
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.40.05.077>

УДК 537.525:004.942

И.В. Мельник, д-р техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского»,
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, кор. 12, 2203)
тел. (044) 4068292, (044) 2049505; e-mail: imelnik@phbme.kpi.ua),

А.В. Починок, канд. техн. наук
Учебно-научный ин-т информационных технологий и менеджмента
(Украина, 08201, Киевская обл., Ирпень, ул. Университетская, 31,
тел. (044) 4999362; e-mail: alina_pochynok@yahoo.com)

Обобщенная методика оценки и аппроксимации положения и формы границы анодной плазмы в электродных системах источников электронов высоковольтного тлеющего разряда

Описанная методика определения положения и формы границы анодной плазмы в диодных и триодных электродных системах источников электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) основана на фотографировании разрядного промежутка и методе компьютерного анализа яркости изображений. При моделировании самосогласованной электронно-ионной оптики источников электронов ВТР граница анодной плазмы рассматривается как источник ионов и как прозрачный для электронов электрод с потенциалом, близким к потенциалу анода. Приведены карты яркости изображений разрядного промежутка для диодных и триодных электродных систем и описаны особенности алгоритмов анализа этих изображений. Используются простые аналитические соотношения для описания геометрии границы плазмы в диодных и триодных электродных системах ВТР и для моделирования самосогласованной электронно-ионной оптики электродных систем ВТР. Расхождение между расчетными результатами моделирования и экспериментальными данными для моделируемых электродных систем составило 20—25 %.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд, анодная плазма, компьютерный анализ изображений, распознавание образов.

Технологические источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) часто применяются в различных отраслях промышленности при реализации технологических операций, связанных с нагревом изделий, включая высокопроизводительную сварку, пайку, отжиг малогабаритных изделий, нанесение покрытий сложного химического состава, а также вакуумный переплав тугоплавких металлов, сплавов и неорга-

© И.В. Мельник, А.В. Починок, 2018

нической керамики для их очистки от вредных примесей. В настоящее время источники электронов ВТР применяются в таких важных отраслях, как электронная промышленность, приборостроение, машиностроение и металлургия [1—6]. При этом несомненными преимуществами источников электронов ВТР над традиционными источниками с нагреваемыми катодами являются относительная простота конструкции источника и вспомогательного вакуумного технологического оборудования, возможность проведения технологических операций в низком и среднем вакууме в среде различных технологических газов, включая активные и инертные, а также возможность эффективного управления мощностью формируемого электронного пучка с использованием газодинамических и электрических систем управления [7].

Однако дальнейшее интенсивное развитие и внедрение в промышленность этих перспективных источников электронов в некоторой степени сдерживается вследствие отсутствия эффективных средств их моделирования и автоматизированного проектирования. Это, прежде всего, обусловлено сложными и многообразными элементарными физическими процессами, протекающими в разрядном промежутке ВТР и на поверхностях электродов при физических условиях горения ВТР [1, 8]. Основными из этих процессов являются: ионизация остаточного газа ускоренными электронами пучка и медленными, отраженными от анода, электронами, эмиссия электронов с поверхности катода под действием ее бомбардировки ускоренными ионами газа и перезарядки ионов на атомах остаточного газа.

В частности, в результате ионизации газа медленными электронами, отраженными от анода, в разрядном промежутке ВТР возникает анодная плазма с ярко выраженной границей, которая при анализе самосогласованной электронно-ионной оптики ВТР обычно рассматривается как источник ионов и прозрачный для электронов электрод [8]. В общем случае геометрическое положение точек границы анодной плазмы определяется как место равновесия давления электрического поля со стороны области катодного падения потенциала и кинетического давления электронного газа со стороны области анодной плазмы. Аналитически это условие равновесия описывается достаточно сложной системой алгебро-дифференциальных уравнений [1, 9—11]:

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{r\in\Gamma} = \sqrt{\frac{n_e k T_e}{\varepsilon_0 A(\varphi^*)}}, \quad A(\varphi^*) = \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + \frac{2q\varphi^*}{kT_e}} + e^{-\frac{2q\varphi^*}{kT_e}} - 2 \right), \quad (1)$$

где n_e — концентрация электронов в плазме; T_e — их температура; q — заряд ионов плазмы; ε_0 — электрическая постоянная; k — постоянная

Больцмана; ϕ^* — приэлектродный потенциал, зависящий от состава используемого газа, значение которого лежит в пределах нескольких вольт.

