

04.1;13.4

Особенности инициирования эффекта полого катода в электродной системе тлеющего разряда с протяженной катодной щелью

© А.С. Климов¹, И.Ю. Бакеев¹, А.А. Зенин¹, Е.М. Окс^{1,2}, В.Т. Чан¹¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

E-mail: klimov@main.tusur.ru

Поступило в Редакцию 20 мая 2021 г.

В окончательной редакции 3 июля 2021 г.

Принято к публикации 6 июля 2021 г.

Представлены результаты исследований влияния размеров катодной щели на инициирование эффекта полого катода в системе тлеющего разряда с протяженным прямоугольным полым катодом. Установлено, что пороговый ток перехода разряда в режим горения с полым катодом определяется размерами катодной щели. С уменьшением ширины щели пороговый ток непропорционально возрастает, с увеличением продольного размера щели этот ток резко снижается.

Ключевые слова: тлеющий разряд, катодный слой, протяженный полый катод, эффект полого катода.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51609.18880

Тлеющий разряд с полым катодом привлекает внимание исследователей и разработчиков на протяжении достаточно длительного периода времени [1]. В разрядах такого типа в результате электростатического удержания электронов в катодной полости и их многократной осцилляции обеспечиваются эффективная ионизация рабочего газа и генерация плазмы [2]. Именно поэтому разряд с полым катодом находит широкое применение в различных электроразрядных устройствах, включая ионные источники [3] и плазменные источники электронных пучков различной конфигурации [4,5].

Для электронных пучков ленточной конфигурации в разрядной системе электронного источника используется протяженный прямоугольный полый катод с продольной щелью в одной из стенок, обращенной к аноду [6]. Источники электронов такого типа также позволяют формировать ленточные электронные пучки в условиях форвакуумного диапазона давлений, где они используются для генерации плотной пучковой плазмы [7,8]. Для протяженного прямоугольного полого катода пороговый ток инициирования эффекта полого катода, по-видимому, может определяться как шириной катодной щели, так и ее длиной. Изучение влияния размеров катодной щели на процессы зажигания разряда в катодной полости и являлось целью исследований, результаты которых представлены в настоящей работе.

Для проведения экспериментов использовалась разрядная система форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка (рис. 1). Разрядная система состояла из выполненных из нержавеющей стали протяженного полого катода 1 прямоугольного сечения и плоского анода 2. Внутренние размеры катодной полости составляли $120 \times 30 \times 70$ мм. В полости вдоль ее длинной стороны имелась протяженная щель 3, длину l и ширину d которой можно было изменять в результа-

те установки соответствующих вкладышей в пределах от 0.4 до 100 мм и от 0.4 до 2 мм соответственно. Анод представлял собой плоскость, удаленную от нижней торцевой плоскости полого катода на 5 мм. В аноде было выполнено прямоугольное эмиссионное окно 4 размером 120×10 мм. Эмиссионное окно было перекрыто мелкоструктурной вольфрамовой сеткой с размерами ячейки 0.6×0.6 мм и геометрической прозрачностью 60%. Наличие сеточного окна позволяло наблюдать свечение разрядной плазмы и визуально оценивать ее однородность. Размещение за сеткой перемещаемого малого ионного коллектора 5 в виде диска диаметром 3 мм позволяло определить профиль распределения плотности плазмы вдоль протяженной оси катодной щели. Напряжение от 0.1 до 10 кВ на разрядный промежуток подавалось от стабилизированного источника питания 6 (Spellman SR6) через балластное сопротивление $10 \text{ k}\Omega$. Максимальное значение тока разряда составляло 300 мА и ограничивалось источником питания

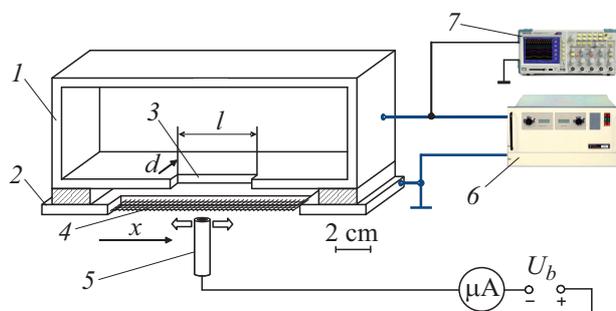


Рис. 1. Схема разрядной системы электронного источника. 1 — протяженный полый катод прямоугольной формы, 2 — плоский анод, 3 — щелевидная апертура в катодной стенке, 4 — эмиссионное сеточное окно, 5 — малый коллектор ионов, 6 — высоковольтный источник питания, 7 — осциллограф.

