



УДК 537.525:621.325

И.В. Мельник, д-р техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37, корпус 12, 2203,
тел. (044) 4068292, (044) 4549505, e-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

Оценка энергетической эффективности импульсных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с учетом электродных процессов и параметров анодной плазмы

Предложена методика моделирования энергетической эффективности импульсных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. Методика основана на комплексном анализе физических процессов, протекающих в области катодного падения потенциала и в области анодной плазмы высоковольтного разряда. В результате моделирования установлено, что энергетическая эффективность газоразрядных импульсных источников электронов зависит от параметров горения вспомогательного разряда и от скажности управляющих импульсов. При соответствующих параметрах вспомогательного разряда эффективность может превышать 90%.

Запропоновано методику моделювання енергетичної ефективності імпульсних джерел електронів високовольтного тліючого розряду. Методика базована на комплексному аналізі фізичних процесів, що протікають в області катодного падіння потенціалу та в області анодної плазми високовольтного розряду. В результаті моделювання встановлено, що енергетична ефективність газорозрядних імпульсних джерел електронів залежить від параметрів горіння допоміжного розряду та від шпаруватості керувальних імпульсів. За умови відповідних параметрів допоміжного розряду ефективність може перевищувати 90%.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электронно-лучевые технологии, источник электронов, высоковольтный тлеющий разряд, импульсный режим, энергетическая эффективность.

Источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) широко применяются в современных электронно-лучевых технологиях при реализации различных термических операций с помощью мощных электронных пучков, включая высокопроизводительную сварку, нанесение покрытий сложного химического состава в контролируемой газовой среде, очистку тугоплавких металлов [1—6]. Это обусловлено рядом технико-экономических преимуществ газоразрядных источников

© И.В. Мельник, 2016

электронов над традиционными источниками с нагреваемыми катодами [1—7]. Основные из них — относительная простота и дешевизна газоразрядных источников электронов и электронно-лучевого технологического оборудования на их основе, возможность работы с различными газами, включая инертные и активные, простота управления током электронного пучка посредством изменения давления в рабочей камере [8].

Недостатком газодинамического управления мощностью электронного пучка является большая величина постоянной времени регулирования, что обусловлено инерционностью газодинамических процессов. В реальных технологических установках с электронными пушками на основе ВТР время регулирования тока разряда может составлять несколько секунд [8], что неприемлемо для современных электронно-лучевых технологий [9—12].

В связи с этим в настоящее время проводятся исследования, связанные с изучением возможностей использования электрического управления током ВТР [7, 13, 14]. Реализация этого способа управления связана с применением дополнительного электрода для зажигания вспомогательного разряда. Форма и расположение вспомогательного электрода могут быть различными. Например, в работах [7, 13—15] рассмотрена система с кольцевым электродом, расположенным в области анодной плазмы. Возможно также использование электродов цилиндрической, конической и других геометрических форм, в зависимости от схемы подключения и режима горения вспомогательного разряда. Результаты теоретической оценки показали, что при электрическом управлении током разряда время перехода ВТР из сильноточного в слаботочный режим может составлять от десятков до сотен микросекунд [13—15]. Такие малые времена переключения тока разряда являются вполне приемлемыми для большинства процессов современных электронно-лучевых технологий [9—12].

В связи с этим актуальной является разработка импульсных электронных пушек ВТР промышленного назначения. Такие электронные пушки могут быть использованы для высоковакуумного переплава тугоплавких сплавов [1, 2] и нанесения композитных полиметаллических и керамических покрытий в среде различных газов, химический состав которых соответствует требованиям выполняемого технологического процесса [2—6]. Однако в ранее проведенных исследованиях не выполнялась оценка энергетической эффективности импульсных источников электронов ВТР, что несколько замедлило процессы разработки и внедрения в промышленность этих перспективных электронных пушек. Поэтому представляется целесообразным получение аналитических соотношений для энергетической эффективности импульсных источников электронов ВТР

с учетом важных физических процессов, протекающих на поверхности электродов и в ионизированном газе.

Постановка задачи. Для оценки энергетической эффективности импульсных источников электронов необходимо решить три основные задачи.

1. Рассмотреть баланс мощности на электродах в разрядном промежутке.

2. Определить концентрацию заряженных частиц в анодной плазме (АП) и ее объем в результате анализа процессов ионизации газа быстрыми электронами пучка, отраженными от анода, и медленными электронами АП.

3. Определить ток ВТР и ток вспомогательного низковольтного разряда на основе результатов расчетов п. 2.

Баланс мощности на электродах разрядного промежутка для диодной системы ВТР проанализирован в работах [16, 17]. При внесении соответствующих изменений, связанных с особенностями горения высоковольтного разряда в импульсном режиме с электрическим управлением током электронного пучка [13—15], предложенная методика расчета может быть использована для анализа баланса мощности на электродах в импульсных источниках электронов ВТР.

