

УДК 537.525:621.325

І.В. МЕЛЬНИК

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
факультет электроники, кафедра электронных приборов и устройств**ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ТРИОДНЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ИХ ПОДВИЖНОСТИ В АНОДНОЙ ПЛАЗМЕ**

В статье приведены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать время увеличения тока высоковольтного тлеющего разряда при подаче управляющих импульсов на кольцевую электрод с учетом изменения температуры и подвижности ионов в анодной плазме. Результаты моделирования показали, что при увеличении управляющего напряжения до 100 – 300 В и при давлении 0,2 – 0,7 Па время увеличения тока разряда составляет десятки – сотни микросекунд, что вполне приемлемо для большинства процессов современных электронно-лучевых технологий.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд, анодная плазма, импульсный режим, температура электронов, подвижность электронов, время увеличения тока разряда.

І.В. МЕЛЬНИК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв**ОЦІНКА ЧАСУ ЗБІЛЬШЕННЯ СТРУМУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЩОГО РОЗРЯДУ В ТРИОДНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕЛЕКТРОНІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ЇХ РУХОМОСТІ В АНОДНІЙ ПЛАЗМІ**

У статті наведені аналітичні співвідношення, які дозволяють розрахувати час збільшення струму високовольтного тліючого розряду у разі подавання керувальних імпульсів на кільцевий електрод з урахуванням зміни температури та рухомості іонів в анодній плазмі. Результати моделювання показали, що за умови збільшення керувальної напруги до 100 – 300 В, якщо тиск становить 0,2 – 0,7 Па, час збільшення струму розряду складає десятки – сотні мікросекунд, що є цілком прийнятним для більшості процесів сучасних електронно-променевої технологій.

Ключові слова: високовольтний тліючий розряд, анодна плазма, імпульсний режим, температура електронів, рухомість електронів, час збільшення струму розряду.

I.V. MELNYK

National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnical Institute"
Faculty of Electronic, Electronic Devices Department**ESTIMATION OF THE RISING TIME OF HIGH VOLTAGE GLOW DISCHARGE CURRENT IN TRIODE ELECTRON SOURCES WITH TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF TEMPERATURE OF ELECTRONS AND ITS MOBILITY IN ANODE PLASMA**

The analytical relations, which allow calculating the time of rising of high voltage glow discharge current with applying the control impulses to ring-like electrode and with taking into account the temperature and mobility of electrons in anode plasma, are considered in the article. The results of simulation shown, that in the case of increasing of control voltage up to 100 – 300 V for pressure 0,2 – 0,7 Pa the time of discharge current rising is in the range tens – hundreds microsecond, that is generally acceptable to the most processes of modern electron-beam technologies.

Keywords: high voltage glow discharge, anode plasma, impulse regime, temperature of electrons, mobility of electrons, time of discharge current rising.

Введение

Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая электронную промышленность, приборостроение, машиностроение и металлургию. Эти перспективные источники электронов эффективно используются для электронно-лучевой сварки, пайки и отжига малогабаритных изделий, для нанесения плёнок и покрытий сложного химического состава в низком и среднем вакууме в контролируемой газовой среде путём активированного электронно-лучевого термического испарения, а также для вакуумного переплава тугоплавких металлов с целью их очистки [1 - 4]. В последнее время в сферах применения электронно-лучевых технологий значительно возрос интерес к использованию интенсивных импульсных электронных пучков, поскольку импульсное тепловое воздействие позволяет значительно расширить круг выполняемых технологических операций и получать монолитные и плёночные материалы с уникальными свойствами [5]. Известно, что импульсный режим работы источников электронов ВТР можно обеспечить путём зажигания и гашения

низковольтного вспомогательного разряда в камере источника [6, 7], однако для практического использования генераторов мощных импульсных электронных пучков в промышленных технологиях важным является обеспечение малого времени увеличения и уменьшения мощности пучка [5]. Как было показано в предыдущих исследованиях [8], для импульсных источников электронов ВТР время изменения мощности формируемого пучка тесно связано с процессами взаимодействия заряженных частиц, протекающими в разрядной анодной плазме, однако все оценки времени зажигания разряда проводились только с использованием аппроксимационных соотношений на основе экспериментальных данных.