Итерационное решение уравнения (1) для реальной геометрии электродных систем ВТР, даже при использовании современных компьютерных технологий, крайне затруднительно [9, 11]. Поэтому при решении практических инженерных задач для определения положения и формы плазменной границы в источниках электронов ВТР чаще всего используется комплексный теоретико-экспериментальный подход, основанный на фотографировании разрядного промежутка, на определении темных и светлых областей полученных фотографий с использованием методов компьютерного анализа изображений, и на аппроксимации полученных экспериментальных данных [8, 10, 11].

Постановка задачи. Рассмотрим конструктивную схему технологической электронно-лучевой установки с диодным источником электронов ВТР (рис. 1) [1, 8]. В полый камере технологической электронной пушки 2, которая является также анодом разряда, зажигается ВТР. Отличительной особенностью триодных источников электронов ВТР является наличие дополнительного кольцевого электрода 10, который используется для зажигания вспомогательного низковольтного разряда. Назначением этого электрода является электрическое управление мощностью формируемого пучка [11]. Для проведения анализа, прежде всего, необходимо иметь яркостную карту изображений разрядного промежутка ВТР, которая в общем виде приведена на рис. 2.

Наличие подвижной границы анодной плазмы усложняет моделирование электронно-оптических свойств электродных систем ВТР и определение параметров формируемого электронного пучка. Граница плазмы является источником положительных ионов и в задачах моделирования рассматривается как прозрачный для электронов электрод. Положение границы анодной плазмы относительно катода в значительной степени зависит от параметров разряда, из которых наиболее важными являются объем разрядного промежутка, давление в нем и ускоряющее напряжение на катоде [11, 12]. Самосогласованная электронно-оптическая задача расчета распределения электрического поля в разрядном промежутке ВТР и определения геометрии границы анодной плазмы является крайне громоздкой с вычислительной точки зрения даже для современных компьютеров и кластерных компьютерных систем. Поэтому для решения этой задачи используют метод фотографирования разрядного промежутка и последующий компьютерный анализ яркости полученных фотографий методом распознавания образов [8, 13, 14]. После этого, на основе полученной информации о положении анодной плазмы относительно катода, строят компьютерные базы данных.

В соответствие с приведенной на рис. 2 картой яркости выделяют пять областей ВТР, имеющих различное свечение [10]:

1. Область, затененная электродами, имеет минимальную нулевую яркость.

2. Прикатодная темная область, через которую не проходят электроны пучка, имеет первый уровень яркости.

3. Область анодной плазмы, которую не пересекает электронный пучок, имеет второй уровень яркости.

4. Прикатодная область, через которую проходят ускоренные электроны пучка, имеет третий уровень яркости.

5. Область анодной плазмы, через которую проходят ускоренные электроны пучка, имеет четвертый, максимальный уровень яркости.

Очевидно, что увеличение яркости свечения разряда в областях 3 и 4 обусловлено повышенным уровнем ионизации газа в области прохождения электронного пучка. Увеличение яркости разряда в областях 2 и 4, соответствующих объему, занимаемому анодной плазмой, обусловлено дополнительной активацией газа медленными отраженными от анода электронами [10, 11]. Очевидно также, что при зажигании вспомогательного управляющего разряда изменяется концентрация заряженных частиц в анодной плазме и соответственно положение ее границы [1, 8, 10—12].

Обобщенная методика определения положения и формы границы анодной плазмы в электродных системах ВТР. В соответствие с поставленной задачей выделяют следующие основные этапы, связанные с определением геометрии анодной плазмы в электродных системах ВТР [10, 11]:

1. Приближенная оценка положения границы анодной плазмы на основе одномерной модели разрядного промежутка. Соответствующие методы оценки параметров анодной плазмы основаны на решении уравнения баланса заряженных частиц в разрядном промежутке с учетом условия самосогласованности горения ВТР. Методы вычисления положения плазменной границы для одномерной модели разрядного промежутка ВТР приведены в работах [9—11].

