
УДК 621.325:537.525

И. В. Мельник, канд. техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корп. 12,
тел.: (044) 2419672, (044) 4549505; E-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

Исследование электронно-ионной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием компьютерного анализа изображений

(Статью представил д-р техн. наук В.П. Симоненко)

Предложена методика моделирования электродных систем высоковольтного тлеющего разряда, основанная на анализе яркости фотографий разряда. Граница анодной плазмы, разграничивающая светлую и темную области разряда, рассматривается как эмиттер ионов и как прозрачный для электронов электрод с заданным потенциалом. Результаты моделирования для реальных электродных систем проверены экспериментально.

Запропоновано методику моделювання електродних систем високовольтного тліючого розряду, яка основана на аналізі яскравості фотографій розряду. Границя анодної плазми, що розмежує світлу та темну області розряду, розглядається як емітер іонів та як прозорий для електронів електрод з заданим потенціалом. Результати моделювання для реальних електродних систем перевірені експериментально.

Ключевые слова: электронная оптика, источники электронов высоковольтного тлеющего разряда, анодная плазма, компьютерный анализ изображений, карты изображений.

Современные методы компьютерного анализа изображений широко используются при проведении научных исследований. В настоящее время применение компьютеров в научной деятельности не ограничивается решением задач оптимизации и сложных систем нелинейных уравнений. Компьютеры все чаще используются для обработки и обобщения экспериментальных данных, включая измерения аналоговых и цифровых сигналов и анализ яркости оптических изображений. При этом для проведения анализа яркости широко используются периферийные компьютерные устройства, преобразующие оптический сигнал в электрический, в том числе цифровые фотокамеры и видеокамеры, планшетные и ручные сканеры. Использование компьютеров при проведении измерений позволяет не

только проводить статистическую обработку экспериментальных данных, но и, в сочетании с методами математического моделирования, разрабатывать качественно новые инженерные методики моделирования и проектирования реальных устройств. Особенно важно сочетать компьютерную обработку экспериментальных данных с численным моделированием реальных систем в случаях, когда из-за сложности и взаимосвязи физических процессов, протекающих в реальных устройствах, их комплексное математическое моделирование затруднено или невозможно. В этих случаях компьютерная обработка экспериментальных данных в сочетании с численным моделированием позволяет получать уточненные количественные оценки параметров устройств. К таким устройствам можно отнести газоразрядные измерительные, коммутирующие, осветительные и технологические устройства, в которых анализ яркости фотографий разряда для различных электрических режимов работы позволяет получить дополнительную информацию, которая может быть использована для моделирования траекторий заряженных частиц в разряде и его энергетики. Такой универсальный подход, основанный на обобщении экспериментальных данных и их использовании при постановке задач моделирования, наиболее ценен для проектировщиков газоразрядных приборов и может быть успешно использован в проблемно-ориентированных системах автоматизированного проектирования (САПР).

К классу таких приборов относятся технологические источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с анодной плазмой, которые находят широкое применение во многих отраслях промышленности при реализации различных технологических операций. Это обусловлено преимуществами газоразрядных источников электронов над традиционными термокатодными, такими как достаточно стабильная и устойчивая работа в низком и среднем вакууме, относительная простота конструкции, простота управления мощностью электронного пучка путем изменения давления [1, 2].

Однако дальнейшее развитие и внедрение в промышленность этих перспективных источников электронов задерживается из-за сложности анализа самосогласованной электронно-ионной оптики ВТР. Сложность решения электронно-оптической задачи в данном случае обусловлена влиянием на траектории заряженных частиц положения и формы границы анодной плазмы, существующей в ВТР. Численное решение самосогласованной задачи расчета траекторий заряженных частиц и определение положения плазменной границы для реальных электродных систем ВТР затруднительно, а в ряде случаев решения этой задачи не существует [3]. Поэтому для моделирования электронно-оптических систем (ЭОС) ВТР необходимо разработать теоретико-экспериментальную методику, при ко-

торой положение и форма границы плазмы определяется экспериментально из фотографий разрядного промежутка, а затем полученные данные используются для компьютерного моделирования самосогласованной ионно-электронной оптики ВТР. Для реализации этой методики с помощью современных средств компьютерного моделирования необходимо создание баз данных с электронными изображениями разрядного промежутка, построение карт этих изображений и разработка эффективных алгоритмов их анализа.