Постановка задачи

Обобщенная конструктивная схема импульсного триодного источника электронов ВТР с обозначенными геометрическими и электрическими параметрами модели источника приведена на рис. 1. Основными геометрическими параметрами моделируемой импульсной системы являются: длина разрядного промежутка l , продольная длина анодной плазмы $d_{п1}$, расстояние от границы плазмы до поверхности катода $d_{кп1}$, поперечный размер разрядного промежутка $d_{поп}$ и поперечный размер катода r_k . Основными электрическими параметрами рассматриваемой модели разрядного промежутка являются ускоряющее напряжение $U_{уск}$, а также значение управляющего напряжения в импульсе $U_{п1}$ и в паузе между импульсами $U_{п0}$. Важным внутренним параметром моделируемой системы является приведенное давление p_{a0} . Приведенные на рис. 1 значения $d_{п1}$ и $d_{кп1}$ соответствуют положению границы анодной плазмы в импульсе, а значения $d_{п0}$ и $d_{кп0}$ – её положению в паузе между импульсами управляющего напряжения.

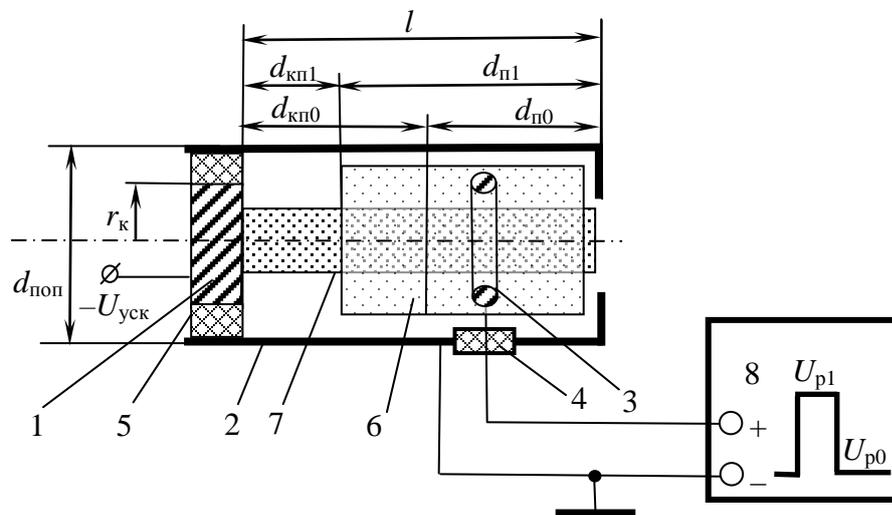


Рис. 1 Схема моделируемого триодного источника электронов ВТР с подключенной цепью управления током разряда [8].

1 – катод; 2 – анод ВТР; 3 – кольцевой электрод для зажигания вспомогательного разряда; 4 – низковольтный изолятор; 5 – высоковольтный изолятор; 6 – анодная плазма; 7 – электронный пучок; 8 – низковольтный источник импульсного напряжения.

В работе [8] было показано, что среднее время увеличения тока разряда при подаче управляющего импульса на кольцевой вспомогательный электрод 3 можно приближенно оценить из соотношений:

$$G = \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{п1}}\right) \left[\gamma \left[\exp(\beta_i U_{уск}) - 1 \right] - 1 \right], \quad \bar{t}_3 = \frac{9kT_e(d_{п1} - d_{п0})}{8(\pi e)^3 \mu_{e0} \gamma G \ln\left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e(\epsilon \Delta U)^3}{\pi p_{a0}}}\right)}, \quad (1)$$

где γ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии для выбранного материала катода, β_i – коэффициент ионизации газа, T_e – температура электронов в анодной плазме с учетом её нагрева электронным пучком и влияния вспомогательного разряда, μ_{e0} – подвижность электронов плазмы.