2. Изготовление экспериментального макета источника электронов и фотографирование разрядного промежутка.

3. Анализ полученных фотографий и определение точек границы плазмы в области увеличения яркости свечения разряда.

4. Аппроксимация полученных точек границы плазмы с использованием известных аналитических соотношений.

5. Определение зависимости геометрии границы плазмы от режимов горения разряда и построение на основе этих зависимостей компьютерных баз данных.

Рис 1. Конструктивная схема электронно-лучевой технологической установки с источником электронов ВТР: 1 — катод; 2 — анод; 3 — анодная плазма; 4 — граница плазмы; 5 — анодная диафрагма; 6 — магнитная линза для фокусировки пучка; 7 — электронный пучок; 8 — технологическая камера; 9 — высоковольтный изолятор; 10 — кольцевой электрод для зажигания низковольтного вспомогательного разряда; 11 — низковольтный изолятор; 12 — обрабатываемое изделие

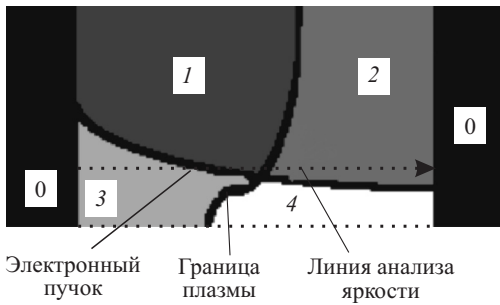
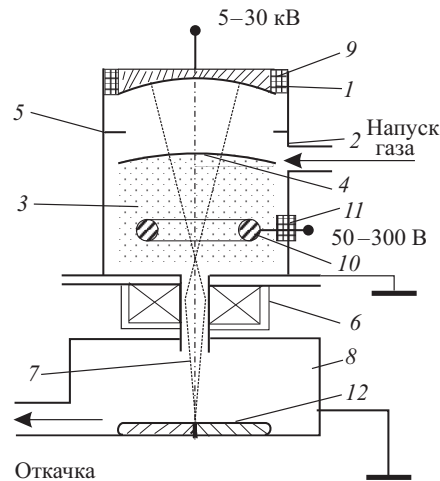


Рис 2. Карта яркости фотографий диодного промежутка ВТР: 0 — минимальная нулевая яркость области 1; 1 — яркость области 2; 2 — яркость области 3; 3 — яркость области 4; 4 — максимальная яркость области 5

6. Использование полученных зависимостей для моделирования самоогласованной электронно-ионной оптики электродных систем ВТР.

Рассмотрим последовательно методы решения поставленных задач для диодных и триодных электродных систем ВТР.

Приближенная оценка положения границы анодной плазмы на основе одномерной модели разрядного промежутка в диодных и триодных электродных системах ВТР. Для одномерной модели высоковольтного разрядного промежутка расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы $d_{к.п}$ можно определить аналитически [11, 12]:

$$d_{к.п} = l - \frac{I_p}{Q_{e0} \left(\chi\gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5\mu_{i0}kT_e}{R^2 p_{a0}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{kT_i}}}, \quad (2)$$

где I_p — ток разряда; l и R — длина и поперечный размер разрядного промежутка; p_{a0} — приведенное давление в области горения разряда; m_e и

m_i — масса электрона и масса ионов газа; $\overline{Q_{e0}}$ — усредненное значение коэффициента поперечного сечения перезарядки для электронов; χ — коэффициент среднего удлинения траекторий электронов в области анодной плазмы; γ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии; T_e и T_i — температура электронов и ионов в плазме; μ_{i0} — подвижность ионов в плазме.

Можно предположить, что для реальных электродных систем со сферическим катодом и коническим анодом граница анодной плазмы имеет форму сферы и концентрична поверхности катода при больших и средних значениях тока разряда [11, 12]. Тогда для аксиально-симметричных систем ВТР с полым анодом (см. рис. 1) расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы можно рассчитать исходя из того, что ее объем зависит только от давления и электрических режимов разряда. Для электродных систем ВТР с цилиндрическими и коническими анодами получены аналитические соотношения [15], связывающие расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы с геометрическими параметрами электродов. Эти соотношения основаны на использовании для оценки объема, занимаемого анодной плазмой, уравнения баланса силы электрического поля, действующей со стороны области катодного падения потенциала, и кинетического давления электронного газа в ионизированной плазме. Полученная математическая модель сводится к кубическому уравнению относительно размера анодной плазмы d_p , которое решается аналитически.

