

УДК 537.533

Исследование оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием метода компьютерного анализа изображений

В. И. Мельник, И. В. Мельник

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
Украина, Киев

Особенностью электронно-оптических систем на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) является наличие подвижной границы анодной плазмы, которая является источником положительных ионов и может рассматриваться как прозрачный для электронов электрод, потенциал которого близок к анодному. Для анализа подобных электронно-оптических систем (ЭОС) используются экспериментальные данные о положении и форме плазменной границы. Для получения этих данных проводились фотографирование разряда в реальных электродных системах, сканирование полученных фотографий и анализ их яркости. Узловые точки границы между областью катодного падения потенциала и областью анодной плазмы определялись в местах увеличения яркости при ее считывании в направлении от катода к аноду. Между узловыми точками искомая кривая интерполировалась кубическими сплайнами. Тестовые расчеты проводились для реальных диодных электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда, используемых в газоразрядных источниках электронов.

Источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой находят широкое применение при реализации технологических операций сварки, пайки и отжига малогабаритных изделий в электронной промышленности и в приборостроении [1], при нанесении тонких пленок окислов и нитридов металлов [3, 10], в металлургии и в машиностроении при плавке металлов и отжиге крупногабаритных изделий [3, 11]. Это связано с такими неоспоримыми преимуществами газоразрядных источников электронов над традиционными термокатодными, как достаточно стабильная и устойчивая работа при рабочих давлениях порядка единиц-десятков паскаль, простота конструкции катодного узла, простота управления током электронного пучка путем изменения давления.

Однако дальнейшее развитие и внедрение в промышленность этих перспективных источников электронов сдерживается из-за сложности анализа электронной оптики высоковольтного тлеющего разряда, поскольку на траектории заряженных частиц оказывают существенное влияние положение и форма границы анодной плазмы, существующей в высоковольтном тлеющем разряде. Решение самосогласованной задачи определения электрического поля в области катодного падения потенциала и определения положения и формы границы анодной плазмы для реальных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда является крайне затруднительным, а в ряде случаев такого решения не существует [2, 3, 10]. Поэтому для моделирования электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда применяют теоретико-экспериментальную методику, при которой положение и форма границы плазмы определяются из фотографий разрядного промежутка, а затем полученные данные используются при компьютерном моделировании распределения электрического поля и траекторий частиц [10].

Ниже рассмотрен метод моделирования ЭОС ВТР, в котором узловые точки границы анодной плазмы определяются путем считывания информации из графических файлов с фотографиями разрядного промежутка, а между узловыми точками искомая кривая интерполируется кубическими сплайнами. Решение самосогласованной задачи определения траекторий движения заряженных частиц в электрическом поле с учетом их пространственного заряда проводилось с использованием модифицированного алгоритма метода трубок тока, предложенного в работе [10]. Приведены результаты моделирования для реальных диодных электродных систем ВТР, которые сравниваются с экспериментальными данными для фокальных параметров пучка.

Особенности геометрии диодных электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда

Поскольку в ВТР плотность тока с эмиттера электронов относительно невысокая (до 10^5 А/м²) [1, 3], одной из главных отличительных особенностей электродных систем технологических газоразрядных источников электронов является использование катодов с развитой эмиссионной поверхностью. Поэтому ЭОС ВТР не могут рассматриваться как параксиальные, и для их численного анализа необходимо использовать наиболее общие методы моделирования интенсивных потоков заряженных частиц, например, метод макрочастиц [6, 7], метод трубок тока [2, 3, 10], метод интегральных уравнений [6, 9].

Другая особенность ЭОС ВТР — наличие в разряде подвижной границы анодной плазмы, которая является эмиттером ионов и может рассматриваться как прозрачный для электронов электрод с определенным потенциалом, определяемым рабочим давлением и мощностью разряда [1, 3]. Для диодных систем ВТР с высокой степенью точности можно считать, что потенциал поверхности плазмы равен анодному потенциалу [1, 10].

На рис. 1 приведена схема ЭОС диодной пушки ВТР. Она содержит катод, имеющий развитую вогнутую эмиссионную поверхность, и полый анод, выполненный в виде замкнутой полости для поддержания горения высоковольтного разряда. Для фокусировки пучка при его транспортировке к обрабатываемому изделию используется магнитная линза.