В предлагаемой методике моделирования геометрии границы анодной плазмы в ЭОС ВТР узловые точки искомой функции, описывающей границу плазмы, определяются считыванием информации из графических файлов с фотографиями разрядного промежутка, а для описания этой функции между узловыми точками используется интерполяция кубическими сплайнами. Для повышения точности определения положения узловых точек используется метод скользящей средней [4]. На основе полученных данных о геометрии границы плазмы рассчитываются траектории заряженных частиц в электрическом поле с учетом пространственного заряда и перезарядок ионов на атомах остаточного газа. Для решения этой задачи используется модифицированный алгоритм метода трубок тока [5].

Основные физические особенности ЭОС ВТР и методика их моделирования. На рис. 1 приведена схема ЭОС диодной пушки ВТР, содержащая катод 1 с вогнутой эмиссионной поверхностью, выполненной в виде части сферы, и анод 2, выполненный в виде замкнутой полости для поддержания горения в ней ВТР. Высоковольтный тлеющий разряд зажигается при ускоряющем напряжении между катодом и анодом, составляющем от единицы до десятков киловольт и давлении в объеме пушки, равном единицам паскалей. При зажигании разряда между катодом и анодом возникает анодная плазма 3, которая располагается в области анода и имеет ярко выраженную границу 4. Образующиеся в плазме ионы ускоряются в электрическом поле и, попадая на катод, бомбардируют его поверхность. В результате ионной бомбардировки происходит эмиссия электронов с поверхности катода, называемая в теории разряда вторичной ионно-электронной эмиссией. Вогнутая форма катода и анодная диаф-

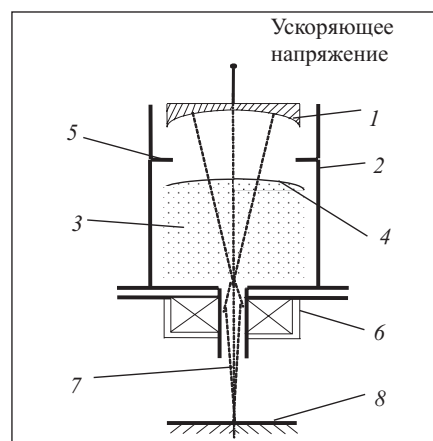


Рис. 1. Электродная система источников электронов на основе ВТР

рагма 5 определяют электронно-оптические свойства электродной системы в области между катодом и анодной плазмой, называемой областью катодного падения потенциала [1, 2]. В результате эмитируемые с поверхности катода электроны формируются в сходящийся электронный пучок 7. Пучок электронов проходит через анодную плазму и через систему транспортировки [6], где с помощью фокусирующей магнитной линзы 6 осуществляется его дополнительная фокусировка, а затем направляется на изделие 8 для осуществления необходимых термических операций [1, 2] или для проведения измерений [7].

Поскольку в ВТР плотность тока электронов, поступающих с поверхности катода, относительно невысокая (до 10^5 А/м²) [1, 2], одной из главных отличительных особенностей электродных систем технологических газоразрядных источников электронов является использование катодов с развитой эмиссионной поверхностью. Поэтому ЭОС ВТР нельзя рассматривать как параксиальные, и для их численного анализа необходимо использовать наиболее общие методы моделирования интенсивных потоков заряженных частиц, например метод макрочастиц [3], метод трубок тока [5], метод интегральных уравнений [8].

