04

Колебательный характер тока в импульсном газовом разряде в гелии атмосферного давления

© *В.С. Курбанисмаилов*[1], *Г.Б. Рагимханов*[1], *Д.В. Терешонок*[2], *З.Р. Халикова*[1]

[1] Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
[2] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: gb-r@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2025 г.
В окончательной редакции 17 июля 2025 г.
Принято к публикации 21 июля 2025 г.

Представлены результаты экспериментального исследования импульсного газового разряда в гелии в плоскопараллельном промежутке с сетчатым катодом после предварительной ультрафиолетовой ионизации на уровне $10^8\,\mathrm{cm}^{-3}$. Анализ осциллограмм тока выявил существование двух устойчивых режимов: апериодического и колебательного, различающихся по амплитуде и длительности импульса. Установлено, что при наличии колебательного режима период колебаний тока не зависит от амплитуды напряжения на разрядной емкости в диапазоне $3-14\,\mathrm{kV}$ и от давления в газоразрядной камере в диапазоне $1-3\,\mathrm{atm}$.

Ключевые слова: импульсный газовый разряд, гелий, предварительная ионизация, сетчатый катод, колебательный режим.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.21.61520.20429

Исследование импульсных газовых разрядов сохраняет актуальность как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения [1–10]. Результаты таких исследований находят широкое применение в области обработки поверхностей, плазменной аэродинамики, плазменно-стимулированного горения, плазменной медицины и других технологических процессах.

Несмотря на достигнутый прогресс в экспериментальных методах диагностики, получение полной пространственно-временно́й картины эволюции плазмы в масштабе всего разрядного промежутка является задачей высокой сложности. Особый интерес представляет влияние предварительной ионизации на динамику развития разряда.

Экспериментальные исследования показывают, что в зависимости от внешних условий при наличии предварительной ионизации газа разряд может реализоваться в различных режимах: однородном объемном, объемном с катодными пятнами, контрагированном и сильноточном диффузном [11,12]. Как показано в ряде работ [11–18], при наличии предварительной ионизации начальной стадией формирования импульсного объемного разряда в инертных газах является развитие волн ионизации — вывод, подтвержденный как численным моделированием, так и высокоскоростной визуализацией ранних стадий разрядного процесса.

Однако следует отметить, что характеристики разряда определяются не только прикладываемым полем, давлением, газом и концентрацией электронов предыонизации, но также параметрами RLC-цепи, где можно ввести эффективные значения сопротивления R, индуктивности L и емкости C [19,20].

В настоящей работе приводятся результаты исследования осциллограмм тока и интегральных картин свечения плоскопараллельного разряда в гелии при давлениях $p = 1-3\,\mathrm{atm}$ и широком диапазоне напряжений $U_0 = 3-14\,\mathrm{kV}$.

На рис. 1 приведена принципиальная схема установки. Разрядный промежуток S представлял собой систему из двух электродов: верхнего — плоского анода из нержавеющей стали с радиусом $r_0 = 2\,\mathrm{cm}$; нижнего — сетчатого катода, расположенного параллельно аноду.

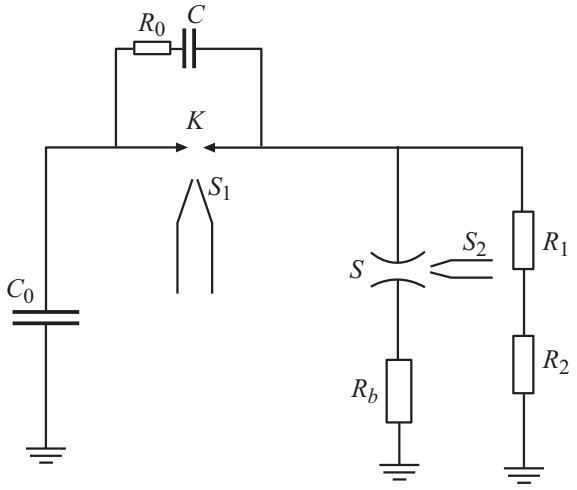


Рис. 1. Принципиальная схема установки: C_0 — разрядная емкость, R_b — балластное сопротивление, K — коммутатор, S_1 — источник предыонизации газовой среды коммутатора, S — основной разрядный промежуток, S_2 — источник предыонизации основного разрядного промежутка ($R_0 = 300\,\Omega$, $R_1 = 21.3\,\mathrm{k}\Omega$, $R_2 = 765\,\Omega$, $C = 4\,\mathrm{nF}$, $C_0 = 15\,\mathrm{nF}$).