В работе [15] получены также аналогичные аналитические соотношения для триодных электродных систем ВТР с цилиндрическим анодом и кольцевым вспомогательным электродом. Рассчитанные зависимости расстояния от поверхности катода до границы анодной плазмы для различных режимов горения ВТР приведены в работах [10, 11].

Методика анализа яркости экспериментальных фотографий разрядного промежутка. Поскольку расстояния от катода до анодного отверстия $d_{к.а}$ и до анодной диафрагмы $d_{к.д}$ вдоль оси пушки всегда являются известными конструктивными параметрами (см. рис. 1), узловые точки границы плазмы легко определить по фотографии разрядного промежутка из следующего соотношения [10]:

$$d_{к.п}^p = \frac{d_{д.п}^\phi}{d_{к.а}^\phi} d_{к.а}^p + d_{к.д}^p, \quad (3)$$

где $d_{к.п}$ — расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы; $d_{д.п}^\phi$ — расстояние от границы анодной плазмы до анодной диафрагмы на

анализируемой фотографии; индексы p соответствуют реальным размерам системы, а индексы ϕ — размерам на фотографии.

Для реализации компьютерного метода определения геометрии границы плазмы фотографии разряда выполнены цифровым фотоаппаратом Nikon N900 или сканированы с разрешением 2500×2500 dpi в формате GIF (Graphic Interchange Format) или BMP (Bit Map Point) в 24-битовой цветовой палитре [14]. При этом яркость каждой дискретной точки фотографии описывается яркостью трех цветовых компонент — красной, зеленой и синей. Для записи яркости каждой точки используется 1 байт памяти, поэтому код яркости может изменяться от нуля для максимально темного цвета до 255 для максимально яркого цвета [13]. Итоговая яркость точки B_{Σ} определяется как среднее арифметическое яркостей ее составляющих [10]:

$$B_{\Sigma} = \frac{B_{\kappa} + B_{\text{с}} + B_{\text{з}}}{3}, \quad (4)$$

где B_{κ} , $B_{\text{с}}$ и $B_{\text{з}}$ — яркости красной, синей и зеленой компонент, заданные в относительных единицах. Яркость точек на фотографиях проанализирована вдоль горизонтальных линий, идущих от катода к аноду. Точки, соответствующие положению плазменной границы, определяются в местах увеличения суммарной яркости, соответствующих либо переходу от области 1 к области 2, либо от области 3 к области 4.

При таком анализе необходимо знать реальный размер фотографии по горизонтали и вертикали для осуществления корректного перехода с одной линии, вдоль которой анализируется яркость, на другую [10]. В итоге определение положения точек границы плазмы сводится к определению параметров $d_{\text{д.п}}^{\phi}$ и $d_{\text{к.а}}^{\phi}$ в соотношении (3). Поскольку при этом важны не размеры, а их отношение, достаточно определить число точек изображения на измеряемом отрезке.

Определенные трудности возникают вследствие того, что точки границы плазмы не всегда можно четко различить на фотографии. Поэтому сначала определяется область увеличения яркости, а искомая точка определяется как средняя точка области. Такой алгоритм известен в литературе как метод скользящей средней [14]. Если область на выбранной линии была слишком обширной для обнаружения искомой точки, то для достижения более корректного результата поиск повторяется на близлежащей соседней горизонтальной линии. Кроме того, для проверки точности результата используется нижняя часть фотографии. Алгоритм поиска узловых точек границы плазмы реализован на программном уровне и поиск точек осуществлялся автоматически. Одна из анализируемых фотографий разрядного промежутка представлена на рис. 3.

