T. 64, № 7

ФИЗИКА

2021

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

DOI: 10.17223/00213411/64/7/3

Н.В. ЛАНДЛЬ, Ю.Д. КОРОЛЕВ, О.Б. ФРАНЦ, В.Г. ГЕЙМАН, Г.А. АРГУНОВ, В.О. НЕХОРОШЕВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОГО КАТОДА ДЛЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ^{*}

Представлены результаты исследования тлеющего разряда низкого давления с полым катодом в условиях, когда глубина катодной полости сравнима с ее диаметром. Получены данные по распределению тока по поверхности катода с использованием секционированных электродов, измерен размер области катодного падения потенциала. Показано, что разряд может поддерживаться в двух режимах: затрудненный тлеющий разряд и обычный тлеющий разряд с полым катодом. В режиме затрудненного тлеющего разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к аноду катодную секцию. Для режима обычного тлеющего разряда, когда глубина катодной полости равна ее диаметру, ток по поверхности катода распределен равномерно. Проведены оценки параметров разряда и размера области катодного падения потенциала с привлечением модели поддержания разряда с полым катодом. Воекто с подения потенциала с привлечением модели поддержания разряда с полым катодом. Показано хорошее согласие расчетных данных с экспериментом.

Ключевые слова: тлеющий разряд, разряд с полым катодом.

Введение

В настоящее время тлеющие разряды низкого давления с полым катодом широко используются в различных областях. В частности, такие разряды применяются в установках для генерации пучков заряженных частиц [1–4], для генерации жесткого ультрафиолетового излучения [5, 6], для генерации плазмы большого объема, модификации свойств поверхности различных материалов [1, 7–11] и т.д. Одним из применений является использование данного разряда в сильноточных коммутирующих приборах – тиратронах с холодным катодом [1, 12–17]. Область рабочих давлений газа в тиратронах соответствует левой ветви кривой Пашена. В таких условиях как для случая самопробоя, так и для принудительного запуска прибора требуется значительный предпробойный ток из основной катодной полости в основной промежуток тиратрона [1, 14, 18–20]. В случае принудительного запуска этот ток обеспечивается за счет специального узла запуска разрядника, который обычно располагается в основной катодной полости.

В настоящее время разработаны различные типы узлов запуска [1, 21–25], среди которых широкое распространение получили узлы запуска на основе слаботочного вспомогательного тлеющего разряда. В одной из новых конструкций узла запуска, реализованной в отпаянном макете тиратрона, электроды узла запуска выполнены в виде двух полостей [26–28]. В такой геометрии электродов разряд поддерживается в режиме затрудненного разряда и в режиме обычного тлеющего разряда. Режим затрудненного тлеющего разряда характеризуется тем, что в катодной полости отсутствует отчетливо выраженная область отрицательного свечения, а размер области катодного падения потенциала сравним с радиусом катодной полости. В режиме обычного тлеющего разряда на оси катодной полости формируется отчетливо выраженная область отрицательного свечения, а напряжение горения разряда снижается по сравнению с режимом затрудненного разряда.

В свою очередь, режим поддержания разряда влияет на характеристики тиратрона в целом [23]. В частности, это касается времен запаздывания срабатывания, разброса времен срабатывания и пробивного напряжения основного промежутка тиратрона. При этом режим поддержания разряда в узле запуска определяется не только давлением газа и характеристиками источника питания [28], но и геометрией электродов.

Цель настоящей работы – получение данных по распределению тока по поверхности катода для различных режимов поддержания разряда и оценка параметров разряда с привлечением модели поддержания разряда с полым катодом в условиях, когда глубина катодной полости сравнима с ее диаметром.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00326.

Экспериментальная установка и методики измерений

Схематическое изображение экспериментальной установки и электрическая цепь измерений приведены на рис. 1. Тлеющий разряд зажигался посредством источника питания постоянного тока V_0 между полым анодом A и секционированным полым катодом C (секции полого катода обозначены как C_1-C_3). Электроды были выполнены в виде полых цилиндров из листовой нержавеющей стали толщиной 0.2 мм и помещены внутрь кварцевой колбы диаметром 75 мм и длиной 105 мм. Расстояние между катодными секциями и между катодом и анодом составляло 2 мм. На торцах колбы монтировались фланцы, оснащенные кварцевыми окнами для регистрации свечения разряда и определения размеров области катодного падения потенциала.

