

УДК 533.95

**ИМПЕДАНС СПЕКТРОСКОПИЯ И ПЕРЕХОДНАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЯДА В ГЕЛИИ  
В РЕЖИМЕ ПРЯМОЙ ИОНИЗАЦИИ****Т.Х.ГУСЕЙНОВ***Бакинский Государственный Университет**htarlan@mail.ru*

*Метод импеданс спектроскопии в сочетании с методом переходных характеристик и характерных времен применен к плазме положительного столба разряда в гелии в условиях прямой ионизации и амбиполярной диффузии. При расчете импеданс спектра использовалась система уравнений, состоящая из уравнения баланса и выражения электронного тока через разряд. Рассчитанная и измеренная импеданс спектры для соответствующих условий обнаруживают удовлетворительное качественное согласие. В конце приводятся результаты измеренных временных зависимостей напряженности продольного электрического поля и концентрации электронов при импульсном изменении разрядного тока. Рассматриваются некоторые переходные характеристики, из которых становятся ясным и процесс формирования различных параметров, их отклики и времена установления.*

**Ключевые слова:** импеданс спектроскопия, переходные процессы, разряд в гелии, прямая ионизация, амбиполярная диффузия.

**1. Введение**

Динамические свойства газоразрядной плазмы можно характеризовать импедансом, знание которого позволяет прогнозировать неустойчивости в разряде и методы их устранения, создавать системы стабилизации различных плазменных параметров [1,2]. Внешний вид импеданс спектров позволяет определить характер ионизации, гибели и времени жизни частиц, скоростей различных реакций [3-11], а также определить характерные размеры в системе [12]. На основе анализа импеданс спектров можно составить эквивалентную схему разряда, определить собственные реактивности и оценить устойчивость разряда, учитывая реактивности внешней цепи и самой плазмы.

Импеданс спектры могут быть определены экспериментально, путем измерений или рассчитаны исходя из элементарных процессов, происходящих в самом разряде. Вычисление импеданса разрядов среднего и высокого давления проводилось в ряде работ [3-6, 10, 11] с учетом множе-

ства элементарных процессов. Получены интересные, качественно отличающиеся кривые импеданса, дана физическая интерпретация выявленных особенностей. Оценена роль влияния отношения чисел прямых и ступенчатых ионизаций, дано объяснение сложной структуры кривых импеданса, связанных с инерцией теплопроводности нейтрального газа, ионизационной инерционностью прямых и ступенчатых процессов. Работы [7-10] посвящены исследованию динамических свойств разрядов в трубках малого диаметра, применяемых в газоразрядных лазерных трубках. Эти разряды интересны тем, что из-за малого диаметра разрядной трубки режим амбиполярной диффузии не успевает установиться, уход заряженных частиц на стенки осуществляется в режиме свободного падения, что в свою очередь приводит к уменьшению концентрации носителей тока. В результате этого увеличиваются напряженность продольного электрического поля и электронная температура, возрастает яркость спектральных линий. Таким образом, образуется плазма с повышенной электронной температурой, где отношение прямых и ступенчатых процессов отличается от традиционных разрядов в широких трубках. С увеличением разрядного тока осуществляется переход в режим амбиполярной диффузии, замедляются потери заряженных частиц на стенках, уменьшается продольное электрическое поле, вольтамперная характеристика принимает падающий характер. Для этих переходных условий получен ряд интересных экспериментальных и расчетных результатов.

Переходные характеристики содержат обширную информацию о процессах в разряде, в связи с чем они представляют значительный интерес при изучении различных типов разрядов в газоразрядной плазме, что является одной из важнейших задач которой уделяется большое внимание. При скачкообразном изменении, включении или выключении разрядного тока установление стационарных значений различных параметров плазмы происходит с различной скоростью [14-16]. Картина усложняется еще и тем, что в стационарном состоянии эти параметры связаны между собой определенными соотношениями. В условиях перехода часто установление одних параметров следует за другим, более медленным процессом. Например, в послесвечении газоразрядной плазмы низкого давления при выключении разрядного тока напряженность продольного электрического поля быстро уменьшается до нуля за времена порядка  $10^{-5}$  с, электронная температура падает до комнатной температуры и коэффициент диффузии уменьшается, характерное время установления концентрации увеличивается на два порядка, спад сильно замедляется.

