

УДК 537.525

А.С. Климов, С.А. Останин

Распределение концентрации плазмы в разряде с протяженным полым катодом форвакуумного плазменного источника электронного пучка

Представлены результаты исследования распределения концентрации плазмы в разряде с полым катодом форвакуумного источника ленточного электронного пучка. Исследования проводились в диапазоне давлений, соответствующих форвакууму (10–30 Па). Показано, что изменение геометрии катодной полости, давления и величины разрядного тока в разной степени влияет на характер распределения концентрации плазмы вблизи эмиссионной границы. Формирование однородного распределения возможно при использовании относительно широкой и глубокой катодной полости. Уменьшение глубины катодной полости приводит к появлению максимумов концентрации плазмы вблизи краев полости. На основе экспериментальных данных предложена качественная модель, описывающая физические процессы образования и гибели частиц в исследуемом разряде с протяженным полым катодом.

Ключевые слова: плазменный электронный источник, тлеющий разряд, распределение концентрации, форвакуумная область давлений.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-26-29

Источники ленточных электронных пучков применяются в различных технологических процессах термического и плазмохимического воздействия на материалы, включая электронно-лучевую обработку поверхности, плазмохимические реакции, травление тонкого монослоя потоками частиц из создаваемой электронным пучком плазмы [1–5]. Один из способов формирования электронного пучка ленточной конфигурации основан на использовании эмиссии из тлеющего разряда в протяженном полым катодом [6]. Традиционная область давлений, в которой функционируют источники электронов с плазменным катодом, находится в диапазоне 10^{-3} –0,1 Па [7]. Однако наиболее оптимальный, с точки зрения получения плотной пучковой плазмы, диапазон давлений газа на несколько порядков выше 1–100 Па [8], что соответствует среднему вакууму или форвакууму, для получения которого используются лишь механические системы откачки – форвакуумные насосы. Электронные источники, способные генерировать электронные пучки при таких давлениях, получили название форвакуумных [9].

Одним из преимуществ источников электронов с плазменным катодом по сравнению с термокатодными источниками является возможность генерации электронных пучков большого сечения [10, 11], к которым относятся и пучки ленточной конфигурации, т.е. электронные пучки с поперечным сечением, представляющим собой прямоугольник с толщиной много меньше ширины.

Одним из параметров, определяющих эффективность электронно-лучевой обработки, является однородность плотности тока по сечению пучка. Для пучков ленточной конфигурации этот параметр является одним из важных, поскольку именно от равномерности плотности тока зависят равномерность обработки самим пучком, а также равномерность создаваемой пучковой плазмы. При этом равномерность распределения плотности тока пучка

зависит от двух параметров – однородности распределения плазмы вблизи эмиссионной границы и распределения электрического поля в ускоряющем промежутке. На однородность эмиссионной плазмы в свою очередь могут оказывать влияние параметры разряда, геометрия катодной полости и давление газа [12–14].

Цель настоящей работы заключалась в определении наиболее существенных параметров, влияющих на равномерность распределения концентрации плазмы вблизи эмиссионной границы.

Экспериментальная установка

Исследование проводилось с использованием макета форвакуумного плазменного электронного источника, основанного на разряде с протяженным полым катодом. Электронный источник представлял собой трехэлектродную систему (рис. 1).

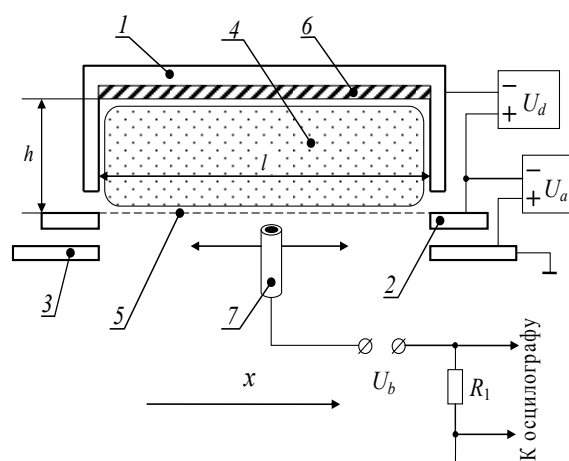


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – плазма; 5 – эмиссионная сетка; 6 – вкладыш; 7 – перемещаемый зонд

Основными электродами источника являлись протяженный прямоугольный полый катод 1, плоский анод 2 и ускоряющий электрод – экстрактор 3.