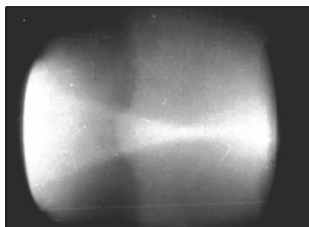


Рис. 3. Анализируемая фотография диодного разрядного промежутка ВТР: ускоряющее напряжение — 15 кВ; рабочее давление — 5 Па

Особенность анализа фотографий триодного разрядного промежутка ВТР состоит в том, что во избежание диффузионного рассеяния ионов плазмы в экспериментальных макетах триодных электродных систем ВТР используются проволочные каркасные электроды. Только используя такие прозрачные электроды, можно визуально наблюдать процесс горения ВТР и фотографировать разрядный промежуток [10]. Одна из полученных фотографий разрядного промежутка приведена на рис. 4, а соответствующая ей карта яркости — на рис. 5 [10].

С учетом указанных особенностей обрабатываемых изображений для триодных систем ВТР перед использованием описанного алгоритма определения положения точек границы анодной плазмы необходимо проведение специальной предварительной обработки первичного изображения. В процессе этой обработки автоматически удаляются темные линии, создаваемые проволоками вспомогательного электрода. Процесс предварительной обработки был реализован в два этапа [10]:

1. С использованием средств программирования проведена предварительная обработка полученного изображения, удалены темные линии, создаваемые проволоками вспомогательного электрода. Если в процессе сканирования изображения найдена точка, яркость которой меньше, чем заранее установленный порог яркости, то яркость этой точки заменяется яркостью предыдущей. Суть описанного алгоритма хорошо понятна из рис. 5.

2. Посредством транспонирования матрицы яркостей полученное изображение поворачивалось на 90 град против часовой стрелки. Далее обработка изображения выполнялась по стандартным алгоритмам поиска точек, соответствующих границе светлых и темных областей, и поиска оптимальной поверхности, описывающей границу плазмы, с использованием методов аппроксимации.

Аппроксимация границы плазмы для диодных и триодных систем ВТР. Аппроксимация найденных точек границы плазмы проведена с использованием математических функций, характер которых соответствует кривой, описывающей границу. Это позволило повысить точность аппроксимации и использовать полученные зависимости для расчета самосогла-

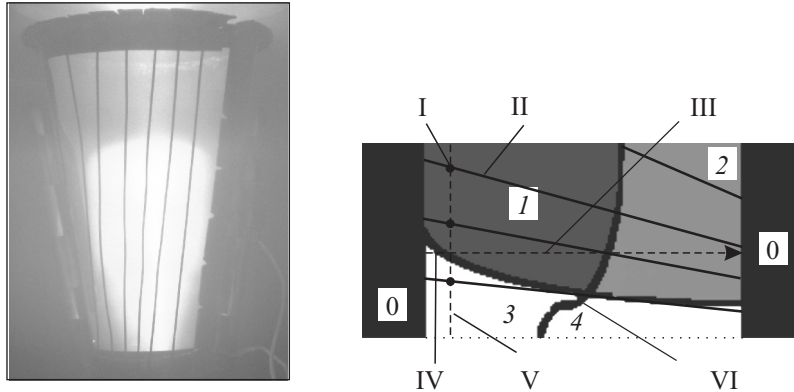


Рис. 4. Фотография разрядного промежутка в триодной электродной системе ВТР: ускоряющее напряжение — 15 кВ; рабочее давление — 1,5 Па; напряжение на вспомогательном электроде — 150 В

Рис. 5. Карта яркости фотографий разрядного промежутка для триодных электродных систем ВТР: I — удаляемые темные точки; II — проволоки электрода вспомогательного разряда; III — линии анализа яркости при считывании точек границы анодной плазмы; IV — электронный пучок; V — линия анализа яркости при удалении темных точек; VI — граница анодной плазмы

сованной электронно-ионной оптики ВТР. Для диодных систем ВТР использована зависимость $z(r)$, описывающая положения точек границы анодной плазмы [10]:

$$z(r) = A \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha}\right) + B, \quad (5)$$

где A, B, α — полуэмпирические коэффициенты, определяемые посредством аппроксимации полученных значений $z(r)$ в процессе обработки фотографии. Для аппроксимации геометрии границы анодной плазмы в триодных электродных системах ВТР использовано соотношение [10]

$$z(z) = A(Br^2 + C) \exp\left(-\frac{r^2}{D}\right) + E, \quad (6)$$

где A, B, C, D, E — полуэмпирические коэффициенты. Результаты аппроксимации точек границы плазмы для фотографии диодного разряда представлены на рис. 6, а, а для фотографии триодного разряда — соответственно на рис. 6, б. В работе [10] приведены фрагменты программ, использованных при реализации описанных алгоритмов.

