
УДК 537.525:621.325

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

Моделирование вольт-амперных характеристик несамостоятельного вспомогательного разряда в триодных газоразрядных электронных пушках

Приведены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать энергетические параметры вспомогательного разряда в триодных электронных пушках высоковольтного тлеющего разряда. Предложенная методика расчета основана на анализе баланса ионов в анодной плазме высоковольтного тлеющего разряда при условии самостоятельности его горения. Проведенные исследования подтвердили перспективность разработки и внедрения в промышленность триодных газоразрядных электронных пушек.

Наведено аналітичні співвідношення, які дозволяють розраховувати енергетичні параметри допоміжного розряду у триодних електронних гарматах високовольтного тліючого розряду. Запропоновано методику розрахунку, яка базована на аналізі балансу іонів в анодній плазмі високовольтного тліючого розряду за умови самостійності його горіння. Проведені дослідження підтвердили перспективність розробки та впровадження у промисловість триодних газорозрядних електронних гармат.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электронно-лучевые технологии, газоразрядная электронная пушка, высоковольтный тлеющий разряд, вспомогательный разряд, анодная плазма.

В настоящее время электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) широко используются в электронной промышленности, приборостроении, металлургии и машиностроении при выполнении технологических операций сварки, пайки, отжига различных изделий, при вакуумном переплаве тугоплавких материалов для их очистки, а также при нанесении покрытий различного назначения, в том числе композитных [1 — 3]. Перспективность внедрения и использования в промышленности технологических газоразрядных пушек обусловлена тем, что они обладают рядом технико-экономических преимуществ по сравнению с традиционно используемыми термокатодными. Среди этих преимуществ необходимо отметить следующие [1 — 3]:

возможность работы в низком и среднем вакууме, что в значительной степени упрощает электронно-лучевое технологическое оборудование и уменьшает его стоимость;

возможность работы с различными технологическими газами, включая активные и инертные, что в значительной степени расширяет диапазон выполняемых технологических операций;

относительная конструктивная простота и малая стоимость;

возможность управления энергетическими параметрами формируемого электронного пучка посредством изменения рабочего давления в камере пушки [4].

В то же время, существенным недостатком систем управления мощностью электронного пучка в пушках на основе ВТР является тот факт, что вследствие инерционности газодинамических процессов автоматическое регулирование тока электронного пучка изменением давления в разрядном промежутке осуществляется достаточно медленно. Как показали проведенные ранее исследования, обычно постоянная времени регулирования в таких системах составляет более 0,1 с [4].

Такие временные параметры систем управления во многих случаях неприемлемы для современных электронно-лучевых технологий. Это связано с тем, что основными требованиями современного производства, в котором используются достаточно дорогостоящие электронно-лучевые технологии, являются высокая производительность технологического процесса и повышенная стабильность энергетических параметров электронного пучка как технологического инструмента.

Только в случае выполнения этих требований удастся получать высококачественные изделия в условиях массового производства, и оно становится эффективным, несмотря на значительные капиталовложения [2, 5]. Поэтому отсутствие эффективных систем управления током электронного пучка с малой постоянной времени его регулирования в некоторой степени сдерживает внедрение в промышленность технологических электронных пушек ВТР, несмотря на перечисленные выше их преимущества.

В связи с этим важной и актуальной задачей является создание малоинерционных систем управления током электронного пучка для газоразрядных электронных пушек. Минимальное значение постоянной времени регулирования для таких систем не должно превышать нескольких миллисекунд.

Постановка задачи. Для решения поставленной задачи необходимо исследовать триодные электродные системы ВТР, в которых управление мощностью осуществляется посредством зажигания вспомогательного низковольтного разряда в результате подачи управляющего напряжения на дополнительный электрод. Результаты экспериментальных исследо-

ваний таких электродных систем свидетельствуют о том, что при электрическом управлении постоянная времени регулирования может быть значительно меньше, чем при газодинамическом, и составлять несколько миллисекунд [6]. Были проведены также исследования электронно-оптических свойств триодного разрядного промежутка ВТР методом яркостного анализа фотографий, основанным на современных средствах компьютерной обработки изображений [7].