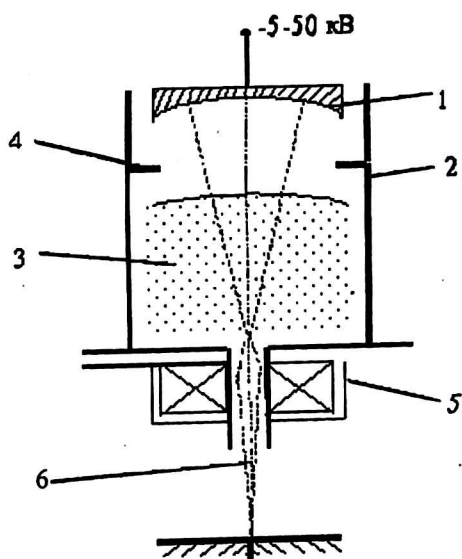


Рис. 1. Электродная система источников электронов на основе ВТР:

1 — катод; 2 — анод; 3 — анодная плазма;
4 — анодная диафрагма; 5 — магнитная линза для фокусировки пучка; 6 — электронный пучок

Между катодом и анодом образуется анодная плазма, которая занимает замкнутый объем исходя из условия равновесия давления электрического поля со стороны области катодного падения потенциала и кинетического давления электронов плазмы. В наиболее общей форме уравнение для равновесного положения границы плазмы можно записать в виде [1]:

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)^2 \Big|_{r \in \Gamma} = f(p), \tag{1}$$

где $\frac{\partial\varphi}{\partial n}$ — 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 высоковольтного тлеющего разряда, где напряжение между катодом и анодом составляет единицы-десятки киловат, а давление в области горения разряда — единицы-десятки паскаль, для определения кинетического давления электронного газа в плазме можно использовать соотношения классической термодинамики Максвелла—Больцмана, тогда уравнение равновесия (1) можно записать в более простой форме [1, 3]:

$$\frac{\varepsilon_0 E_n^2}{2} = n_e k T_e, \tag{2}$$

где E_n — электрическое поле возле границы плазмы;
 n_e — концентрация электронов в плазме;
 T_e — их температура.

Для одномерной модели высоковольтного разрядного промежутка расстояние от катода до анодной плазмы можно, исходя из соотношения (2), определить аналитически [2]:

$$d_{\text{кп}} = l - \frac{I_p}{\bar{Q}_{\text{ео}} \left(\chi \gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5\mu_{\text{io}} k T_e}{R^2 p_{\text{ао}}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{k T_i}}}, \tag{3}$$

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

Если предположить, что граница анодной плазмы имеет форму сферы и концентрична поверхности катода, что имеет место при больших и средних значениях тока разряда [10], для аксиально-симметричных систем высоковольтного тлеющего разряда с полым анодом электродная система которых приведена на рис. 1, легко пересчитать значение расстояния от поверхности холодного катода до границы анодной плазмы исходя из того, что ее объем

зависит только от давления и электрических режимов разряда и не изменяется при изменении геометрии электродов:

$$d'_{\text{кп}} = R_{\text{к}} - \sqrt[3]{R^2 (R_{\text{к}} - d_{\text{кп}}) \arctg \left(\frac{R}{l} \right)}, \quad (4)$$

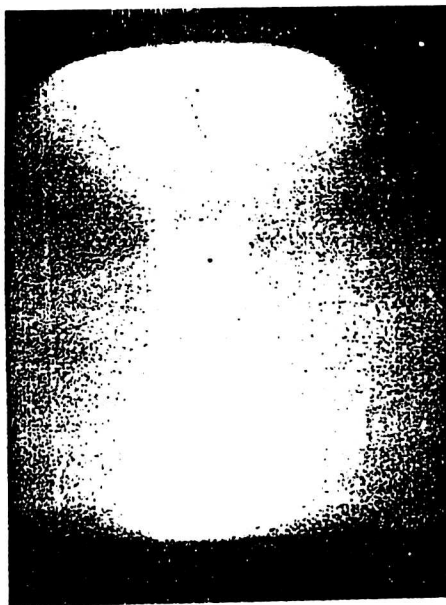
где $R_{\text{к}}$ — радиус сферы катода.

