных атомов и напряженности продольного электрического поля n_1 , N_1 , E_1 .

$$\left. \begin{aligned} N_{m0}\alpha_{mi} &= \beta n_0 \\ N_0\alpha_{0m} &= N_{m0}\alpha_m \\ J_0 &= eb n_0 E_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и

$$\left. \begin{aligned} i\omega n_1 &= N_1 n_0 \alpha_{mi} + \beta n_0 n_1 \\ i\omega N_1 &= N_0 n_0 \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_1 - \alpha_m N_1 n_0 \\ j_1 &= eb(n_1 E_0 + n_0 E_1) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь n_0 , N_{m0} , E_0 - средние значения соответствующих параметров. Система уравнений (6) характеризует стационарный ПС, а (7)-малые колебания параметров плазмы. При получении системы (7) были использованы соотношения (6).

Решение системы (7) относительно n_1 , N_1 , E_1 приводит к следующему выражению импеданса единицы длины ПС

$$Z_1 = \frac{(B + i\omega)(C + i\omega)}{AD + (B + i\omega)(C + i\omega)} R_0, \quad (8)$$

где введены обозначения $A = N_0 \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_0$, $B = \beta n_0$, $C = \alpha_m n_0$, $D = \alpha_{mi} n_0$,

$\frac{E_0}{J_0} = R_0$. Из этого выражения для амплитуды и фазы комплексного динамического сопротивления имеем:

$$|Z_1| = \frac{\left\{ \omega^4 + (B^2 + C^2 - AD)\omega^2 + ABCD + B^2 C^2 \right\}^{1/2} + [\omega AD(B + C)]^2}{(AD + BC - \omega^2)^2 + \omega^2 (B + C)^2} \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{AD(B + C)\omega}{\omega^4 + (B^2 + C^2 - AD)\omega^2 + ABCD + B^2 C^2} \quad (10)$$

Анализ этих выражений показывает, что при $\omega = 0$ $|Z_1| = \frac{BC}{AD + BC}$ и $\varphi_z = 0$, т.е. при низких частотах динамическое сопротивление имеет активный характер и стационарный разряд обладает возрастающей характеристикой. При $\omega = \infty$ $\varphi_z = 0$ и $|Z_1| = R_0$, т.е. при очень высоких частотах динамическое сопротивление разряда имеет активный характер и численно равно удельному сопротивлению разряда постоянному току.

Общий вид динамической характеристики приведен на рис. 1. Видно, что согласно возрастающей статической ВАХ разряда, кривая импеданса (или динамического сопротивления) начинается с положительного действительного значения при низких частотах. Динамическое сопротивление имеет индуктивный характер, причем с ростом частоты индуктивность столба возрастает. Значение $|Z_1|$ достигает своего максимума при частотах порядка \sqrt{AD} . При более высоких частотах индуктивная составляющая и вместе с ним $|Z_1|$ уменьшаются. При предельно высоких частотах динамическое сопротивление оказывается чисто омическим и определяется величиной R_0 .

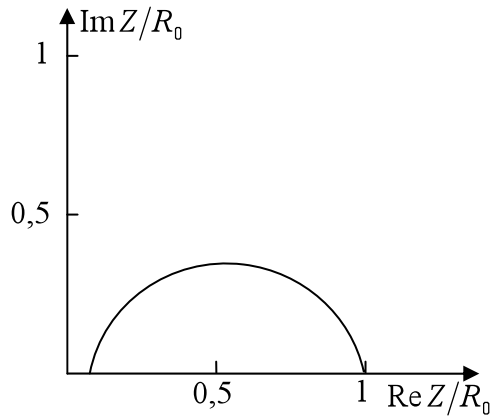


Рис. 1. Кривая комплексного динамического сопротивления, вычисленная по формуле (8).

§3. Выводы и заключение

Вычисление комплексного динамического сопротивления разряда (или импеданса) показало, что при $\omega = 0$ для стационарного разряда импеданс носит активный характер и имеет положительный знак, т.е. стационарный разряд в условиях рекомбинации имеет возрастающую ВАХ. Это связано с тем, что при малых флуктуациях разрядного тока, в уравнении баланса заряженных частиц приходный член линейно зависит от концентрации электронов, т.к. в урав-

нении баланса метастабильных уровней приходный и уходный члены пропорциональны n_e , и следовательно, как видно из второго уравнения системы (6), N_m от n_e и силы разрядного тока не зависит. Уходный же член в уравнении баланса заряженных частиц от n_e зависит квадратично и, для удовлетворения уравнения (3), при малых изменениях разрядного тока и концентрации электронов изменяется E_z .

