

UOT 533.95**HELIUM PLAZMASININ SƏRBƏSTÇATMA REJİMİNDƏN
AMBİPOLYAR DİFFUZIYA REJİMİNƏ KEÇİDİN İMPEDANSI****T.X.HÜSEYNOV, Q.İ.QƏRİBOV,
V.H.SƏFƏROV, E.A.RƏSULOĞ***Bakı Dövlət Universiteti**htarlan@mail.ru, garibovgio@yahoo.com, eldarasul@gmail.com*

İşdə spektroskopiya üsulu ilə helium plazmasının sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçidinin impedansı tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, boşalma cərəyanının modullaşma tezliyinin 10 kHs-dən böyük qiymətində impedansın ölçülmüş və hesablanmış spektrlərinin gedişi praktiki olaraq eyni xarakterlidir. Cərəyanın modullaşmasının dərinlik əmsalı kifayət qədər kiçik olduqda həm təcrübi, həm də nəzəri əyriyədə maksimum müşahidə olunur, yəni impedansın modulu artır. Boşalma cərəyanının modullaşma dərinliyi artdıqda rezonans hadisəsi güclənir. Rezonansın bu qaydada dəyişməsinin səbəblərindən biri kimi cərəyanın modullaşma dərinliyinin artması ilə impedansın spektrində qeyri-xətti effektlərin təsirinin artmasını göstərmək olar.

Açar sözlər: qaz boşalması plazması, sərbəstçatma rejimi, ambipolyar rejim, impedans spektroskopiyası, qodoqraf, elektronun yaşama müddəti.

Müasir dövrdə plazmadan müxtəlif sahələrdə geniş istifadə edilir. Bu sahələrdən biri də təsirsiz qazların əlavə edilməsi ilə plazma dəstələrinin yaradılmasıdır. Belə dəstələrin köməyi ilə müxtəlif metal səthlərinin işlənməsi prosesi həyata keçirilir. Plazma dəstəsinə təsirsiz qaz əlavə etdikdə onun metal səthlərinə təsirinin effektivliyi yüksəlir. Bu məqsəd üçün helium təsirsiz qazından istifadə etdikdə plazma dəstəsinin gücü və intensivliyi bir qədər də yüksəlir. Helium təsirsiz qaz boşalması plazmasının spektroskopik və dinamik tədqiqatları bu sahədə öz töhvəsini verə bilər [1]. Odur ki, plazma dəstəsində heliumun spektral xətlərinin intensivliyini artırmaq üçün plazmanın praktikada mümkün olan müxtəlif mövcudluq hallarından daha effektiv rejimin seçilməsi vacib şərtlərdən biridir. Təqdim etdiyimiz bu iş də həmin problemə həsr edilmişdir. Helium plazmasının sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçid şəraitində impedans spektroskopiyaya üsulu ilə helium plazması öyrənilmiş və məlum olmuşdur ki, boşalma cərəyanının modullaşma dərinlik əmsalı kifayət qədər kiçik olduqda, aşağı tezliklər oblastında eksperimental

əyrilərdə maksimum müşahidə olunur və nəticədə, impedansın modulu artır.

Boşalma cərəyanının kiçik qiymətlərində, aşağı təzyiqli təsirsiz qaz boşalması plazmasında yüklü zərrəciklərin yaranmasının başlıca mexanizmini əsas səviyyədə elektron zərbəsi ilə atomların ionlaşması prosesi oynayır. Yüklü zərrəciklərin yox olmasında isə onların plazmanı hüdudlandıran qabın divarlarına sərbəst düşməsi və burada rekombinasiyası əsas rol oynayır. Yüklü zərrəciklərin bir qədər yüksək sıxlıqlarında boşalmada ambipolyar diffuziya rejimi formalaşır. Sərbəst zərrəciklərin radial istiqamətdəki hərəkəti yavaşdır, boşalmada elektronların orta yaşama müddəti böyüyür yüksəlir. Bu isə sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçidə uyğun gəlir və boşalmanın voltamper xarakteristikası (VAX) düşən xarakterli olur. Bizim fikrimizcə, boşalmada VAX-ın mənfi (enmə) faktorunun yaranmasına səbəb, plazma daxilində müsbət fəza yüklərinin miqdarının artması və borunun divarlarında mənfi yüklərin yığılmasıdır. Əks işarəli yüklərin ayrılması radial elektrik sahəsi yaradaraq, elektronların divar istiqamətindəki hərəkətini ləngidir və plazmanın keçiriciliyini artırır. Ona görə də sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçidin öyrənilməsi və bu şəraitdə plazmanın dinamik xassələrinin tədqiqi böyük maraq kəsb edir [2-5].