Однако определение всех параметров, входящих в соотношение (3) и зависящих от режима горения разряда, крайне затруднительно и требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований. Использование уравнений (3) и (4) при моделировании ЭОС ВТР с помощью компьютера требует создания баз данных большого объема для хранения значений коэффициентов формулы (3). Кроме того, не во всех случаях корректным является предположение о концентричности границы анодной плазмы и поверхности катода. Тем не менее, соотношения (3), (4) можно использовать для предварительной оценки параметров ЭОС ВТР на этапе их проектирования.

Использование компьютерного анализа изображений для описания геометрии границы плазмы

Современные технологии компьютерного анализа графических изображений, в частности методы сканирования и яркостного анализа фотографий, позволяют предложить значительно более эффективный метод определения положения и конфигурации границы плазмы при теоретико-экспериментальном анализе ЭОС ВТР.

Из фотографии разрядного промежутка (рис. 2) видно, что положения точек границы анодной плазмы легко определить по изменению яркости свечения разряда.



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

Поскольку расстояния от катода до анодного отверстия $d_{ка}$ и до анодной диафрагмы $d_{кд}$ вдоль оси пушки являются известными конструктивными параметрами (см. рис. 1), положение узловых точек границы плазмы определяется из соотношения:

$$d_{кп}^p = \frac{d_{дп}^{\phi}}{d_{ка}^{\phi}} d_{ка}^p + d_{кд}^p, \quad (5)$$

где $d_{кп}$ — расстояние между поверхностью катода и границей анодной плазмы;

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

Для реализации компьютерного метода определения профиля границы плазмы фотографии разряда сканировались и 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 0 (для максимально темного цвета) до 255 (для максимально яркого цвета) [4]. Итоговая яркость точки определяется как среднеарифметическое яркостей ее трех составляющих.

Для алгоритмизации процесса определения профиля границы плазмы необходимо построить яркостную карту анализируемых изображений, которая в наиболее общем виде приведена на рис. 3. Здесь светлые и темные области разряда отделены друг от друга границей анодной плазмы в продольном направлении и областью прохождения электронного пучка — в поперечном направлении. Очевидно, что для рассматриваемых аксиально-симметричных электродных систем ВТР достаточно анализа только одной верхней или нижней части фотографии разряда, а вторая половина фотографии может быть использована для проверки полученного результата. Экспериментальные исследования показали, что практически во всех случаях, за исключением слабых режимов, на фотографиях разрядного промежутка можно выделить пять областей яркости (см. рис. 3):

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, которую не пересекает электронный пучок (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).



Рис. 3. Карта яркости для высоковольтного тлеющего разряда

Как видно из приведенной фотографии, различия яркости между точками второго и третьего уровней могут быть незначительными.

Яркость точек анализировалась вдоль линий, идущих от катода к аноду, поэтому для простоты анализа фотографии, аналогичные приведенным на рис. 2, поворачивались на 90° , и анализ производился в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 3. Это упрощает анализ графических файлов, поскольку в них записывается изменение яркости точек вдоль строки экрана. Точки, соответствующие положению плазменной границы, определялись в местах увеличения суммарной яркости всех цветов, соответствующему либо переходу из области 1 в область 2, либо из области 3 в область 4. Направление считывания яркости точек указано стрелкой на рис. 3.

При проведении такого анализа прежде всего необходимо знать реальный размер фотографии по горизонтали и по вертикали в пикселях [4] для осуществления корректного перехода с одной линии, вдоль которой анализировалась 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 в результате к определению параметров $d_{оп}^\phi$ и $d_{па}^\phi$, которые входят в соотношение (5), причем поскольку нам необходимо знать не сами размеры, а только их отношение, достаточно определить количество точек изображения (пикселей) на измеряемом отрезке. Определенные трудности возникают только из-за того, что, как видно из рис. 2, точки границы плазмы не всегда можно четко различить на фотографии. Поэтому сначала определяется область увеличения яркости, а искомая точка определяется как средняя точка области. Если эта область на выбранной линии слишком обширна для обнаружения искомой точки, то для достижения более корректного результата поиск повторяется на близлежащей соседней линии. Кроме того, для проверки точности результата использовалась нижняя часть фотографии. Алгоритм поиска узловых точек границы плазмы был реализован на программном уровне, и поиск точек осуществлялся автоматически.