Эксперименты проводились при диаметрах полого катода 75 мм (рис. 1, *a*) и 45 мм (рис. 1, *б*). В первом случае катод состоял из двух секций, во втором – из трех. Ток разряда на каждую из секций измерялся отдельно посредством миллиамперметров. Изменение величины полного тока разряда осуществлялось за счет изменения напряжения V_0 и величины балластного сопротивления R_b . Рабочим газом являлся воздух при давлении (2–10)·10⁻² Торр. Откачка газа проводилась турбомолекулярным насосом, а напуск газа – посредством регуляторов расхода газа.



Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки и электрическая цепь измерений: A – анод, $C_1 - C_3$ – секции полого катода; $V_0 \le 3$ кВ, $R_b = 30-170$ Ом

В экспериментах мы измеряли напряжение горения разряда V_d , ток разряда на каждую из секций катода и проводили регистрацию свечения разряда с торца катода.

Как будет показано ниже, для описания режимов поддержания разряда при различных размерах катодной полости удобно использовать не только глубину катодной полости при определенном ее диаметре, но и отношение глубины полости к ее диаметру L/D. Тогда для случая рис. 1, *a* отношение L/D будет равно 0.67 и 1, а в условиях рис. 1, $\delta L/D = 0.5$, 1 и 1.5.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики разряда и величины тока на отдельные секции в зависимости от полного тока разряда для конфигурации электродов, представленной на рис. 1, *а*. Негативы фотографии свечения разряда, соответствующие L/D = 1, представлены на рис. 3. Рассмотрим вольт-амперную характеристику для случая L/D = 1. Пробой между электродами *A* и C_1-C_2 происходит при напряжении 1.2 кВ. После этого в электродной системе зажигается разряд с током *i* = 10 мА и напряжением горения $V_d = 600$ В. Режим поддержания разряда соответствует участку II вольт-амперной характеристики, который можно характеризовать как обычный тлеющий разряд с полым катодом. Внутри полости присутствует плазма отрицательного свечения (рис. 3), а размер области катодного падения потенциала $l_c = 19$ мм.

С уменьшением напряжения источника питания V_0 рабочая точка смещается по характеристике влево. При этом величина l_c увеличивается. В частности, в крайней левой точке характеристики при токе i = 3.5 мА и напряжении $V_d = 495$ В величина $l_c = 25$ мм. При дальнейшем снижении напряжения источника питания происходит скачкообразный переход разряда в режим I, который можно трактовать как затрудненный тлеющий разряд с полым катодом. Характеристикой данного режима является высокое, по сравнению с режимом обычного тлеющего разряда, напряжение горения и большой размер области катодного падения потенциала. Фактически, в данном случае мы не можем говорить о присутствии в катодной полости области отрицательного свечения, поскольку величина l_c сравнима с радиусом полости. Отметим, что обратный переход в режим обычного тлеющего разряда происходит из крайней правой точки режима I. С уменьшением глубины полости, или с уменьшением отношения L/D, напряжение горения разряда в режиме I снижается, а в режиме II повышается.

Из рис. 2, δ видно, что в режиме затрудненного разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к катоду секцию. Это означает, что в режиме I плазма разряда проникает внутрь полости не на всю глубину. В режиме обычного тлеющего разряда основная доля тока замыкается на дальнюю от анода секцию катода. Однако в данном случае, несмотря на то, что глубина секции C_2 в два раза больше, чем длина секции C_1 , плотности токов на поверхности каждой из секций приблизительно равны. Это говорит о том, что в режиме обычного тлеющего разряда ток по поверхности катода распределяется равномерно.



Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда, полученные для системы электродов, представленной на рис. 1, a, (a) и зависимости токов на каждую из секций катода от полного тока разряда (δ) ; $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Topp



Рис. 3. Фотографии свечения разряда для условий рис. 2 (вольт-амперная характеристика для L/D = 1)

С увеличением давления газа напряжение горения разряда снижается в обоих режимах, а переход к обычному тлеющему разряду происходит при меньшем полном токе разряда. В частности, при давлении $4 \cdot 10^{-2}$ Торр и L/D = 1 переход происходит при токе i = 0.8 мА и напряжении горения $V_d = 395$ В. При этом распределение тока по поверхности катода для режима обычного тлеющего разряда также оказывается равномерным.

