

УДК 537.533

Моделирование вольт-амперных и энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда

И.В. Мельник

В работе приведены аналитические соотношения для расчета энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Проведенные теоретические оценки основаны на анализе баланса заряженных частиц в анодной плазме с учетом условия самостоятельности горения ВТР. Основным достоинством предлагаемой модели является то, что уравнения, полученные для размера анодной плазмы и для концентрации ионов в ней, имеют аналитические решения. Это позволяет проводить предварительные количественные и качественные оценки энергетики ВТР на начальном этапе проектирования источников электронов. В работе также приводятся простые аналитические соотношения для расчета токов основного и вспомогательного разрядов и энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР.

PACS: 41.85.— p; 41.75.— i

Ключевые слова: моделирование, тлеющий разряд, источник электронов, высоковольтный.

Введение

Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с анодной плазмой в настоящее время находят широкое применение в машиностроении, в электронной промышленности, в приборостроении, в металлургии и в других отраслях промышленности при выполнении различных термических технологических операций в низком и среднем вакууме. В частности, с помощью электронных пушек ВТР можно эффективно осуществлять такие термические операции, как высокоскоростная сварка тонкостенных изделий, нанесение композитных покрытий в среде активных или инертных газов при пониженном давлении, высокопроизводительный вакуумный переплав тугоплавких металлов с целью их рафинирования, отжиг малогабаритных изделий [1–3].

Основными технико-экономическими преимуществами технологических источников электронов на основе ВТР по сравнению с традиционно используемыми термокатодными источниками и с другими методами термического и радиационного воздействия на вещество являются следующие [1, 2].

1. Возможность проведения технологических операций в низком и среднем вакууме в среде раз-

личных технологических газов, включая активные и инертные, в зависимости от требований технологического процесса.

2. Относительная конструктивная простота и дешевизна источников электронов ВТР и технологического оборудования на их основе.

3. Относительная простота используемых откатных средств.

4. Относительно высокая стабильность работы электронных пушек ВТР и высокое качество изготавливаемых изделий при необходимости проведения технологической операции в среде активных газов, например в кислородной среде.

5. Относительная простота управления мощностью формируемого электронного пучка путём автоматического регулирования давления в камере источника электронов ВТР при неизменном ускоряющем напряжении [4].

Тем не менее, несмотря на указанные преимущества, существующие газодинамические системы управления током пучка, которые используются для диодных источниках электронов ВТР, часто не удовлетворяют повышенным требованиям современных электронно-лучевых технологий [2, 3, 5]. Это обусловлено инерционностью газодинамических процессов, вследствие которой автоматическое регулирование тока электронного пучка за счет изменения давления в разрядном промежутке осуществляется достаточно медленно. Как показали проведенные теоретические и экспериментальные исследования, обычно постоянная времени регулирования в газодинамических системах управления составляет более

Мельник Игорь Витальевич, доцент.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».

Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37, корп. 12.

Тел: 454–95–03. E-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 15 августа 2013 г.

© Мельник И.В., 2013

0,1 с [4]. Такие большие времена регулирования в ряде случаев 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 оборудования и повышенная стабильность энергетических параметров формируемого электронного пучка. Только при выполнении этих требований удаётся получать высококачественные изделия в условиях массового производства, и именно за счет этого электронно-лучевое оборудование становится эффективным [3, 5]. Отсутствие эффективных систем управления током электронного пучка в некоторой степени сдерживает внедрения в промышленность технологических источников электронов ВТР, несмотря на все описанные выше их преимущества.

В связи с вышесказанным проектировщики электронно-лучевого технологического оборудования в последнее время проявляют большой интерес к триодным источникам электронов ВТР, в которых управление током электронного пучка осуществляется электрическим способом, а именно, за счет изменения потенциала на управляющем электроде [6]. Такой способ управления является значительно более быстродействующим, чем газодинамическое управление. Как показали проведенные экспериментальные исследования, при использовании электрического управления средняя величина постоянной времени регулирования тока разряда может составлять около десятков микросекунд [6].