Методика расчета концентрации заряженных частиц в АП и ее объема для стационарного режима работы триодных источников электронов ВТР предложена в [7, 15]. В работе [7] приведены аналитические соотношения для токов основного и вспомогательного разрядов. Полученные результаты могут быть использованы для анализа энергетической эффективности источников электронов ВТР в импульсном режиме работы с учетом частоты следования управляющих импульсов и их скважности.

Рассмотрим распределение мощности на электродах и проведем оценку тока основного и вспомогательного разрядов с учетом процессов взаимодействия заряженных частиц в АП и занимаемого ею объема.

Оценка баланса мощности на электродах разрядного промежутка для импульсного режима горения ВТР. Как известно, разрядный промежуток ВТР можно условно разделить на две области с ярко выраженной границей: первая — это область катодного падения потенциала, вторая — область АП. При моделировании самосогласованной электронно-ионной оптики разрядного промежутка граница АП рассматривается как источник ионов и подвижный электрод, прозрачный для электронов пучка [7, 16, 17]. В области катодного падения потенциала электроны и ионы направлены движутся под действием электрического поля, которое определяется приложенным ускоряющим напряжением и положением границы анодной плазмы относительно катода [7, 16, 17]. При этом поток ускоренных электронов слабо взаимодействует с атомами остаточного газа, а на

характеристики ионного потока большое влияние оказывают перезарядки ионов на атомах остаточного газа. Эмиссия электронов с поверхности катода происходит в результате ее бомбардировки ускоренными ионами и нейтральными атомами. Этот процесс называется вторичной ионно-электронной эмиссией [16, 17]. Ионизация газа в разрядном промежутке осуществляется в основном медленными электронами анодной плазмы и частично быстрыми электронами пучка, отраженными от анода.

Если частота следования управляющих импульсов не превышает десятков килогерц, накопления энергии в разрядном промежутке во время действия импульсов не наблюдается [13, 14]. Большая часть мощности, подводимой к разрядному промежутку, переносится на коллектор электронным пучком, а остальная мощность расходуется на нагрев электродов и рабочего газа. Уравнение баланса мощности в ВТР для диодной электродной системы можно записать в следующем виде [16, 17]:

$$W_{\Sigma} = W_{\Pi} + W_{\text{э}} + W_{\text{об}}, \quad (1)$$

где W_{Σ} — суммарная мощность, подводимая к разрядному промежутку; W_{Π} — мощность электронного пучка; $W_{\text{э}}$ — мощность, выделяемая на электродах; $W_{\text{об}}$ — мощность, расходуемая на нагрев газа в объеме разрядного промежутка. Для импульсных источников электронов, с учетом зажигания вспомогательного разряда, уравнение (1) можно записать в виде

$$W_{\Sigma} = W_{\Pi} + W_{\text{э}} + W_{\text{об}} + W_{\text{уп}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{уп}}$ — мощность вспомогательного разряда, используемого для управления мощностью электронного пучка. Мощность $W_{\text{об}}$ называется объемными потерями [16—19], которые без учета конвекционного теплообмена можно оценить, используя соотношение [18, 19]:

$$\overline{W_{\text{об}}} = \int_V \overline{n_e} dV \int_{v_e=0}^{v_e=v_{\text{max}}} \frac{v_e}{\lambda_e} \bar{\chi} \frac{mv_e^2}{2} F_e(v_e) dv_e. \quad (3)$$

Здесь V — объем разрядного промежутка; v_e — скорость электронов; $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2eU_{\text{уск}}}{m_e}}$ — максимальная скорость электронов, где $U_{\text{уск}}$ — ускоряющее напряжение; $\overline{n_e}$ — средняя концентрация электронов; $\bar{\chi} = 2m_e / m_a$; $F_e(v_e)$ — функция их распределения по скоростям; $\lambda_e = \frac{1}{n_a s_a + n_i s_i}$ — длина свободного пробега электронов; $\overline{n_a}$ и $\overline{n_i}$ — средняя концентрация

атомов и ионов газа; s_a и s_i — сечение торможения заряженных частиц в разряде относительно электронов [18, 19],

$$s_a = 4\pi \left(\frac{e^2}{(m_e v_e)^2} \right)^2 \ln \left(\frac{m_e v_e^2}{\sqrt[3]{n_a} e^2} \right), \quad s_i = 4\pi \left(\frac{e^2}{(m_e v_e)^2} \right)^2 \ln \left(\frac{m_e v_e^2}{\sqrt[3]{n_i} e^2} \right). \quad (4)$$