В данной работе метод импеданс спектроскопии в сочетании с методом переходных характеристик и характерных времен применен к плазме положительного столба разряда в гелии в условиях прямой ионизации и амбиполярной диффузии. При расчете импеданс спектра использовалась система уравнений, состоящая из уравнения баланса электронов

с учетом прямой ионизации и амбиполярной диффузии, а также выражения электронного тока через разряд, при этом пренебрегалось ступенчатой ионизацией и объемной рекомбинацией. Рассчитан и измерен импеданс спектр для соответствующих условий и получено удовлетворительное качественное согласие. В конце приводятся результаты измеренных временных зависимостей напряженности продольного электрического поля и концентрации электронов. Рассматриваются некоторые переходные характеристики, из которых становятся ясным и процесс формирования различных параметров, их отклики и времена установления.

## 2. Метод импеданс спектроскопии в режиме прямой ионизации

Система уравнений, описывающая динамические свойства разряда в этом случае имеет вид:

$$\frac{dn}{dt} = N_0 \alpha_{0i} n - \frac{n}{\tau_a}, \quad (1)$$

$$j = nebE, \quad (2)$$

где  $n, N_0$  - концентрации электронов и атомов в нормальном состоянии;  $\alpha_{0i}$  - скорость прямой ионизации,  $\tau_a$  - время жизни электронов, определяемое амбиполярной диффузией,  $j$  - плотность разрядного тока,  $b$  - подвижность электронов,  $E$  - напряженность продольного электрического поля. При составлении системы уравнений использовалась двухуровневая модель атома.

Решение этой системы в линейном приближении методом малых возмущений относительно динамического сопротивления единицы длины ПС дает:

$$Z_1 = \frac{E_1}{j_1} = \frac{i\omega}{\omega_0 + i\omega} R_0. \quad (3)$$

Здесь введены обозначения  $\omega_0 = N_0 \frac{d\alpha_{0i}}{dE} E_0$ ,  $R_0 = \frac{E_0}{j_0}$ ,  $j_0$  и  $j_1$  постоянная составляющая и амплитуда возмущения плотности разрядного тока,

$E_1$  - комплексная амплитуда колебания продольного электрического поля.

Таблица 1

P, Тор	J <sub>b</sub> , мА	R <sub>0</sub> , Ом·см	E <sub>0</sub> , В/см	j <sub>0</sub> , А/см <sup>2</sup>	n <sub>e</sub> , см <sup>-3</sup>
0,06	50	3,8·10 <sup>2</sup>	2,7	7,08·10 <sup>-3</sup>	2,2·10 <sup>9</sup>

N <sub>0</sub> , см <sup>-3</sup>	N <sub>M</sub> , см <sup>-3</sup>	n <sub>e</sub> α <sub>0i</sub> N <sub>0</sub> , см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	n <sub>e</sub> α <sub>Mi</sub> N <sub>M</sub> , см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	τ <sub>a</sub> <sup>-1</sup> , с <sup>-1</sup>
1,9·10 <sup>15</sup>	1,5·10 <sup>9</sup>	3,77·10 <sup>14</sup>	6,6·10 <sup>12</sup>	2·10 <sup>5</sup>

Входящие в эти формулы величины приведены в таблице 1. Здесь N<sub>M</sub> –

заселенность триплетного метастабильного уровня,  $\alpha_{mi}$  – скорость реакции ступенчатой ионизации электронным ударом. Кривая динамического сопротивления (годограф), построенная по формуле (3), с использованием этих значений представлена на рисунке 1. Видно, что динамическое сопротивление имеет индуктивный характер. Годограф начинается с начала координат при  $\omega = 0$ , с ростом частоты увеличиваются активная и реактивная составляющие, при частотах порядка  $2\pi\tau_a^{-1}$  реактивная составляющая достигает своего максимального значения, затем спадает. Активная часть и модуль динамического сопротивления всюду монотонно возрастают. При предельно высоких частотах импеданс имеет активный характер и достигает значения, равного удельному сопротивлению столба.

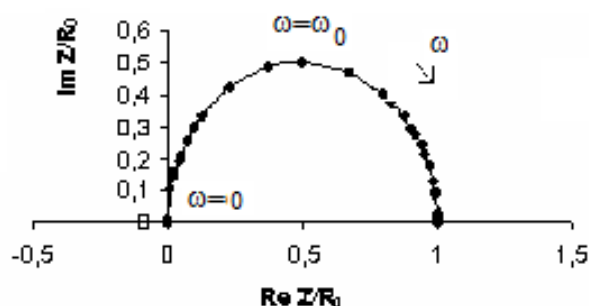


Рис. 1. Кривая динамического сопротивления (годограф), построенная по формуле (3).