Проблема состоит в том, что сложные и разнообразные физические процессы, протекающие в разрядном промежутке ВТР и связанные с элементарными и коллективными взаимодействиями заряженных частиц, в настоящее время недостаточно хорошо изучены и их сложно описывать математически. Это не позволяет проектировщикам на этапе предварительной разработки источников электронов использовать современные средства компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования. Однако математическое обеспечение современных программных комплексов, в частности, системы научно-технических расчетов MatLab, позволяет писать специализированное программное обеспечение, предназначенное для моделирования технологических источников электронов ВТР. Основные особенности программной реализации таких математических моделей в системе MatLab рассматривались в работе [7].

Существующие в настоящее время программные комплексы, предназначенные для моделирования электронно-лучевых устройств с плазменными эмиттерами, позволяют решать самосогласованную задачу о равновесии границы плазмы в электрическом поле [16–18]. Однако в этих системах не учтены важные физические особенности горения ВТР, в частности, нагрев анодной плазмы электронным пучком. Кроме того, недостатком подобных программных комплексов является большое время счета самосогласованной электронно-оптической задачи, даже для одного варианта электродной системы. Поэтому исследование физических процессов в ВТР и формирование математической модели для триодных источников электронов является актуальной научно-технической проблемой.

В связи с этим важной и актуальной задачей является создание простой и адекватной физико-математической модели для триодных источников электронов ВТР. Поэтому целью данной статьи является исследование физических процессов, протекающих в триодном разрядном промежутке ВТР, а также разработка математической модели, позволяющей оценить энергетические параметры формируемого электронного пучка.

Геометрия моделируемой электродной системы ВТР и анализ процессов взаимодействия заряженных частиц в триодном высоковольтном разрядном промежутке

Для оценки токов основного и вспомогательного разрядов в триодной электродной системе ВТР и баланса энергии в разрядном промежутке необходимо определить концентрацию ионов в анодной плазме, температуру электронов в ней и её объём. Для решения этой задачи необходимо записать и решить уравнение баланса ионов в анодной плазме с учетом особенностей геометрии моделируемого триодного высоковольтного разрядного промежутка и протекающих в нём физических процессов. Из теории ВТР известно, что анодная плазма образуется в результате ионизации газа несколькими группами электронов [8]. В связи с этим дальнейший анализ моделируемой электродной системы будем проводить, рассматривая ионизационные процессы в анодной плазме ВТР с учетом зажигания несамостоятельного вспомогательного разряда. Для упрощения теоретического анализа ограничимся рассмотрением аксиально-симметричной электродной системы ВТР с плоским катодом, цилиндрическим анодом и кольцевым вспомогательным электродом. Аналогичная модель электродной системы рассматривалась в работах [9, 10].

Параметры ионизации газа и диффузии ионов из плазмы в уравнении (1) определяются

$$z_{\sigma} = \frac{j_{\text{ек}} d_n p_{a0} A_i U_{\text{уск}}^{-a_i}}{e} \left(1 + \eta_i \left(1 - f \left(1 - d_n p_{a0} Q_{ep0} \right) \right) \eta_U^{-a_i} k_e \right),$$

$$z_M = 0,25 d p_{a0} \alpha_i n_e N_0 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \left(U_i + \frac{2kT_e}{e} \right) \exp \left(-\frac{eU_i}{kT_e} \right),$$

$$z_d = \frac{\pi^2 n_i \mu_{i0} kT_e}{d p_{a0} e}, \quad z_p = \frac{\pi^3 n_i \mu_{i0} \gamma d_o U_p e^4 \ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_{\delta} + kT_e)^3}{\pi p_{a0}}} \right)}{2,25 d kT_e (eU_{\delta} + kT_e)},$$

