

УДК 537.525

И.В. Мельник, д-р техн. наук, С.Б. Тугай

Исследование электронно-оптических свойств триодных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения и формы границы анодной плазмы

Проведен анализ положения и формы границы анодной плазмы в триодных электродных системах высоковольтного тлеющего разряда. Методика анализа основана на фотографировании разрядного промежутка и на использовании современных методов компьютерной обработки изображений. Полученные результаты показали принципиальную возможность и перспективность использования триодных электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда в современных электронно-лучевых технологиях.

Analyzing of anode plasma boundary form and position in triode high voltage glow discharge electrodes systems is provided. Methodic of analyzing is based on photographing of discharge gap and on using of up-date methods of computer image recognizing. Obtained results show the principle possibility and perspectives of using triode glow discharge electron guns in the novel electron-beam technologies.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд, триодная электродная система, анодная плазма, компьютерный анализ изображений.

Введение

В современных электронно-лучевых технологиях широкое применение находят электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [1, 2]. Эти перспективные источники электронов отличаются относительной простотой и надежностью работы, длительным сроком службы холодного катода, устойчивостью работы в широком диапазоне давлений в среде различных газов, а также простотой управления мощностью формируемого электронного пучка, осуществляемого путем изменения давления в области горения ВТР или малоинерционным электрическим способом, за счет зажигания вспомогательных разрядов [3]. Малоинерционное электрическое управление током разряда позволяет не только эффективно изменять параметры электронного пучка при непрерывном режиме горения ВТР [3], но и использовать импульсный режим работы источни-

ков электронов, позволяющий более чем на порядок повысить плотность эмиссионного тока с поверхности холодного катода [1]

Однако использование методов быстрогодействующего электрического управления параметрами ВТР приводит к изменению положения и формы границы анодной плазмы, которая в электродных системах технологических газоразрядных источников электронов рассматривается как источник ионов и как прозрачный для электронов электрод [4, 5]. Соответственно, изменение параметров анодной плазмы оказывает существенное влияние на самосогласованную электронно-ионную оптику ВТР, на распределение электрического поля в разрядном промежутке, и, как результат, на геометрические и энергетические параметры формируемого электронного пучка. Сложность и многообразие физических процессов элементарных и коллективных взаимодействий заряженных частиц, протекающих при зажигании вспомогательных разрядов в ВТР, не позволяет построить адекватную физико-математическую для решения самосогласованной электронно-оптической задачи с подвижной плазменной границей. В связи с этим предварительный анализ электронно-оптических свойств триодных электродных систем ВТР возможен только за счет совместного использования теоретических и экспериментальных данных и построения полуэмпирических моделей.

В работе [6] была предложена теоретико-экспериментальная методика оценки положения и формы границы анодной плазмы ВТР, основанная на фотографировании разрядного промежутка и на яркостном анализе полученных фотографий с использованием современных компьютерных методов распознавания изображений. Предложенная методика является в достаточной степени универсальной и может быть применена для анализа электронно-оптических свойств триодных систем ВТР, что и является предметом исследования данной статьи.

Анализ фотографий разрядного промежутка триодных электродных систем ВТР

Физические основы электрического управления параметрами ВТР состоят в том, что в

электродном промежутке зажигается низковольтный вспомогательный несамостоятельный разряд. Несамостоятельные разряды относятся к типу дуговых полокатодных разрядов, при зажигании которых значительно повышается степень ионизации остаточного газа и увеличивается объём анодной плазмы [1, 3].

На этапе предварительных оценок положения и формы границы анодной плазмы в триодных электродных системах ВТР могут быть использованы аппроксимационные соотношения, полученные в работах [5, 6] для диодных систем, при этом объём, занимаемый анодной плазмой, должен оцениваться исходя из реального тока ВТР с учетом дополнительной ионизации. Тем не менее, зажигание вспомогательного разряда оказывает существенное влияние на форму плазменной границы, поэтому окончательные выводы об электронно-оптических свойствах разрядного промежутка можно сделать только на основе анализа экспериментальных данных. Для определения и аппроксимации формы границы анодной плазмы использовалась методика яркостного анализа фотографий разрядного промежутка, подробно описанная в работах [6, 7]. При этом основной задачей был выбор подходящей функции аппроксимации, адекватно описывающей положение и форму плазменной границы в триодных системах ВТР.

На рис. 1 приведена одна из проанализированных фотографий разрядного промежутка триодной системы ВТР, а на рис. 2 – увеличенная фотография локальной области, в которой расположена граница анодной плазмы. Анализ геометрии границы плазмы показывает, что описывающая ее математическая функция должна иметь локальный минимум на оси симметрии системы и глобальный максимум при некотором значении радиальной координаты r . Общий вид искомой функции и ее параметры приведены на рис. 3.