Условия проведения измерений приведены в табл. 1. Эксперименты проводились в спектрально чистом гелии в разрядной трубке с внутренним диаметром  $d = 3$  см и длиной  $L = 60$  см, снабженной искусственно накаливаемым вольфрамовым катодом, никелевым анодом конической формы и рядом электрических зондов для измерения параметров плазмы. С целью исключения влияния стратовых колебаний сила разрядного тока и давление газа выбирались ниже границы существования страт.

Как видно из табл.1, прямая ионизация превышает ступенчатую ионизацию почти на два порядка. Ступенчатая ионизация с остальных двух квантовых уровней составляет не более 20% от числа ионизаций с триплетного метастабильного уровня. Измеренная для этого режима кривая импеданса представлена на рисунке 2. На диаграмме проставлены значения частоты модуляции в герцах. Кривая начинается с начала координат. По мере увеличения частоты активная и реактивная составляющие увеличиваются, причем последняя имеет индуктивный характер при всех частотах. Реактивная составляющая достигает своего максимального значения при частоте порядка  $10^4$  Гц, затем убывает. При высоких частотах реактивная составляющая с ростом частоты уменьшается и кривая импеданса стремится к действительному значению, близкому сопротивлению столба пост-

янного тока. Как следует из сопоставления расчетных и экспериментальных кривых импеданса, ход годографов качественно согласуется.

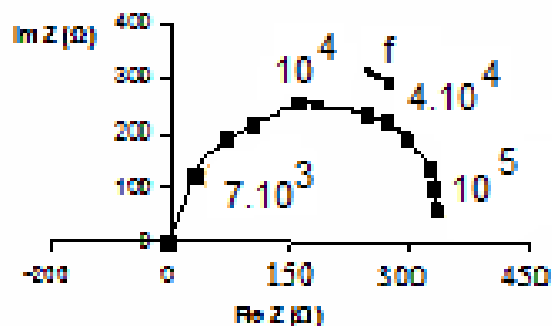


Рис. 2. Измеренная кривая динамического сопротивления (годограф).  
Прямая ионизация.

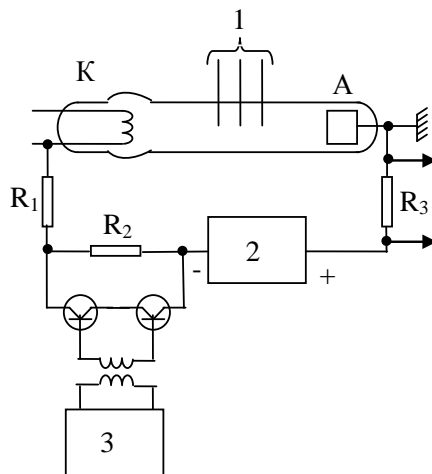
### 3. Установление электрического поля при импульсном изменении разрядного тока

Переходные характеристики и характер установления параметров в газоразрядной плазме низкого давления проводились в положительном столбе разряда в гелии. Разряд создавался в цилиндрической трубке с внутренним диаметром 3 см, длиной 70 см, снабженной накаливаемым катодом. Давление газа было  $P = 0,06$  Торр. Характерные значения плазменных параметров соответствовали величинам, приведённым в таблице 1.

Скачкообразное изменение разрядного тока осуществлялось с помощью схемы, изображенной на рис. 3. Для быстрого отключения разрядного тока применялся несколько видоизменённый вариант этой схемы. Временной ход разрядного тока наблюдался через сопротивление  $R = 50$  Ом, помещенное между заземленным анодом и источником. Невозмущенное значение анодного тока варьировалось от 50 до 300 мА. Изменение разрядного тока осуществлялось путем подачи импульса напряжения на ключевую схему на транзисторах. Частота повторения импульсов возбуждения была достаточно низкой (около 20 Гц), что обеспечивало исключение остаточных явлений от предыдущего импульса. Напряженность продольного электрического поля измерялась с помощью двух поперечно направленных цилиндрических зондов. Наблюдение изменения концентрации электронов осуществлялось по изменению ионного тока насыщения на зонд.