где $j_{\text{ек}}$ — плотность тока электронов на поверхности катода, n_e — концентрация электронов в плазме, T_e — температура электронов в плазме с учётом её нагрева электронным пучком, N_0 — постоянная Лошмидта, η_i и η_U — коэффициенты отражения электронов от анода ВТР по току и по энергии соответственно, f — коэффициент прозрачности анода, γ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности анода ВТР, U_i — потенциал ионизации газа, μ_{i0} — подвижность ионов в анодной плазме для данного рода газа, k_e — коэффициент удлинения траекторий электронов, Q_{ep0} — сечение рассеяния электронов на ионах остаточно-

из следующих соотношений [8–10]:

го газа, α_i — эмпирическая постоянная для данного газа, A_p, a_i — полуэмпирические коэффициенты.

Расчет положения границы анодной плазмы

Уравнение самостоятельности горения ВТР можно записать в следующем виде [8–10]:

$$n_i = \frac{j_{\text{ек}} \sqrt{\frac{kT_e}{2m_e}}}{e \left(A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} + 1 \right)}. \tag{3}$$

где m_e — масса электрона, e — его заряд. Тогда система уравнений (1) — (3) является полной и замкнутой, и уравнение баланса ионов в анодной плазме (1) можно переписать в таком виде [9, 10]:

$$\frac{\pi^2 \mu_{i0} (kT_e + eU_p)}{(p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d_o}{\lambda_e} \right) - 3(kT_e + eU_p) \times N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_p)}{2\pi m_e}} \exp \left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right) =$$

$$= A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} \left(A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} + 1 \right) \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \times \left(1 + \eta_i \left(1 - f \left(1 - d p_{a0} Q_{ep0} \right) \right) \eta_U^{-a_i} k_e \right). \tag{4}$$

Полученное уравнение (4) является кубическим относительно переменной d_n . Проведя замену переменных и используя формулу Кордано,

решение этого уравнения можно записать следующим образом [9, 10]:

$$R_1 = A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} \left(A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} + 1 \right) \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}}, \quad R_2 = f \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e,$$

$$R_3 = 3(kT_e + eU_p) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}} \exp \left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right),$$

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

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

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

$$d = y - \frac{C_y}{3}, \quad \lambda_e = \frac{2,25 kT_e (eU_p + kT_e)^2}{\pi e^4 p_{a0} \ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_p + kT_e)^3}{\pi p_{a0}}} \right)}$$

где λ_e — длина свободного пробега электронов в анодной плазме, $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, p, q, u, v$ и y — вспомогательные переменные, C_y и D_y — коэффициенты решаемого кубического уравнения, D — дискриминант этого уравнения.

Анализ зависимости положения границы анодной плазмы от ускоряющего напряжения, напряжения горения вспомогательного разряда и от приведенного давления в разрядном промежутке был проведен в работе [9]. Расчеты в соответствии с соотношениями (4, 5) проводились для алюминиевого катода и медного анода, при этом в качестве рабочего газа рассматривался азот. В соответствии с этим при проведении расчетов были взяты такие коэффициенты [9, 10]: $U_i = 18$ В; $T_e = 800$ К; $\alpha_i = 0,343$; $\alpha_i = 1,452$; $\eta_i = 0,7$; $\eta_U = 0,95$; $f = 0,99$; $\mu_{i0} = 1,27 \cdot 10^{-4}$ м²/В·с; $Q_{ep0} = 5,3 \cdot 10^{-19}$ м²; $A_i = 3,8 \cdot 10^{-6}$; $\gamma = 4,6$. Выбранный диапазон рабочих давлений составлял $p_{a0} = 0,1$ – 1 Па при ускоряющих напряжениях $U_{\text{уск}} = 5$ – 30 кВ и напряжениях горения вспомогательного разряда $U_p = 30$ – 100 В. При этом геометрические размеры моделируемой системы составляли: $l = 0,07$ м, $d_{\text{поп}} = 0,035$ м и $r_k = 0,025$ м.

