

## РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА В ГЕЛИИ В НИЗКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

**Т.Х.ГУСЕЙНОВ**

*Бакинский Государственный Университет*

*AZ1148, Баку, З.Халилова, 23*

Расчитана динамическая характеристика разряда в гелии в низкочастотном диапазоне с учетом ступенчатой ионизации. В разрушении метастабильных атомов, ответственных за ступенчатую ионизацию, принято во внимание разрушение электронным ударом и гибель на стенках за счет диффузии. При малых значениях разрядного тока и малых концентрациях электронов в области низких частот действительная часть комплексного сопротивления имеет отрицательный знак, т.е. разряд обладает негatronным свойством, статическая характеристика – падающая. С увеличением разрядного тока растет концентрация электронов и увеличивается доля разрушения метастабильных атомов электронным ударом, отрицательная часть действительной составляющей импеданса при низких частотах уменьшается, и ослабевает его негatronное свойство.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к устойчивости и стабильности газоразрядной плазмы, применяемой во многих газоразрядных приборах, стимулирует изучение динамических характеристик разряда. Эти характеристики, с одной стороны, являются важным источником информации в понимании свойств разряда, с другой стороны, необходимы для различных технических приложений [1,2]. Они устанавливают соотношение между током и напряжением, меняющимся со временем, и поэтому могут определяться только из рассмотрения разряда в колебательном режиме. При этом широко используется динамическое сопротивление или импеданс. Причем особенно ценную информацию о стационарном или колеблющемся разряде можно получить из низкочастотной ветви кривой импеданса или динамической характеристики.

Динамические характеристики могут быть определены экспериментально путем измерений или рассчитаны, исходя из элементарных процессов, происходящих в самом разряде. Такого рода исследования проводились нескольких группах работ [3-5], [6,7], [8,9]. В работах [3-5] вычислен импеданс разрядов среднего и высокого давления с учетом множества элементарных процессов. Получены качественно отличающиеся кривые импеданса, дана физическая интерпретация выявленных особенностей. Оценена роль влияния отношения чисел прямых и ступенчатых ионизаций, дано объяснение сложной структуры кривых импеданса, связанной с инерцией теплоемкости нейтрального газа, ионизационной инерционностью прямых и ступенчатых процессов.

Динамические свойства разрядов в трубках малого диаметра, рассмотренные в [6,7] интересны тем, что в некотором диапазоне с ростом разрядного тока осуществляется переход из условия свободного падения на стенки в режим амбиполярной диффузии, замедляются потери заряженных частиц на стенках, уменьшается продольное электрическое поле, вольт-амперная характеристика принимает падающий характер. Для этих переходных условий получен ряд интересных экспериментальных и расчетных динамических характеристик.

Рассмотренный в работе [9] расчет динамического сопротивления разряда с учетом элементарных процессов при различных режимах баланса частиц позволил получить выражение импеданса в широком диапазоне разрядных условий. При этом учитывалось разрушение метастабильных уровней, ответственных за

ступенчатую ионизацию, электронным ударом и диффузией. Учет этих механизмов в отдельности приводит к качественно различным видам кривых импеданса.

В представленной работе проведен расчет комплексного сопротивления разряда в гелии с учетом ступенчатой ионизации. В разрушении метастабильных атомов принято во внимание разрушение электронным ударом и гибель на стенках за счет диффузии. Известно, что при постоянном давлении газа с ростом разрядного тока первый механизм превалирует над вторым, и в результате этого статическая ВАХ разряда с падающей переходит в характеристику вида плато. В случае падающей статической характеристики в низкочастотной части динамической характеристики действительная часть комплексного сопротивления имеет отрицательный знак, т.е. разряд обладает негатронным свойством. Причем с увеличением доли разрушения электронным ударом в исчезновении метастабильных атомов отрицательная часть действительной составляющей импеданса уменьшается, и ослабевает его негатронное свойство.

### РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В условиях ступенчатой ионизации система уравнений, описывающая ПС разряда, имеет вид

$$\frac{dn}{dt} = N_m \alpha_{mi} n - \frac{n}{\tau_a}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_m}{dt} = N_0 \alpha_{0m} n - \left( \frac{1}{\tau_m} + n \alpha_m \right) N_m, \quad (2)$$

$$j = nebE, \quad (3)$$

здесь  $n$ ,  $N_0$ ,  $N_m$  - концентрации электронов нормальных, возбужденных и метастабильных атомов,  $\alpha_{0m}, \alpha_{mi}, \alpha_m$  - скорости реакций прямого возбуждения, ступенчатой ионизации и разрушения метастабильных уровней электронным ударом,  $\tau_a$  - время жизни электронов в разряде за счет амбиполярной диффузии,  $b_e$  - подвижность электронов,  $j$  - плотность разрядного тока,  $E$  - напряженность продольного электрического поля,  $\tau_m$  - время диффузии метастабильных атомов к стенкам.

В этой системе первые два уравнения представляют собой уравнения баланса электронов и метастабильных атомов, третье – выражение плотности разрядного тока.

Предполагается, что электроны возникают только путем ступенчатой ионизации метастабильных атомов электронным ударом, исчезают в результате амбиполярной диффузии. Метастабильные атомы образуются в результате прямого возбуждения, исчезают на стенках вследствие диффузии 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

$$\left. \begin{aligned} n_e(t) &= n_0 + n_1 e^{i\omega t}, |n_1| \ll n_0 \\ N_m(t) &= N_{m0} + N_1 e^{i\omega t}, |N_1| \ll N_{m0} \\ E(t) &= E_0 + E_1 e^{i\omega t}, |E_1| \ll E_0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

здесь  $n_1, N_1, E_1$  - комплексные амплитуды колебаний соответствующих параметров.

Как правило,  $\alpha_{mi}$ ,  $\tau_a$ ,  $\alpha_m$ ,  $b_e$  слабо зависят от напряженности электрического поля, и при линеаризации системы (1-3) этими зависимостями можно пренебречь. Величина  $\alpha_{0m}$  сильно зависит от  $E$ , и ее можно разложить в ряд в виде

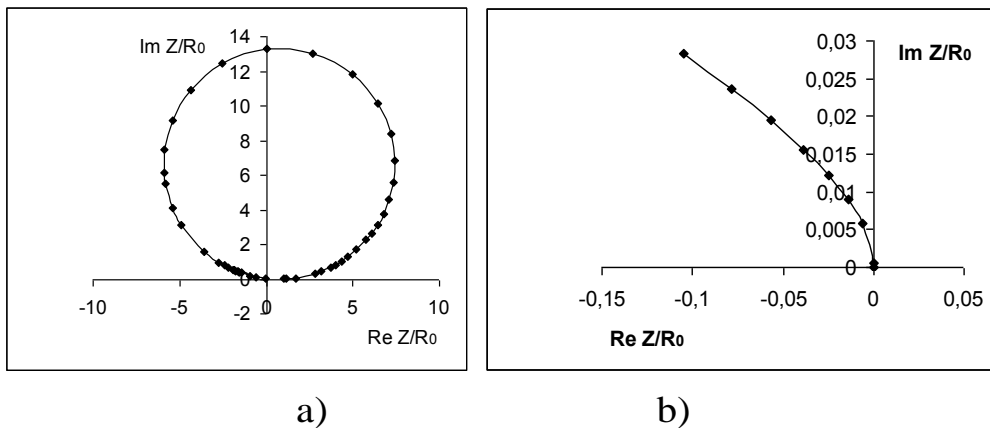
$$\alpha_{0m}(t) = \alpha_{0m}(E_0) + \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_1 e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \frac{d^2\alpha_{0m}}{dE^2} E_1^2 e^{2i\omega t} + \dots \quad (6)$$

Подстановка (4,5,6) в (1-3) с последующей линеаризацией приводит к двум системам уравнений для стационарных значений параметров плазмы и комплексных амплитуд  $n_1, N_1, E_1$ .