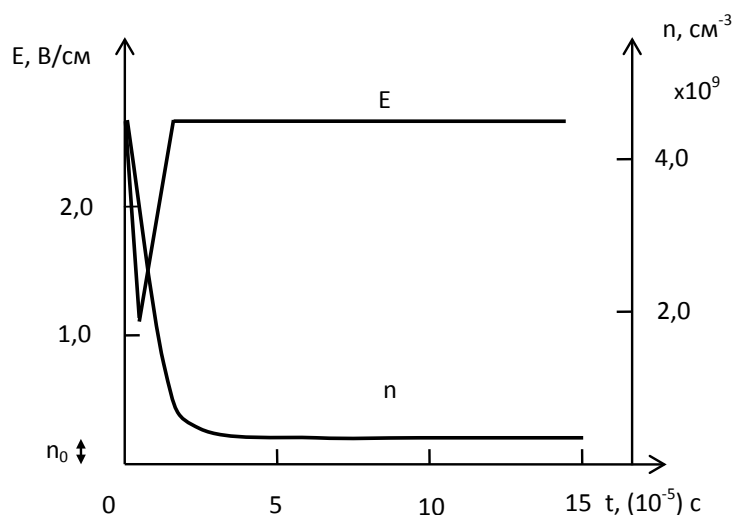
На рис.4 представлено изменение концентрации электронов  $n_e$  и продольного электрического поля  $E_z$  после десятикратного уменьшения разрядного тока. Фронт импульса изменения разрядного тока был меньше  $10^{-7}$  с. Видно, что после небольшого кратковременного всплеска  $E_z$  выходит на предыдущий уровень. Это связано с характером ВАХ разряда типа плато. Небольшое изменение  $E_z$  приводит к незначительному изменению времени амбиполярной диффузии. Поэтому концентрация электронов быстро устанавли-

вается на новом уровне, соответствующем новым значениям скорости ионизации и исчезновения заряженных частиц в результате амбиполярной диффу-



зии.

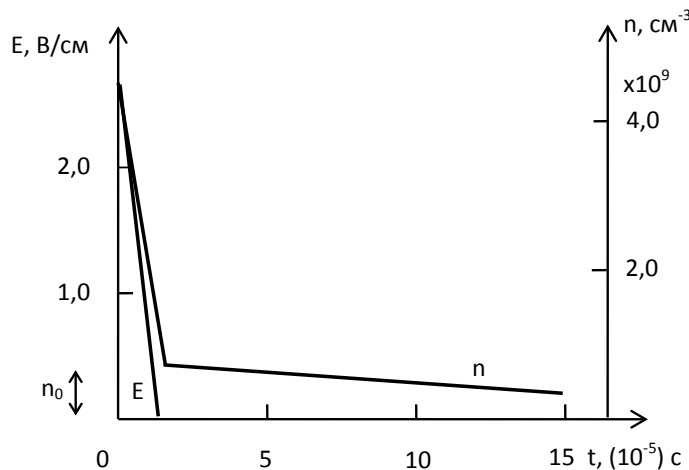
**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки. 1 – измерительные зонды, 2 – источник питания, 3 – генератор прямоугольных импульсов.



**Рис. 4.** Изменение концентрации электронов  $n_e$  и продольного электрического поля  $E_z$  при десятикратном импульсном уменьшении разрядного тока от 100 до 10 мА. Фронт импульса изменения разрядного тока был меньше  $10^{-7}$  с.

На рис.5 представлено изменение параметров плазмы после уменьшения разрядного тока до нуля. Напряженность электрического поля за время порядка  $10^{-5}$  с уменьшается до нуля. Синхронно с ней уменьшаются электронная температура  $T_e$  и коэффициент амбиполярной диффузии. Поэтому дальнейший спад концентрации происходит не с характерным временем порядка  $10^{-5}$  с, что соответствует коэффициенту амбиполярной

диффузии, соответствующему значению  $T_e$ , сформированному в ПС с током (порядка нескольких электрон-вольт), а с характерным временем соответствующим значению электронной температуры порядка комнатной



температуры.

**Рис. 5.** Изменение концентрации электронов  $n_e$  и продольного электрического поля  $E_z$  при уменьшении разрядного тока от 100 мА до нуля. Фронт импульса изменения разрядного тока был меньше  $10^{-7}$  с.

#### 4. Заключение

Метод импеданс спектроскопии в сочетании с методом переходных характеристик и характерных времен применен к плазме положительного столба разряда в гелии в условиях прямой ионизации и амбиполярной диффузии. Расчет импеданс спектра производился на основе системы уравнений, состоящей из уравнения баланса электронов с учетом прямой ионизации и амбиполярной диффузии, а также выражения электронного тока через разряд. При расчете импеданс спектра необходимо знание скоростей реакций прямых и ступенчатых возбуждений, ионизаций, а также значений их производных по напряженности электрического поля. Кроме того должны быть известны заселенности возбужденных уровней и скорости различных элементарных процессов с их участием, времена жизни и т. д. Эти данные были получены в работе [9], где проводилось комплексное исследование газоразрядной плазмы дугового разряда с искусственно накаливаемым катодом в гелии.