Полученная расчетная зависимость положения границы анодной плазмы относительно катода от напряжения горения вспомогательного разряда и от приведенного давления в разрядном промежутке при ускоряющем напряжении 15 кВ приведена на рис 2. Знание объема анодной плазмы позволяет определить концентрацию ионов в ней и, соответственно, рассчитать ток основного и вспомогательного разряда, а также энергетическую

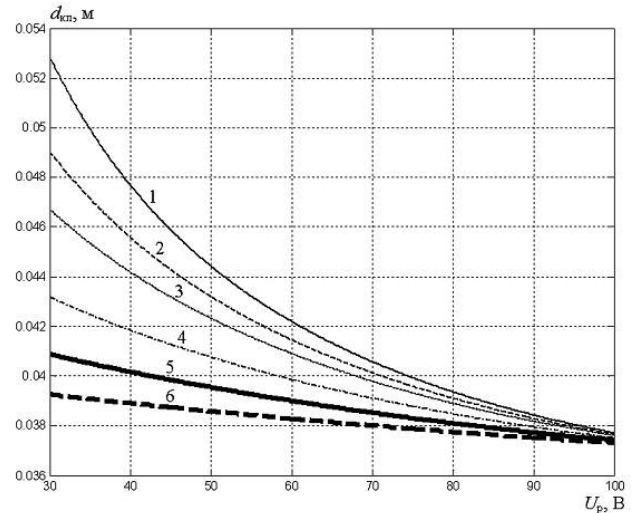


Рис. 2. Зависимость положения границы анодной плазмы относительно катода от напряжения горения вспомогательного разряда и от давления в разрядном промежутке. Ускоряющее напряжение: $U_{\text{уск}} = 15$ кВ. 1 — $p_{a0} = 0,1$ Па, 2 — $p_{a0} = 0,2$ Па, 3 — $p_{a0} = 0,3$ Па, 4 — $p_{a0} = 0,5$ Па, 5 — $p_{a0} = 0,6$ Па, 6 — $p_{a0} = 0,7$ Па

эффективность триодного источника электронов. Более подробный анализ зависимости положения границы анодной плазмы от параметров основного и вспомогательного разряда проведен в работе [9].

Расчет тока основного и вспомогательного разряда

Зная продольный размер анодной плазмы d_n , определяемый из соотношений (5), можно найти концентрацию ионов в анодной плазме ВТР n_i из соотношений работы [10]:

$$C_1 = A_i U_{\text{уск}}^{-\alpha_i} (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-\alpha_i}) \times (1 + \eta_i \eta_u^{-\alpha_i} (1 - f(1 - d_n p_{a0} Q_{ep0}))), C_4 = 3 N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_p)}{2\pi m_e}} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_n p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d_{\text{поп}}}{\lambda_e}\right) - C_4, C_3 = (kT_e + eU_p) \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p}\right) C_2, n_i = \frac{C_1}{C_3}$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 — вспомогательные переменные.

Тогда ток вспомогательного разряда определяется следующим образом [10]:

$$I_p = e n_i \pi r_{\text{поп}} (1 + \gamma) (r_{\text{поп}} + 2d) \sqrt{\frac{2eU_p}{m_i}}, \quad (7)$$

$$r_{\text{поп}} = \frac{d_{\text{поп}}}{2}$$

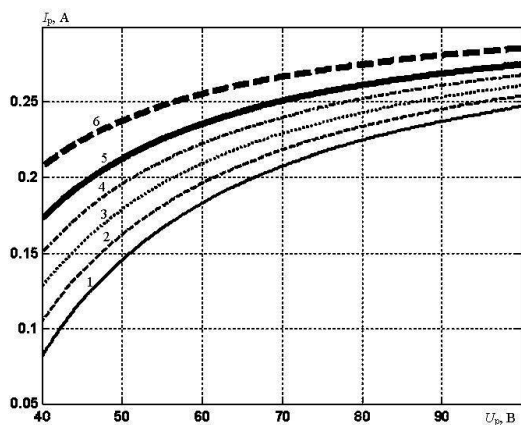
где m_i — масса ионов рабочего газа. Ток основного разряда определяется из соотношения:

$$I_e = r_k^2 n_i (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-\alpha_i}) \sqrt{\frac{\pi e d_n (kT_e + eU_p)}{2m_e}}. \quad (8)$$