Анализируя соотношения (3) и (4), можно сделать вывод о том, что для условий горения ВТР средняя длина свободного пробега электронов $\bar{\lambda}_e$ превышает длину разрядного промежутка l , которая для реальных электродных систем составляет десятки сантиметров [16, 17]. Следовательно, объемные потери мощности в ВТР на несколько порядков меньше, чем мощность, выделяемая на электродах. Поэтому для решаемой задачи объемными потерями можно пренебречь. С учетом этого определяем мощность электронного пучка и энергетическую эффективность η диодных источников электронов ВТР:

$$W_{\Pi} = 0,4en_i(t)U_{\text{уск}}D_a(\gamma+1)\sqrt{\frac{2kT_e}{m_{\Gamma}}}(1-Q_{e0}p_0d_{\Pi}), \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\gamma}{(1+\gamma)}(1-Q_{e0}p_0d_{\Pi}),$$

где γ — обобщенный коэффициент ионно-электронной эмиссии; p_0 — давление в разрядном промежутке; Q_{e0} — приведенное сечение ионизации газа электронами; d_{Π} — продольный размер анодной плазмы; D_a — коэффициент прозрачности анода ВТР; T_e — температура электронов плазмы; k — постоянная Больцмана; m_{Γ} — масса молекул газа. Тогда, с учетом соотношений (5), мощность, выделяемую на электродах, для импульсного режима горения ВТР можно определить так:

$$W_{\kappa} = \frac{\alpha\tau_{\text{и}}I_{\text{max}}U_{\text{уск}}}{T_{\text{и}}(\gamma+1)}, \quad W_{\text{а}} = W_{\kappa}\gamma Q_{e0}p_0d_{\Pi}, \quad (6)$$

где W_{κ} и $W_{\text{а}}$ — мощность, выделяемая на катоде и аноде; $\tau_{\text{и}}$ и $T_{\text{и}}$ — длительность управляющих импульсов и период их следования; I_{max} и I_{min} — максимальный и минимальный ток ВТР; $\alpha(\tau_{\text{и}}, T_{\text{и}}, I_{\text{max}}, I_{\text{min}})$ — безразмерный коэффициент, учитывающий мощность источника электронов в импульсе и в паузе между импульсами. Учитывая, что средняя

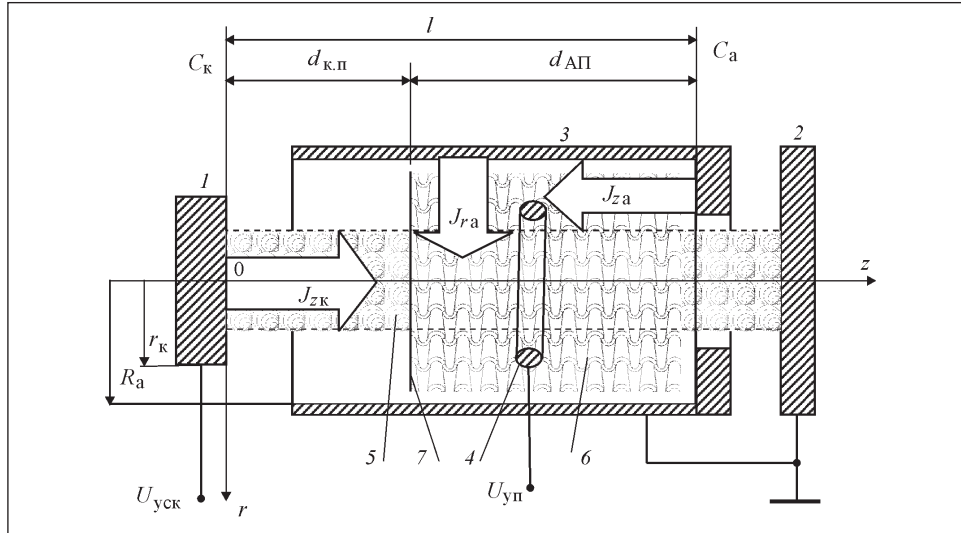


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в триодной электродной системе импульсного источника электронов ВТР: 1 — катод; 2 — коллектор электронного пучка; 3 — анод; 4 — управляющий электрод; 5 — электронный пучок; 6 — АП; 7 — граница АП; C_k и C_a — координаты катода и анода; $d_{к.п}$ — расстояние от поверхности катода до границы АП; $d_{АП}$ — продольный размер АП; l — продольный размер разрядного промежутка; $U_{уп}$ — управляющий импульс

мощность, выделяемая на катоде за промежуток времени, больший, чем период следования импульсов, определяется из соотношения

$$W_k = \frac{U_{уск}(\tau_n I_{max} + (T_n - \tau_n) I_{min})}{T_n(\gamma + 1)}, \quad (7)$$