Biz problemi həll etmək üçün yüklü zərrəciklərin sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçidi halında boşalmanın müsbət sütununun vahid uzunluğuna düşən kompleks dinamik müqaviməti hesablayıb və alınan qiymətləri kompleks dinamik müqavimətin təcrübi nəticələrinin qiymətləri ilə müqayisə etmişik. Bu müqayisə zamanı hər iki nəticələrin uyğun gəlməsinə görə deyə bilərik ki, sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçid üçün təklif etdiyimiz izahat doğrudur.

Sərbəstçatma rejimindən ambipolyar diffuziya rejiminə keçidə uyğun olan qaz boşalması plazmasının parametrlərini elektronların balans tənliklər sistemindən tapmaq olar:

$$\frac{dn_e}{dt} = N_0 \alpha n_e - \frac{n_e}{\tau_a}, \quad (1)$$

$$j = g n_e e b_e E. \quad (2)$$

Burada n_e , b_e – elektronların konsentrasiyası və yürüklüyü, N_0 – neytral atomların konsentrasiyası, α – birbaşa ionlaşma reaksiyasının sürətini xarakterizə edən əmsal, τ_a – elektronların ambipolyar diffuziya yaşama müddəti, j – boşalma cərəyanının sıxlığı, E – aksial elektrik sahəsinin intensivliyi, g – yüklü zərrəciklərin radial paylanması nəzərə alan faktordur.

Adətən boşalmada elektronun ambipolyar diffuziya rejimində yaşama müddətinin τ_a – sabit olduğu hesab edilir və o, aşağıdakı ifadə ilə təyin olunur:

$$\tau_a = \frac{1}{\mu^2 D_a}. \quad (3)$$

Burada $\mu = \frac{2,405}{r_0}$, D_a – ambipolyar diffuziya əmsalı olub, $D_a = b_i \left(\frac{kT_e}{e} + \frac{kT_i}{e} \right) \approx b_i \frac{kT_e}{e}$ ifadəsi ilə təyin edilir. Boşalma cərəyanının qiyməti artdıqca, ke-

çid oblastında radial elektrik sahəsi, elektronların yaşama müddəti və konsentrisiyası artır, elektronların temperaturu yüksəlir, diffuziya əmsalı isə kiçilir. Ona görə də elektronun orta yaşama müddətini:

$$\tau = \frac{\tau_a}{1 + \gamma \frac{kT_e}{ne}} \quad (4)$$

ifadəsi ilə təyin etmək olar. Burada $\gamma = \frac{\varepsilon_0}{e\Lambda^2}$, ε_0 – elektrik sabitidir.

(1 – 2) tənliklər sistemində (3) ifadəsini nəzərə alsaq, dinamik volt-ampere xarakteristikanın aşağıdakı şəkildəki ifadəsini alırıq:

$$\frac{1}{J} \frac{dJ}{dt} - \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = N_0 \alpha n - \frac{1 + \beta \frac{U^2}{J}}{\tau_a}. \quad (5)$$

Burada $\beta = \frac{bg}{L}$, $g = \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha PL}}$, λ – elektronların sərbəst qaçış yolunun uzunluğu, α – orta istilikötürülmə əmsalındır.