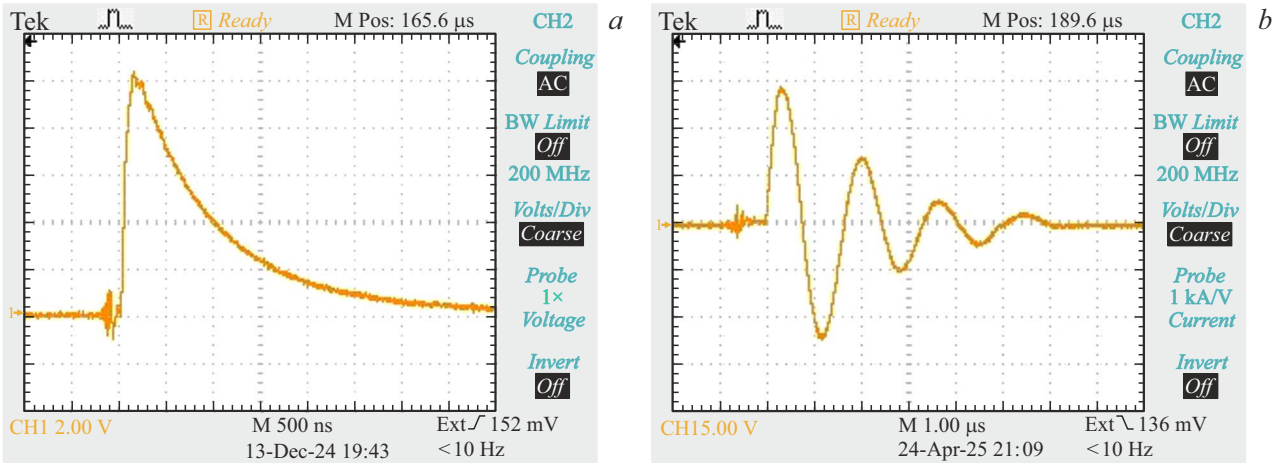


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока разряда в апериодическом (a) и колебательном (b) режимах при $U_0 = 8$ kV, $R_b = 52\,\Omega$.

Межэлектродное расстояние составляло $d = 1$ cm. В качестве рабочего газа применялся гелий с химической чистотой не ниже 99.99 %.

Для создания необходимого вакуума камера откачивалась с использованием турбомолекулярного насоса Welch CDK 240 (ILMVAC), обеспечивающего предельное остаточное давление порядка $5 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Предварительная ионизация осуществлялась посредством искрового разряда, размещенного за сетчатым анодом. Временна́я задержка между подачей высоковольтного импульса и запуском подсвета составляла 100–150 ns, а длительность светового импульса — порядка 600 ns. При энерговкладе во вспомогательный разряд (источник УФ-излучения) около 0.3–0.4 J достигалась концентрация электронов порядка 10^8 cm^{-3}.

Для исследования влияния амплитуды напряжения на разрядной емкости U_0 и давления газа p на характеристики разряда проводилась визуализация интегральных картин свечения с помощью беззеркального цифрового фотоаппарата Sony Alpha A7 III (ILCE-7M3B) с объективом фокусного расстояния 85 mm.

Электрические характеристики разряда (напряжение и ток) регистрировались с использованием омического делителя напряжения и малоиндуктивного шунта. Сигналы регистрировались четырехканальным цифровым запоминающим осциллографом Tektronix TDS2024C с полосой пропускания 200 MHz. Погрешность измерения тока по амплитуде составляла не более 3 %. Высоковольтные импульсы подавались от импульсного генератора, обеспечивающего регулировку амплитуды на C_0 в диапазоне от 3 до 14 kV. Время нарастания напряжения до амплитудного значения составляло до 10 ns.