Однако физические процессы, протекающие в триодном разрядном промежутке ВТР, до настоящего времени изучены недостаточно, что не позволяет эффективно проектировать триодные газоразрядные пушки для современных электронно-лучевых технологий. Наиболее важными неисследованными вопросами являются энергетический баланс в триодном высоковольтном разрядном промежутке и соотношение между мощностями основного и вспомогательного разрядов. Кроме того, особый интерес представляет положение и форма границы анодной плазмы в триодных электродных системах ВТР, которая при моделировании рассматривается как источник ионов и как прозрачный для электронов электрод с заданным потенциалом [7 — 9].

Рассмотрим физико-математическую модель, позволяющую определять положение границы анодной плазмы и ток вспомогательного разряда в триодных электродных системах ВТР. Для вывода необходимых уравнений проведем анализ распределения потоков заряженных частиц в анодной плазме и их взаимодействия с поверхностями электродов. При этом в качестве базовых аналитических соотношений используем уравнение баланса заряженных частиц в анодной плазме, условие самостоятельности ВТР, а также полуэмпирические соотношения, описывающие элементарные взаимодействия потоков заряженных частиц между собой в объеме плазмы и с поверхностями электродов.

Основные физические процессы, учитываемые при построении модели, следующие:

- ионизация газа быстрыми и медленными электронами;
- вторичная ионно-электронная эмиссия;
- резонансная перезарядка ионов на атомах остаточного газа в области катодного падения потенциала [8, 10, 11].

Преимуществами предлагаемой модели является ее относительная простота и возможность получения аналитического решения для положения границы анодной плазмы относительно катода и для зависимости тока вспомогательного разряда от напряжения на управляющем электроде и от энергии электронов пучка. Такие упрощенные физико-математические модели имеют большое значение на этапе предварительного проектирова-

ния газоразрядных пушек и оценки их функциональных возможностей [12]. Более точные оценки для реальных электродных систем могут быть получены двумя способами: теоретически, посредством численного решения задачи равновесия сил электрического поля и кинетического давления плазмы на ее границе [7, 9], или теоретико-экспериментальным способом, т.е. фотографированием разрядного промежутка и проведением компьютерного анализа яркости полученных фотографий [7].

Основным конечным результатом предлагаемой модели является возможность исследования энергетики вспомогательного разряда и получение его вольт-амперных характеристик. Это позволяет на этапе предварительного проектирования триодных электронных пушек ВТР оценить их энергетическую эффективность и возможность использования в условиях современного производства. Предлагаемая модель позволяет также оценивать положение границы анодной плазмы в разрядном промежутке ВТР. Этот параметр имеет большое значение при анализе самосогласованной электронно-ионной оптики высоковольтного тлеющего разряда [7, 9].

Параметры модели триодного высоковольтного разрядного промежутка. На рис. 1 представлена упрощенная схема триодного высоковольтного разрядного промежутка. Моделируемое устройство содержит три основных электрода. На катод 1 высоковольтного тлеющего разряда подается ускоряющее напряжение U_y . С катода под действием ионной бомбардировки происходит эмиссия электронов, которые формируют электронный пучок 3. Заземленный корпус прибора 2 является анодом ВТР и катодом вспомогательного разряда, поэтому вспомогательный разряд теоретически может рассматриваться как разряд с полым катодом [10, 11]. Анодная плазма 4 располагается в полости анода ВТР на определенном расстоянии от катода и при моделировании разрядного промежутка рассматривается как источник ионов и как электрод с заданным потенциалом. Для рассматриваемой схемы разрядного промежутка вспомогательный кольцевой электрод 5 располагается в области анодной плазмы вне зоны прохождения электронного пучка, при этом на управляющий электрод подается положительный потенциал U_p , величина которого может составлять от десятков до сотен вольт.

Возможны и другие конструкции триодной электродной системы ВТР с соответствующими схемами подключения электродов. Например, в работе [6] рассмотрена система с цилиндрическим управляющим электродом, на который подается отрицательный потенциал. В любом случае схема подключения электродов при зажигании вспомогательного разряда должна обеспечивать эффект полого катода [10, 11].