При решении задач аппроксимации использованы средства программирования и аналитического процессора системы научно-технических расчетов MatLab [10]. Для зависимости, приведенной на рис. 6, а, коэффи-

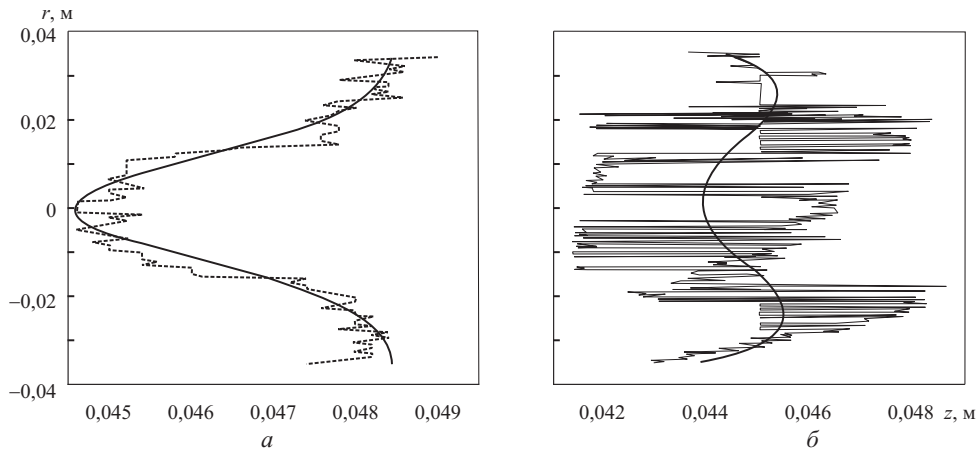


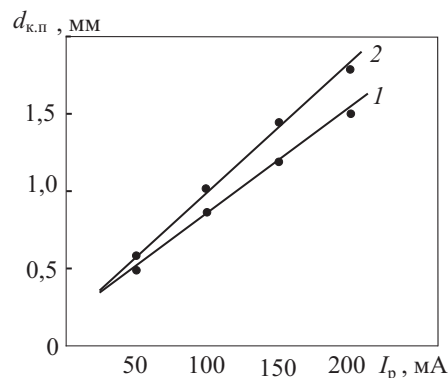
Рис. 6. Аппроксимация точек границы плазмы для фотографии диодного (а) и триодного (б) разрядных промежутков ВТР

циенты соотношения (5) составили: $A = 0,0039$, м; $B = 0,0485$, м; $\alpha = 0,0281$, м², для зависимости, приведенной на рис. 6, б, коэффициенты соотношения (6) составляли: $A = 0,00794$, м; $B = 0,3$, м⁻²; $C = 0,01$; $D = 0,06$; $E = 0,0443$, м.

Анализ результатов моделирования. Полученные результаты аппроксимации границы анодной плазмы использованы для расчета распределения электрического поля и траекторий заряженных частиц в электродных системах ВТР. Результаты расчета распределения электрического поля и распределения плотности тока электронного пучка в фокальной плоскости приведены в работе [8]. Для расчета распределения электрического поля в электродных системах ВТР использован метод интегральных уравнений, а для расчета траекторий частиц — дифференциальное уравнение электронной оптики, которое решалось методом Рунге — Кутты четвертого порядка. При расчете пространственного заряда с учетом перезарядок ионов на атомах остаточного газа использован модифицированный метод недеформируемых трубок тока [8].