При проведении анализа фотографий количество узловых точек бралось в пределах от 30 до 50, а между узловыми точками искомая функция $r(z)$ интерполировалась кубическими сплайнами [5]:

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

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

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

где i — номер узла;

h — расстояние между узлами, которое в соответствии с реализованным алгоритмом поиска узловых точек могло изменяться;

N — число точек;

b, c, d — коэффициенты интерполяции.

Система уравнений (6) решалась методом прогонки [5]. Коэффициенты, используемые для интерполяции границы плазмы, запомнились в числовом виде и использовались для анализа других электродных систем ВТР.

Результаты моделирования электронно-оптического высоковольтного тлеющего разряда и его верификация

На рис. 4 приведены кривые, характеризующие положение и конфигурацию плазменной границы для ЭОС ВТР с соблюдением масштаба по продольной и поперечной координате. Очевидно, что при малых давлениях форма границы плазмы отличается от сферической и приведенные выше оценки параметра $d_{\text{кп}}$ справедливы только для режимов больших токов разряда. Эти данные подтверждаются также результатами анализа точности моделирования ЭОС ВТР [8, 12].

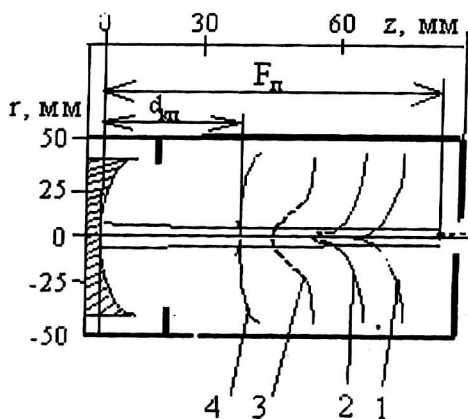


Рис. 4. Конфигурация и положение границы плазмы для различных режимов разряда: ускоряющее напряжение — 15 кВ; ток разряда: 1 — 20 мА; 2 — 50 мА; 3 — 100 мА; 4 — 200 мА

Анализ распределения электрического поля в области катодного падения потенциала и определения траекторий заряженных частиц проводился с использованием модифицированного алгоритма метода трубок токов, предложенного и описанного в работе [10]. 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 макрочастиц, который обычно используется для анализа систем со встречными взаимодействующими потоками [6, 7], однако метод трубок токов является более эко-

номичным по затратам процессорного времени и оперативной памяти. График плотности тока пучка в кроссовере, полученный по численному алгоритму, предложенному в работе [10], приведен на рис. 5.

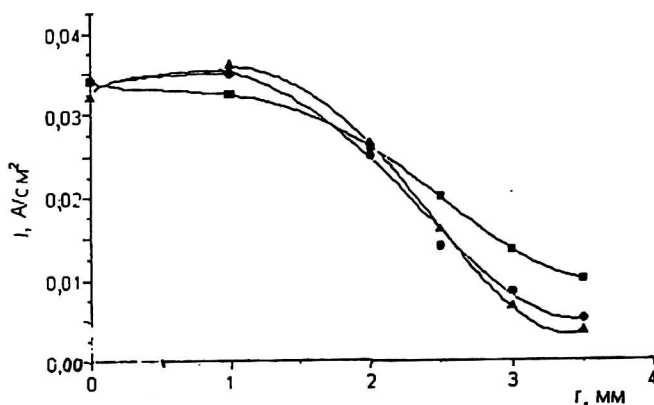


Рис. 5. Распределение плотности тока в кроссовере электронного пучка. Ток разряда — 100 мА

Результаты верификации расчетных и экспериментальных данных приведены в таблице.

