

03;04

## Характеристики катодного слоя тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте

© В.А. Лисовский, С.Д. Яковин

Харьковский национальный университет  
Научный физико-технологический центр, Харьков

Поступило в Редакцию 18 февраля 2000 г.  
В окончательной редакции 22 мая 2000 г.

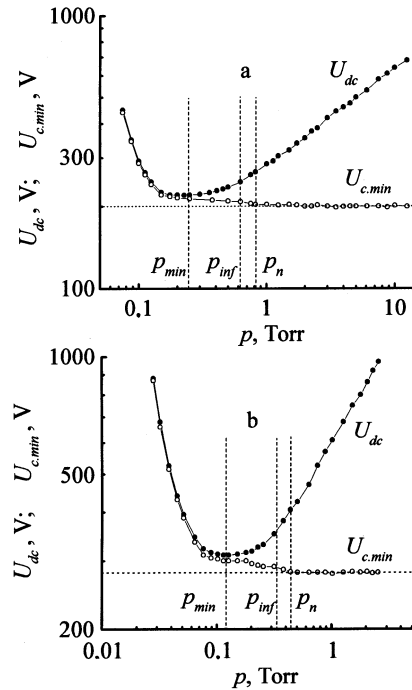
Экспериментально определены характеристики катодного слоя тлеющего разряда в аргоне и азоте в широком диапазоне давлений газа. Получено, что нормальный режим горения может наблюдаться только при наличии ионизации в анодном слое (справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда). Показана некорректность одного способа определения нормального катодного падения напряжения.

Как известно [1–10], тлеющий разряд постоянного тока может гореть в двух режимах — нормальном и аномальном. В аномальном режиме увеличение разрядного тока  $I_{dc}$  сопровождается ростом напряжения на катодном слое  $U_c$  (и напряжения на электродах  $U_{dc}$ ) и уменьшением толщины катодного слоя  $d_c$ , при этом весь катод покрыт разрядом. В нормальном режиме только часть поверхности катода покрыта разрядом. При уменьшении разрядного тока катодное падение напряжения и толщина катодного слоя сохраняются постоянными ( $U_c = U_n$ ,  $pd_c = (pd_c)_n$ , где  $p$  — давление газа), занимаемая разрядом на катоде площадь  $S$  уменьшается, при этом плотность тока  $j = I_{dc}/S$  сохраняется также постоянной ( $j = j_n$ ). В работах [3,11,12] утверждается, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от минимума кривой зажигания тлеющего разряда (т.е. при  $pL \geq (pL)_{\min}$ , где  $L$  — расстояние между электродами), а при меньших давлениях газа тлеющий разряд горит только в аномальном режиме.

В настоящей работе измерены характеристики катодного слоя (катодное падение напряжения  $U_c$ , толщина катодного слоя  $d_c$ , отношение плотности тока к квадрату давления газа  $j/p^2$ ) короткого (без положительного столба) тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте в широком диапазоне давлений газа. Оказалось, что нормальный режим

горения может наблюдаться только справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда при наличии ионизации в анодном слое. Показана некорректность одного из способов измерения нормального катодного падения напряжения.

Эксперименты проводились при давлениях аргона и азота  $p = 10^{-2} - 10$  Torr в диапазоне постоянных напряжений на электродах  $U_{dc} \leq 1000$  V и разрядных токов  $I_{dc} \leq 100$  mA. На катод из дюралюминия подавался потенциал от источника постоянного напряжения, анод из нержавеющей стали находился под потенциалом земли. Катод и анод занимали все поперечное сечение разрядной трубки диаметром 100 mm, при этом межэлектродное расстояние было равно  $L = 33$  mm.



**Рис. 1.** Кривая зажигания тлеющего разряда  $U_{dc}$  и зависимость наименьшего катодного падения напряжения  $U_{c,min}$  от давления аргона (a) и азота (b). Диаметр разрядной трубки 100 mm,  $L = 33$  mm.

Ряд экспериментов проведен для разрядной трубки с внутренним диаметром 63 mm, при этом диаметр подвижных стальных катода и анода был равен 62 mm. Измерения параметров плазмы проводились с помощью одиночного цилиндрического зонда из нихрома длиной 5 mm и диаметром 0.18 mm. Падение напряжения на катодном слое мы определяли, расположив зонд на видимой границе слоя и измерив потенциал плазмы  $\varphi_{pl}$  относительно анода. При этом катодное падение потенциала  $U_c$  равно разности напряжения на электродах  $U_{dc}$  и потенциала плазмы ( $U_c = U_{dc} - \varphi_{pl}$ ). Плотность тока мы определяли, разделив величину измеренного тока в цепи электродов  $I_{dc}$  на площадь катода  $S$ . При наличии эффекта нормальной плотности тока величину  $j$  мы определяли, измерив разрядный ток при условиях, когда разряд уже заполнил свою поверхность катода, но напряжение между электродами еще оставалось равным нормальному.