При проведении расчетов с использованием соотношения (1) использовались оценки положения анодной плазмы относительно катода $d_{кп}$, полученные в работах [6, 7], однако значения T_e и μ_{e0} определялись приближенно по току вспомогательного разряда I_p с использованием справочных данных из [9, 10].

Целью данной работы является получение уточнённых значений среднего времени зажигания разряда \bar{t}_3 с учетом зависимости температуры электронов и их подвижности в анодной плазме от параметров горения ВТР и низковольтного вспомогательного разряда.

Оценка положения границы анодной плазмы и тока высоковольтного тлеющего разряда

Расчет положения границы анодной плазмы можно провести исходя из уравнения баланса ионов в ней с учетом ионизации газа быстрыми электронами пучка и медленными, отраженными от анода электронами. При этом необходимо учесть диффузию ионов из плазмы на анод ВТР, а также влияние вспомогательного разряда. Тогда, принимая во внимание условие самостоятельности горения ВТР [6 – 8], можно записать следующую систему уравнений для определения расстояния от границы плазмы до катода $d_{кп}$ [6, 7]:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= A_i U_{уск}^{-a_i} (A_i U_{уск}^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}}; \quad R_2 = f \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e; \quad R_4 = \mu_{e0} (kT_e + eU_p) \left(\frac{\pi}{p_{a0}}\right)^2 \left(1 + \frac{\gamma d_{поп}}{\lambda_e}\right); \\
 R_3 &= 3(kT_e + eU_p) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}} \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p}\right); \quad R_5 = R_1 R_2 p_{a0} Q_{ep0}; \quad C_y = -\frac{R_1 + R_3 + R_1 R_2}{R_5}, \\
 D_y &= \frac{R_4}{R_5}, \quad p = -\frac{C_y^2}{3}, \quad q = \frac{2C_y^3}{27} + D_y, \quad D_{yp} = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2; \quad u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D_{yp}}}; \\
 v &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D_{yp}}}; \quad y = u + v; \quad d_{п} = y - \frac{C_y}{3}; \quad \lambda_e = \frac{9kT_e (eU_p + kT_e)^2}{4\pi e^4 p_{a0} \ln\left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_p + kT_e)^3}{\pi p_{a0}}}\right)}; \quad d_{кп} = l - d_{п},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $j_{ек}$ – плотность тока электронов на поверхности катода, η_i и η_U – коэффициенты отражения электронов от анода ВТР по току и по энергии соответственно, k_e – коэффициент удлинения траекторий электронов, f – коэффициент прозрачности анода ВТР, Q_{ep0} – сечение рассеяния электронов на ионах остаточного газа, λ_e – длина свободного пробега электронов, γ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности анода ВТР, n_e – концентрация электронов в плазме, U_i – потенциал ионизации газа, N_0 – постоянная Лосмидта, α_i – полуэмпирическая постоянная, являющаяся константой для данного газа, A_i , a_i – полуэмпирические коэффициенты, где C_y , D_y – коэффициенты решаемого уравнения, D_{yp} – дискриминант уравнения, а p , q , u , v и y – вспомогательные переменные [6, 7].

Зная поперечный размер анодной плазмы $d_{п}$, концентрацию ионов в ней и ток ВТР можно определить из соотношений [6, 7]:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_{п} p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d_{поп}}{\lambda}\right) - 3N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_p)}{2\pi m_e}}, \quad S_2 = 1 + \eta_i \eta_U^{-a_i} (1 - f(1 - d_{п} p_{a0} Q_{ep0})), \\
 n_i &= \frac{A_i U_{уск}^{-a_i} (1 + A_i U_{уск}^{-a_i}) S_2}{S_1 (kT_e + eU_p) \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p}\right)}, \quad I_p = r_k^2 n_i (1 + A_i U_{уск}^{-a_i}) \sqrt{\frac{\pi e d_{п} (kT_e + eU_p)}{2m_e}},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где S_1 и S_2 – вспомогательные переменные, n_i – концентрация ионов, I_p – ток ВТР.

Вычисленные из соотношений (2, 3) значения тока разряда и положения анодной плазмы для сильноточного и слаботочного режимов горения разряда могут быть непосредственно подставлены в выражение (1), а метод расчета температуры электронов в плазме и их подвижности будет рассмотрен в следующем разделе статьи.