Разряд с полым катодом, зажигаемый между плоским анодом и протяженным полым катодом, служил генератором плазмы 4. Внутренние размеры катодной полости составляли $280 \times 60 \times 30$ мм³. Расстояние катод–анод во всех экспериментах устанавливалось равным 5 мм. Извлечение электронов осуществлялось через протяженное эмиссионное окно в аноде, перекрытое мелкоструктурной вольфрамовой сеткой 5 с прозрачностью 80%. Эмиссионное окно представляло собой протяженную щель с размерами 280×10 мм². Использование вольфрама в качестве материала сетки позволяло работать при повышенных давлениях и в условиях интенсивного нагрева сетки обратным ионным потоком из ускоряющего промежутка источника. Все электроды источника изготавливались из нержавеющей стали. Конструкция ускоряющего промежутка источника обеспечивала сохранение электрической прочности и работоспособности источника вплоть до давлений 30 Па при ускоряющем напряжении до 10 кВ.

Медные вкладыши 6 позволяли изменять внутреннюю геометрию катодной полости, в частности глубину h полого катода, от 60 до 24 мм.

Измерение концентрации n плазмы в катодной полости производилось перемещаемым одиночным лэнгмюровским зондом 7 по ионному току насыщения [15]. Обработка зондовой характеристики осуществлялась по стандартной методике. Зонд устанавливался за эмиссионной сеткой со стороны ускоряющего промежутка на устройстве перемещения, что позволяло двигать его вдоль протяженного размера катодной полости. Расположение зонда непосредственно в катодной полости, т.е. при снятой эмиссионной сетке, приводило к возмущению плазмы разряда. В связи с этим измерения концентрации плазмы проводились вне разрядной ячейки в непосредственной близости к эмиссионной сетке.

Ионы, подлетающие к эмиссионной сетке, пролетают сквозь ее ячейки и попадают на приемную поверхность зонда. За счет рассеяния часть ионов теряется, однако это не может сказаться на характере распределения концентрации вдоль катодной полости. Специальные измерения концентрации плазмы, проведенные непосредственно в катодной полости, и сравнение с измерениями за эмиссионной сеткой показали, что потери ионов составляют не более 10–20% во всем диапазоне варьируемых параметров. Отрицательное смещение на зонд подавалось от источника стабилизированного напряжения порядка 20 В. Ток зонда определялся с помощью осциллографа Tektronix TDS2024B по величине падения напряжения на измерительном резисторе R_1 номиналом 10 кОм. Измерения проводились в атмосфере аргона при давлениях 12,5; 17,5 и 26 Па.

Результаты работы и их анализ

Исследования показали, что на характер распределения концентрации плазмы оказывают влияние давление газа, величина разрядного тока, а также геометрия катодной полости. Уменьшение глубины полости неизменно нарушало однородность распределения концентрации плазмы – концентрация на

краях полости в несколько раз превышала концентрацию в ее средней части. С уменьшением глубины и ростом давления газа разница между концентрацией на краю и средней частью только увеличивалась (рис. 2, 3).

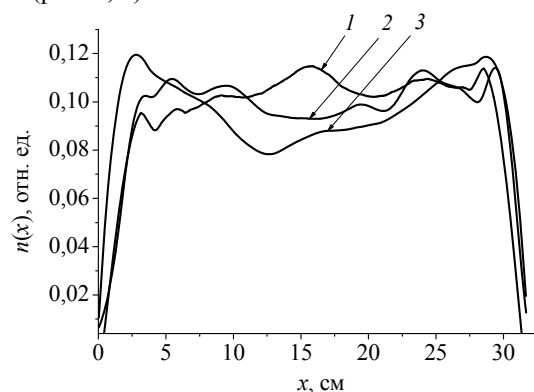


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 12 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 60 мм, 2 – 54,5 мм, 3 – 48 мм