При уменьшении диаметра катодной полости до 45 мм (рис. 1, δ) поведение вольт-амперных характеристик при изменении отношения L/D такое же, как и для случая D = 75 мм. С увеличением L/D напряжение горения разряда снижается. Пример вольт-амперных характеристик для случая D = 45 мм и соответствующие величины токов на катодные секции приведены на рис. 4. Негативы фотографий свечения разряда для случая L/D = 1 представлены на рис. 5.



Рис. 4. Вольт-амперные характеристики разряда в электродной системе на рис. 1, δ (*a*) и зависимости токов на каждую из секций катода от полного тока разряда (δ); $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Topp



Рис. 5. Фотографии свечения разряда для условий рис. 4 (вольт-амперная характеристика для L/D = 1)

Из рис. 4 видно, что для L/D = 0.5 в области токов i < 16 мА разряд поддерживается только в режиме затрудненного тлеющего разряда. Для случая L/D = 1.5 имеется гистерезис вольтамперной характеристики. Видно, что при D = 45 мм, как и для случая D = 75 мм, в режиме затрудненного разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к аноду секцию катода. После перехода в режим обычного разряда большая доля тока начинает замыкаться на дальнюю от анода секцию. Для условия L/D = 1 также можно говорить о том, что ток по поверхности катода распределен практически равномерно. При увеличении глубины полости (L/D = 1.5) отчетливо видно, что токи на секции C_2 и C_3 равны, а ток на ближнюю к аноду секцию i_1 существенно меньше токов i_2 и i_3 . Таким образом, можно заключить, что для размеров катодной полости, соответствующей L/D = 1, ток на поверхность катода замыкается равномерно. При увеличении L/D на ближнюю к аноду секцию катода замыкается меньшая доля тока.

Из фотографий свечения разряда видно, что для D = 45 мм в режиме затрудненного тлеющего разряда размер области катодного падения потенциала сравним с радиусом катодной полости и отчетливо выраженная область отрицательного свечения отсутствует. Для режима обычного тлеющего разряда с увеличением тока разряда величина l_c снижается. В частности, при токе i == 5 мА величина $l_c = 13$ мм, а при токе i = 10 мА $l_c = 10$ мм.

Для объяснения механизмов поддержания обычного тлеющего разряда можно привлечь модель, детально описанную в работах [1, 16, 17, 26, 29, 30]. Основные положения модели удобно объяснить с помощью рис. 6. Для упрощения модели плоский анод А помещен непосредственно вблизи выходного отверстия катодной полости С.

Пространство внутри катодной полости заполнено плазмой отрицательного свечения, которая поддерживается благодаря ионизации газа быстрыми осциллирующими электронами, эмитиро-

ванными с катода и ускоренными в катодном слое под действием разности потенциалов $V_{\rm c} \approx V_d$. Полный ток разряда на поверхности катода складывается из тока эмиссии iem и тока ионов на катод ii. Ионы движутся на катод в бесстолкновительном режиме под действием разности потенциалов $kT_e/2e$, которая прикладывается к так называемому предслою [14].

В работах [16, 17] обращается внимание на то, что ток эмиссии с поверхности катода обусловлен не только бомбардировкой катода ионами, но также фотоэмиссией. При этом физически более обоснованно рассматривать ток электронов, возникающий за счет фотоэмиссии, как некоторый внешний ток *i*ext по отношению к току эмиссии за счет ионной бомбардировки. Тогда для определения количества вторичных электронов с катодной поверхности можно ввести обобщенный коэффициент вторичной электронной эмиссии Г, который учитывает как классический коэффициент вторичной электронной эмиссии у, так и внешний ток *i*_{ext}.

Характерной особенностью разрядов низкого давле-

ния газа является наличие отрицательного потенциального барьера вблизи анода. Часть плазменных электронов, появившихся в плазме за счет ионизации газа быстрыми электронами с катода, может уходить из плазмы на анод, обеспечивая ток разряда на аноде. Это относится к тем электронам, энергии которых достаточно, чтобы преодолеть барьер отрицательного падения потенциала вблизи анода ΔV . Ток этих электронов i_{en} можно записать так:

$$i_{ep} = S_D \frac{en_e v_e}{4} \exp\left(-\frac{e\Delta V}{kT_e}\right),\tag{1}$$

катодом

где $v_e = (8kT_e/\pi m)^{1/2}$ – средняя скорость хаотического движения электронов в плазме; T_e – температура электронов в плазме; S_D – площадь анода. Кроме того, часть тока на аноде переносится электронами, которые стартовали с катода, не претерпели ни одного столкновения в плазме и ушли на анод. Тогда полный ток на катоде и на аноде можно записать следующим образом:

$$i = \gamma i_i + i_{\text{ext}} + i_i = i_{ep} + (\gamma i_i + i_{\text{ext}}) \frac{S_D}{S_c},$$
 (2)

где величина $\gamma i_i + i_{ext} = \Gamma i_i = i_{em}$ есть полный ток эмиссии электронов с катода, а S_c – площадь поверхности катода.