из (6) и (7) получаем

$$\alpha = 1 - \frac{(T_n - \tau_n) I_{min}}{\tau_n I_{max}}. \quad (8)$$

Рассмотрим обобщенную схему электродной системы импульсного источника электронов (рис. 1). Потoki тепловой энергии с поверхностей электродов можно записать в виде [18, 19]

$$J_{R_a} = \frac{\beta \lambda_r \tau_n}{T_n} \left(\frac{\partial T_r}{\partial r} \right)_{r=R_a}, \quad J_{z_k} = \frac{\beta \lambda_r \tau_n}{T_n} \left(\frac{\partial T_r}{\partial z} \right)_{z=C_k}, \quad J_{z_a} = \frac{\beta \lambda_r \tau_n}{T_n} \left(\frac{\partial T_r}{\partial z} \right)_{z=C_a}, \quad (9)$$

где λ_r — теплопроводность газа; T_r — температура газа; $\beta(\tau_n, T_n, T_r)$ — безразмерный коэффициент, учитывающий временные параметры управ-

ляющих импульсов. Можно предположить, что для линейной тепловой модели

$$\beta = 1 - \frac{(T_{и} - \tau_{и}) J_{\min}}{\tau_{и} J_{\max}}, \quad (10)$$

где J_{\max} — максимальный тепловой поток во время действия импульса; J_{\min} — минимальный тепловой поток в паузе между импульсами. Переходя от дифференциальных уравнений (9), (10) к интегральным и проводя интегрирование по поверхности электродов, для линейной модели тепловых потоков можно записать [18, 19]:

$$\begin{aligned} I_{ra} &= \frac{\beta \lambda_{г} \tau_{и}}{T_{и}} \frac{(T_{a} - T_{г})}{d_{к.п}^2} = \frac{\beta \overline{n_{ат}} c_{вт} (T_{a} - T_{г}) v_{ar} \tau_{и}}{T_{и}}, \\ I_{zk} &= \frac{\beta \lambda_{г} \tau_{и}}{T_{и}} \frac{(T_{к} - T_{г})}{R_a^2} = \frac{\beta \overline{n_{ат}} c_{вт} (T_{к} - T_{г}) v_{к} \tau_{и}}{T_{и}}, \\ I_{za} &= \frac{\beta \lambda_{г} \tau_{и}}{T_{и}} \frac{(T_{a} - T_{г})}{R_a^2} = \frac{\beta \overline{n_{ат}} c_{вт} (T_{a} - T_{г}) v_{az} \tau_{и}}{T_{и}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где v_{ar} , v_{az} , $v_{к}$ — величины, обратные скорости отвода тепла с поверхности электродов, называемые также частотой теплоотвода; $c_{вт}$ — объемная теплопроводность газа; $\overline{n_{ат}}$ — средняя концентрация атомов газа.

При расчете энергетической эффективности реальных источников электронов ВТР необходимо также учитывать конвекционный механизм передачи тепловой энергии, связанный с прохождением потока газа через разрядный промежуток. При работе источника электронов в составе технологического оборудования проводится напуск газа в разрядный промежуток с регулируемой скоростью [8]. При этом поток газа, проходящий через разрядный промежуток, нагревается в результате передачи тепла от электродов, и электродная система охлаждается. Учесть отвод тепла из объема разрядного промежутка в процессе откачки газа можно, добавив в систему уравнений (11) выражение для конвекционного газового потока [18, 19]:

$$I_F = \frac{\beta \tau_{и} \overline{n_{ат}} c_{вт}}{T_{и}} (T_{г} - T_{г0}) v_F, \quad v_F = \frac{2u}{C_a}, \quad (12)$$

где $T_{г0}$ — температура газа, поступающего в разрядный промежуток; u — скорость газового потока, пропорциональная скорости откачки. Тогда ба-

ланс мощности на электродах и их температуру можно определить из соотношения

$$W_{\text{э}} = I_{\text{за}} + I_{\text{зк}} + I_{\text{ра}} - I_{\text{Ф}}. \quad (13)$$

При использовании соотношений (9)—(13) теплопроводность газа $\lambda_{\text{г}}$ можно оценить с использованием молекулярно-кинетической теории [19]:

$$\lambda_{\text{г}} = \sqrt{\frac{3kT_{\text{г}}}{8m_{\text{г}}}} \frac{k}{\pi a_{\text{г}}^2}, \quad (14)$$

где $a_{\text{г}}$ — размер атомов рабочего газа.

Для оценки энергетической эффективности триодных источников электронов с использованием соотношений (2)—(14) необходимо знать продольный размер АП $d_{\text{п}}$ и концентрацию ионов в ней n_i . Соответствующие аналитические выражения для оценки параметров АП, а также токов основного и вспомогательного разрядов получены в работах [7, 15].