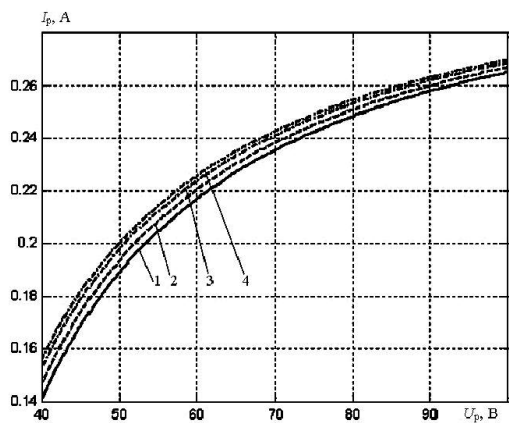
Расчитанные вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда для различных значений ускоряющего напряжения и приведенного давления в разрядном промежутке приведены на рис. 3, а вольт-амперные характеристики основного разряда — на рис. 4.

Оценка энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда

В работах [8, 13], путём анализа баланса энергии на электродах и в объёме разрядного про-

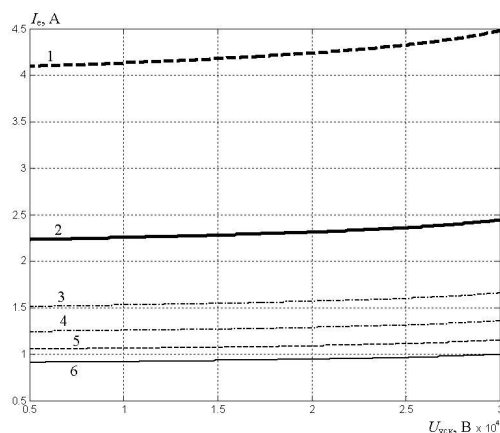


а)

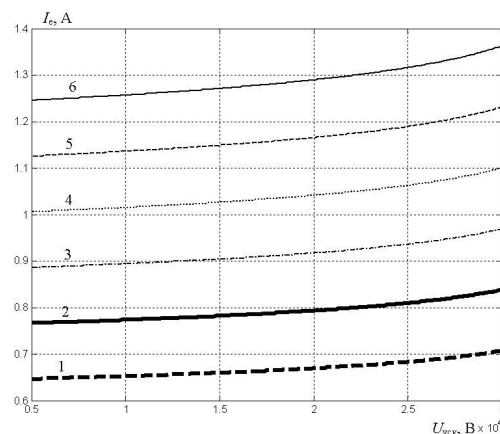


б)

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда для различных приведенных давлений в разрядном промежутке (а) и ускоряющих напряжений (б). а) $U_{укс} = 15$ кВ; 1 — $p_{a0} = 0,2$ Па, 2 — $p_{a0} = 0,3$ Па, 3 — $p_{a0} = 0,4$ Па, 4 — $p_{a0} = 0,5$ Па, 5 — $p_{a0} = 0,6$ Па, 6 — $p_{a0} = 0,7$ Па. б) $p_{a0} = 0,5$ Па; 1 — $U_{укс} = 5$ кВ, 2 — $U_{укс} = 10$ кВ, 3 — $U_{укс} = 20$ кВ, 4 — $U_{укс} = 30$ кВ



а)



б)