На рис. 7 приведены расчетные зависимости тока диаметра формируемого электронного пучка от тока разряда при газодинамическом и электрическом управлении. Точность расчетных данных по сравнению с полученными экспериментальными результатами составляла 20—30%. Меньший диаметр электронного пучка в диодных системах ВТР обусловлен тем, что граница анодной плазмы, имеющая потенциал, близкий к анодному, вследствие выпуклой геометрической формы (см. рис. 6) оказывает фокусирующее действие на формируемый электронный пучок. С точки зрения физики разряда это связано с нагревом плазмы высокоэнергетичными

Рис. 7. Зависимость диаметра полученного электронного пучка от тока разряд: 1 — для диодной системы ВТР; 2 — для триодной системы ВТР



электронами пучка в приосевой области, что приводит к увеличению температуры электронного газа в плазме и ее объема.

В триодных электродных системах ВТР наличие вспомогательного разряда приводит к повышению уровня ионизации газа в периферийной прианодной области низкоэнергетичными отраженными от анода электронами [10]. В связи с этим граница анодной плазмы в таких системах принимает вогнутую форму (см. рис. 6, б), а такая форма плазменной границы оказывает дефокусирующее действие на формируемый электронный пучок. Таким образом, полученные в работе результаты моделирования положения плазменной границы для различных режимов горения ВТР позволяют оценить технологические возможности формируемого электронного пучка.

Выводы

При проведении теоретических и экспериментальных исследований были использованы аналитические соотношения для приближенной оценки геометрического положения границы анодной плазмы относительно поверхности катода в диодных и триодных электродных системах ВТР, приведенные в работах [10, 11]. Описанная методика моделирования диодных и триодных систем ВТР, основанная на методе компьютерной обработки фотографий разрядного промежутка, позволяет на предварительном этапе проектирования определить фокальный диаметр электронного пучка и оценить технологические возможности источника электронов. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования самосогласованной электронно-ионной оптики ВТР. Описанные результаты представляют интерес для проектировщиков электронно-лучевого технологического оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурии Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989, 256 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 // *Electro-technica and Electronica (E+E)*. 2014, Vol. 49, No. 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, No. 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 Conference Proceedings.* 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, No. 5—6, p. 152—158.
7. *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 // *Proc. of SPIE. Sixth International Conference on «Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics».* 2003, Vol. 5065, p. 64—76.
8. *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, No. 111, p. 288—294.
9. *Ильин В.П.* Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука, 1985, 336 с.
10. *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.
11. *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.
12. *Новиков А.А.* Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. М.: Энергоатомиздат, 1983, 96 с.
13. *Басараб М.А., Волосюк В.К., Горячкин О.В. и др.* Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007, 544 с.
14. *Дейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 2 / Перевод с англ. М.: Финансы и статистика, 1987, 351 с.
15. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V.* High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations // *IEEE Transactions on plasma science.* 2003, Vol. 31, No. 5, p. 987—993.

Получена 06.08.18

REFERENCES

1. Zavalov, M.A., Kreyndel, Yu. E., Novikov, A.A. and Shanturin, L.P., (1989), *Plazmennye protsessy v tekhnologicheskikh elektronnykh pushkakh* [Plasma processes in technological electron guns], *Energoatomizdat, Moscow, USSR.*
2. Grechanyuk, M.I., Melnyk, A.G., Grechanyuk, I.M., Melnyk, V.G. and Kovalchuk, D.V. (2014), Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials, *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, Vol. 49, no. 5-6, pp. 115-121.
3. Mattausch, G., Zimmermann, B., Fietzke, F., Heinss, J.P., Graffel, B., Winkler, F., Roegner, F.H. and Metzner, C. (2014), Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies, *Elektrotechnica and Electronica (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, Proceedings of the 54th Annual Technical Conference*, Chicago, pp. 202-209.
5. Yarmolich, D., Nozar, P., Gleizer, S., Krasik, Y.E., Mittica, G., Ancora, C., Brilliante, A., Bilotti, I. and Tiliani, C. (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., Metzner, C. and Roegner, F.H. (2012), Technologies and tools for the plasma-activated EB high-rate deposition of Zirconia”, *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, Vol. 47, no. 5-6, pp. 152-158.
7. 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. The Sixth International Conference on “Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics”*, Vol. 5065, pp. 64-76.
8. Denbnovetsky, S.V., Felba, J., Melnik, V.I. and Melnik, I.V. (1997), Model of beam formation in a glow discharge electron gun with a cold cathode, *Applied Surface Science*, Vol. 111, pp. 288-294.
9. Пин, В.П. (1985), *Численные методы решения задач электродинамики* [Numerical methods for solving electrophysics problems], Nauka, Moscow, USSR.
10. Melnyk, I.V. and Tuhai, S.B. (2012), “Simulation of geometry of anode plasma boundary in triode high voltage glow discharge electrode systems”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 34, no. 1, pp. 15-28.
11. Melnyk, I.V. and Tuhai, S.B. (2012), “Analytical calculation of anode plasma boundary position in a high voltage glow discharge gap with lighting of additional discharge”, *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 55, no. 11, pp. 50-59.
12. Novikov, A.A. (1983), *Istochniki elektronov vysokovoltного тлейусhego razryada s anodnoy plasmoy* [High voltage glow discharge electron sources with anode plasma], Energoatomizdat, Moscow, USSR.
13. Romanov, V.Yu. (1992), *Populiarnye formaty failov dlya khraneniya graficheskikh izobrazheniy* [Popular files formats for saving of graphic images], Unitech, Moscow, Russia.
14. Dreiper, N. and Smit, H. (1987), *Prikladnoi regressionnyy analiz* [Applied regression analysis], Financy i statistika, Moscow, USSR.
15. Denbnovetsky, S.V., Melnyk, V.G. and Melnyk, I.V. (2003), High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 31, no. 5, pp. 987-993.