Оценка параметров АП и токов основного и вспомогательного разрядов. В работах [7, 15] показано, что оценить объем АП и концентрацию ионов в ней можно, решая самосогласованную систему алгебраических уравнений, включающую уравнение баланса заряженных частиц в объеме квазинейтральной плазмы и уравнение самосогласованности горения ВТР. Продольный размер АП определяется из соотношений [7, 15]

$$\begin{aligned} R_1 &= A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} (A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e + eU_{\text{уп}}}{2\pi m_e}}, \quad R_2 = D_a \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e, \\ R_3 &= 3(kT_e + eU_{\text{уп}}) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_{\text{уп}}}{2\pi m_e}} \exp\left(-\frac{\Phi_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{уп}}}\right), \\ R_4 &= \mu_{i0} (kT_e + eU_{\text{уп}}) \left(\frac{\pi}{p_0}\right)^2 \left(1 + \frac{2\gamma R_a}{\lambda_e}\right), \quad R_5 = R_1 R_2 p_0 Q_{ep0}, \\ C_y &= -\frac{R_1 + R_3 + R_1 R_2}{R_5}, \quad D_y = \frac{R_4}{R_5}, \quad p = -\frac{C_y^2}{3}, \quad q = \frac{2C_y^3}{27} + D_y, \\ D &= \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2, \quad u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}, \quad v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}, \quad y = u + v, \quad d_{\text{п}} = y - \frac{C_y}{3}, \end{aligned} \quad (15)$$

где η_i и η_U — коэффициенты отражения электронов от анода ВТР по току и по энергии; k_e — коэффициент удлинения траекторий электронов; μ_{i0} —

подвижность ионов в АП для используемого рабочего газа; Q_{ep0} — сечение рассеяния электронов на ионах остаточного газа; T_e — температура электронов в АП с учетом ее нагрева электронным пучком; λ_e — длина свободного пробега электронов; n_e — концентрация электронов в АП; U_i — потенциал ионизации газа; N_0 — постоянная Лошмидта; α_i — полуэмпирическая постоянная, являющаяся константой для данного газа; A_i, a_i — полуэмпирические коэффициенты; C_y, D_y — коэффициенты решаемого уравнения; D — дискриминант уравнения; p, q, u, v, y — вспомогательные переменные.

При известном продольном размере $d_{АП}$ концентрацию ионов в АП можно определить из соотношения [7]:

$$n_i = \frac{A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-a_i}) (1 + \eta_i \eta_U^{-a_i} (1 - D_a (1 - d_{п} p_0 Q_{ep0})))}{(kT_e + eU_{\text{уп}}) \left(\frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_{п} p_0)^2} \left(1 + \frac{2\gamma R_a}{\lambda_e} \right) - 3 N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_{\text{уп}})}{2\pi m_e}} \right) \exp \left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{уп}}} \right)} \quad (16)$$

Соотношение для тока вспомогательного разряда имеет вид

$$I_{\text{уп}} = e n_i \pi R_a (1 + \gamma) (R_a + 2d_{п}) \sqrt{\frac{2eU_{\text{уп}}}{m_{\Gamma}}}, \quad (17)$$

а для тока основного разряда —

$$I_e = r_k^2 n_i (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-a_i}) \sqrt{\frac{\pi e d_{п} (kT_e + eU_{\text{уп}})}{2m_e}}. \quad (18)$$

Мощность вспомогательного разряда для импульсного режима ВТР определяем из соотношений

$$W_{\text{уп}} = \frac{\delta \tau_{и} U_{\text{уп}} I_{\text{уп}}^{\max}}{T_{и}}, \quad \delta = 1 - \frac{(T_{и} - \tau_{и}) I_{\text{уп}}^{\min}}{\tau_{и} I_{\text{уп}}^{\max}}, \quad (19)$$

где $I_{\text{уп}}^{\min}$ и $I_{\text{уп}}^{\max}$ — минимальный и максимальный ток вспомогательного разряда. Таким образом, окончательное выражение для энергетической эффективности импульсного источника ВТР имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{W_{\Sigma} - W_{\text{э}} - W_{\text{уп}}}{W_{\Sigma}}. \quad (20)$$