Второй важной особенностью ЭОС ВТР является то, что на самосогласованную ионно-электронную оптику ВТР, в частности на пространственный заряд и траектории электронов, существенное влияние оказывают элементарные и коллективные взаимодействия частиц в разряде. В области катодного падения потенциала наиболее важными процессами являются ионизация газа и перезарядка ионов на атомах остаточного газа [1, 2]. В работах [5, 9] приведен модифицированный численный алгоритм анализа ЭОС ВТР, основанный на методе трубок тока, позволяющий учесть влияние элементарных взаимодействий частиц на параметры формируемого электронного пучка. В анодной плазме основной процесс, оказывающий влияние на горение разряда и на его оптические свойства, — нагрев плазмы ускоренными электронами в области прохождения электронного пучка [1, 10]. В результате нагрева объем анодной плазмы изменяется при изменении ускоряющего напряжения и давления в разрядном промежутке. Поэтому при анализе траектории ЭОС ВТР границу плазмы следует рассматривать как эмиттер ионов и как подвижный, прозрачный для электронов электрод с изменяющимся потенциалом.

Следовательно, при построения адекватных моделей ЭОС ВТР необходимо рассчитывать распределение электрического поля с учетом геометрии и потенциала границы анодной плазмы, которые, в свою очередь, зависят от параметров высоковольтного разряда [1, 2]. Учесть влияние изменения геометрии анодной плазмы на параметры формируемого элект-

ронного пучка при численном моделировании ЭОС ВТР наиболее сложно, поскольку для этого необходимо решать самосогласованную электронно-оптическую задачу для систем с плавающей границей.

Численные методы решения таких задач в настоящее время недостаточно хорошо разработаны [3]. Поэтому проектирование ЭОС ВТР проводится по следующей итерационной методике. На первом этапе осуществляются предварительные теоретические оценки параметров анодной плазмы [10] и для заданной геометрии ЭОС ВТР по численным алгоритмам [5] оцениваются геометрические параметры формируемого электронного пучка.

Рассмотрим аналитические соотношения, определяющие предварительные оценки параметров анодной плазмы, для различных типов ЭОС ВТР. На втором этапе проектирования ЭОС ВТР полученные результаты проверяются экспериментально на действующем макете и осуществляется доводка геометрии электродов. Однако во многих случаях для дальнейшей оптимизации электродной системы необходимы более точные теоретические оценки с учетом реальной геометрии границы анодной плазмы для разных режимов разряда. Такие оценки можно провести с помощью анализа яркости фотографий разряда. Рассмотрим построение карт изображений ВТР и алгоритмы их анализа и обработки.

Приближенные аналитические оценки параметров анодной плазмы. Для диодных систем ВТР в большинстве случаев можно считать, что потенциал поверхности плазмы равен анодному потенциалу [2, 5]. Более точное значение потенциала анодной плазмы можно определить из следующих соотношений [2, 9, 10]:

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

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 составляет несколько вольт.

Анодная плазма занимает конечный замкнутый объем в соответствии с условием равновесия давления электрического поля со стороны области катодного падения потенциала и кинетического давления электронов плазмы. В наиболее общей форме уравнение равновесного положения границы плазмы можно записать в виде [3]

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{r\in\Gamma}^2 = f(p), \quad (2)$$

где $\partial\phi/\partial n$ — изменение потенциала в окрестности границы плазмы по нормали к кривой, описывающей эту границу; r — рассматриваемый элементарный участок границы плазмы; p — кинетическое давление электронного газа в плазме. При физических условиях горения ВТР для определения кинетического давления электронного газа в плазме можно использовать соотношения классической термодинамики Максвелла—Больцмана. Тогда уравнение равновесия (2) можно записать в упрощенной форме [1, 2]:

$$\frac{\varepsilon_0 E_{\Pi}^2}{2} = n_e k T_e, \quad (3)$$

где E_{Π} — электрическое поле возле границы плазмы. Для одномерной модели высоковольтного разрядного промежутка расстояние от поверхности катода до анодной плазмы, исходя из соотношений (2), (3), можно определить аналитически [2]:

$$d_{\text{к.п}} = l - \frac{I_p}{\overline{Q_{\text{ео}}} \left(\chi\gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5\mu_{\text{io}} k T_e}{R^2 p_{\text{ао}}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{k T_i}}}, \quad (4)$$

где I_p — ток разряда; l и R — длина и поперечный размер разрядного промежутка; $p_{\text{ао}}$ — приведенное давление в области горения разряда; m_e и m_i — масса электрона и ионов газа; $\overline{Q_{\text{ео}}}$ — усредненное значение коэффициента поперечного сечения перезарядки для электронов; χ — коэффициент среднего удлинения траекторий электронов в области анодной плазмы; γ — коэффициент отражения электронов от поверхности анода.