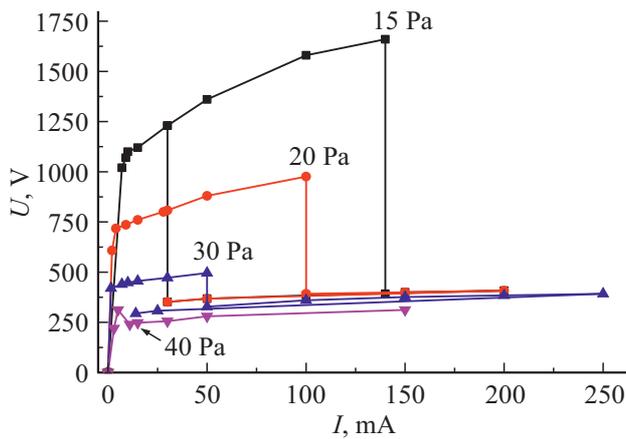


Рис. 2. ВАХ разряда в зависимости от давления внутри камеры при ширине щели 1 мм и длине 18 мм.

разряда. Измерение падения напряжения на разрядном промежутке осуществлялось высоковольтным щупом TESTEC HVP-15HR, подключенным к осциллографу 7 Tektronix2024B.

Вакуумная камера откачивалась механическим насосом до предельного давления 2–3 Па. Давление газа (аргона) в камере регулировалось игольчатым натекателем в диапазоне от 15 до 50 Па. За напряжение зажигания разряда принималось напряжение, предшествующее появлению сколь-нибудь заметного тока в цепи катода. Для точного определения порогового тока иницирования эффекта полого катода ток разряда сразу после его зажигания ограничивался на уровне 10 мА. Далее ток разряда повышался, и при определенной его величине наблюдалось резкое снижение напряжения горения разряда, что соответствовало проникновению плазмы в катодную полость и иницированию эффекта полого катода.

Как и следовало ожидать, на пороговый ток зажигания разряда в катодной полости наряду с давлением газа оказывают влияние ширина и длина катодной щели, однако степень влияния заметно различается. Для длины щели 100 мм даже при ее минимально возможной ширине 0.4 мм разряд проникает в катодную полость уже при пороговом токе в единицы мА. При меньших длинах щели в зависимости от тока разряд может либо только гореть между плоскими частями катода и анода, либо при большем токе замыкаться также на внутреннюю поверхность катодной полости (рис. 1). На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда для различных давлений газа при протяженности щели в катоде $l = 18$ мм (ширина щели $d = 1$ мм).

Вид ВАХ на рис. 2 соответствует типичной ВАХ разряда с полым катодом. При определенном пороговом токе разряда I_m происходит резкое снижение напряжения горения разряда, соответствующее переходу разряда в режим горения с полым катодом. Из представленных

на рис. 2 данных также видно, что пороговый ток I_m ожидаемо снижается с повышением давления рабочего газа.

Зависимость порогового тока перехода разряда в режим горения с полым катодом от длины щели l представлена на рис. 3, а. Следует отметить, что при ширине щели в полости 0.4 мм минимальная ее протяженность, при которой наблюдалось возникновение эффекта полого катода, составляла величину $l = 24$ мм. Для щели с $d = 1$ мм $l = 18$ мм, а для щели шириной 2 мм для проникновения плазмы в полость было достаточно длины щели 2 мм. Щель в катоде с размерами 2×2 мм по сути являлась моделью одиночного отверстия в полном катоде. Тем не менее сравнение условий иницирования эффекта полого катода в случае круглого отверстия показало, что при диаметре отверстия 2 мм проникновение разряда в катодную полость происходит при несколько больших значениях тока разряда.

Проникновение разряда в полость и иницирование эффекта полого катода происходит, как известно, в результате „разрыва“ ионного слоя, отделяющего плазму от стенок катода. Очевидно, что протяженность ионного слоя в случае узкой щели довольно высока по сравнению с поперечными размерами щели в катодной полости, и разряд не может проникнуть в полый катод. Для простой оценки протяженности катодного слоя можно пренебречь электронами в слое и считать его исключительно ионным. Тогда решение уравнения Пуассона сводится к закону „степени 3/2“ для ионов

$$j_i = \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2e}{M_i}} \frac{\epsilon_0 U_c^{3/2}}{l_c^2}, \quad (1)$$