Основные геометрические размеры моделируемого разрядного промежутка ВТР следующие: продольный размер промежутка l , его попереч-

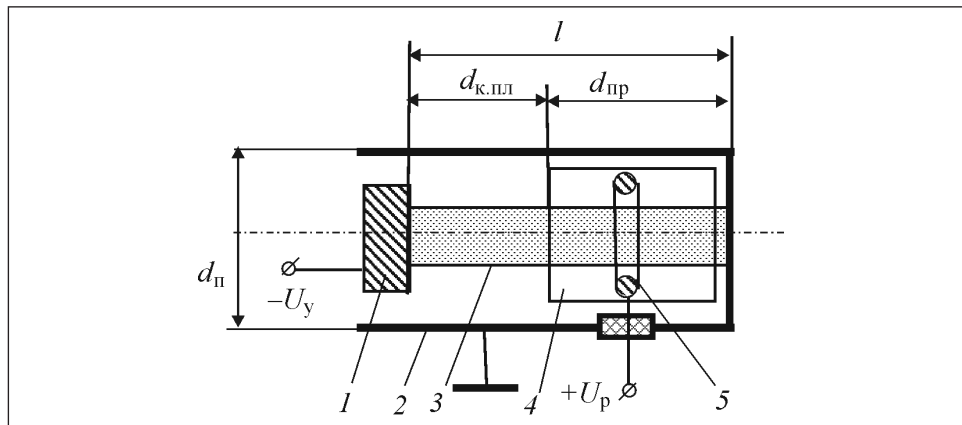


Рис. 1. Схема триодного высоковольтного разрядного промежутка и его геометрические параметры: 1 — катод; 2 — анод ВТР, являющийся катодом вспомогательного разряда; 3 — электронный пучок; 4 — анодная плазма; 5 — кольцевой электрод для зажигания вспомогательного разряда

ный размер d_p , продольный размер анодной плазмы $d_{пр}$ и расстояние от катода до анодной плазмы $d_{к.пл}$. Важным входным параметром рассматриваемой модели разрядного промежутка является приведенное давление p_{a0} , которое в условиях горения ВТР с учетом зажигания вспомогательного разряда может находиться в диапазоне от 0,1 до 10 Па.

В действительности физические условия горения основного и вспомогательного разрядов определяются материалами электродов, составом рабочего газа, ускоряющим напряжением, напряжением на вспомогательном электроде и приведенным давлением в разрядном промежутке. Однако на условия горения разряда большое влияние оказывают элементарные процессы взаимодействия частиц между собой и с поверхностями электродов. Из них определяющее значение имеют следующие [8, 10, 11]:

1. Эмиссия электронов с поверхности катода ВТР под воздействием ионной бомбардировки, определяемая коэффициентом эффективности вторичной ионно-электронной эмиссии $\gamma_{эф}$ и зависящая от ускоряющего напряжения и приведенного давления газа.

2. Перезарядка ионов на атомах остаточного газа с эффективным сечением Q_{i0} .

3. Ионизация газа быстрыми электронами пучка и медленными электронами анодной плазмы с соответствующими сечениями ионизации.

4. Эмиссия ионов из анодной плазмы на катод вспомогательного разряда под воздействием амбиполярной диффузии, для которой характерна длина свободного пробега электронов λ_e и ионов λ_i при заданном приведенном давлении в разрядном промежутке.

5. Вторичная ионно-электронная эмиссия с поверхности катода вспомогательного разряда, характеризуемая коэффициентом эмиссии γ .

Параметры модели, определяющие элементарные взаимодействия частиц в разрядном промежутке ВТР, определяются экспериментально для определенных материалов электродов и состава рабочего газа либо используются данные, приведенные в литературе [10, 11].

Аналитические соотношения для определения положения границы анодной плазмы. Концентрация ионов в анодной плазме ВТР определяется на основе уравнения баланса ионов [8, 10, 11]

$$z_{\bar{\sigma}} + z_{\text{м}} + z_{\text{р}} = z_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $z_{\bar{\sigma}}$ — эффективность ионизации газа быстрыми электронами пучка; $z_{\text{м}}$ — эффективность ионизации газа медленными электронами плазмы; $z_{\text{р}}$ — количество ионов, образующихся в несамостоятельном разряде; $z_{\text{д}}$ — диффузионное рассеяние электронов в анодной плазме с учетом их дрейфа в электрическом поле, создаваемом вспомогательным электродом.