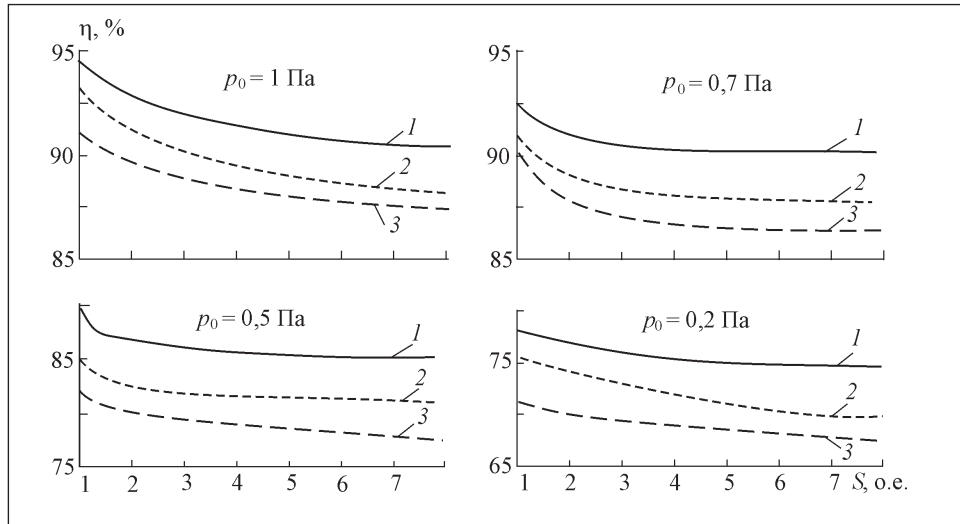


Рис. 2 Рассчитанные графики зависимости энергетической эффективности импульсных источников электронов ВТР от давления в разрядном промежутке p_0 , максимального напряжения вспомогательного разряда $U_{\text{уп}}^{\text{max}}$ и скважности управляющих импульсов S при $U_{\text{уск}} = 15$ кВ, $\tau_{\text{и}} = 1$ мс, $U_{\text{уп}}^{\text{min}} = 20$ В: 1 — $U_{\text{уп}}^{\text{max}} = 300$ В; 2 — $U_{\text{уп}}^{\text{max}} = 200$ В; 3 — $U_{\text{уп}}^{\text{max}} = 100$ В

Соотношения (2)—(20) были использованы при написании программы моделирования, позволяющей оценить энергетическую эффективность импульсных источников электронов ВТР.

Анализ результатов моделирования. Тестирование предложенной методики моделирования импульсных источников электронов ВТР и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными проводилось для электродной системы со следующими параметрами: материал катода — алюминий; материал анода — медь; рабочий газ — азот; ускоряющее напряжение — 15 кВ; давление газа в разрядном промежутке — 0,1 — 1 Па; напряжение горения вспомогательного разряда в импульсе — 100—300 В; напряжение горения вспомогательного разряда в паузе между импульсами — 20—30 В.

В соответствии с этими данными были выбраны следующие значения параметров ВТР в системе уравнений (15) [7, 18, 19]: $U_i = 18$ В; $T_e = 800$ К; $a_i = 0,343$; $\alpha_i = 1,452$; $\eta_i = 0,7$; $\eta_U = 0,95$; $\gamma = 4,6$; $D_a = 0,99$; $\mu_{i0} = 1,27 \cdot 10^{-4}$ м²/Вс; $Q_{ep0} = 5,3 \cdot 10^{-19}$ м⁻²; $A_i = 3,8 \cdot 10^{-6}$. Частота следования управляющих импульсов составляла 500 Гц — 5 кГц. При этом их скважность $S = T_{\text{и}} / \tau_{\text{и}}$ изменялась в пределах от одного до десяти. В процессе моделирования и проведения экспериментальных исследований рассматривались следующие геометрические параметры электродной системы ВТР: $l = 0,07$ м, $R_a = 0,035$ м, $r_k = 0,025$ м.

Результаты моделирования энергетической эффективности импульсных источников электронов ВТР для различных значений рабочего давления в разрядном промежутке представлены на рис. 2, из которого видно, что при уменьшении скважности управляющих импульсов увеличивается энергетическая эффективность источника. Это объясняется более высоким коэффициентом использования мощности электронного пучка во времени. Математически этот эффект можно объяснить, анализируя соотношения (17)—(19).

Из полученных результатов моделирования также очевидно, что энергетическая эффективность импульсных источников электронов ВТР увеличивается с возрастанием управляющего напряжения и с увеличением давления в разрядном промежутке. Это объясняется тем, что увеличение тока ВТР при увеличении концентрации заряженных частиц в АП происходит в значительно большей степени, чем увеличение тока вспомогательного разряда. Такое увеличение концентрации ионов может происходить по двум причинам: вследствие увеличения давления в разрядном промежутке и вследствие увеличения напряжения горения вспомогательного разряда при подаче управляющих импульсов. Минимальное напряжение горения вспомогательного разряда при проведении моделирования и экспериментальных исследований составляло $U_{уп}^{min} = 20 В$. В процессе моделирования для оценки токов основного и вспомогательного разрядов использованы соотношения (15) — (18), а для оценки энергетической эффективности источника электронов — соотношения (19), (20).