Оценка температуры электронов в анодной плазме и их подвижности

Температура электронов в анодной плазме определяется из соотношения [9 – 11]:

$$T_e = \frac{eU_p}{2k} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\pi e^2 m_i}{6m_e} \left(\frac{U_{уск} d_{кп}}{p_{a0} Q_{ea}}\right)^2} \right], \tag{4}$$

где m_i – масса ионов газа, k – постоянная Больцмана.

Частота столкновений электронов с атомами остаточного газа ν_e для физических условий горения ВТР может быть оценена из соотношения [10, 11]:

$$v_e = \frac{U_{\text{уск}} d_{\text{кп}}}{\sqrt{\frac{3U_p m_e^2}{em_i} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\pi e^2 m_i}{6m_e} \left(\frac{U_{\text{уск}} d_{\text{кп}}}{p_{a0} Q_{ea}} \right)^2} \right] - 1 \right)}} \quad (5)$$

При известной температуре электронов и частоте столкновения их с атомами остаточного газа, которые определяются из соотношений (4, 5), для функции распределения Максвелла можно записать следующее аналитическое выражение для подвижности электронов [9 – 11]:

$$\mu_e = \frac{e \int_0^\infty v_e^4 \exp\left(-\frac{m_e v_e^2}{2kT_e}\right) dv_e}{3v_e m_e \int_0^\infty v_e^2 \exp\left(-\frac{m_e v_e^2}{2kT_e}\right) dv_e} = \frac{eK_{\text{пп}}}{3v_e m_e} \quad (6)$$

где коэффициент $K_{\text{пп}}$ описывает процесс термодинамического взаимодействия формируемого электронного пучка с анодной плазмой и, в соответствии с (6), определяется из соотношения:

$$K_{\text{пп}} = \frac{\int_0^\infty v_e^4 \exp\left(-\frac{m_e v_e^2}{2kT_e}\right) dv_e}{\int_0^\infty v_e^2 \exp\left(-\frac{m_e v_e^2}{2kT_e}\right) dv_e} \quad (7)$$

Численное решение уравнения (7) проводилось с использованием метода квадратур Симпсона, границы интегрирования по скорости определялись из соотношений

$$v_e^{\text{min}} = 0,1 \sqrt{\frac{2eU_{\text{упр.}}}{m_e}} \approx 10^5; \quad v_e^{\text{max}} = 0,2 \sqrt{\frac{2eU_{\text{уск.}}}{m_e}} \approx 10^7. \quad (8)$$

Результаты моделирования и их анализ

Результаты расчета времени увеличения тока разряда, проведенного с использованием соотношений (4 – 8), приведены на рис. 2. Для сравнения на рис. 2 приведены аналогичные результаты, полученные в работе [8] с использованием экспериментальных и литературных данных [9, 10]. Из приведенных данных видно, что расхождение между полученными результатами не превышает 10%, а точность расчета выше при использовании соотношений (4 – 8), поскольку в работе [8] расчеты проводились для усредненного значения температуры электронов и их подвижности в анодной плазме. Все расчеты проводились для следующих значений геометрических и внутренних параметров модели [8]: $I = 7 \text{ см}$, $d_{\text{поп}} = 7 \text{ см}$, $r_k = 5 \text{ см}$, $U_i = 18 \text{ В}$, $a_j = 0,343$, $\gamma = 4,6$, $Q_{ep0} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2}$, $\alpha_j = 1,452$, $\eta_j = 0,7$, $\eta_U = 0,95$, $f = 0,99$, $A_j = 3,8 \cdot 10^{-6}$, $\beta_j = 2,8 \cdot 10^{-4}$. При подаче управляющих импульсов ток ВТР увеличивается от единиц мА до 1–1,5 А.