Для определения эффективности ионизации газа быстрыми и медленными электронами, а также эмиссии ионов из анодной плазмы в процессе амбиполярной диффузии используем следующие соотношения [8, 10, 11]:

$$\begin{aligned} z_{\bar{\sigma}} &= \frac{j_{\text{ек}} d_{\text{пр}} p_{a0} A_i U_y^{-a_i}}{e} (1 + \eta_i (1 - f (1 - d_{\text{пр}} p_{a0} Q_{\text{ep}0}))) \eta_U^{-a_i} k_e, \\ \gamma_{\text{эф}} &= A_i U_y^{-a_i}, \quad z_{\text{м}} = \frac{d_{\text{пр}} p_{a0} n_e}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \bar{Q}_{\text{епл}0}, \\ \bar{Q}_{\text{епл}0} &= N_0 \alpha_i \left(U_i + \frac{2kT_e}{e} \right) \exp\left(-\frac{eU_i}{kT_e} \right), \\ z_{\text{д}} &= \frac{\pi^2 n_i \mu_{i0} kT_e}{d_{\text{пр}} p_{a0} e}, \quad z_{\text{р}} = \frac{\pi^2 n_i \mu_{i0} \gamma d_{\text{н}} U_{\text{р}} (eU_{\text{р}} + kT_e)}{d_{\text{пр}} p_{a0} \lambda}, \\ \lambda_e &= \frac{9kT_e (eU_{\text{р}} + kT_e)^2}{4\pi e^4 p_{a0} \ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_{\text{р}} + kT_e)^3}{\pi p_{a0}}} \right)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $j_{\text{ек}}$ — плотность тока электронов на поверхности катода; η_i и η_U — коэффициенты отражения электронов соответственно от анода по току и энергии; f — коэффициент прозрачности анода; $Q_{\text{ep}0}$ — сечение рассеяния

электронов на ионах остаточного газа; k_e — коэффициент удлинения траекторий электронов; n_e — концентрация электронов в плазме; $\bar{Q}_{\text{епл}0}$ — усредненное сечение ионизации газа медленными электронами плазмы; $N_0 = 2,7 \cdot 10^{25}$ — постоянная Лошмидта, м^{-3} ; U_i — потенциал ионизации газа; α_i — эмпирическая постоянная для данного газа; μ_{i0} — подвижность ионов в анодной плазме; m_e — масса электрона; T_e — температура электронов в плазме с учетом ее нагрева электронным пучком; A_i, a_i — полуэмпирические коэффициенты.

Концентрацию ионов в анодной плазме определяем из условия самостоятельности горения ВТР [8]:

$$n_i = \frac{j_{\text{ек}} \sqrt{\frac{kT_e}{2m_e}}}{e(A_i U_y^{-a_i} + 1)}. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1), с учетом (2), (3), запишем в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\pi^2 \mu_{i0} (kT_e + eU_p)}{(p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d_{\text{п}}}{\lambda_e} \right) - \\ & - 3(kT_e + eU_p) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_p)}{2\pi m_e}} \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right) = \\ & = A_i U_y^{-a_i} (A_i U_y^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} (1 + \eta_i (1 - f(1 - d_{\text{пр}} p_{a0} Q_{\text{еп}0})) \eta_U^{-a_i} k_e). \quad (4) \end{aligned}$$

Уравнение (4) является кубическим относительно параметра $d_{\text{пр}}$ и имеет аналитическое решение.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} R_1 &= A_i U_y^{-a_i} (A_i U_y^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}}, R_2 = f \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e, \\ R_3 &= 3(kT_e + eU_p) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}} \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

$$R_4 = \mu_{i0}(kT_e + eU_p) \left(\frac{\pi}{p_{a0}} \right)^2 \left(1 + \frac{\gamma d_{\text{п}}}{\lambda_e} \right), R_5 = R_1 R_2 p_{a0} Q_{ep0}.$$