Максимальный ток, А	Режим горения вспомогательного разряда		Экспериментальное значение	Расчетное значение	Расхождение, %
	p_0 , Па	$U_{уп}$, В			
ВТР	0,5	300	1,6	1,48	7,5
		200	1,1	1,15	4,5
		100	0,8	0,83	3,75
	1	300	2,1	2,26	7,6
		200	1,7	1,63	4,1
		100	1,1	1,13	2,7
Вспомогательного разряда	0,5	300	7,8	8,04	3,1
		200	6,5	6,21	4,5
		100	5,3	5,53	4,3
	1	300	8,5	8,84	4
		200	7,2	6,92	3,9
		100	6,1	6,27	2,8

Расчетные и экспериментальные значения контролируемых параметров для различных рабочих режимов импульсных источников электронов ВТР приведены в таблице, из которой видно, что для различных рабочих режимов разряда расхождение между расчетными и экспериментальными значениями токов основного и вспомогательного разрядов составляло менее 10%, что свидетельствует об эффективности и точности разработанной математической модели. Кроме того, использование для расчета положения границы АП и концентрации ионов в ней простых аналитических соотношений (15), (16) позволяет избежать необходимости применения сложных итерационных процедур, связанных с моделированием равновесного положения АП в условиях горения ВТР, что значительно сокращает время расчета токов основного и вспомогательного разрядов.

Результаты моделирования показали, что при относительно высоких значениях давления рабочего газа и максимального напряжения горения вспомогательного разряда, а также при малой скважности управляющих импульсов, энергетическая эффективность импульсных источников электронов ВТР может составлять более 90%. Поскольку время переключения тока ВТР из сильноточного в слаботочный режим может составлять от десятков и сотен микросекунд [13, 14], разработка и внедрение в промышленность импульсных источников электронов ВТР позволит расширить возможности электронного пучка как технологического инструмента и согласовать параметры источников электронов с параметрами технологического процесса, что даст новый стимул развитию современных электронно-лучевых технологий.

Выводы

Таким образом, установлено, что энергетическая эффективность импульсных источников электронов ВТР зависит от максимального и минимального напряжения горения вспомогательного разряда, давления в разрядном промежутке и скважности управляющих импульсов. Для повышения энергетической эффективности импульсного источника электронов ВТР можно увеличивать максимальное напряжение горения вспомогательного разряда и давление в области горения разряда или уменьшать скважность управляющих импульсов. При соответствующем подборе рабочих режимов импульсного источника электронов ВТР его энергетическая эффективность может превышать 90%.

Высокая эффективность разработанных средств моделирования обусловлена тем, что для определения объема анодной плазмы и концентрации ионов в ней используются простые аналитические соотношения, а не сложные итерационные алгоритмы, требующие больших вычислительных

затрат. Расхождение расчетных и экспериментальных значений максимального тока основного и вспомогательного разрядов для рабочих режимов технологических источников электронов ВТР не превышает 10%.

Полученные результаты моделирования могут представлять практический интерес для проектировщиков электронно-лучевого технологического оборудования.

СПИСОК 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. *Mattausch G., Zimmermann B., Fietzke F. et al.* Gas discharge electron sources — proven and novel tools for thin-film technologies // *Ibid.* — 2014. Vol. 49, № 5—6. — P. 183—195.
4. *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.
5. *Yarmolich D., Nozar P., Gleizer S. et al.* Characterization of deposited films and the electron beam generated in the pulsed plasma deposition gun // *Japanese Journal of Applied Physics.* — 2011. — Vol. 50.— 08JD03.
6. *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.
7. *Мельник И.В.* Обобщенная методика моделирования триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Электрон. моделирование.* — 2013. — 35, № 4. — С. 93—107.
8. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.I., Melnyk I.V., Tugay B.A.* Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications // *Proceedings of SPIE. Sixth International Conference on «Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics».* — 2003. — Vol. 5065. — P. 64—76.
9. *Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.* Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
10. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 239 с.
11. *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.
12. *Pinto T., Buxton A., Neailey K., Barnes S.* Surface engineer improvements and opportunities with electron beams // *Ibid.* — 2014. — Vol. 49, № 5—6. — P. 221 — 225.
13. *Мельник И.В.* Оценка времени увеличения тока высоковольтного тлеющего разряда в триодной электродной системе при подаче управляющих импульсов // *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника.* — 2013. — 56, № 12. — С. 51—61.
14. *Melnyk I.V.* Simulation of time of current increasing in impulse triode high voltage glow discharge electron guns // *Electrotechnic and Electronic (E +E)*. — 2014. — Vol. 49, № 5—6. — P. 254—258.

15. Мельник И.В., Тугай С.Б. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2012. — 55, № 11. — С. 50—59.
16. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
17. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Атомиздат, 1989. — 256 с.
18. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. Том 1. Общие вопросы электродинамики газов. — М.-Л.: Гос. изд. технико-теоретич. лит., 1952. — 432 с.
19. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.