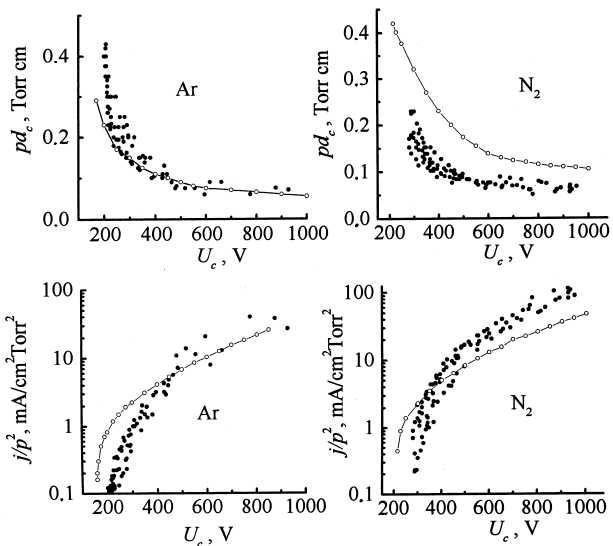
На рис. 1 показаны измеренные нами кривые зажигания тлеющего разряда  $U_{dc}(p)$ , а также зависимости наименьшего катодного падения напряжения  $U_{c, \min}$  от давления газа  $p$ . Наименьшим катодным падением мы назвали падение напряжения на катодном слое перед потуханием разряда. Из рисунка видно, что с ростом давления газа наименьшее катодное падение напряжения уменьшается и при  $p = p_n$  достигает минимальной величины  $U_{c, \min} = U_n$  (для аргона  $U_n = 200 \pm 3$  V, для азота  $U_n = 280 \pm 3$  V). При этом выполняется соотношение  $p_n/p_{\min} \approx 3.5$ .

В работе [13] показано, что на кривых зажигания справа от минимума существует точка перегиба с координатами  $p = p_{\text{inf}}$  и  $U_{dc} = U_{dc, \text{inf}}$ , для которой справедливы соотношения:

$$\frac{U_{dc, \text{inf}}}{U_{dc, \min}} = \frac{e}{2}, \quad \frac{p_{\text{inf}}}{p_{\min}} = e, \quad (1)$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов,  $p_{\min}$  и  $U_{dc, \min}$  — координаты минимума кривой зажигания. Из (1) следует, что пороговое давление  $p_n$  для появления нормального режима горения находится справа от точки перегиба. Этот вывод подтверждается нашими измерениями вольт-амперных характеристик разряда, а также визуальными наблюдениями свечения разряда вблизи катода.

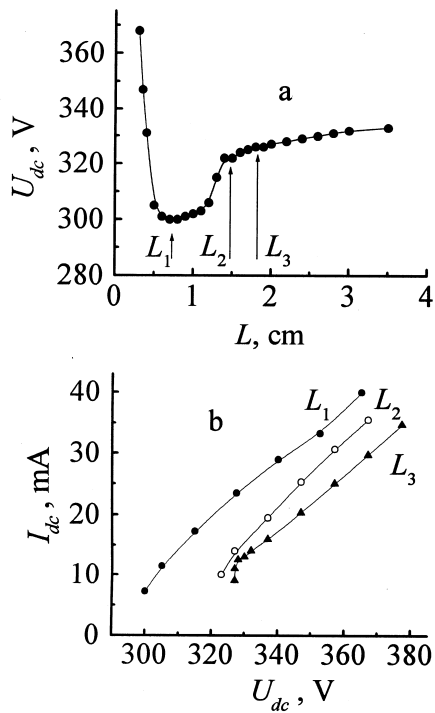
На рис. 2 показаны измеренные нами значения  $pd_c(U_c)$  и  $j/p^2(U_c)$  для аргона и азота. Для аргона  $(pd_c)_n \approx 0.4 \pm 0.03$  Torr cm,  $(j/p^2)_n \approx 0.11 \pm 0.02$  mA/cm<sup>2</sup>·Torr<sup>2</sup>, а для азота  $(pd_c)_n \approx 0.23 \pm 0.03$  Torr · cm,  $(j/p^2)_n \approx 0.22 \pm 0.02$  mA/cm<sup>2</sup>·Torr<sup>2</sup>. На этих же



**Рис. 2.** Зависимости произведения давления газа и толщины катодного слоя  $pd_c$  и отношения плотности разрядного тока к квадрату давления газа  $j/p^2$  от величины катодного падения напряжения для аргона и азота. Диаметр разрядной трубки 100 мм,  $L = 33$  мм.

рисунках приведены также экспериментальные значения для железного катода из обзорной работы [2], разумно согласующиеся с нашими результатами. Полученные нами экспериментальные значения  $pd_c(U_c)$  и  $j/p^2(U_c)$  для разных давлений газа и напряжений на электродах удовлетворительно укладываются на одну кривую.