Тогда, используя формулу Кордано [13], решение уравнения (4) с учетом (5) запишем в виде

$$C_y = -\frac{R_1 + R_3 + R_1 R_2}{R_5}, D_y = \frac{R_4}{R_5}, p = -\frac{C_y^2}{3}, q = \frac{2C_y^3}{27} D_y, \tag{6}$$

$$D = \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2, u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}, v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}, y = u + v, d_{\text{пр}} = y - \frac{C_y}{3},$$

где D — дискриминант уравнения (4) с учетом (5); u и v — вспомогательные переменные [13]. Поскольку все коэффициенты в (5) — положительные числа, а дискриминант D в системе (6) всегда больше нуля, уравнение (4) всегда имеет единственное действительное решение, получаемое из соотношений (5) и (6) [13].

Полученные соотношения (5), (6) имеют большое практическое значение, так как позволяют оценить положение границы анодной плазмы в триодном разрядном промежутке ВТР и могут быть использованы для анализа энергетики и самосогласованной ионно-электронной оптики высоковольтного тлеющего разряда при электрическом управлении его параметрами.

Аналитические соотношения для расчета вольт-амперных характеристик несамостоятельного вспомогательного разряда. Определив из (5), (6) продольный размер анодной плазмы, можно определить концентрацию ионов в анодной плазме ВТР [8]:

$$n_i = \frac{A_i U_y^{-a_i} (1 + A_i U_y^{-a_i}) (1 + \eta_i \eta_U^{-a_i} (1 - f(1 - d_{\text{пр}} p_{a0} Q_{ep0})))}{(kT_e + eU_p) \left(\frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_{\text{пр}} p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d_{\text{п}}}{\lambda} \right) - 3N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_p)}{2\pi m_e}} \right) \exp \left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right)}. \tag{7}$$

Тогда, определяя эмиссионную площадь границы анодной плазмы в несамостоятельном разряде с полым катодом как сумму площадей нижнего основания и боковой поверхности цилиндра (см. рис. 1), получаем аналитическое соотношение для тока несамостоятельного разряда:

$$I_p = en_i \pi r_{\text{п}} (1 + \gamma) (r_{\text{п}} + 2d_{\text{пр}}) \sqrt{\frac{2eU_p}{m_i}}, \quad r_{\text{п}} = \frac{d_{\text{п}}}{2}, \tag{8}$$

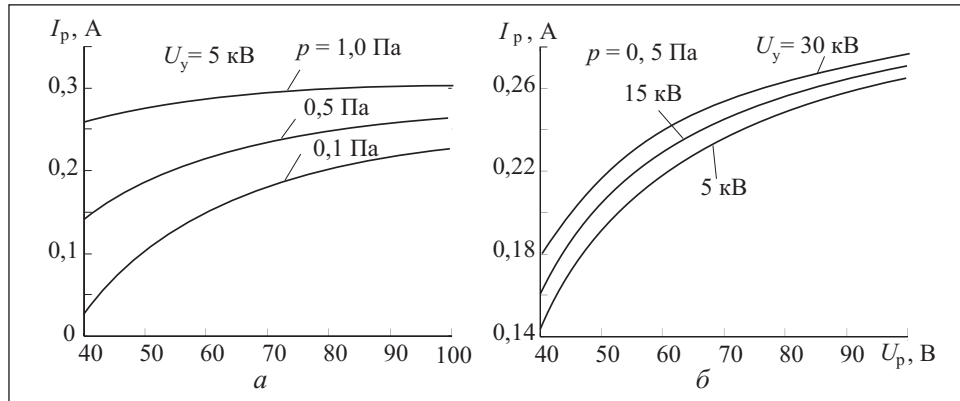


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда при различных величинах рабочего давления p (а) и ускоряющего напряжения U_y (б)

где m_i — масса ионов рабочего газа; n_i — концентрация ионов в анодной плазме, определяемая из (7) с учетом (5), (6).