(5) diferensial tənliyini xəttləşdirsək, alırıq:

$$\frac{1}{J_0} \frac{dJ_1}{dt} - \frac{J_1}{A} = \frac{1}{U_0} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{B}. \quad (6)$$

(6) ifadəsində:

$$\frac{1}{A} = \frac{\mu_0 \beta U_0^3}{J_0^2}, \frac{1}{B} = \frac{\mu_0 U_i}{g U_0} - \frac{\mu_0 \beta U_0^2}{J_0} \left(4 + \frac{U_i}{g U_0} \right), \mu_0 = \frac{b e g}{\Lambda^2}.$$

İşarələmələrini nəzərə alsaq, onda boşalmanın harmonik həyəcanlanması halında, müsbət sütunun vahid uzunluğuna düşən impedansı üçün alırıq:

$$Z = \frac{U_1}{J_1} = R + jX. \quad (7)$$

Burada

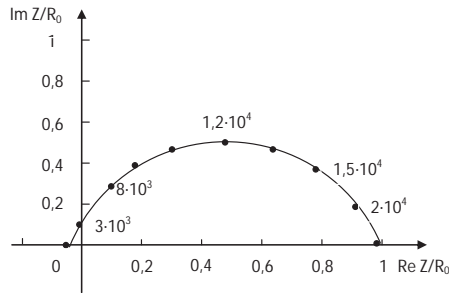
$$R = \frac{\frac{\omega^2}{J_0 U_0} - \frac{1}{J_1 U_1}}{\frac{1}{U_1^2} + \frac{\omega^2}{U_0^2}}, X = \frac{\omega \left(\frac{1}{J_0 U_0} + \frac{1}{J_1 U_0} \right)}{\frac{1}{U_1^2} + \frac{\omega^2}{U_0^2}}. \quad (8)$$

Helium qazı boşalması üçün impedans spektrinin hesablanmış nəticələri şəkil 1-də göstərilmişdir. Burada impedansın ayrılarında kiloherslərlə harmonik həyəcanlanma tezliyinin qiymətləri verilmişdir. Şəkildən görünür ki, aşağı tezliklər oblastında impedansın həqiqi hissəsi mənfi qiymətə malikdir, yəni boşalma neqatron xassəlidir.

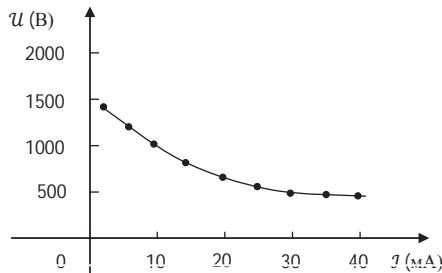
Helium qazının $p = 1$ Tor təzyiqində boşalmanın ölçülmüş statik VAX-ı şəkil 2-də göstərilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi, cərəyan artdıqca, boşalmanın gərginlik düşgüsü azalır. Boşalma cərəyanının 30 mA-dan böyük qiymətlərində xarakteristikanın düşmə sürəti yavaşır. Bu nəticə ambipolyar sahənin formalaşmasını və normal səyriyə boşalmaya keçidin baş verdiyini göstərir.

İmpedans xarakteristikalarını ölçmək məqsədi ilə statik VAX-da boşalma cərəyanının $J_b = 20$ mA qiymətinə uyğun işçi nöqtə seçmişik. İmpedans spektri [2]-də təsvir edilən qurğuda ölçülmüşdür. Bu qurğuda harmonik rəqslər generatorundan elektrik dövrəsinə daxil olan modullaşmış siqnal bölüşdürücü kondensatorlardan keçməklə, boşalma dövrəsində yerləşdirilmiş və qiyməti 50 Om

olan müqavimətə verilir. Boşalma cərəyanının modullaşma dərinliyi 5-10% tərtibində götürülmüş, modullaşma tezliyinin yuxarı həddi 100 kHs olmuş, boşalma cərəyanının effektiv modullaşması isə praktiki olaraq, tezliyin $2 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^4$ Hs qiymətlərində müşahidə edilmişdir. Helium qaz boşalması plazması impedansının təcrübi yolla ölçülmüş qiymətləri gərginliyin və cərəyanın dəyişən toplananlarının nisbətindən, onlar arasındakı fazalar fərqi nəzərə almaqla, təyin etmişik.