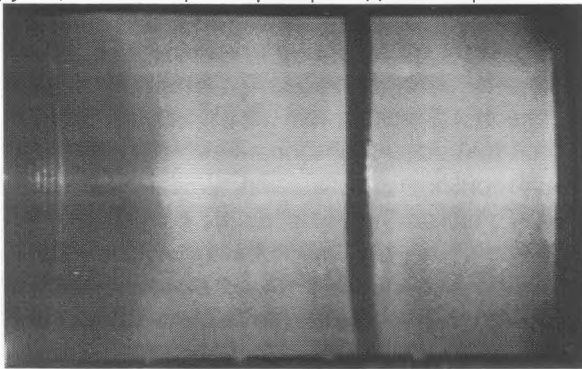


Рис. 1. Фотография разрядного промежутка триодной системы ВТР. Геометрические размеры системы: по горизонтали – 100 мм, по вертикали – 70 мм, ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток разряда – 300 мА, напряжение на вспомогательном электроде – 100 В

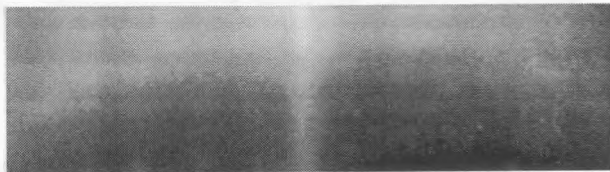


Рис. 2. Фотография локальной области плазменной границы в триодной системе ВТР

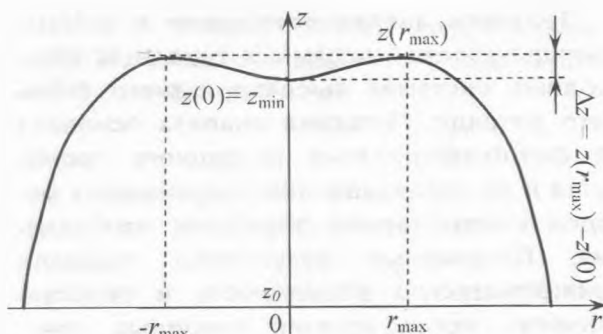


Рис. 3. Обобщенный график функции, описывающей границу анодной плазмы в триодных электродных системах ВТР

Основной особенностью функции, приведенной на рис. 3, является её чётность. Именно эта особенность определяет симметрию электрического поля в триодных электродных системах ВТР, и соответственно, она должна быть сохранена при аппроксимации границы плазмы с целью адекватного описания электронно-оптических свойств моделируемых электродных систем.

Выбор функции аппроксимации границы анодной плазмы

Анализ фотографий разрядного промежутка проводился в соответствии с методикой, предложенной в работах [6, 7]. Карта яркости разрядного промежутка ничем существенно не отличается от соответствующей карты яркости для диодных электродных систем ВТР, особенности которой подробно описывались в работах [6, 7]. На карте яркости, в соответствии с предложенной методикой анализа фотографий разрядного промежутка, были выделены следующие 5 областей.

1. Область, затененная электродами, которая имеет минимальную, нулевую яркость.
2. Прикатодная темная область, через которую не проходят электроны пучка. Эта область имеет первый уровень яркости.
3. Область анодной плазмы, которую не пересекает электронный пучок. Этой области соответствует второй уровень яркости.
4. Прикатодная область, через которую проходят ускоренные электроны пучка. Этой области соответствует третий уровень яркости.

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

Считывание изображений и их перевод в цифровой формат осуществлялись средствами системы MatLab, что позволило легко согласовать их с используемыми алгоритмами математической обработки графической информации в едином программном комплексе.

Решение задачи аппроксимации геометрии границы анодной плазмы проводилось в соответствии с методикой, предложенной в работах [6 – 9], с использованием средств моделирования системы MatLab, включая математические библиотеки и функции аналитического процессора. Проведенные исследования показали, что стандартные функции полиномиальной аппроксимации не могут адекватно описать характерные особенности чётной функции, график которой приведен на рис. 3. В частности, значения функции $z(r_{\max})$ и $z(-r_{\max})$ могут существенно отличаться, а положение минимума функции может не соответствовать нулевому значению радиальной координаты, что существенно нарушает осевую симметрию моделируемой электронно-оптической системы. Использование полиномиальной аппроксимации только для положительных значений координаты r с сохранением симметрии функции $z(r)$ в области отрицательных значений также неприемлемо, поскольку в этом случае имеет место излом функции в точке $r = 0$, который оказывает существенное влияние на распределение электрического поля в приосевой области. Предложенный в работе [7] метод интерполяции плазменной границы кубическими сплайнами также не очень удобен из-за необходимости разбиения интервала интерполяции на отрезки малой длины, на каждом из которых используются различные математические описания функции интерполяции. Это, в конечном итоге, усложняет анализ особенностей геометрии плазменной границы в процессе моделирования электронно-оптических систем ВТР.