Received 06.08.18

I.V. Мельник, А.В. Починок

УЗАГАЛЬНЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ І АПРОКСИМАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ І ФОРМИ КОРДОНУ АНОДНОЇ ПЛАЗМИ В ЕЛЕКТРОДНИХ СИСТЕМАХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОНІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

Описана методика визначення положення та форми межі анодної плазми в діодних та тріодних електродних системах високовольтного тліючого розряду (ВТР) базується на фотографуванні розрядного проміжку та на використанні методу комп'ютерного аналізу яскравості зображень. Під час моделювання самоузгодженої електронно-іонної оптики джерел електронів ВТР розглядалась як джерело іонів та як прозорий для електронів електрод із потенціалом, близьким до анодного. Використано прості аналітичні співвідношення для описання геометрії границі плазми в діодних та тріодних електродних

системах ВТР для моделирования самоустроенной электронно-ионной оптики электродных систем ВТР. Результаты моделирования зривнюються з експериментальними даними. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними для электродных систем, які моделювалися, складала близько 20—25%.

К л ю ч о в і с л о в а: високовольтний тліючий розряд, анодна плазма, комп'ютерний аналіз зображень, розпізнавання образів.

I.V. Melnyk, A.V. Pochynok

GENERALIZED METHODS OF ESTIMATION AND APPROXIMATION OF ANODE PLASMA BOUNDARY FORM AND POSITION IN THE ELECTRODE SYSTEMS OF HIGH VOLTAGE GLOW DISCHARGE ELECTRON SOURCES

The paper deals with the methods of determining anode plasma boundary form and position in diode and triode electrode systems of high voltage glow discharge (HVGD) electron sources, based on photographing of discharge gap and on using the method of computer analysing of image brightness. During the simulation of self-consistent electron-ion optic of HVGD electron sources the anode plasma boundary is considered as the source of ions and as the transparent electrode for electrons with potential close to the cathode potential. The brightness map of discharge gap images for diode and triode electrodes systems are presented and singularities of algorithms of analyzing these images are described. For describing of plasma boundary geometry in diode and triode HVGD electrode systems the simple analytical relations have been obtained. For simulation of self-consistent electron-ion optic of HVGD electrode systems the approximate relations were obtained. These relations have also been used for estimation of focal diameter of formed electron beam. The obtained simulation results were compared with experimental data. Disagreement between the theoretical and experimental data for the simulated electrode systems was in the range of 20-25%.

К e y w o r d s: high voltage glow discharge, anode plasma, computer analysis of images, images recognizing.

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

ПОЧИНОК Алина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Учебно-научного ин-та информационных технологий и менеджмента Университета государственной фискальной службы Украины. В 2007 г. закончила Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Область научных исследований — математическое моделирование и создание компьютерных программ для моделирования результатов научных измерений, развитие методов и программного обеспечения для математической обработки научных данных.