I.V. Melnyk

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF PULSED HIGH VOLTAGE GLOW DISCHARGE ELECTRON SOURCES WITH ALLOWANCE FOR THE PROCESSES ON ELECTRODES AND PARAMETERS OF ANODE PLASMA

Methods of simulation of energy efficiency of pulsed electron sources of high voltage glow discharge are considered in the article. The proposed methods are based on the complex analysis of physical processes, taking place in the region of cathode potential drop and in the region of anode plasma of high voltage discharge. The obtained simulation results show, that energy efficiency of pulsed glow discharge electron sources depended on the parameters of additional discharge and on relative control pulse duration ratio. With using suitable parameters of additional discharge the energy efficiency may exceed 90%.

Key words: electron-beam technologies, electron source, high voltage glow discharge, pulsed operation, energy efficiency.

REFERENCES

1. Ladokhin, S.V., Levitskiy, N.I., Chernyavsky, V.B. et al. (2007), *Elektronno-luchevaya pлавка v liteynom proizvodstve* [Electron-beam melting in foundry], Stal, Kiev, Ukraine.
2. Grechanyuk, M.I., Melnyk, A.G., Grechanyuk, I.M. et al. (2014), “Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials”, *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 49, no. 5-6, pp. 115-121.
3. Mattausch, G., Zimmermann, B., Fietzke, F. et al. (2014), “Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies”, *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 49, no. 5-6, pp. 183-195.
4. Feinaeugle, P., Mattausch, G., Schmidt, S. and Roegner, F.H. (2011), “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, 54th Annual Technical Conference Proceedings*, Chicago, 2011, pp. 202-209.
5. Yarmolich, D., Nozar, P., Gleizer, S. et al. (2011), “Characterization of deposited films and the electron beam generated in the pulsed plasma deposition gun”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50, 08JD03.
6. Mattausch, G., Scheffel, B., Zywitzki, O. et al. (2012), “Technologies and tools for the plasma-activated EB high-rate deposition of zirconia”, *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 47, no. 5-6, pp. 152-158.
7. Melnyk, I.V. (2013), “Generalized methods of simulation of high voltage glow discharge triode electron sources”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 35, no. 4, pp. 93-107.

8. Denbnovetsky, S.V., Melnyk, V.I., Melnyk, I.V. and Tugay, B.A. (2003), "Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications", *Proceedings of SPIE. Sixth International Conference on Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics*, Vol. 5065, pp. 64-76.
9. Shiller, S., Geisig, U. and Panzer, S. (1980), *Elektronno-luchevaya tekhnologiya* [Electron-beam technology], Energiya, Moscow, Russia.
10. Rykalin, N.N., Zuev, I.V. and Uglov, A.A. (1978), *Osnovy elektronno-luchevoi obrabotki materialov* [Foundations of electron-beam treatment of materials], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
11. Grechanyuk, N., Kucherenko, P., Grechanyuk, I. and Shpack, P. (2006), "Modern technologies and equipment for obtaining new materials and coatings", *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 41, no. 5-6, pp. 122-128.
12. Pinto, T., Buxton, A., Neailey, K. and Barnes, S. (2014) "Surface engineer improvements and opportunities with electron beams", *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 49, no. 5-6, pp. 221-225.
13. Melnyk, I.V. (2013), "Estimation of time of increasing of high voltage glow discharge electron current in the triode electrode system under supply of control impulse", *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 56, no. 12, pp. 51-61.
14. Melnyk, I.V. (2014), "Simulation of time of current increasing in impulse triode high voltage glow discharge electron guns", *Elektrotehnika i Elektronika (E+E)*, Vol. 49, no. 5-6, pp. 254-258.
15. Melnyk, I.V. and Tugay, S.B. (2013), "Analytical calculation of plasma boundary position in high voltage glow discharge under the lighting of additional discharge", *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 55, no. 11, pp. 50-59.
16. Novikov, A.A. (1983), *Istochniki elektronov vysokovoltного tleyushego razryada s anodnoy plasmoy* [High voltage glow discharge electron sources with anode plasma], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
17. Zavialov, M.A., Kreyndel, Yu.E., Novikov, A.A. and Shanturin, L.P. (1989), *Plasmennyye processy v tekhnologicheskikh elektronnykh pushkakh* [Plasma processes in technological electron guns], Atomizdat, Moscow, Russia.
18. Granovskiy, V.L. (1952), *Elektricheskiy tok v gazakh. Tom 1. Obschie voprosy elektrodinamiki gazov* [Electric current in gases. Vol. 1. General problems of gas electrostatics], Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, Moscow, Leningrad, Russia.
19. Raizer, Yu.P. (1987), *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge], Nauka, Moscow, Russia.

Поступила 03.12.15

МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование электронно-лучевых технологических устройств, теория газового разряда, программирование и теория алгоритмов.