Соотношения (5)—(8) использованы для получения и анализа вольт-амперных характеристик вспомогательного разряда в триодной электродной системе ВТР. В моделируемой системе расчеты проведены для алюминиевого катода и медного анода, в качестве рабочего газа рассмотрен азот. При проведении расчетов использованы такие коэффициенты [8, 10, 11]: $U_i = 18\text{ В}$; $T_e = 800\text{ К}$; $a_i = 0,343$; $\alpha_i = 1,452$; $\eta_i = 0,7$; $\eta_U = 0,95$; $f = 0,99$; $\mu_{i0} = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$; $Q_{ep0} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2}$; $A_i = 3,8 \cdot 10^{-6}$; $\gamma = 4,6$. Полученные зависимости тока вспомогательного разряда от напряжения вспомогательного разряда, ускоряющего напряжения и давления в разрядном промежутке приведены на рис. 2.

Анализ результатов моделирования. Полученные вольт-амперные характеристики несамостоятельного разряда имеют большое практическое значение для анализа возможности использования метода электрического управления в технологических электронных пушках на основе ВТР. Для этого в первую очередь необходимо оценить мощность, расходуемую на поддержание вспомогательного разряда, и сравнить ее с мощностью формируемого электронного пучка. Именно это соотношение характеризует эффективность использования метода электрического управления мощностью электронного пучка. Как видно из приведенных расчетных данных, мощность, расходуемая на поддержание несамостоятельного разряда, составляет не более 30 Вт при мощности электронного пучка порядка десятков киловатт.

Таким образом, в триодных системах ВТР на поддержание вспомогательного разряда расходуется не более 1 % потребляемой мощности, т.е. к.п.д. электронной пушки относительно диодной системы практически не изменяется. Учитывая описанные выше преимущества электрических систем управления, связанные с малой величиной постоянной времени регулирования тока разряда, можно сделать вывод о перспективности триодных газоразрядных пушек и целесообразности их внедрения в промышленное производство. Рассчитать ток основного разряда можно с помощью соотношения (3).

Из данных, приведенных на рис. 2, видно, что с возрастанием напряжения горения несамостоятельного разряда скорость увеличения тока разряда значительно уменьшается, т.е. устройство переходит в режим насыщения. Это обусловлено двумя важными факторами, связанными с физикой горения ВТР. Во-первых, при низких давлениях (0,1 — 10 Па) не имеют существенного значения лавинные процессы и процессы коллективного взаимодействия заряженных частиц, вследствие которых может происходить неограниченное увеличение их концентрации и тока разряда [10, 11]. Во-вторых, как установлено в результате теоретического анализа, ограничение скорости роста тока разряда обусловлено особенностями перемещения границы плазмы при изменении ускоряющего напряжения.

При малых напряжениях вспомогательного разряда с увеличением напряжения увеличивается объем анодной плазмы, и увеличение концентрации ионов происходит двумя способами: в результате возрастания степени ионизации газа и в результате увеличения объема ионизированного газа. Однако это происходит только до тех пор, пока расстояние между границей плазмы и катодом ВТР превышает поперечный размер разрядного промежутка. При выполнении условия $d_{к.пл} \approx d_{п}$ положение границы анодной плазмы стабилизируется и в дальнейшем, при возрастании напряжения горения вспомогательного разряда, объем анодной плазмы не увеличивается. В этом случае увеличение тока разряда происходит только вследствие увеличения степени ионизации газа.

Отсутствие лавинообразных процессов и режим насыщения для несамостоятельного разряда обуславливают высокую стабильность его горения, что крайне важно для обеспечения устойчивой работы технологических газоразрядных пушек в составе электронно-лучевого оборудования. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что изменение давления в значительно большей степени влияет на ток несамостоятельного разряда, чем изменение ускоряющего напряжения. Поэтому при проектировании систем электрического управления параметрами триодных газоразрядных пушек необходимо стабилизировать рабочее давление в камере пушки [4].

Полученные результаты имеют большое теоретическое и практическое значение не только для оценки энергетики и расчета вольт-амперных характеристик вспомогательного разряда, но и для анализа самосогласованной электронно-ионной оптики в триодных системах ВТР.