Предположим, что граница анодной плазмы имеет форму сферы и концентрична поверхности катода, что наблюдается при больших и средних значениях тока разряда [2, 5]. Тогда для аксиально-симметричных систем ВТР с полым анодом (см. рис. 1), легко вычислить расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы 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, связывающие расстояние от поверхности катода до границы анодной плазмы с геометрическими параметрами электродов [10]:

$$d_{\text{к.п}}^{\text{II}} = R_{\text{к}} - \sqrt[3]{R^2 (R_{\text{к}} - d_{\text{к.п}}) \arctan\left(\frac{R}{l}\right)};$$

$$s = 1 + \left(\frac{R_a}{h_a}\right)^2 - \sqrt{1 + \left(\frac{R_a}{h_a}\right)^2};$$

$$I_a^2 = h_a^2 + R_a^2, \quad w = 3 - \frac{s h_a^2}{h_a^2 + R_a^2}, \quad d_{п.а} = h_a - d_{к.п}; \quad (5)$$

$$d_{п.а}^к = \sqrt[3]{\frac{3R_a^2 d_{к.п}^4 l_a^4}{2h_a^4 s w^2} - \frac{l_a^{12} R_a^6}{27h_a^{15} s^3 w^2} + \sqrt{\frac{9R_a^4 (d_{к.п}^2)^2 l_a^8}{4h_a^8 s^2 w^2} - \frac{l_a^{24} R_a^{12}}{243h_a^{30} s^6 w^6} - \frac{2R_a^8 l_a^{16} d_{к.п}^4}{9h_a^{19} s^4 w^4}}}$$

где R_k — радиус сферы катода; h_a — высота анода; R_a — его диаметр в основании конуса или цилиндра; $d_{п.а}^к$ — высота анодной плазмы в электродной системе с коническим анодом; $d_{к.п}^к$ — расстояние плазма — катод в электродной системе с цилиндрическим анодом; l_a — образующая анодного конуса; s, w — вспомогательные геометрические параметры.

Вычислив с учетом соотношений (1) — (5), положение границы плазмы и ее потенциал, можно решить самосогласованную электронно-оптическую задачу, определив распределение электрического поля в разрядном промежутке и траектории заряженных частиц. Такие оценки справедливы для максимальных токов разряда и используются на начальном этапе проектирования технологических источников электронов. Однако в режимах небольших токов разряда, которые при реальных размерах электродных систем ВТР составляют 150—200 мА, в результате нагрева плазмы ускоренными электронами происходит уменьшение расстояния между поверхностью катода и границей анодной плазмы в приосевой области разряда. Результаты оценки точности моделирования ЭОС ВТР, приведенные в [11], свидетельствуют о том, что в режимах малых токов разряда погрешность моделирования плазменной границы с использованием соотношений (4), (5) превышает 50 % и оказывает существенное влияние на расчетные значения геометрических параметров формируемого электронного пучка. Поэтому при проектировании газоразрядных источников электронов, работающих в таких режимах, необходимо проводить более точные оценки положения и формы плазменной границы с использованием фотографий разрядного промежутка.

Использование компьютерного анализа изображений для описания геометрии границы плазмы. Современные методы компьютерного анализа графических изображений, в частности методы сканирования и анализа яркости фотографий, позволяют предложить эффективный метод определения положения и конфигурации границы плазмы при теоретико-экспериментальном анализе ЭОС ВТР.



Рис. 2. Фотография разрядного промежутка: ускоряющее напряжение — 15 кВ, ток разряда — 200 мА

На фотографии разрядного промежутка (рис. 2) видно, что положения точек границы анодной плазмы можно определить по изменению яркости свечения разряда. Поскольку расстояния от катода до отверстия анода $d_{к.а}$ и до его диафрагмы $d_{к.д}$ вдоль оси пушки являются известными конструктивными параметрами (см. рис. 1), узловые точки границы плазмы, изображенные на рис. 2, легко определить из соотношения

$$d_{к.п}^p = \frac{d_{к.п}^{\phi}}{d_{к.а}^{\phi}} d_{к.а}^p + d_{к.д}^p, \quad (6)$$

где $d_{к.п}$ — расстояние между поверхностью катода и границей анодной плазмы; верхние индексы p соответствуют реальным размерам системы, а индексы ϕ — размерам на фотографии.