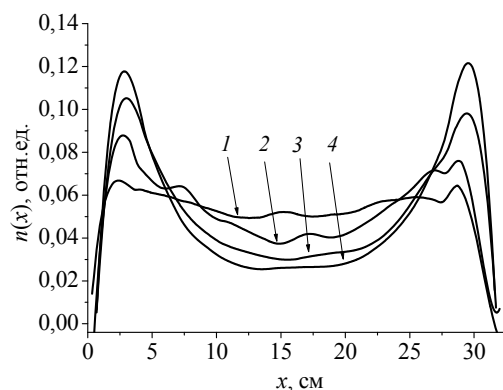


Рис. 3. Распределение концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 26 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 60 мм, 2 – 54,5 мм, 3 – 36 мм, 4 – 24 мм

Объяснение полученных результатов может быть дано на основе учета процессов генерации и ухода частиц из плазмы газового разряда. Как известно, в тлеющем разряде основными механизмами рождения заряженных частиц – ионов и электронов является ионизация газа, причем в ионизации участвуют как сами плазменные электроны, так и электроны, рождаемые за счет вторичной ион-электронной эмиссии со стенок катодной полости. При повышенных давлениях форвакуумного диапазона длина свободного пробега электронов в атмосфере аргона составляет несколько сантиметров, и ионизация нейтральных атомов вторичными электронами происходит в основном вблизи торцевых стенок полости. Это и может служить объяснением повышения концентрации плазмы вблизи торцевых стенок катодной полости в случае работы в атмосфере аргона при повышении давления.

Указанный механизм образования неоднородности был положен в основу полуколичественной модели процессов в плазме разряда с протяженным полым катодом. Измерения показали, что в попереч-

ном сечении катодной полости плазма более однородна, чем в продольном (вдоль оси x), это позволило существенно упростить расчет и перейти к одномерной модели, учитывающей изменение концентрации n и потенциала плазмы ϕ только вдоль одной координаты x . При построении модели учитывалось, что движение заряженных частиц в плазме происходит за счет дрейфа и диффузии, плазма положительна относительно анода, электроны покидают плазму за счет теплового движения с учетом потенциально-го барьера между ней и анодом, рождение ионов и электронов происходит за счет ионизации молекул газа как плазменными, так и вторичными электронами.

При построении модели был использован подход, описанный в [16]: записывались уравнения непрерывности для потоков ионов и электронов, а также выражения для самих потоков. Дополнительно учитывалось рождение заряженных частиц за счет ион-электронной эмиссии со стенок катодной полости, а также размеры самой полости. Уравнения непрерывности для потоков ионов j_i и электронов j_e , таким образом, представляли собой:

$$\text{div } j_i = W_p + W_\gamma - Z_i, \quad (1)$$

$$\text{div } j_e = W_p + W_\gamma + W_{\gamma s} - Z_e, \quad (2)$$

где $W_p, W_\gamma, W_{\gamma s}$ – слагаемые, учитывающие рождение заряженных частиц за счет ионизации газа плазменными электронами, γ -электронами, а также вклад самих γ -электронов соответственно $1/(\text{м}\cdot\text{с})$; Z_i и Z_e – скорость исчезновения заряженных частиц, $1/(\text{м}\cdot\text{с})$.

С учетом процессов диффузии и дрейфа заряженных частиц выражения для потоков могут быть представлены как

$$j_i = -D_i \cdot \frac{dn}{dx} \cdot S - \mu_i \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot n \cdot S, \quad (3)$$

$$j_e = -D_e \cdot \frac{dn}{dx} \cdot S + \mu_e \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot n \cdot S, \quad (4)$$

где μ_i, μ_e, D_i, D_e – подвижности и коэффициенты диффузии ионов и электронов соответственно; $S = h \cdot l$ – площадь сечения плазмы, м^2 .

Скорости рождения частиц $W_p, W_\gamma, W_{\gamma s}$ могут быть представлены:

$$W_p = \beta \cdot n \cdot S, \quad (5)$$

где β – выход ионизации плазменными электронами, $1/\text{с}$.

$$W_\gamma = 0,4 \frac{\phi}{U_i} \gamma n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot S, \quad (6)$$

где γ – коэффициент ионно-электронной эмиссии; M_i – масса иона, кг ,

$$W_{\gamma s} = 0,4 \gamma n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot (2a + b - 4l_s), \quad (7)$$

$$Z_i = 0,4 n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot (2a + b - 4l_s), \quad (8)$$

$$Z_e = \frac{1}{4} n \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{kT_e}\right) \cdot (b - 2l_s), \quad (9)$$

где $\Delta\phi$ – разность потенциалов плазма-анод, В.