Энергетическая эффективность триодных газоразрядных пушек практически не отличается от эффективности аналогичных диодных систем, используемых в промышленности. Однако при этом стабильность работы триодных газоразрядных пушек выше, чем у соответствующих диодных аналогов, а их технологические возможности в большей степени соответствуют уровню развития современных электронно-лучевых технологий.

Выводы

В результате решения уравнения баланса заряженных частиц в анодной плазме и уравнения для условия самостоятельности горения ВТР получены аналитические соотношения, описывающие зависимость тока вспомогательного разряда от напряжения его горения, а также от давления в разрядном промежутке и ускоряющего напряжения для триодных систем ВТР.

Достоинствами предложенной модели являются ее простота и универсальность. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что в триодных газоразрядных электронных пушках мощность вспомогательного разряда составляет не более 1% мощности основного, однако при этом стабильность их работы значительно выше, чем диодных. В связи с этим работа триодных газоразрядных электронных пушек в составе электронно-лучевого технологического оборудования отличается более высокой стабильностью и их технологические возможности соответствуют уровню развития современных электронно-лучевых технологий. Особенно широкие перспективы для развития электронно-лучевых технологий открываются при использовании импульсного режима работы триодных газоразрядных электронных пушек.

Analytical relations, which allow calculating energy parameters of additional discharge in triode high-voltage glow discharge electron guns, are given in this article. The proposed calculation technique is based on analyzing of ions balance in the anode plasma of high-voltage glow discharge on condition of its burning independence. Main advantages of the proposed model are its simplicity and generality. The results of simulation show, that in triode glow discharge electron guns power of additional discharge is lower than 1% relative to that of the main discharge. However, the stability of operation of triode glow discharge electron guns is considerably greater, than for diode ones. The performed investigations have confirmed the promising character of elaboration of triode glow discharge electron guns and their introduction into industry.

1. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* / Завьялов М.А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
2. *Ладохин С. В., Левицкий Н. И., Чернявский В. Б. и др.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. — Киев : «Сталь», 2007. — 605 с.
3. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности // *Электроника и связь. Тем. вып. «Проблемы электроники»*. Ч. 2. — Киев : Изд-во «Политехника», 2005. — С. 84 — 87.
4. *Мельник И. В., Тугай Б. А., Тугай С. Б.* Повышение стабильности работы электромагнитного натекаателя в системе автоматического управления током газоразрядной пушки // *Электроника и связь*. — 2002. — № 14. — С. 172—175.
5. *Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.* Электронно-лучевые технологии. — М. : Энергия, 1980. — 528 с.
6. *Denbnovetsky S. V, Melnik V. I., Melnik I. V., Tugay B. A.* Investigation of Forming of Electron Beam in Glow Discharge Electron Guns with Additional Electrode // XVIII-th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (XVIII ISDEIV). August 17—21, 1998. The Netherlands, Proceedings. Vol. 2. — Eindhoven Technical University Edition, 1998. — P. 637 — 640.
7. *Мельник И. В., Тугай С. Б.* Моделирование геометрии границы анодной плазмы в триодных электродных системах высоковольтного тлеющего разряда. // *Электрон. моделирование*. — 2012. — **34**, № 1. — С. 15—28.
8. *Новиков А. А.* Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
9. *Denbnovetsky S. V., Felba J., Melnik V. I., Melnik I. V.* Model Of Beam Formation in a Glow Discharge Electron Gun with a Cold Cathode // *Applied Surface Science*. — 1997. — **111**. — P. 288—294.
10. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда: Учеб. руководство. — М. : Наука, 1987. — 592 с.
11. *Грановский В. Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. — М.: Наука, 1971. — 544 с.
12. *Мельник И. В.* Классификация моделей электронно-оптических систем с точки зрения методологии САПР // *Электроника и связь*. — 2007. — **37**, № 2. — С. 20—31.
13. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М. : Наука, 1981. — 720 с.

Поступила 02.07.12

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.

ТУГАЙ Сергей Борисович, аспирант кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончил в 2002 году. Область научных исследований — моделирование и проектирование электронно-лучевых технологических устройств, системы управления электронно-лучевым технологическим оборудованием.