При реализации компьютерного метода определения геометрии границы плазмы фотографии разряда сканировались с разрешением 300×300 dpi и запоминались в формате GIF (Graphic Interchange Format) в 24-битовой цветовой палитре. При таком представлении 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 [12]. Итоговая яркость точки определяется как среднее арифметическое яркостей ее составляющих:

$$B_{\Sigma} = \frac{B_{к} + B_{с} + B_{з}}{3}, \quad (7)$$

где $B_{к}$, $B_{с}$ и $B_{з}$ — яркости красной, синей и зеленой компонент, заданные в относительных единицах по описанной выше системе.

Для построения алгоритма процесса определения геометрии границы плазмы прежде всего необходимо построить карту яркости анализируемых изображений, которая в общем виде приведена на рис. 3, где светлые и темные области разряда отделены одна от другой границей анодной плазмы в продольном направлении и областью прохождения электронного пучка в поперечном направлении. Очевидно, что для рассматриваемых аксиально-симметричных ЭОС ВТР достаточно анализа только одной верхней или нижней части фотографии разряда, а вторая часть

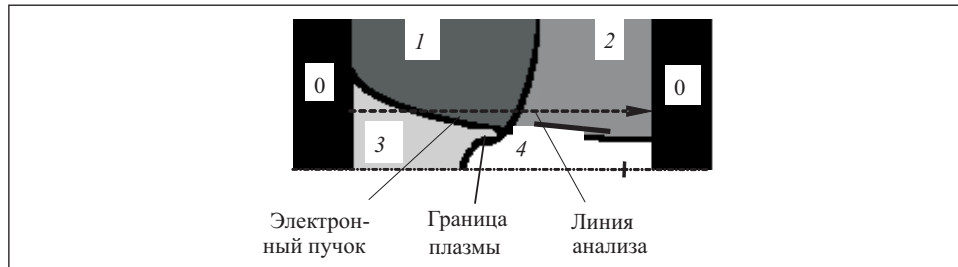


Рис. 3. Карта яркости для ВТР

фотографии может быть использована для проверки полученного результата. Экспериментальные исследования показали, что, за исключением режимов минимальных токов, практически во всех случаях на фотографиях разрядного промежутка можно выделить пять областей яркости:

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

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

3. Область анодной плазмы, непересекаемая электронным пучком (второй уровень яркости).

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

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

Как видно из рис. 2, различия яркости между точками второго и третьего уровня могут быть незначительными. Анализ яркости точек проводили вдоль горизонтальных линий, идущих от катода к аноду. Для этого фотографии, аналогичные приведенной на рис. 2, поворачивали на 90° и проводили анализ в соответствии с картой яркости, приведенной на рис. 3. Это позволило выполнить считывание яркостей трех компонент цвета из ячеек памяти с соседними адресами. Точки, соответствующие положению плазменной границы, определяли в местах увеличения суммарной яркости, соответствующих переходу либо из области 1 в область 2, либо из области 3 в область 4. Направление считывания яркости точек указано стрелкой на рис. 3.

Для проведения такого анализа прежде всего необходимо знать реальный размер фотографии по горизонтали и по вертикали [12] для осуществления корректного перехода с одной линии, вдоль которой анализируется яркость, на другую. Переход от нулевого уровня яркости к первому соответствует положению на фотографии анодной диафрагмы, а переход от

второго или четвертого уровня яркости к нулевому — положению анодного отверстия. Поэтому определение положения точки границы плазмы сводится к определению параметров $d_{д.п}^{\Phi}$ и $d_{к.п}^{\rho}$ из соотношения (6). Следует заметить, что поскольку необходимо определить не параметры, а только их отношение, достаточно определить число точек изображения (пикселей) на измеряемом отрезке. Определенные трудности возникают вследствие того, что точки границы плазмы не всегда можно четко различить на фотографии (см. рис. 2). Поэтому сначала определяется область увеличения яркости, а искомая точка определяется как средняя точка области. Такой алгоритм известен в литературе как метод скользящей средней [4]. Если эта область на выбранной линии слишком обширна для обнаружения искомой точки, то для достижения более корректного результата поиск повторяется на ближайшей 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.