Данный подход позволяет получить условие самоподдержания разряда:

$$\Gamma \frac{V_{\rm c}}{V_2} \left(1 - \frac{S_D}{S_{\rm c}} \right) = 1, \qquad (3)$$

где величина



Рис. 6. Схематическое изображение областей разряда и распределений потенциала применительно к модели

поддержания тока в разряде с полым

$$V_2 = V^* + \frac{2kT_e}{e} + \Delta V + \Gamma \left(\frac{3kT_e}{2e} + \Delta V\right)$$
(4)

– полная энергия, затрачиваемая на один акт ионизации, в которой учитываются также потери на поддержание некоторой электронной температуры в плазме и потери, связанные с уходом электронов на анод. Величина V^* , входящая в (4), представляет собой среднюю энергию, которую затрачивают быстрые электроны на один акт ионизации с учетом потерь на возбуждение и упругие соударения.

Модель позволяет сделать оценки следующих параметров разряда: обобщенный коэффициент вторичной электронной эмиссии Γ , ток ионов i_i и внешний ток i_{ext} с поверхности катода, концентрацию плазмы в полости $n = n_i \approx n_e$. Наконец, в рамках рассматриваемой модели можно оценить размер катодного слоя l_c . В отличие от тлеющих разрядов высокого давления, здесь катодный слой является бесстолкновительным, т.е. электроны не производят ионизацию в слое. Тогда при известной величине прикатодного падения потенциала $V_c \approx V_d$ длину катодного слоя можно найти из условия, что в слое протекает ионный ток насыщения:

$$j_{i} = \frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_{0} \left(\frac{e}{M}\right)^{1/2} \frac{V_{c}^{3/2}}{l_{c}^{2}},$$
(5)

где *М* – масса иона.

При вычислениях будем использовать следующие численные значения характерных параметров плазмы: $eV^* = 70$ эВ, $kT_e = 2$ эВ, $\gamma = 0.15$. Поскольку в модели имеется ввиду, что ток разряда распределен по поверхности катода равномерно, оценки будем проводить для случая L/D = 1. Кроме того, в модели предполагается, что величина катодного слоя существенно меньше радиуса катодной полости. Поэтому оценки параметров разряда будут справедливы только для режима обычного тлеющего разряда с полым катодом. Результаты оценок для наиболее характерных точек представлены в таблице.

Параметры разряда	<i>D</i> = 75 мм			<i>D</i> = 45 мм	
V_d, \mathbf{B}	495	540	600	530	560
і, мА	3.45	5	10	5	10
Γ	0.224	0.205	0.184	0.209	0.197
<i>i</i> _{<i>i</i>} , мА	2.82	4.15	8.5	4.14	8.35
<i>i</i> _{em} , мА	0.42	0.62	1.22	0.62	1.25
i _{ext} , мА	0.21	0.23	0.28	0.24	0.4
<i>l</i> _с , мм	26	23	18	14	10
$n_i, 10^8 \mathrm{cm}^{-3}$	7.6	11.2	23	31	63

Результаты оценок для характерных условий поддержания разряда

Видно, что основная доля тока на поверхности катода переносится ионами. При этом величина внешнего тока i_{ext} оказывается меньше, чем ток эмиссии за счет ионной бомбардировки. Из данных таблицы также следует, что оценки размеров области катодного падения потенциала довольно хорошо согласуются с экспериментом. Например, при D = 75 мм и токе i = 5 мА экспериментально измеренная величина $l_c = 21$ мм, а расчетная $l_c = 23$ мм; при D = 45 мм и токе i = 5 мА экспериментально измеренная величина $l_c = 13$ мм, а расчетная $l_c = 14$ мм.