Ускоряющее напряжение, кВ	Ток разряда, мА	Положение кроссовера пучка (расчет/ эксперимент), мм	Фокальный диаметр пучка (расчет/ эксперимент), мм
15	50	55/50	1,35/1,4
	100	62/58	1,38/1,3
	150	65/63	1,44/1,5
	200	66/67	1,56/1,6
	250	67/67,5	1,69/1,74
20	50	51,5/48	1,25/1,3
	100	56,5/55	1,3/1,2
	150	62,5/61	1,37/1,4
	200	67/65,5	1,42/1,45
	250	67,5/67	1,5/1,53

Очевидно, что полученные результаты обеспечивают большую точность моделирования, чем аналогичные данные для границы плазмы, модулируемой сферой, концентричной с поверхностью холодного катода, причем для анализа оптических свойств ЭОС использовался один и тот же метод [8, 12]. Однако если для положения кроссовера электронного пучка экспериментальная и теоретическая зависимости практически совпадают, то для экспериментальной зависимости фокального диаметра пучка от тока разряда наблюдается минимум в области малых токов разряда, а соответствующая теоретическая зависимость в области тех же токов разряда является строго возрастающей, хотя очевидно, что уменьшение фокального диаметра пучка обусловлено фокусирующими свойствами выпуклой границы плазмы (см. рис. 4). По всей видимости, несоответствие расчетных и экспериментальных данных в области малых токов разряда обусловлено сложностью определения границы темной и светлой областей при яркостном анализе фотографий.

Выводы

Использование при исследовании ЭОС ВТР для определения положения и конфигурации границы плазмы метода компьютерного анализа изображений позволяет повысить точность моделирования — по сравнению с методом, в котором граница плазмы моделируется в виде части сферы, концентричной с поверхностью катода [8].

Аппроксимация кривой, описывающей границу плазмы, кубическими сплайнами, позволила при использовании метода трубок тока достичь точности оценок фокальных параметров пучка для ЭОС ВТР 30–35 % во всем диапазоне рабочих напряжений и токов разряда. Несоответствие теоретической и экспериментальной зависимостей фокального диаметра пучка от тока разряда, по всей видимости, обусловлено сложностью определения границы темной и светлой областей при анализе яркости фотографий.

Литература

1. Новиков А. А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
2. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. — М.: Наука, 1985. — 335 с.
3. Завьялов М. А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
4. Романов В. Ю. Популярные форматы файлов для хранения графических изображений. — М.: Унитех, 1992. — 156 с.
5. Самарский А., Гулин С. Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 225 с.
6. Силады М. Электронная и ионная оптика. — М.: Мир, 1990. — 640 с.
7. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. — М.: Мир, 1987. — 640 с.
8. Денбновецкий С. В., Мельник И. В. Оценка погрешности моделирования электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда// Электроника и связь. 1997. Ч. 1. № 2: Тематический сборник по материалам научно-технической конференции “Проблемы физической и биомедицинской электроники”. — Киев, 1997. С. 133–137.
9. Andretta M., Marini M., Zanarini G. Nutrical simulation of a rotation-symmetric space-symmetric space-charge effects in the near-cathode region// IEEE: Transactions on Electron Devices, 1986, vol. ED-33, August. P. 1084–1089.
10. Denbnovsky 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.
11. Felba J., Friedel K., Przybecky K. Application of glow discharge electron gun to surface modification// Vacuum, 41, 1990, № 7–9. P. 2177–2180.
12. Denbnovsky S. V., Felba J., Melnik V. I., Melnik I. V. The desing of glow discharge electron gun with cold cathode by means of experimentally verified model of beam formation. — Fifth international conference on electron beam technologies. — Varna, 1997. P. 23–28.

Investigation of high voltage glow discharge electrode's systems optic by using an image analyzing computer method

V. I. Melnik, I. V. Melnik

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Ukraine, Kiev

The main singularity of electron-optical systems based on high-voltage glow discharge is an existing of moving plasma boundary which is a source of positive ions and can be considered as a moving electrode with the near-anode potential. For analysing of such electron-optical systems experimental data about plasma boundary form and position is used. Making photographs of discharge in a standard electrode's systems its scanning and brightness analyse are provided for obtaining that data. The node points of the boundary between the near-cathode dark region and anode plasma was defined in the places of brightness increasing, if the values of brightness getting in direction from cathode to anode. Between the nodes obtained curves were interpolated by using cube splines. The test calculations have been provided for standard high-voltage glow discharge electron optical systems.