При проведении анализа фотографий число узловых точек находится в пределах от 30 до 50, а между узловыми точками искомая функция $z(r)$ интерполировалась кубическими сплайнами [13]:

$$z_i^c(r) = a_i + b_i(r - r_i) + \frac{c_i}{2}(r - r_i)^2 + \frac{d_i}{6}(r - r_i)^3; \quad a_i = z_i^d; \quad h_i = r_i - r_{i-1};$$

$$h_i c_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1}) c_i + h_{i+1} c_{i-1} = 6 \left(\frac{z_{i+1}^d - x_i^d}{h_{i+1}} - \frac{z_i^d - z_{i-1}^d}{h_i} \right); \quad (8)$$

$$d_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{h_i}; \quad b_i = \frac{h_i c_i}{2} - \frac{h_i^2 d_i}{6} + \frac{z_i^d - z_{i-1}^d}{h_i}; \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где i — номер узла; h — расстояние между узлами, которое в соответствии с реализованным алгоритмом поиска узловых точек могло изменяться; N — число точек; a, b, c, d — коэффициенты интерполяции. Система уравнений (8) решалась численно методом прогонки [13]. Коэффициенты сплайна, рассчитанные для интерполяции границы плазмы, запоминались в выходных файлах и могли быть использованы для анализа аналогичных ЭОС ВТР.

Результаты моделирования ЭОС ВТР и их верификация. На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие положение и конфигурацию плазменной границы для ЭОС ВТР, с соблюдением масштаба по продольной и поперечной координатам. При малых давлениях форма границы плазмы отличается от сферической, и приведенные выше оценки расстояния от катода до поверхности границы плазмы справедливы только для режимов больших токов разряда. Эти данные подтверждены также

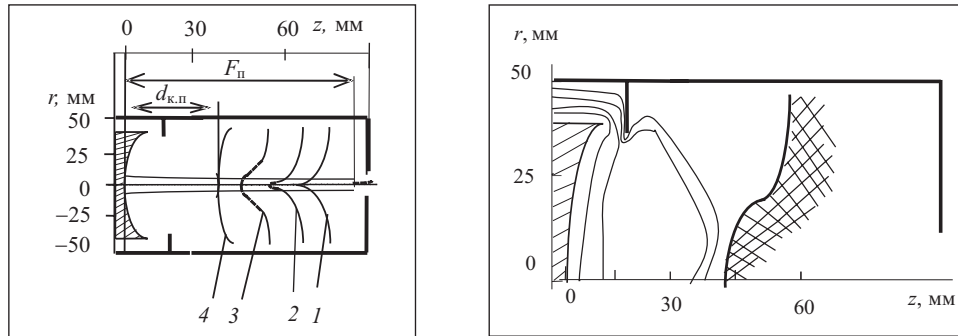


Рис. 4. Характеристики конфигурации и положения границы плазмы для различных режимов разряда: ускоряющее напряжение — 15 кВ; ток разряда: 1 — 20 мА; 2 — 50 мА; 3 — 100 мА; 4 — 200 мА

Рис. 5. Распределение электрического поля в области катодного падения потенциала: ускоряющее напряжение — 15 кВ; ток разряда — 100 мА

результатами анализа точности моделирования ЭОС ВТР, приведенными в работе [11].