Исследования электрических и интегральных картин свечения проводились для двух режимов формирования разряда, реализуемых при последовательном подключении к разрядному промежутку балластными сопротивлениями $R_b = 2$ и $52\,\Omega$. В зависимости от расстояния между электродами в коммутаторе S_1 были выявлены два принципиально различных режима горения разряда: апериодический и колебательный.

На рис. 2 в качестве примера представлены типичные осциллограммы тока разряда при напряжении $U_0 = 8$ kV. Следует отметить, что при прочих равных условиях и увеличении межэлектродного зазора в коммутаторе (более 2 mm), как видно из осциллограмм, режим протекания тока меняется с апериодического (рис. 2, a) на колебательный (рис. 2, b).

При балластном сопротивлении $R_b = 52\,\Omega$ амплитудное значение тока в колебательном режиме выше, чем в апериодическом, а при более низких сопротивлениях (например, $R_b = 2\,\Omega$) — наоборот, амплитуда тока в апериодическом режиме больше, чем в колебательном. В колебательном режиме (рис. 2, b) период колебаний тока составляет приблизительно $T \approx 1.7\,\mu$s и практически не зависит от U_0 и p. Кроме того, при увеличении U_0 длительность разряда в колебательном режиме увеличивается и находится в диапазоне $5-7\,\mu$s в исследованном интервале полей.

На рис. 3 представлены интегральные картины свечения разряда в колебательном режиме тока для $R_b = 52\,\Omega$ при разных напряжениях и давлениях от 1 до 3 atm. В отличие от апериодического режима в колебательном (вплоть до 11 kV) удается сформировать предельно однородный объемный разряд без выраженных диффузных каналов и без появления светящихся пятен на электродах (рис. 3). Дальнейшее увеличение прикладываемого поля приводит к появлению взрывоэмиссионных факелов на сплошном электроде, количество которых увеличивается при увеличении U_0. При напряжении $U_0 = 14$ kV на интегральных картинах мы наблюдаем развитие искрового канала.

Как видно из рис. 3, при увеличении давления газа уменьшается яркость плазменного столба, но увеличивается однородность разряда. Кроме того, наблюдаются уменьшение амплитуды тока и увеличение длительности разрядного импульса.

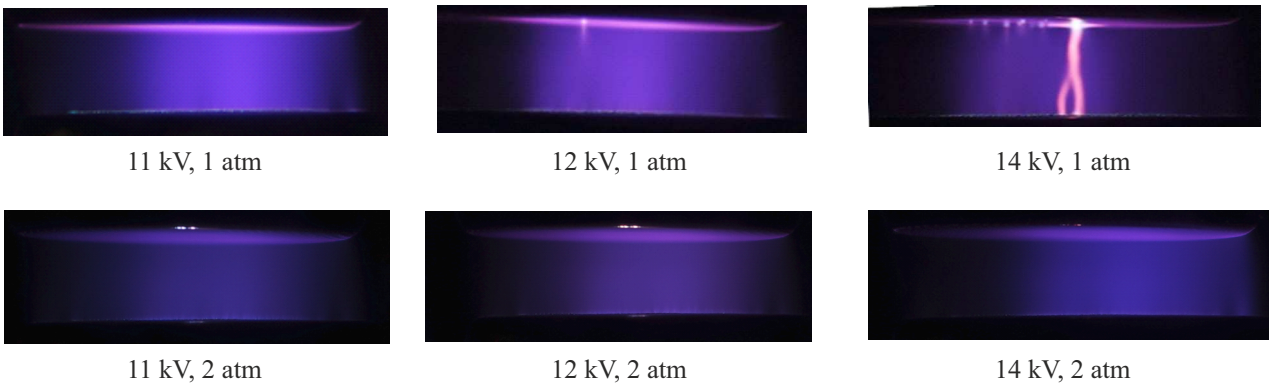


Рис. 3. Интегральные картины свечения разряда (колебательный режим): $R_b = 52\,\Omega$.