Лучше всего подходит для решения поставленной задачи методика аппроксимации, предложенная в работе [6]. В соответствии с этой методикой граница плазмы аппроксимируется простой аналитической зависимостью, которая подбирается с учетом всех характерных особенностей аппроксимируемой функции на всём интервале аппроксимации. Здесь наиболее сложным процессом с вычислительной точки зрения является поиск неизвестных коэффициентов функции аппроксимации. Эта задача решается с использованием стандартного урав-

нения регрессии, основанного на методе наименьших квадратов [6, 8, 9]:

$$F(x_1 \dots x_n) \Big|_{\min} = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \Big|_{\min}, \quad (1)$$

где x_i – точки отсчета аргумента, n – количество точек отсчета, y_i – заданные значения функции, $f(x_i)$ – значения функции аппроксимации. В работах [6, 8, 9] была предложена универсальная методика решения оптимизационной задачи, описываемой уравнением (1), для любой функции аппроксимации $f(x_i)$. Эта методика основана на совместном использовании аналитического процессора и численных методов оптимизации, и её можно представить в виде следующих последовательных шагов.

1. Задаются вектора входных данных для значений аргумента x_i и функции y_i . В нашем случае это отсчетные значения координаты r_i и считанные с фотографии значения координаты z_i , соответствующие границе светлых и темных областей.
2. Определяется функция аппроксимации и её варьируемые параметры.
3. Значение функции аппроксимации $f(x_i)$, а также отсчетные значения x_i и y_i , подставляются в уравнение регрессии (1).
4. В результате математических преобразований, выполняемых с помощью аналитического процессора системы MatLab, находится наиболее простое выражение для функции регрессии $F(c_1 \dots c_n)$, где $c_1 \dots c_n$ – изменяемые параметры функции. Упрощение выражения (1) обычно производится путём сведения подобных слагаемых под знаком суммы.
5. Производится поиск минимума полученной функции $F(x_1 \dots x_n)$ по n переменным.

Например, в MatLab для поиска минимума функции нескольких переменных можно эффективно использовать процедуру **fmins** [8, 9].

Функцию, характерные особенности которой представлены на рис. 3, можно аппроксимировать математической функцией, записанной в виде произведения квадратичного полинома на

экспоненциальную функцию вида $\exp\left(-\frac{r^2}{C}\right)$.

Соответствующее математическое выражение можно записать в виде:

$$z(r) = (Ar^2 + B) \exp\left(-\frac{r^2}{C}\right) + D, \quad (2)$$

где A , B , C , D – эмпирические коэффициенты, которые определяются путём поиска минимума функции регрессии (1). Достоинства предложенной методики аппроксимации состоит в том, что функция (2) является чётной и при любых значениях коэффициентов A , B , C и D адекватно описывает характерные особенности границы анодной плазмы в триодных системах ВТР, которые показаны на рис. 3. Результат аппроксимации границы плазмы, приведенной на фрагменте фотографии на рис. 2, полученной с использованием функции (2), приведен на рис. 4. Соответствующая математическая функция имеет вид:

$$z[M](r[M]) = 0,0443 + \left(0,0238r[M]^2 + 7,94 \cdot 10^{-4}\right) \exp\left(\frac{-r[M]^2}{0,06}\right). \quad (3)$$

Из рис. 4 очевидно, что исходная фотография имеет большую зашумлённость, что связано с особенностями горения ВТР и с существенным влиянием флуктуационных факторов на параметры ионизации газа, а также на концентрацию и температуру ионов в анодной плазме [1]. При анализе фотографий диодных систем ВТР также наблюдалась их значительная зашумлённость [6].

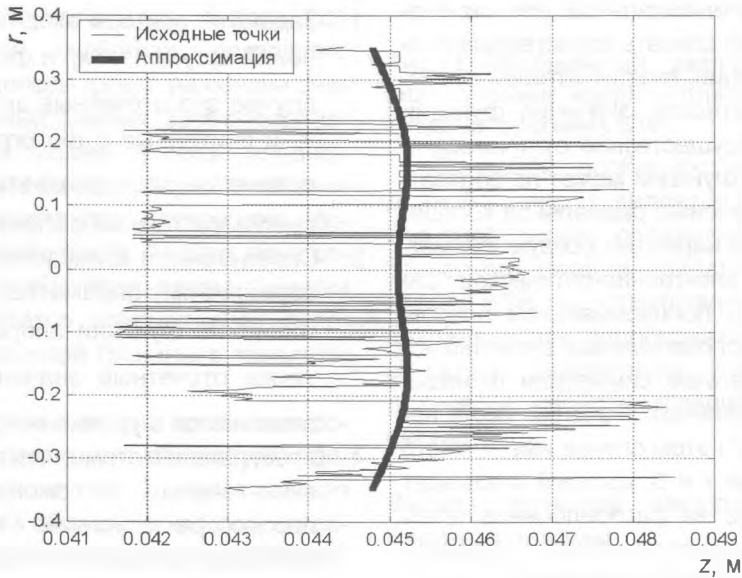


Рис. 4. Аппроксимация границы плазмы функцией вида (2), выполненная средствами пакета MatLab с использованием фрагмента фотографии, приведенного на рис. 2