Полученные результаты показали, что метод импеданс спектроскопии и метод переходных характеристик достаточно хорошо дополняют друг друга и позволяют глубоко и всесторонне изучить динамические свойства газоразрядной плазмы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В. Л. Электрический ток в газе, ГИТТЛ, М.-Л., т.1, 1952, с.343-360.
2. Привалов В.Е. Квантовая Электроника, т.4, №10, 1977, с. 2085-2119.

3. Rutscher A., Deutsch H., Beitr. Plasmaphys, v.17, No2, 1977, p.89-102.
4. Deutsch H., Pfau S. Beitr. Plasmaphys, v.17, No3, 1977, p.145-153.
5. Дейч Г., Голубовский Ю.Б. Радиотехника и электроника, №6, 1978, с.1206-1211.
6. Wilke L., Kablan N., Deutsch H. Contribution to Plasma Phys., v. 30. No4. 1990, p.481 – 486.
7. Привалов В.Е. Радиотехника и Электроника, т. 25, № 3, 1980, с. 567-572.
8. Привалов В.Е., Шишов С.И. ЖТФ, т.39, № 7, 1989, с.204-208
9. Гусейнов Т.Х. Изв. НАН Азербайджана, т.24, Серия физ.-мат. № 2, 2004, с. 116 - 122.
10. Абдуллаев Р.А., Гусейнов Т.Х. Изв. вузов Радиоэлектроника, т.51, №4, 2008, с.38 – 49.
11. Sobhanian S., Khorram S., Muradov A. European Journ of Phys., Appl. Phys. v.30, No3, 2005, p.201-207.
12. Rui Shao, Kalinin S., Bonelli D.A., Applied Physics Letters, v.82, №12, 2003, p.1869.
13. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, М.: Наука, 2000.
14. Полянский М.Н., Скребов В.Н., Шухтин А.М. Оптика и Спектроскопия, т. 34, №2, 1973, с.221-225.
15. Ault S., Raether M., Sobhanian S., J. Appl. Phys. v.52, No9, 1981, p.5483.
16. Muradov A.H., Huseynov T.H., Safarov V.H., Allahverdiyev Sh.A. Proceedings, Intern. Conference "Technical and Physical Problems of Electric Engineering, Baku, 2014, p.388 – 390.

### **HELİUM QAZINDA BİRBAŞA İONLAŞMA ŞƏRAİTİNDƏ OLAN ELEKTRİK BOŞALMASININ İMPEDANS SPEKTROSKOPIYASI VƏ KEÇİD XARAKTERİSTİKASI**

**T.X.HÜSEYNOV**

#### **XÜLASƏ**

Helium qazında, birbaşa ionlaşma və ambipolyar diffuziya şəraitində olan elektrik boşalmasına impedans spektroskopiyası və keçid xarakteristikası üsulları birgə şəkildə tətbiq olunmuşdur. İmpedans spektri hesablanarkən elektronların balans tənliyindən və boşalmadan keçən cərəyan şiddətinin ifadəsindən ibarət tənliklər sistemindən istifadə edilmişdir. Hesablanmış və ölçülmüş impedans spektrləri keyfiyyətcə uyğunluq təşkil edirlər. Sonda boşalma cərəyanının impuls şəklində dəyişməsi zamanı uzununa elektrik sahəsinin intensivliyinin və elektron konsentrasiyasının zamana görə dəyişməsinin ölçülmüş asılılıqlarının nəticələri verilmişdir. Bəzi keçid xarakteristikalarına baxılmış və onların əsasında müxtəlif parametrlərin qararlaşıma müddətləri aydınlaşdırılmışdır.

**Açar sözlər:** impedans spektroskopiya, keçid prosesləri, heliumda elektrik boşalması, birbaşa ionlaşma, ambipolyar diffuziya.

### **THE IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND TRANSIENT CHARACTERISTICS OF HELIUM GAS DISCHARGE UNDER DIRECT IONIZATION CONDITIONS**

**T.Kh.HUSEYNOV**

#### **SUMMARY**

The method of impedance spectroscopy coupled with the method of transient characteristics and characteristic time scale are applied to the positive column plasma of a helium gas discharge under the direct ionization and ambipolar diffusion conditions. The system of equations containing the electron balance equation and the expression of electron current through the discharge is used for the calculation of impedance spectrum. Finally, there have been considered the results of the measured temporal dependences of the longitudinal electric field and electron number density when the discharge current abruptly changes. Relaxation times of different plasma parameters by considering the transient characteristics were detected.

**Key words:** impedance spectroscopy, transient processes, discharge in helium gas, direct ionization, ambipolar diffusion.

*Поступила в редакцию: 25.05.2015 г.  
Подписано к печати: 18.06.2015 г.*