Из полученных линеаризованных систем определяется выражение импеданса единицы длины ПС. Решение имеет особенно простой вид в двух предельных случаях, когда  $\alpha_m n_0 \gg \tau_m^{-1}$  и  $\alpha_m n_0 \ll \tau_m^{-1}$ . В первом случае предполагается, что метастабильные уровни, ответственные за ступенчатую ионизацию, разрушаются только электронным ударом. При этом в уравнении (2) первый член в скобке отбрасывается, и выражение импеданса единицы длины ПС получается в виде

$$Z_i = \frac{E_1}{j_1} = \frac{-\omega^2 + iB\omega}{AC - \omega^2 + iB\omega} R_0, \quad (7)$$

здесь введены обозначения  $A = N_0 \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_0$ ,  $B = \alpha_m n_0$ ,  $C = \alpha_{mi} n_0$ ,  $R_0 = \frac{E_0}{j_0}$ .



**Рис.1.**

- a) Кривая импеданса, вычисленная для случая, когда метастабильные атомы разрушаются электронным ударом.
- b) Предельные значения импеданса, построенные в крупном масштабе для очень низких частот.

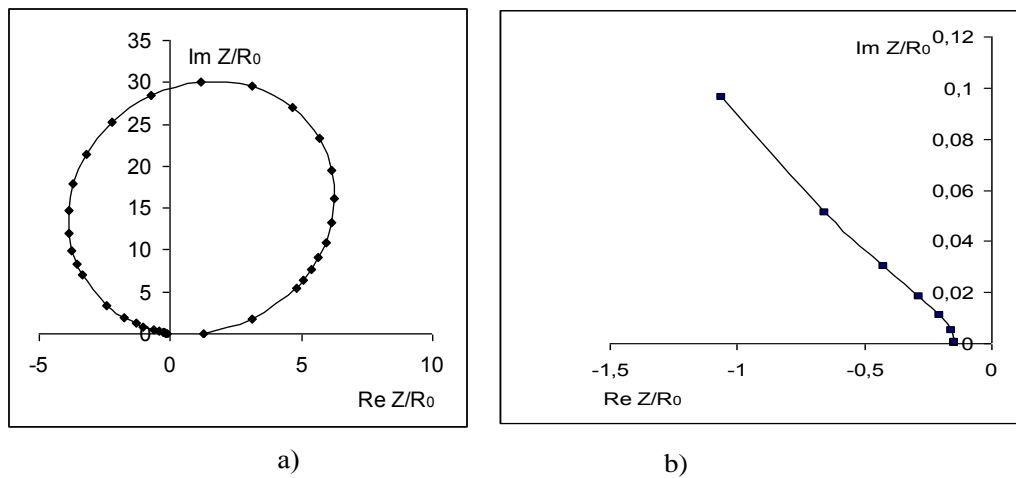
Кривая импеданса, построенная по формуле (7) приведена на Рис.1а. Там же приведена начальная ее часть в крупном масштабе, соответствующая низким частотам. Видно, что кривая начинается с начала координат, с ростом  $\omega$  переходит во второй квадрант с фазовыми сдвигами  $\varphi > \frac{\pi}{2}$ . Значение  $Z = 0$  при  $\omega = 0$  означает, что ВАХ стационарного разряда параллельна оси тока. Импеданс носит индуктивный характер, и с ростом частоты индуктивность ПС возрастает. При частоте  $\nu = 1,3 \cdot 10^4$  Гц  $|Z|$  достигает своего максимального значения. При более высоких частотах индуктивная составляющая уменьшается и при  $\omega = \infty$  принимает действительное значение, равное удельному сопротивлению столба по постоянному току  $R_0 = E_0/j_0$ .