Анализ яркости фотографий разряда позволяет также определить положение кроссовера электронного пучка. Кроссовер рассматривается как плоскость, в которой поперечное сечение пучка минимально. Поскольку при прохождении в плазме ВТР электронный пучок не имеет ярко выраженной границы (см. рис. 2), при поиске границ областей 4 и 2 (см. рис. 3), как и при поиске положения точек границы плазмы, использован метод скользящей средней. Положение граничных точек относительно оси симметрии системы непосредственно связано с диаметром электронного пучка в данной плоскости, хотя и не соответствует его истинному значению. Поэтому поиск кроссовера пучка осуществляется как поиск минимального значения границы областей 4 и 2. Для решения этой задачи использован метод золотого сечения [14]. При этом положение фокуса пучка в реальной конструкции пушки относительно диафрагмы на фотографии вычисляется по формуле, аналогичной формуле (6):

$$F_{\phi.п}^p = \frac{F_{д.ф}^{\phi}}{d_{к.а}^{\phi}} d_{к.а}^p + d_{к.д}^p. \quad (9)$$

Граница областей 4 и 2 на фотографии только качественно связана с диаметром электронного пучка в анализируемой плоскости, и ширина области 4 не всегда соответствует его истинному значению. Поэтому верификация расчетных и экспериментальных данных по значению фокального диаметра электронного пучка в фокусе в данном случае не проводилась.

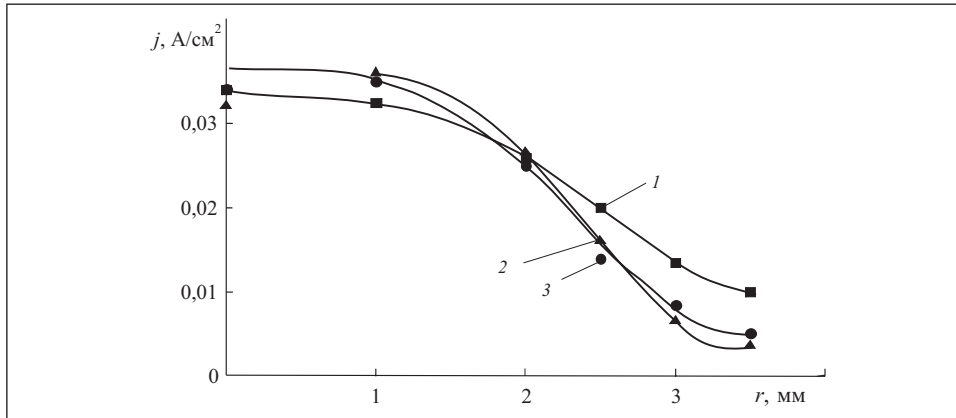


Рис. 6. Распределение плотности тока в кроссовере электронного пучка при токе разряда — 100 мА: 1 — $U_c = 10$ кВ; 2 — $U_c = 15$ кВ; 3 — $U_c = 20$ кВ

Ускоряющее напряжение, кВ	Ток разряда, мА	Расчетные значения фокального диаметра пучка, мм	Положение кроссовера пучка, мм	
			Расчет	Эксперимент
15	50	1,35	55	50
	100	1,38	62	58
	150	1,44	65	63
	200	1,56	66	67
	250	1,69	67	67,5
20	50	1,25	51,5	48
	100	1,3	56,5	55
	150	1,37	62,5	61
	200	1,42	67	65,5
	250	1,5	67,5	67

Анализ распределения электрического поля в области катодного падения потенциала и определения траекторий заряженных частиц проводился с использованием модифицированного алгоритма метода трубок токов, предложенного в работах [5, 9]. Основное его отличие состоит в том, что он позволяет учитывать влияние на пространственный заряд перезарядок ионов на атомах остаточного газа. В этом он идентичен методу макро-частиц, который обычно используется для анализа систем со встречными взаимодействующими потоками [3], однако метод трубок токов более экономичен по затратам процессорного времени и оперативной памяти.

На рис. 5 приведены эквипотенциальные линии электрического поля, полученные в результате моделирования, а на рис. 6 — график плотности тока пучка в кроссовере, полученный по численному алгоритму, предложенному в работе [9]. Результаты верификации расчетных и экспериментальных данных приведены в таблице. Положение кроссовера пучка определено по фотографиям разрядного промежутка с использованием описанной выше методики и соотношения (9).