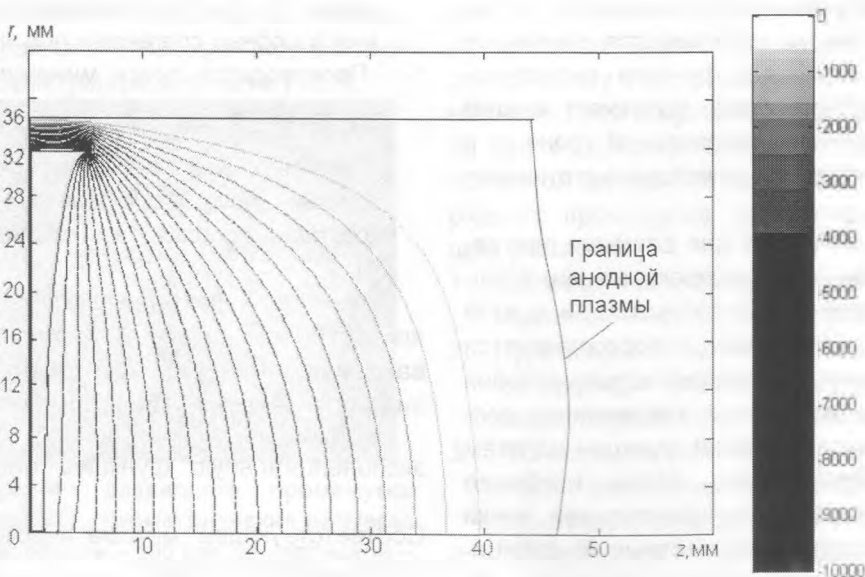


Рис. 5. Моделирование распределения электрического поля в триодной электродной системе ВТР

На рис. 5 приведено распределение электрического поля в триодной электродной системе ВТР, при проведении расчетов для аппроксимации границы плазмы использовалось соотношение (3).

Анализ результатов моделирования показал, что в триодных системах ВТР граница анодной плазмы оказывает дефокусирующее действие на электронный пучок в периферийной области разряда, в связи с чем его фокальный диаметр обычно на 5–10% больше, чем для соответствующих режимов разряда в диодных электродных системах. Полученные результаты моделирования полностью соответствуют имеющимся экспериментальным данным [3]. Погрешность моделирования, которая оценивалась по геометрическим фокальным параметрам формируемого электронного пучка, составляла не более 15-20%. Для расчета траекторий частиц и определения фокальных параметров пучка использовались известные вычислительные алгоритмы, которые были подробно описаны в работе [10].

Выводы

Полученные результаты моделирования распределения электрического поля и траекторий электронов пучка с учетом реальной геометрии границы анодной плазмы показали принципиальную возможность использования триодных электронных пушек ВТР для осуществления большинства технологических операций [2]. Это открывает широкие перспективы для дальнейшего внедрения в промышленность перспективных газоразрядных электронных пушек, а применение малоинерционного электрического управления параметрами разряда позволит значительно расширить их технологические возможности.

Литература

1. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. // Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. – М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
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». – 2005. – Часть 2. – С. 84–87.
3. 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, August 17-21, 1998, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings. – Vol.2. – P. 637–640.
4. 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. – 111 (1997). - P. 288-294.
5. Мельник И.В. Аналитическая оценка положения границы плазмы в электродных системах высоковольтного тлеющего разряда с коническим анодом. // Электроника и связь. – №8 (2000). – Т. 1 – С. 107–109.
6. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Аппроксимация положения и формы границы анодной плазмы в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – Часть 1 (2009). – С. 83–88.
7. Мельник И.В. Исследование электронно-ионной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием методов компьютерного анализа изображений // Электронное моделирование. – 2007. – Т. 29. – №1. – С. 45–58.
8. Мельник И.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. – К.: Університет «Україна», 2009 – Т. 1. Основи роботи та функції системи. – 507 с.
9. Мельник И.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. – К.: Університет «Україна», 2009. – Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. – 327 с.
10. Мельник И.В. Численное моделирование распределения электрического поля и траекторий частиц в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48. – №6. – С. 61-71.