В другом предельном случае предполагается, что метастабильные уровни разрушаются на стенках в результате диффузии. В этом случае в уравнении (2)

пренебрегается вторым членом в скобках. Из решения линеаризованной системы получается

$$Z_1 = \frac{-(CD + \omega^2)\tau_m + i\omega}{(AC - DC - \omega^2)\tau_m + i\omega} R_0, \quad (8)$$

здесь введено обозначение  $D = N_0 \alpha_{om}$ . Кривая импеданса, построенная по формуле (8) приведена на Рис.2а. Там же приведена ее начальная часть в более крупном масштабе, соответствующая низким частотам. Видно, что кривая начинается с отрицательного действительного значения при  $\omega = 0$ , следовательно, статическая ВАХ носит падающий характер, и ПС обладает негатронным свойством. С ростом  $\omega$  модуль  $|Z|$  и ее индуктивная составляющая растут. При частоте  $\nu = 8,9 \cdot 10^3$  Гц индуктивность достигает своего максимального значения, затем уменьшается до нуля. При предельно высоких частотах импеданс принимает действительное значение  $R_0$ .



**Рис.2.**

- а) Кривая импеданса, вычисленная для случая, когда метастабильные атомы разрушаются в результате диффузии к стенкам.  
 б) Предельные значения импеданса, построенные в крупном масштабе для очень низких частот.

В обоих рассмотренных случаях импеданс имеет индуктивный характер. В низкочастотной области кривые импеданса имеют негатронное свойство и качественно отличаются. С ростом частоты  $|Z|$  увеличивается и достигает своего максимального значения при частотах порядка среднегеометрической частоты между обратными временами жизни электронов и метастабильных атомов. В высокочастотной области кривые импеданса имеют приблизительно одинаковое поведение. С ростом частоты индуктивная составляющая уменьшается и при  $\omega = \infty$  принимает действительное положительное значение, равное удельному сопротивлению столба постоянному току.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислен импеданс единицы длины ПС разряда единичного поперечного сечения при средних давлениях, т.е. в условиях, когда заряженные частицы возникают в результате ступенчатой ионизации и исчезают из-за амбиполярной диффузии к стенкам. В этих условиях при низких значениях разрядного тока концентрация электронов мала, и в уходном члене уравнения баланса метастабильных уровней разрушением электронным ударом по сравнению с диффузией можно пренебречь. Таким образом, при низких разрядных токах

метастабильные атомы, ответственные за ступенчатую ионизацию, исчезают из разряда в результате диффузии к стенкам. С ростом силы разрядного тока  $n_e$  увеличивается и, как видно из стационарного случая уравнения (2),  $N_m$  также возрастает. Увеличение  $N_m$  приводит к увеличению относительной доли ступенчатой ионизации и дополнительному росту концентрации, что приводит к спаду напряженности продольного электрического поля. При этом отпадает необходимость поддержания имеющегося электрического поля, статическая ВАХ приобретает падающий характер, и разряд приобретает негatronное свойство. Соответственно этому кривая импеданса начинается с отрицательного действительного значения при  $\omega=0$ . С увеличением частоты  $|Z|$  возрастает, причем импеданс имеет индуктивный характер, и негatronное свойство сохраняется. При частотах порядка  $\left(\frac{N_0}{\tau_m} \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_0\right)^{1/2}$  модуль  $Z$  достигает своего максимального значения, а затем спадает. При более высоких частотах индуктивная составляющая уменьшается и при  $\omega = \infty$  принимает действительное положительное значение, равное удельному сопротивлению столба по постоянному току.