Şək. 1. Helium qazı boşalması üçün hesablanmış impedans əyrisi. Əyrinin üstündəki tezliklər kHs-lə verilmişdir.

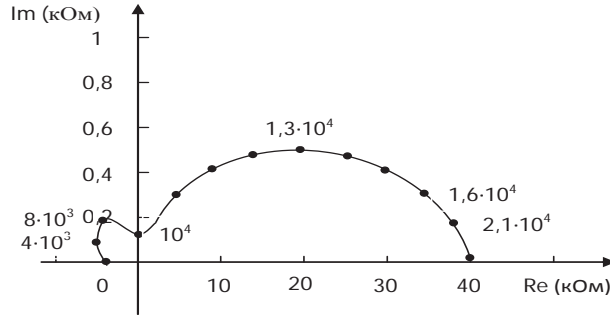


Şək. 2. Boşalmanın statik volt-ampere xarakteristikası. He, P = 1 Tor.

Boşalmanın impedansının təcrübi ölçülmələrindən alınmış nəticələri şəkil 3-də təsvir olunmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, modullaşma tezliyinin 10 kHs qiymətindən nisbətən böyük tezliklərdə ölçülmüş və hesablanmış impedans spektrləri praktiki olaraq eyni xarakterlidir (şəkil 1 və 3). Boşalma cərəyanının modullaşma dərinliyi kifayət qədər kiçik olduqda, aşağı tezliklər oblastında eksperimental əyriyə maksimum müşahidə olunur və nəticədə, impedansın modulu artır. Helium qaz boşalmasında boşalma cərəyanının modullaşma dərinlik əmsalı artdıqda isə rezonans hadisəsi daha da yüksəlir. Qaz boşalmasında rezonans hadisəsinin bu cür dəyişməsinin səbəblərindən biri impedans spektrində qeyri-xətti effektlərin təsirinin artmasıdır.

İmpedans spektrlərinin hesablanmış nəticələrini ölçülmüş impedans əyri-ləri ilə (qodoqraflarla) müqayisə etdikdə, onların keyfiyyətə bir-biri ilə uyğun gəldiyini görürük.

Dinamik müqavimətin təcrübi ölçmələri cədvəl 1-də verilmiş boşalma şəraitində aparılmışdır. Təcrübə spektral təmiz helium qazı boşalmasında aparılmışdır. Boşalma borusunun daxili diametri $d = 3$ sm və uzunluğu $L = 60$ sm götürülmüşdür. Slindrik boruda süni yolla közərdilən volfram katod, nikel anod və plazma parametrlərini ölçmək üçün zondlar yerləşdirilmişdir. Strat rəqslərini kənarlaşdırmaq məqsədilə boşalma cərəyanı və qazın təzyiqi strat rəqslərinin mövcudluq sərhədindən kənar oblastlarda seçilmişdir.



Şək. 3. Helium qazı boşalmasında ölçülmüş impedans əyrisi. $P = 1$ Tor, $J_b = 20$. mA. Əyrinin üstündəki tezliklər kHs-lə verilmişdir.

Cədvəl 1

Birbaşa ionlaşma rejimində helium qazı boşalmasının şərtləri

p , Tor	J_b , mA	R_0 , Om·sm	E_0 , B/sm	j_0 , A/sm ²	n_e , sm ⁻³
1	20	$3,6 \cdot 10^2$	2,5	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^9$
N_{m_3} , sm ⁻³	$n_e \alpha_{oi} N_0$, sm ⁻³ ·san ⁻¹	$n_e \alpha_{mi} N_m$, sm ⁻³ ·san ⁻¹	τ_a^{-1} , san ⁻¹	$N_{0,3}$, sm ⁻³	-
$1,45 \cdot 10^9$	$3,73 \cdot 10^{14}$	$6,46 \cdot 10^{12}$	$1,95 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^{15}$	-