где U_c — разность потенциалов на слое или разность потенциалов между плазмой и катодом [В], l_c — протяженность слоя [м], e — заряд электрона [С], M_i — масса иона газа (для азота $M_i = 66.8 \cdot 10^{-27}$ кг). Сравнивая с формулой Бома для плотности ионного тока из плазмы, получаем

$$j_i \approx 0.4 \epsilon n_0 \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}, \quad (2)$$

где n_0 — концентрация плазмы [м^{-3}], k — постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Для протяженности слоя получаем выражение

$$l_c \approx 0.2 \frac{1}{\sqrt{j_i}} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \sqrt{e} U_c^{3/2}}{\sqrt{M_i}}}. \quad (3)$$

Плазма, как известно, проникает в катодную полость при равенстве толщины слоя половине поперечного размера отверстия в катоде:

$$l_c \leq \frac{d}{2}. \quad (4)$$

где d — ширина узкой части катодной полости либо диаметр отверстия [м].

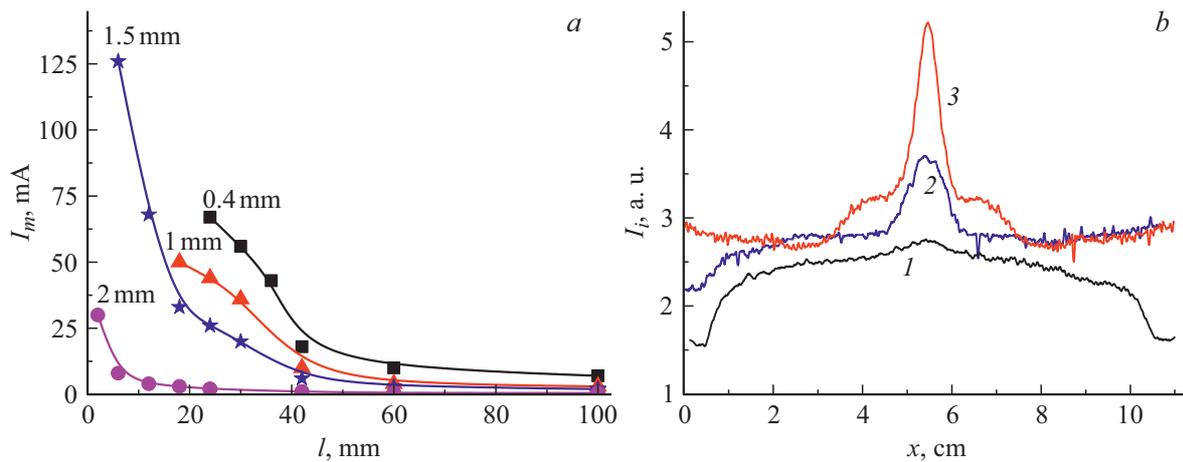


Рис. 3. *a* — зависимость порогового тока перехода от длины щели при различной ширине щели, давление 30 Па. *b* — распределение ионного тока из плазмы: 1 — щель отсутствует, 2 — щель 1×18 мм, 3 — щель 1×36 мм; давление 30 Па (аргон), ток разряда 10 мА.

Катодное падение потенциала, как правило, слабо зависит от величины тока разряда, и основным фактором, влияющим на протяженность катодного слоя, оказывается концентрация плазмы либо, как следует из (3), плотность разрядного тока j_i . Из выражения (3) следует, что с ростом j_i снижается протяженность катодного слоя, и при выполнении условия (4) плазма проникает в полость. Подставляя в (3) измеренные в эксперименте значения параметров разряда (см. рис. 2 и 3, *a*) и оценивая для простоты плотность тока разряда как отношение тока разряда к площади открытой части катода за вычетом площади щели, получаем, что при $U_c = 1600$ В, $I_d = 140$ мА, $M_i = 66.8 \cdot 10^{-27}$ кг протяженность слоя составляет 1.2 мм, что сравнимо с поперечным размером щели в 1 мм. Здесь за падение напряжения на катодном слое было принято напряжение разряда, поскольку потенциал плазмы в представленных условиях, как правило, близок к потенциалу анода. С ростом давления и снижением U_c с 1600 до 400 В (рис. 2) протяженность слоя уменьшается, что и приводит к проникновению плазмы в катодную полость при меньших токах разряда.

Расчет по формуле (3) дает для ширины щели в катоде $d = 0.4$ мм, т.е. для $l_c < 0.2$ мм, требуемую величину тока разряда порядка 6 А, однако, как следует из рис. 3, *a*, экспериментальные значения более чем на порядок меньше и в данном случае ток разряда составляет 75 мА. Протяженность ионного слоя при токе разряда 75 мА и давлении 30 Па составляет 0.75 мм. Эта величина почти в 4 раза больше, чем $d/2$, и условие (4) для ширины не выполняется. Однако если применить условие проникновения плазмы в катодную полость для протяженности щели в катоде l , то получается, что условие (4) может быть выполнено, поскольку при протяженности щели 2 мм $l_c < l/2$. Однако, как следует из результатов экспериментов, плазма проникает в катодную полость при другом соотношении между l и l_c .