Заключение

Проведено исследование распределения тока по поверхности катода для тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с использованием секционированных электродов. Показано, что для режима затрудненного тлеющего разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к аноду секцию. В режиме обычного тлеющего разряда при отношении глубины полости к ее диаметру L/D = 1 ток по поверхности катода распределяется равномерно. С увеличением отношения L/D основная доля тока замыкается на дальние от анода секции.

Получены фотографии свечения разряда в катодной полости для режима затрудненного тлеющего разряда и для режима обычного тлеющего разряда. Для режима затрудненного разряда область отрицательного свечения как таковая на оси разряда отсутствует. Проведены оценки параметров разряда для режима обычного тлеющего разряда с полым катодом. Показано, что основная доля тока на поверхности катода переносится ионами из плазмы отрицательного свечения. Оценки величины области катодного падения потенциала хорошо согласуются с результатами эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Korolev Y.D. and Koval N.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. No. 32. P. 323001.
- 2. Akishev Y.S., Karal'nik V.B., Petryakov A.V., et al. // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42. No. 1. P. 14.
- 3. Gavrilov N.V. and Kamenetskikh A.S. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 1875.
- 4. Dewald E., Frank K., Hoffman D.H.H., et.al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 272.
- 5. Bergmann K., Vieker J., and Wezyk A. // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. No. 14. P. 143302.
- 6. Borisov V.M., Eltsov A.V., Ivanov A.S., et al.// J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 3254.
- 7. Иванов Ю.Ф., Лопатин И.В., Петрикова Е.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 11. – С. 137–142.
- Lopatin I.V., Akhmadeev Y.H., and Koval N.N. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 103301.
 Koval N.N., Ryabchikov A.I., Sivin D.O., et al. // Surf. Coat. Technol. 2018. V. 340. -
- Koval N.N., Ryabchikov A.I., Sivin D.O., et al. // Surf. Coat. Technol. 2018. V. 340. -P. 152.
- 10. Akhmadeev Y.H., Denisov V.V., Koval N.N., et al. // Plasma Phys. Rep. 2017. V. 43. No. 1. P. 67.
- 11. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 9. С. 44–48.
- 12. Lamba R.P., Pathania V., Meena B.L., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. No. 10. P. 103508.
- 13. Yan J.Q., Shen S.K., Wang Y.A., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. No. 6. P. 065102.
- 14. Korolev Y.D. and Frank K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 1525.
- 15. Zhang J. and Liu X. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017. V. 24. No. 4. P. 2050–2055.
- 16. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. No. 8. P. 2087.
- 17. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., et al. // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42. No. 8. P. 799-807.
- 18. Ландль Н.В., Королев Ю.Д., Гейман В.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 5–12.
- 19. Королев Ю.Д., Ландль Н.В., Гейман В.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 162–171.
- 20. Kozyrev A.V., Korolev Y.D., Rabotkin V.G., and Shemyakin I.A. // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. No. 9. P. 5366–5371.
- 21. Mehr T., Arentz H., Bickel P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23. P. 324–329.
- 22. Bochkov V.D., Dyagilev V.M., Ushich V.G., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2001. V. 29. No. 5. P. 802-808.
- 23. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., et al. // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. No. 1. P. 110-117.
- 24. Ландль Н.В., Королев Ю.Д., Аргунов Г.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 5. – С. 90–98.
- 25. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. No. 8. P. 2349-2353.
- 26. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., et al. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. No. 11. P. 113510.
- 27. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., et al. // AIP Adv. 2019. V. 9. No. 8. P.085326.
- 28. Korolev Y.D., Landl N.V., Frants O.B., et al. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. No. 7. P. 073510.
- 29. Ландль Н.В., Королев Ю.Д., Гейман В.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 11. – С. 59–67.
- 30. Ландль Н.В., Королев Ю.Д., Гейман В.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 172–181.

Поступила в редакцию 10.10.2020, после доработки – 01.02.2021.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Ландль Николай Владимирович, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: landl@lnp.hcei.tsc.ru;

Королев Юрий Дмитриевич, д.ф-м.н., профессор, гл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: korolev@lnp.hcei.tsc.ru; Франц Олег Борисович, науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: frants@lnp.hcei.tsc.ru;

Гейман Владимир Гарьевич, науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: geyman@lnp.hcei.tsc.ru;

Аргунов Григорий Александрович, мл. науч сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: argunov.grigory@yandex.ru;

Нехорошев Виталий Олегович, мл. науч сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: credence@vtomske.ru.