При высоких значениях силы разрядного тока концентрация электронов высока, и в уравнении баланса метастабильным диффузионным членом можно пренебречь. С увеличением силы разрядного тока увеличивается  $n_e$ , и как следует из уравнения (2) для стационарного случая, оба члена уравнения баланса возрастают пропорционально концентрации электронов, заселенность метастабильных уровней с ростом разрядного тока не меняется, выходит на насыщение. Падающий характер ВАХ исчезает, и характеристика становится параллельной оси тока. В соответствии с этим кривая импеданса начинается с начала координат при  $\omega=0$ , с увеличением частоты  $Z$  переходит во второй квадрант, имея при этом индуктивный характер. При частотах порядка  $\left(N_0 \frac{d\alpha_{0m}}{dE} E_0 \alpha_m n_0\right)^{1/2}$  модуль  $Z$  достигает своего максимального значения, а затем спадает. При более высоких частотах индуктивная составляющая уменьшается и при  $\omega = \infty$  принимает действительное значение.

В заключении автор выражает признательность проф. А.Х.Мурадову за ценные обсуждения.

1. Под. ред В.Е.Фортова, *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, М.: Физматлит, (2004) 530.
2. В.Е.Привалов, *Квантовая Электроника*, **4** (1977) 2085.
3. A. Rutscher, H. Deutsch, *Beitr. Plasmaphys.*, **17** №2 (1977) 89.
4. H.Deutsch, S.Pfau *Beitr., Plasmaphys.*, **17** №3 (1977) 145.
5. Г.Дейч, Ю.Б.Голубовский, *Радиотехника и электроника*, №6 (1978) 1206.
6. В.Е.Привалов, *Радиотехника и Электроника*, **25** (1980) 567.
7. В.Е.Привалов, С.И.Шишов, *ЖТФ*, **39** №7 (1989) 204
8. Ю.М.Каган, Р.И.Лягущенко, В.М.Миленин, А.Х.Мурадов, *ЖТФ*, **45** (1975) 1019.
9. S.Sobhanian, S.Khorram, A.Muradov, *European Journ of Phys., Appl. Phys.*, **30** №3 (2005) 201.

**HELİUM QAZINDA ELEKTRİK BOŞALMASININ DİNAMİK XARAKTERİSTİKASININ  
KİÇİK TEZLİK DİAPAZONUNDA HESABLANMASI**

**T.X.HÜSEYNOV**

Helium qazında elektrik boşalmasının dinamik xarakteristikası alçaq tezlik diapazonunda pilləli ionlaşmanı nəzərə almaqla hesablanmışdır. Pilləli ionlaşmanın baş verdiyi metastabil atomların yox olmasında elektron zərbəsi ilə dağılma və diffuziya nəticəsində divarda məhv olma nəzərə alınmışdır. Boşalma cərəyanının və elektron konsentrasiyasının kiçik qiymətlərində kompleks müqavimətin həqiqi hissəsi alçaq tezliklərdə mənfi işarəli alınır. Elektrik boşalması neqatron xassəyə malik olur və statik volt amper xarakteristikası enən xarakter daşıyır. Boşalma cərəyanının qiyməti artdıqca elektron konsentrasiyası da artır, metastabil atomların yox olmasında elektron zərbəsi ilə dağılmanın rolu artır, impedansın mənfi həqiqi hissəsi azalır, neqatron xassəsi zəifləyir.

**COMPUTATION OF THE DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF A DISCHARGE  
IN HELIUM IN THE LOW FREQUENCY RANGE**

**T.Kh.HUSEYNOV**

The dynamical characteristic of a discharge in helium gas has been computed at low frequency range taking into account stepwise ionization. It has been assumed that metastable atoms decay by the electron impact and as a result of diffusion. At low discharge currents and low electron number densities the real part of dynamical resistance at low frequency range has been negative, i.e. discharge has had a negatron property, statical volt-ampere characteristics is descending. With the increase of discharge current electron number density and the share of decay of metasable atoms by the electron impact has increased. The real negative part of the dynamical resistance and the negatron property has decreased.

Редактор: К.Курбанов