Преимущество данного метода состоит в том, что по фотографиям разряда можно определить не только геометрию анодной плазмы, но и фокусное расстояние электронного пучка. Это позволяет использовать компьютерный анализ изображений не только для предварительного теоретического анализа, но и для верификации данных моделирования и эксперимента, качественной проверки адекватности модели, а также для ее уточнения и совершенствования в соответствии с результатами экспериментов.

Выводы. Метод компьютерного анализа изображений для определения положения и конфигурации границы плазмы в ЭОС ВТР позволяет значительно повысить точность моделирования по сравнению с методом, в котором граница плазмы моделируется в виде части сферы, концентричной поверхности катода [10]. Особенно заметно повышение точности для моделей ЭОС в режиме малых токов разряда. Аппроксимация кривой, описывающей границу анодной плазмы кубическими сплайнами, позволила при использовании для расчета траекторий метода трубок тока достичь точности оценок фокальных параметров пучка, составляющей 30—35 % во всем диапазоне рабочих напряжений и токов разряда. Некоторые несоответствия теоретических и экспериментальных зависимостей фокального диаметра пучка от тока разряда обусловлены сложностью физических процессов, протекающих в ВТР, и несоответствием между градиентами яркости на фотографиях и реальными геометрическими свойствами анодной плазмы. Практическая ценность рассмотренных полуэмпирических моделей ЭОС ВТР состоит в значительном повышении точности моделирования, особенно для режимов малых токов разряда, при незначительном увеличении процессорного времени, необходимого для анализа одного варианта ЭОС.

A technique of simulating electrode systems of high voltage glow discharge is proposed. It is based on the analysis of discharge photo brightness. The boundary of anode plasma demarcating the light and dark regions of discharge is considered as ion emitter and as electrode with the given potential transparent for electrons. The results of simulation for real electrode systems are tested by the experiment.

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. *Новиков А. А.* Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
3. *Ильин В. П.* Численные методы решения задач электрофизики. — М. : Наука, 1985. — 336 с.
4. *Дейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 2 / Перевод с англ. — М. : Финансы и статистика, 1987. — 410 с.
5. *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.
6. *Мельник И. В.* Моделирование транспортировки электронных пучков из области низкого в область высокого вакуума в эквипотенциальном канале // Электрон. моделирование. — 2001. — **23**, № 4. — С. 82—92.
7. *Мельник В. И., Мельник И. В.* Диагностика напыляемых диэлектрических покрытий с использованием газоразрядной электронной пушки // Тр. X Межнационального совещания «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 3—8 июля 2000 г. / Под ред. Г. Г. Бондаренко — М. : НИИ ПМТ при МГИЭМ (ТУ), 2000. — С. 222—226.
8. *Мельник И. В.* Алгоритм решения задачи анализа электронной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда, основанный на использовании метода интегральных уравнений // Вестник Херсонского государственного технического университета. — Херсон, 2002. — Вып. 2 (15). — С. 321—25.
9. *Мельник И. В.* Численное моделирование распределения электрического поля и траекторий частиц в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда. — Изв. высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2005. — **48**, № 6. — С. 61—71.
10. *Мельник И. В.* Аналитическая оценка положения границы плазмы в электродных системах высоковольтного тлеющего разряда с коническим анодом // Электроника и связь. — 2000. — **1**, № 8. — С. 107—109.
11. *Денбновецкий С. В., Мельник И. В.* Оценка погрешности моделирования электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда // Там же.— Тематический сб. по материалам научно-технической конференции «Проблемы физической и биомедицинской электроники». Ч. 1. —1997. — С. 133—137.
12. *Романов В. Ю.* Популярные форматы файлов для хранения графических изображений. — М. : Унитех, 1992. — 156 с.
13. *Самарский А., Гулин С.* Численные методы. — М. : Наука, 1989. — 225 с.
14. *Васильев В. П.* Численные методы решения экстремальных задач: Уч. пособие для вузов. — М. : Наука, 1988. — 552 с.

Поступила 02.06.06;
после доработки 15.11.06

МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, канд. техн. наук, докторант Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончил в 1989 г. Область научных исследований — исследование самосогласованной электронно-ионной оптики в высоковольтном тлеющем разряде, энергетика газового разряда и разрядной плазмы, взаимодействия электронных и ионных пучков с веществом.