Продольная координата x отсчитывалась от середины полости. Для решения системы уравнений начальное значение концентрации бралось из эксперимента и составляло порядка $1,2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, в предположении симметрии задачи значение первой производной концентрации в начальной точке устанавливалось равным нулю. Сечение ионизации, подвижности, а также другие константы были взяты из [17]. Система уравнений (1)–(4) решалась численными методами: значения концентрации, потенциала плазмы, а также величины потоков рассчитывались пошагово для данного значения координаты. В результате решения были получены распределения концентрации плазмы, представленные на рис. 4 и 5.

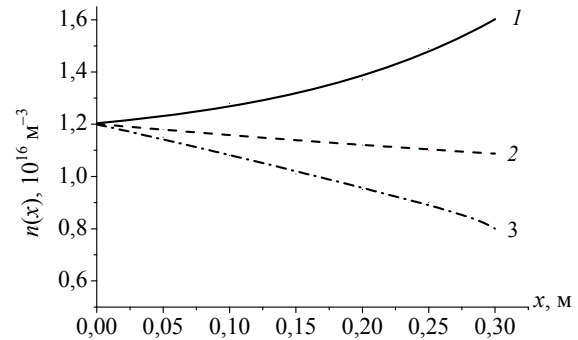


Рис. 4. Расчетные распределения концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 12 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 23 мм, 2 – 24 мм, 3 – 25 мм

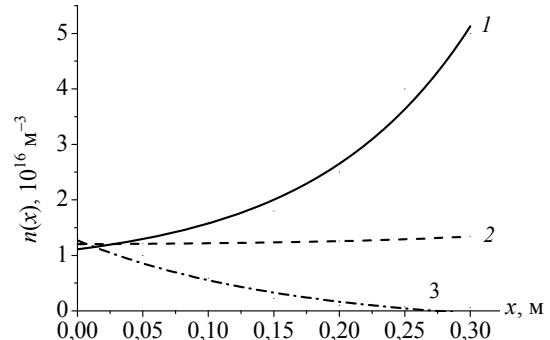


Рис. 5. Расчетные распределения концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 26 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 23 мм, 2 – 24 мм, 3 – 25 мм

Представленные на рис. 4, 5 расчетные кривые $n(x)$ для разных глубин катодной полости находят в качественном соответствии с экспериментальными результатами, представленными на рис. 2, 3. Однако в расчетных результатах наблюдается более резкая зависимость концентрации плазмы от размеров катодной полости, в частности ее глубины h . Так, изменение глубины на несколько миллиметров вызывает резкое изменение в характере распределения концентрации плазмы – от максимума в средней части до появления максимумов вблизи ее торцов. Такое поведение расчетной зависимости скорее всего связано с простотой расчетной модели, не учитывающей изменение концентрации в поперечном сечении полости. Тем не менее расчетные зависимости отражают тенденции, наблюдаемые эксперимен-

тально: уменьшение глубины полости приводит к росту концентрации вблизи торцевых стенок катода; рост давления способствует более существенному росту концентрации вблизи торцов полости.

Проведенные расчеты подтверждают сформулированные соображения относительно физического механизма формирования распределения $n(x)$ в разряде с протяженным полым катодом. С уменьшением глубины полости характер распределения меняется – концентрация плазмы повышается вблизи торцевых стенок катодной полости и существенно зависит от давления газа – рост давления приводит к более существенному росту концентрации.

Заключение

Распределение концентрации плазмы в полой катоде форвакуумного источника ленточного электронного пучка в диапазоне давлений 10–30 Па в значительной степени зависит от геометрии катодной полости и давления газа. Наиболее равномерное распределение концентрации плазмы во всем исследуемом диапазоне давлений наблюдается в случае достаточно глубокой полости, когда длина свободного пробега электронов превышает глубину в несколько раз. Определены параметры геометрии полости, при которых удается получать равномерное распределение концентрации плазмы.

Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта № 3.9605.2017/8.9.

Литература

1. Atomic fluorine densities in electron beam generated plasmas: A high ion to radical ratio source for etching with atomic level precision / D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov, S.G. Walton // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2017. – Vol. A35. – P. 01A104.
2. Leonhardt D. Applications of Electron-Beam Generated Plasmas to Materials Processing / D. Leonhardt, C. Murator, S.G. Walton // *IEEE Trans. on Plasma Science.* – 2005. – Vol. 33, No. 2. – P. 783.
3. Vasilieva T.M. Application of electron beam plasma for biopolymers modification // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2012. – Vol. 370. – P. 012012.
4. Agarwal A. Plasma atomic layer etching using conventional plasma equipment / A. Agarwal, M. J. Kushner // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. A27. – P. 37.
5. Electron Beam Generated Plasmas for Ultra Low Te Processing / S.G. Walton, D.R. Boris, S.C. Hernández et al. // *J. Solid State Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 4, No. 6. – P. 5033–5040.
6. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 156 с. (пер. на англ. язык: Oks E.M. Plasma Cathode Electron Sources – Physics, Technology, Applications. – N.Y.: WILEY-VCH, 2006. – 172 p.).
7. Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
8. Production of large-area plasmas by electron beams / R.F. Fernsler, W.M. Manheimer, R.A. Meger et al. // *Physics of Plasmas.* – 1998. – Vol. 5, No. 5. – P. 2137.
9. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник и др. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.

10. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *Приборы и техника эксперимента.* – 2003. – № 2. – С. 127–129.

11. Бурдовицин В.А. Параметры «плазменного листа», генерируемого ленточным электронным пучком в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *Изв. вузов. Физика.* – 2004. – № 3. – С. 74–77.

12. Гаврилов Н.В. Генерация однородной плазмы в тлеющем разряде с полым анодом и широкоапертурным полым катодом / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, С.П. Никулин // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 83–88.

13. Никулин С.П. Генерация однородной плазмы и широких ионных пучков в пеннинговской системе с неэквивалентным полым катодом / С.П. Никулин, Д.Ф. Чичигин, П.В. Третников // *ЖТФ.* – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 39–42.

14. Мартенс В.Я. Управление распределением плотности тока по поверхности плазменного эмиттера большой площади / В.Я. Мартенс, Е.Ф. Шевченко // *Письма в ЖТФ.* – 2011. – Т. 37, № 8. – С. 71–78.

15. Чен Ф. Диагностика плазмы / Ф. Чен; под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. – М.: Мир, 1967. – 515 с.

16. Климов А.С. Тлеющий разряд с неоднородным полым катодом для форвакуумных плазменных источников электронов / А.С. Климов, Ю.А. Бурачевский, И.С. Жирков // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – 2008. – 2(18), ч. 2. – С. 53–58.

17. Левитский, С.М. Сборник задач и расчетов по физической электронике / С.М. Левитский. – Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1964. – 212 с.

Климов Александр Сергеевич

Д-р техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРА
Тел.: +7-905-990-52-41
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Останин Сергей Александрович

Студент каф. физической электроники ТУСУРА
Тел.: +7-913-109-73-28
Эл. почта: super_gaara@mail.ru

Klimov A.S., Ostanin S.A.

Plasma density distribution in the discharge with an extended hollow cathode of the fore-vacuum plasma electron source

The article presents the results of an investigation of the plasma density distribution in a hollow cathode discharge of a ribbon electron beam source. The investigations were carried out in the forvacuum pressure range (10–30 Pa). It is shown that the change in the geometry of the cathode cavity, pressure, and magnitude of the discharge current affects the character of the distribution of the plasma density near the emission boundary. Formation of a homogeneous distribution is possible using a relatively wide and deep cathode cavity. A decrease in the depth of the cathode cavity leads to the appearance of plasma density maxima near the edges of the cavity. A model describing the ionization and current transfer processes occurring in the discharge system under investigation is proposed.

Keywords: plasma electron source, glow discharge, concentration distribution, forvacuum pressure range.