Cədvəl 1-dən görüldüyü kimi, birbaşa ionlaşmalar ($3,73 \cdot 10^{14}$) pilləli ionlaşmalardan ($6,46 \cdot 10^{12}$) təqribən iki tərtib böyükdür. Pilləli ionlaşmaların sayı digər iki triplet metastabil kvant səviyyələrdən ionlaşmaların sayının 20%-ni təşkil edir. Bu rejimdə ölçülmüş impedans əyrisi şəkil 3-də göstərilmişdir. Diaqramda modullaşma tezliyinin qiymətləri Hs-lərlə verilib. Şəkildən görüldüyü kimi əyri mənfi qiymətdən başlanır. Tezlik artdıqca, impedansın aktiv və reaktiv toplananları artır, həmçinin reaktiv toplanan bütün tezlik qiymətlərində induktiv xarakter daşıyır. İmpedansın reaktiv toplananı tezliyin 10^4 kHs qiymətində ordinat oxunu kəsir, yenidən artaraq maksimuma çatır və sonra azalır. Nisbətən böyük tezliklərdə impedansın reaktiv toplananı tezlik artdıqca, azalır və impedans əyrisi sabit boşalma cərəyananlı müsbət sütunun müqavimətinə bərabər olan həqiqi qiymətini alır.

ӘДӘБИҮАТ

1. J. Michael Johnson et.al. Extending the volume of atmospheric pressure plasma jets through the use of additional helium gas streams//Plasma Sources Sci.Technol. 2020, 29015006.
2. Т.Х.Гусейнов Импеданс спектроскопия в плазме дугового разряда при средних давлениях // Ученые записки, Баку, 2017, № 1, с. 73–79.
3. А.Х.Мурадов, Т.Х.Гусейнов Об импедансе разряда в неоне в конической трубке // Радиотехника и электроника, Россия, 2011, т.56, № 5, с. 641–645.
4. E.V.Easton, P.G.Pickner An electrochemical impedance spectroscopy study of fuel cell electrodes // Electro-chim. Acta., in Russian, 2005, v. 50, p. 2469–2474.
5. С.В.Дудин, А.В.Зыков, В.И.Вареник Диагностика плазменных технологических систем / Украина: Миллениум, 2009, 32 с.

ИМПЕДАНС ПЕРЕХОДА ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ ИЗ РЕЖИМА СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ В РЕЖИМ АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ

Т.Х.ГУСЕЙНОВ, Г.И.ГАРИБОВ, В.Г.САФАРОВ, Э.А.РАСУЛОВ

РЕЗЮМЕ

В работе спектроскопическим методом исследован импеданс перехода плазмы гелия из режима свободного падения в режим амбиполярной диффузии. Выявлено, что при частоте модуляции разрядного тока выше 10 кГц ход измеренного и вычисленного спектров импеданса имеет практически одинаковый характер. При достаточно малых значениях коэффициента глубины модуляции тока, как на экспериментальной, так и на теоретической кривой наблюдается максимум, т.е. модуль импеданса растет. При увеличении глубины модуляции разрядного тока резонанс усиливается. В качестве одной из причин такого изменения резонанса можно указать усиление влияния нелинейных эффектов в спектре импеданса с ростом глубины модуляции тока.

Ключевые слова: плазма газового разряда, режим свободного падения, амбиполярный режим, импеданс спектроскопия, годограф, время жизни электрона.

TRANSITION IMPEDANCE OF HELIUM PLASMA FROM THE FREE FALL REGIME TO THE AMBIPOLAR DIFFUSION REGIME

T.Kh.GUSEINOV, G.I.GARIBOV, V.G.SAFAROV, E.A.RASULOV

SUMMARY

In this work, the transition impedance of helium plasma from the free fall regime to the ambipolar diffusion regime was investigated by the spectroscopic method. It was found that at a discharge current modulation frequency above 10 kHz, the behavior of the measured and calculated impedance spectra is practically the same. At sufficiently small values of the current modulation depth coefficient, a maximum is observed both on the experimental and theoretical curves, that is, the impedance modulus increases. As the depth of modulation of the discharge current increases, the resonance increases. As one of the reasons for such a change in the resonance, one can indicate the enhancement of the influence of nonlinear effects in the impedance spectrum with an increase in the depth of current modulation.

Keywords: gas discharge plasma, free fall regime, ambipolar regime, impedance spectroscopy, hodograph, electron lifetime.