Рис. 4. Вольт-амперные характеристики основного разряда для различных напряжений горения вспомогательного разряда (а) и приведенных давлений в разрядном промежутке (б). а) $p_{a0} = 0,5$ Па; 1 — $U_p = 90$ В, 2 — $U_p = 75$ В, 3 — $U_p = 60$ В, 4 — $U_p = 50$ В, 5 — $U_p = 40$ В, 6 — $U_p = 30$ В. б) $U_p = 30$ В; 1 — $p_{a0} = 0,1$ Па, 2 — $p_{a0} = 0,12$ Па, 3 — $p_{a0} = 0,15$ Па, 4 — $p_{a0} = 0,18$ Па, 5 — $p_{a0} = 0,2$ Па, 6 — $p_{a0} = 0,25$ Па

межутка, было показано, что энергетическая эффективность диодных источников электронов ВТР определяется из соотношений:

$$\eta_d = 1 - \frac{2 + k_d(1 + 2k_d\gamma\mu_{i0})}{2k_d(1 + \gamma k_d)}, \quad k_d = lp_{a0}\overline{Q_{i0}}, \quad (9)$$

где $\overline{Q_{i0}}$ — усреднённое сечение перезарядок ионов на атомах остаточного газа. Проведенные теоретические оценки энергетической эффективности диодных источников электронов ВТР показали, что потери мощности в объёме разрядного промежутка из-за невысоких давлений минимальны, и ими можно пренебречь, а суммарные потери мощности на катоде и на аноде составляют не более 10% [13]. Тогда, зная токи основного и вспомогательного разрядов, можно рассчитать энергетическую эффективность триодных источников ВТР, с учетом соотношений (7) — (9), следующим образом:

$$\eta_T = \frac{\eta_d}{1 + \frac{\eta_d U_p I_p}{U_{укс} I_e}}. \quad (10)$$

Зависимости энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР от ускоряющего напряжения, приведенного давления в разрядном промежутке и от напряжения горения вспомогательного разряда, рассчитанные по формулам (5—10), приведены на рис. 5. Из приведенных расчетных зависимостей видно, что при невысоких давлениях в разрядном промежутке энергетическая эффективность триодных источников электронов ВТР близка к соответствующей величине для диодных систем и составляет более 80%.

Анализ полученных результатов моделирования

Из проведенного теоретического анализа и полученных графических зависимостей можно сделать вывод о том, что изменение давления в разрядном промежутке оказывает значительно более существенное влияние на токи основного и вспомогательного разрядов, чем изменение ускоряющего напряжения. Поэтому для надёжной

стабилизации тока формируемого электронного пучка необходимо также стабилизировать величину давления в разрядной камере источников электронов.

Полученные результаты моделирования сравнивались с расчетными данными для диодных систем ВТР, а также с экспериментальными данными, полученными для триодных систем. Например, как видно из расчетных данных, приведенных на рис. 5, зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения носит степенной характер, однако при этом крутизна полученной функциональной зависимости небольшая, т. е. показатель степени невысокий. Это полностью совпадает с известными теоретическими данными для диодных систем ВТР, для которых зависимость тока разряда от ускоряющего напряжения и приведенного давления в разрядном промежутке достаточно точно описывается выражением [8, 14]:

$$I_p = C_p U_{\text{уск}}^m p_{a0}^k, \quad (11)$$

где C_p , m и k — эмпирические константы, зависящие от материала катода и рабочего газа, причем значения коэффициентов m и k лежат в диапазоне [1; 2]. Обычно для реальных электродных систем эти коэффициенты подбираются путём аппроксимации экспериментальных данных. Соответствующая методика аппроксимации была предложена в работе [14].

Очевидно, что рассчитанные вольт-амперные характеристики триодного разрядного промежутка ВТР, приведенные на рис. 4, при соответствующем подборе коэффициентов также могут быть аппроксимированы степенными зависимостями с невысоким положительным показателем степени, аналогичными (11). Сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными показало, что их расхождение составляет не более 30–40%, что для моделей газоразрядных систем является очень хорошим результатом. При этом во всём исследованном диапазоне ускоряющих напряжений, управляющих напряжений и рабочих давлений наблюдается качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Несомненным достоинством предлагаемой модели является её простота, универсальность и экономичность. Такая модель позволяет проводить предварительные оценки энергетических параметров электронного пучка на начальном этапе проектирования источника электронов.