С увеличением частоты появляется и возрастает индуктивная составляющая. При более высоких частотах, определяемых ионизационной инерционностью и инерционностью накопления метастабильных атомов, индуктивная часть переходит через максимум и при предельно высоких частотах уменьшается до нуля. Это является следствием имеющих место механизмов накопления и диссипации энергии [1]. Активная же составляющая монотонно возрастает с ростом частоты и стремится к значению R_0 при $\omega \rightarrow \infty$.

Следует отметить, что экспериментальное определение коэффициентов, входящих в расчетные формулы, затруднены из-за невысокой точности определения скоростей реакций (они имеют порядковый характер). Поэтому количественное сравнение результатов расчетов с измеренными кривыми импеданса не имеет смысла. Однако ход годографов динамического сопротивления качественно согласуется с общими закономерностями экспериментальных кривых [9], что свидетельствует в пользу применимости предложенной модели для расчетов импеданса рядов, находящихся в ионизационно-рекомбинационном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Гостехиздат, 1952, т.1, с.374-382.
2. Дейч Г., Голубовский Ю.Б. Радиотехника и электроника. 1978, №6, с.1205-1211.
3. Привалов В.Е., Шишов С.И. Радиотехника и электроника. 1987, т.32, №8, с.1678-1685.
4. Wilke L., Kablan N., Deutsch H. Contribution to Plasma Phys. 1990, 30, №4, p. 481-486.
5. Привалов В.Е., Шишов С.И. ЖТФ, 1989, т.39, №7, с.204-208.
6. Привалов В.Е. Квантовая электроника. 1977, т.4, №10, с.2085-2119.
7. Мурадов А.Х. Известия ВУЗ-ов "Радиофизика", 1988, т.33, №6, с.763-768.
8. Rutscher A., Deutsch H., Beitr. Plasmaphys, 1977, v.17, №2, 89-102.
9. Абдуллаев Р.А., Гусейнов Т.Х. Журнал Известия вузов «Радиоэлектроника». Киев: 2008, т.51, №4, с.38-49.
10. Sobhanian S., Khorram S., Muradov A. European Journ of Phys., Appl. Phys. 2005, v.30, №3, 201-206.

YÜKLÜ ZƏRRƏCİKLƏRİN HƏCMİ REKOMBİNASİYASI ŞƏRƏİTİNDƏ ELEKTRİK BOŞALMASININ KOMPLEKS DİNAMİK MÜQAVİMƏTİNİN HESABLANMASI

Ə.X.MURADOV, T.X.HÜSEYNOV

XÜLASƏ

Yüklü zərrəciklərin pilləli ionlaşma nəticəsində yarandığı və həcmi rekombinasiya nəticəsində yox olduğu şəraitdə qazda elektrik boşalmasının kompleks dinamik müqaviməti

hesablanmışdır. Hesablamalar nəticəsində qurulmuş qodoqraf kiçik tezliklərdə həqiqi müsbət qiymətdən başlayır. Dinamik müqavimət induktiv xarakter daşıyır. Tezlik artdıqca boşalmanın induktivliyi artır, müəyyən maksimal qiymətə kimi artır, sonra azalır. Çox yüksək tezliklərdə boşalmanın induktivliyi sıfıra kimi azalır, dinamik müqavimət aktiv xarakter alır. Bu qiymət boşalmanın vahid uzunluğunun sabit cərəyan müqavimətinə bərabər alınır.

COMPUTATION OF THE DISCHARGE COMPLEX DYNAMICAL RESISTANCE AT THE RECOMBINATION CONDITIONS OF CHARGED PARTICLES

A.H.MURADOV, T.H.HUSEYNOV

SUMMARY

Expression of the discharge complex dynamical resistance when charged particles appear as a result of step ionization and disappear due to volume recombination is obtained. The diagram plotted on the basis of computation starts from the real positive value at low frequencies. The impedance has an inductive character. With the increase of frequency the discharge inductance increases, reaches its maximum value, and descends. At too high frequencies the discharge inductance decreases to zero, and the dynamical resistance has a real character which is equal to the resistance of discharge unit length.