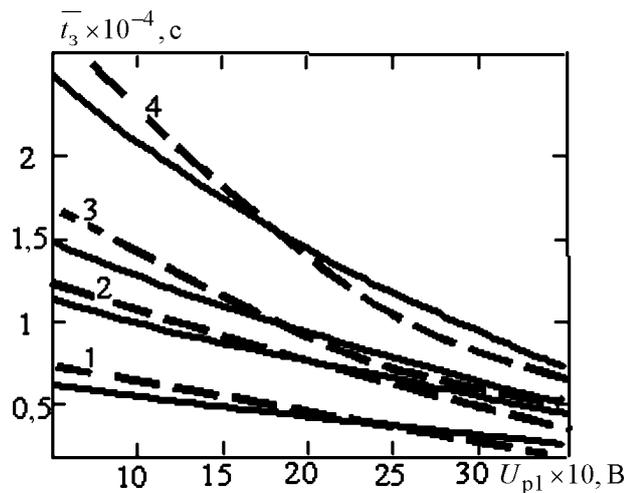


Рис. 2 Рассчитанные зависимости среднего времени увеличения тока ВТР от максимального напряжения управляющего импульса U_{p1} и от давления в разрядном промежутке. Сплошные линии – результаты, полученные без учета зависимостей (4–7) по литературным данным [8], пунктирные линии – результаты, полученные с учетом зависимостей (4–7).
1 – 0,7 Па; 2 – 0,4 Па; 3 – 0,3 Па; 4 – 0,2 Па. $U_{\text{уск}} = 15 \text{ кВ}$; $U_{p0} = 5 \text{ В}$.

Из данных моделирования, приведенных на рис. 2, видно, что минимальные значения среднего времени увеличения тока ВТР соответствуют высоким значениям напряжения в импульсе и давления в разрядном промежутке. Это обусловлено тем, что для физических условий горения ВТР ионизационные процессы в разряде преобладают над диффузионными.

Выводы

Из полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что для физических условий горения ВТР при изменении управляющего напряжения в импульсе от минимального значения $U_{p0} = 5$ В до максимального значения $U_{p1} = 100 - 300$ В среднее время увеличения тока разряда составляет порядка десятков – сотен микросекунд. Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, соответствуют измеренным экспериментальным данным с точностью до 25 – 30%. Такие малые времена регулирования являются вполне приемлемыми для большинства процессов современных электронно-лучевых технологий [8], что свидетельствует о перспективности дальнейших работ по разработке импульсных источников электронов ВТР и их внедрению в промышленное производство. Полученные результаты представляют большой практический интерес для разработчиков электронно-лучевого технологического оборудования.

Список использованной литературы

1. Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б. и др. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. – Киев: «Сталь», 2007. – 605 с.
2. Grechanyuk M.I., Melnyk A.G., Grechanyuk I.M. et al. Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials. // *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*. – 2014. — Vol. 49, № 5-6. – P. 115–121.
3. Feinaeugle P., Mattausch G., Schmidt S., Roegner F.H. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD. // *Society of Vacuum Coaters. 54-th Annual Technical Conf. Proc., Chicago, 2011.* – P. 202–209.
4. Mattausch G., Scheffel B., Zywitzki O. et al. Technologies and tools for the plasma-activated EB high-rate deposition of Zirconia. // *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*. – 2012. – Vol. 47, № 5-6. – P. 152–158.
5. Grechanyuk N., Kucherenko P., Grechanyuk I., Shpack P. Modern technologies and equipment for obtaining of new materials and coatings // *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*. – 2006. – Vol. 41, № 5-6. – P. 122–128.
6. Мельник И.В., Тугай С.Б. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда. // *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника.* – 2012.— Том 55, № 11. – С. 50—59.
7. Мельник И.В. Обобщенная методика моделирования триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Электронное моделирование.* – 2013. – Том 35, № 4. – С. 93-107.
8. Мельник И.В. Оценка времени увеличения тока высоковольтного тлеющего разряда в триодной электродной системе при подаче управляющих импульсов. // *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника.* – 2013.— Том 56, № 12.— С. 51—61.
9. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. Том 1. Общие вопросы электродинамики газов. – М.–Л.: Гос. изд. технико-теоретич. литературы, 1952. – 432 с.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
11. Велихов Е.П., Ковалев В.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. – М.: Наука, 1987. – 160 с.