Оценки энергетической эффективности триодных источников электронов показали, что в диапазоне невысоких рабочих давлений она не сильно отличается от эффективности диодных систем и составляет более 80%. Однако при этом посто-

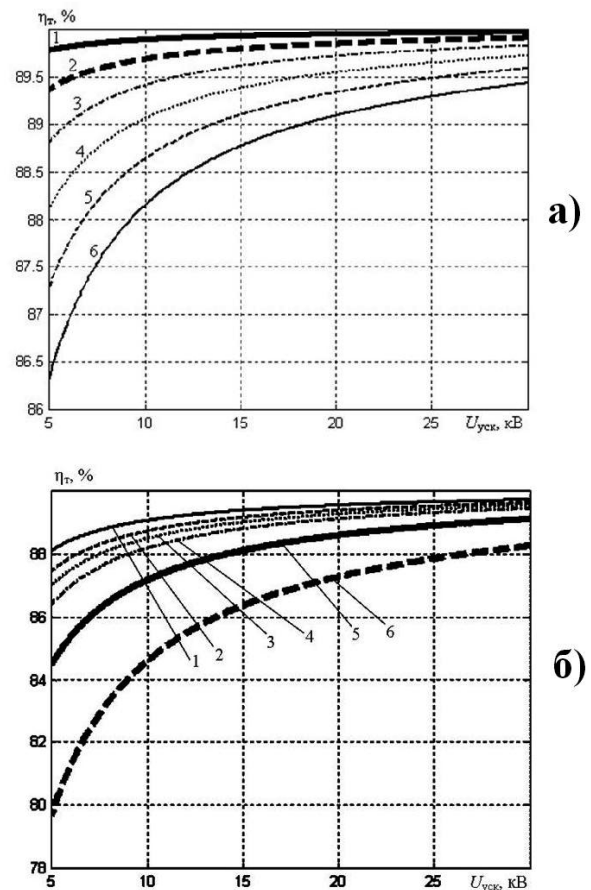


Рис. 5. Рассчитанная зависимость энергетической эффективности триодного источника электронов от ускоряющего напряжения для различных напряжений горения вспомогательного разряда (а) и приведенных давлений в разрядном промежутке (б). а) $p_{a0} = 0,5$ Па; 1 — $U_p = 80$ В, 2 — $U_p = 70$ В, 3 — $U_p = 60$ В, 4 — $U_p = 50$ В, 5 — $U_p = 40$ В, 6 — $U_p = 30$ В. б) $U_p = 50$ В; 1 — $p_{a0} = 0,2$ Па, 2 — $p_{a0} = 0,4$ Па, 3 — $p_{a0} = 0,5$ Па, 4 — $p_{a0} = 0,6$ Па, 5 — $p_{a0} = 0,8$ Па, 6 — $p_{a0} = 1$ Па

янная времени регулирования тока электронного пучка для триодных электродных систем значительно меньше.

В целом, из полученных результатов моделирования видно, что при изменении напряжения на управляющем электроде от 30 до 100 В, при стабильном давлении в разрядном промежутке, ток электронного пучка возрастает примерно в 4 раза. При этом к.п.д. триодных источников электронов уменьшается всего на несколько процентов. Это, с учетом малой постоянной времени регулирования, свидетельствует о высокой эффективности электрического управления параметрами формируемого электронного пучка и о потенциальной возможности использования этого способа управления в современном промышленном электронно-лучевом технологическом оборудовании [5, 15].

Таким образом, использование источников электронов ВТР триодного типа позволит значительно расширить технологические возможности электронно-лучевого оборудования. Особенно

перспективным является исследование возможностей работы триодных источников электронов ВТР в импульсном режиме.