Как следует из [4,14], переход из таунсендовского разряда в тлеющий происходит таким образом, что слева от точки перегиба перераспределение потенциала (вызванное возмущением вакуумного поля  $E_{dc}$  возникающим пространственным зарядом) приводит к затруднению размножения электронов, в то время как справа от точки перегиба размножение электронов облегчается благодаря перераспределению потенциала и разряд может гореть при меньших напряжениях. Следовательно, нормальный режим горения может наблюдаться только вблизи и справа от точки перегиба.



**Рис. 3.** Зависимость напряжения на электродах от расстояния между катодом и анодом при величине разрядного тока  $I_{dc} = 10$  mA (a) и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в азоте (b) при расстояниях между электродами, указанных на рис. 3, a. Диаметр разрядной трубки 63 mm, давление азота  $p = 1$  Torr.

Катодное падение напряжения часто измеряется следующим способом. Зажигают тлеющий разряд при  $L$  порядка нескольких сантиметров, и затем анод сдвигают в сторону катода, регистрируя при этом напряжение на электродах при постоянном разрядном токе [2,3,15,16]. На рис. 3, a показана измеренная нами подобная зависимость напряжения между электродами от расстояния  $L$ . Наименьшее напряжение между электродами, измеренное таким способом при небольших

значениях разрядного тока, обычно принимается равным нормальному катодному падению напряжения  $U_n$ . Покажем, что такой способ измерения нормального катодного падения напряжения  $U_n$  является некорректным. Зафиксируем расстояние  $L = L_1$ , при котором мы наблюдаем наименьшее напряжение между электродами, и измерим вольт-амперную характеристику разряда  $I_{dc}(U_{dc})$  (рис. 3, *b*). При этих условиях эффект нормальной плотности тока отсутствует, т. е. не видно ни увеличения тока при постоянном напряжении, ни сжатия разряда с уменьшением тока в цепи электродов. Поэтому измеренное таким образом наименьшее напряжение между электродами не является нормальным катодным падением напряжения. Разряд при этих условиях соответствует разряду при  $pL \approx (pL)_{\min}$ . Теперь при горящем разряде и наименьшем напряжении между электродами начнем увеличивать расстояние между катодом и анодом. Когда анод входит достаточно далеко в темное фарадеево пространство ( $L = L_2$ ), напряжение между электродами резко увеличивается на 10–20 V (в зависимости от сорта газа). Одновременно с этим у поверхности анода возникает анодное свечение в виде тонкой светящейся пленки. Нормальный режим горения при этих условиях тоже отсутствует. Еще увеличим величину зазора  $L$ . Когда  $L = L_3$ , при наименьшем разрядном токе появляется эффект нормальной плотности тока (рис. 3, *b*). Как видно из сравнения рис. 1 и 3, нормальное катодное падение напряжения может наблюдаться только при тех условиях, когда напряжение между электродами не является наименьшим. Поэтому способ определения нормального катодного падения напряжения из наименьшего напряжения между электродами не является корректным.

Мы экспериментально выяснили, что тлеющий разряд может гореть в нормальном режиме только при наличии анодного свечения вблизи поверхности анода. Если анодное свечение не наблюдается, то тлеющий разряд в этом случае горит в аномальном режиме. Анодное свечение появляется, когда падение напряжения на анодном слое становится близким к потенциалу ионизации молекул газа электронным ударом. Поэтому существует связь между появлением нормального режима горения и наличием ионизации в анодном слое.

Таким образом, мы определили характеристики катодного слоя в нормальном и аномальном режиме. Получено, что нормальный режим горения может существовать только в области давлений справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда.

## Список литературы

- [1] *Druyvesteyn M.J., Penning F.M.* // Rev. Modern Physics. 1940. V. 12. N 2. P. 87–174.
- [2] *Frencis G.* In Handbuch der Physik / Ed. by Flugge S. Berlin: Springer, 1956. V. 22. P. 53–208.
- [3] *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [5] *Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 2. С. 99–103.
- [6] *Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 2. С. 380–382.
- [7] *Райзер Ю.П., Суржиков С.Т.* // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 8. С. 452–456.
- [8] *Lister G.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. N 12. P. 1649–1680.
- [9] *Helin W., Zuli L., Daming L.* // Vacuum. 1996. V. 47. N 9. P. 1065–1072.
- [10] *Goto M., Kondoh Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. N 1. P. 308–312.
- [11] *Клярфельд Б.Н., Гусева Л.Г., Покровская-Соболева А.С.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. В. 4. С. 704–713.
- [12] *Klarfeld B.N., Guseva L.G., Vlasov V.V.* // Proc. X Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Oxford. Contrib. Papers 1. 1971. P. 97–98.
- [13] *Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. N 11. P. 2340–2348.
- [14] *Kolobov V.I., Fiala A.* // Phys. Rev. E. 1994. V. 50. N 4. P. 3018–3032.
- [15] *Guntherschulze A.* // Zeitschrift fur Physik. 1926. V. 40. P. 414–420.
- [16] *Guntherschulze A.* // Zeitschrift fur Physik. 1928. V. 49. P. 358–379.