Можно предположить, что на проникновение разряда в катодную полость оказывают влияние не сами размеры катодной щели, а их соотношение. Но, как следует из эксперимента, уменьшение ширины щели в 2.5 раза (с 1 до 0.4 мм) приводило к возрастанию тока перехода в 2 раза (с 56 до 114 мА) при давлении 20 Па и в 3.5 раза (с 9 до 32 мА) при давлении 40 Па. При уменьшении ширины щели с 2 до 1 мм ток возрастает уже более чем в 10 раз (с 4 до 56 мА). Следует отметить, что чем меньше ширина щели, тем большие значения имеют ее протяженность и давление газа. Для ширины щели в 2 мм переход разряда в полость имеет место при токах, не превышающих несколько мА, т.е. практически сразу при зажигании разряда между плоскими частями катода и анода. В то же время для более узкой щели требуются токи в сотни мА.

Измерения тока ионов из плазмы на малый коллектор, расположенный за анодной сеткой и перемещающийся вдоль продольной оси разрядной системы, показали следующее. В отсутствие щели разряд, очевидно, реализуется только в области между торцевой частью полого катода и плоским анодом. В этом случае профиль распределения ионного тока, отражающий в определенной степени распределение плотности плазмы, довольно однородный (кривая 1 на рис. 3, *b*). При токах разряда ниже пороговых разряд также горит только в области между плоскими электродами. Наличие щели приводит к появлению неоднородности распределения плотности плазмы вдоль протяженного размера полости с выраженным максимумом в центральной части разрядного промежутка (кривые 2 и 3 на рис. 3, *b*). Степень неоднородности плотности плазмы заметно повышается с увеличением протяженности катодной щели. Возникающая неоднородность плотности плазмы приводит к уменьшению протяженности катодного слоя в локальной области катодной щели и тем самым стимулирует

разрыв в этом месте ионного слоя и инициирование эффекта полого катода.

Таким образом, для тлеющего разряда с протяженным прямоугольным полым катодом и протяженной катодной щелью на пороговый ток инициирования эффекта полого катода оказывают влияние размеры катодной щели. Даже в случае узкой катодной щели, для которой условие разрыва катодного слоя заведомо не выполняется, увеличение длины щели приводит к проникновению плазмы в катодную полость. Такое влияние протяженности катодной щели может быть связано с усилением неоднородности распределения плотности разрядной плазмы при токах разряда ниже пороговых для инициирования эффекта полого катода. Результаты проведенных исследований позволяют более обоснованно подходить к выбору геометрии протяженной прямоугольной полости и катодной щели при создании различных электроразрывных устройств на основе тлеющего разряда с протяженным полым катодом.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки (грант FEWM-2020-0038).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.И. Москалев, *Разряд с полым катодом* (Энергия, М., 1969).
- [2] А.С. Метель, С.Н. Григорьев, *Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов. Физика, техника, применение* (МГТУ „Станкин“, М., 2005).
- [3] N.V. Gavrilov, G.A. Mesyats, G.V. Radkovski, V.V. Bersenev, *Surface Coat. Technol.*, **96** (1), 81 (1997).
- [4] В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, *Изв. вузов. Физика*, **63** (10), 33 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/10/33 [V.A. Burdovitsin, E.M. Oks, *Russ. Phys. J.*, **63**, 1678 (2021). DOI: 10.1007/s11182-021-02221-9].
- [5] А.П. Семенов, *ЖТФ*, **77** (2), 131 (2007). [A.P. Semenov, *Tech. Phys.*, **52** (2), 276 (2007). DOI: 10.1134/S1063784207020211].
- [6] W.M. Manheimer, R.F. Fernsler, M. Lampe, R.A. Meger, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **9** (3), 37 (2000). DOI: 10.1088/0963-0252/9/3/316
- [7] I.Y. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **27** (7), 075002 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aacb55
- [8] А.С. Климов, М.И. Ломаев, Е.М. Окс, А.П. Андрейчик, *ЖТФ*, **87** (2), 192 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44124.1825 [A.S. Klimov, M.I. Lomaev, E.M. Oks, A.P. Andreichik, *Tech. Phys.*, **62** (2), 218 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217020128].