Заключение

Проведенные теоретические исследования показали, что при электрическом управлении ток электронного пучка, при постоянном давлении в разрядной камере триодных источников электронов ВТР, может увеличиваться в несколько раз. При этом к.п.д. источника электронов составляет более 80%, а постоянная времени регулирования тока пучка лежит в диапазоне десятков-сотен микросекунд. Другими словами, при использовании триодных источников электронов ВТР рабочее давление в камере источника может устанавливаться в соответствии с требованиями технологического процесса, а требуемая мощность электронного пучка достигается путём подбора величины управляющего напряжения. Это значительно расширяет возможности применения источников электронов ВТР в современных электронно-лучевых технологиях [3, 5, 15]. Ещё более широкие возможности предоставляются при использовании импульсных режимов работы источников электронов ВТР, однако вопрос о возможности их работы в импульсном режиме и о возможных временах переключения тока электронного пучка является предметом отдельных теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные в работе результаты моделирования имеют большое теоретическое и прикладное значение. Знание продольного размера анодной плазмы и концентрации ионов в ней позволяет анализировать также самосогласованную электронно-ионную оптику ВТР [11, 12]. Развитие и совершенствование предложенных в данной работе средств моделирования позволит оценить не только статические, но и динамические процессы в разрядном промежутке ВТР и исследовать возможность работы источников электронов ВТР в импульсном режиме в составе электронно-лучевого оборудования с учётом требований конкретных технологических процессов.

Посвящая эту работу светлой памяти доктора технических наук, профессора кафедры микроэлектроники Винницкого национального технического университета Новицкого Анатолия Александровича, который в 70–80-е годы XX века один из первых создал математическую теорию высоковольтного тлеющего разряда и получил важные аналитические соотношения для оценки параметров анодной плазмы и баланса энергии в диодном разрядном промежутке.

Литература

1. Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках.— М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности. / Электроника и связь, тематический выпуск «Проблемы электроники», часть 2, 2005.— Киев, Издательство «Политехника».
3. Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б., и др. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве.— Киев: «Сталь», 2007.
4. Мельник И.В., Тугай Б.А., Тугай С.Б. // Электроника и связь. 2002. № 14. С. 172
5. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевые технологии.— М.: Энергия, 1980.
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 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (XVIII ISDEIV), August 17–21, 1998, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings, vol.2.— Eindhoven Technical University Edition.
7. Мельник И.В., Тугай С.Б. // Электронное моделирование. 2010. Т. 32. № 6. С. 31
8. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. Мельник И.В., Тугай С.Б. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2012. Т. 55. № 11. С. 50
10. Мельник И.В., Тугай С.Б. // Электронное моделирование. 2012. Т. 34. № 5. С. 103.
11. Мельник И.В. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2005. Т. 48. № 6. С. 61
12. Мельник И.В., Тугай С.Б. // Электронное моделирование. 2012. Т. 34. № 1. С. 15
13. Мельник И.В. // Электроника и связь. 2004. Т. 9. № 21. С. 14.
14. Мельник И.В. // Вестник херсонского национального технического университета. 2009. Вып. 2 (35). С. 299.
15. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Онищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы.— М.: Наука, 1986.
16. Козырев А.Н., Свешников В.М. // Вестник херсонского национального технического университета. 2013. Вып. 2 (47). С. 163.
17. Свешников В.М., Залесский В.Г., Петрович О.Н. // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 40
18. Sveshnikov V.M. // Электротехника и электроника. 2012. № 5–6. С. 31

**Simulation of volt-ampere and energy characteristics
of the electron triode sources at high-voltage glow discharge**

I. V. Melnik

Kiev Polytechnic Institute
37 Pobeda av., Kiev, 03056, Ukraine.
E-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua

The simulation of volt-ampere and energy characteristics of the electron triode sources at high-voltage glow discharge has been made in this work. The results of the research are presented in the article.

PACS: 41.85.— p; 41.75.— i

Keywords: simulation, glow discharge, electron source, high-voltage.

Bibliography — 18 references

Received August 15, 2013