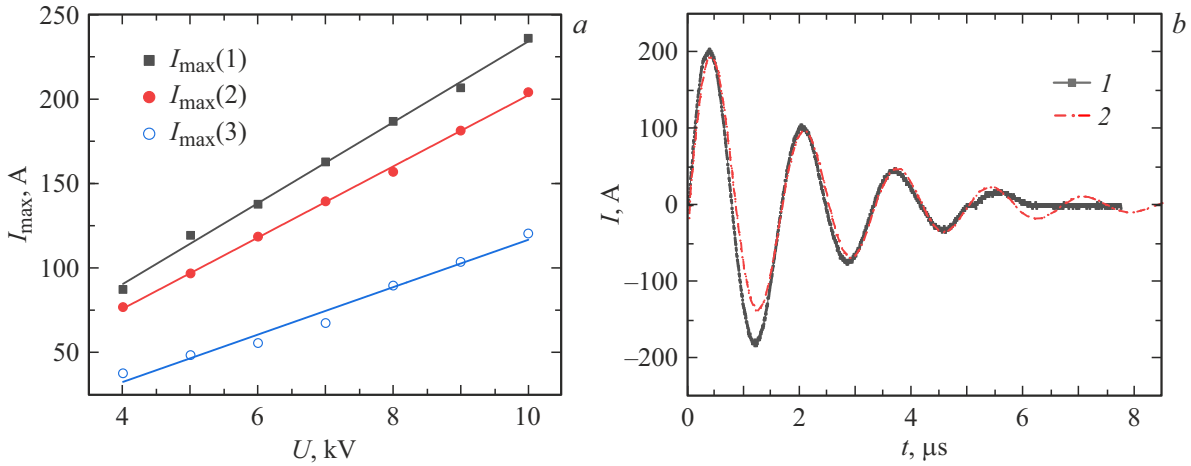


Рис. 4. *a* — амплитудные значения тока разряда в колебательном режиме при давлении $p = 1$ atm и балластном сопротивлении $R_b = 52\,\Omega$ для первых трех максимумов на рис. 2, *b*; *b* — характерные осциллограммы тока разряда в колебательном режиме: $U_0 = 8$ kV, $R_b = 52\,\Omega$ (*1* — эксперимент, *2* — расчет из уравнения (1)).

На рис. 4, *a* приведены амплитудные значения тока I, зафиксированные для первых трех максимумов в колебательном режиме.

Колебательный характер тока с переполюсовкой (рис. 2, *b*) дает возможность ввести эффективную индуктивность и заменить реальную схему на эквивалентную в виде RLC-цепи, где R_d, L_d, C_d — сопротивление, индуктивность и емкость разрядного промежутка.

Запишем уравнения Кирхгофа для $R_dL_dC_d$-контура

$$L_d\frac{dI}{dt} + R_dI + \frac{1}{C_d}\int Idt = 0 \Rightarrow \frac{d^2I}{dt^2} + 2\delta\frac{dI}{dt} + \omega_0^2 = 0,$$

$$\delta = \frac{R_d}{2L_d},\ \ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_dC_d}}. \qquad (1)$$

Решение (1) есть $I(t) = I_0e^{-\delta t}\sin(\omega t + \varphi)$, где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T}$. Здесь $\varphi = 0$ при условии, что $I(t=0) = 0$. Из рис. 4, *b* найдем коэффициент затухания как отношение амплитуд первого и третьего максимумов тока $\delta = \frac{\ln\left(I_0/I(T)\right)}{T} = \frac{\ln(2.3\pm0.4)}{T}$, в результате получим равенство

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{L_dC_d} - \frac{R_d^2}{4L_d^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{L_dC_d} - \left(\frac{\ln(I_0/I(T))}{T}\right)^2} = \frac{2\pi}{T}, \qquad (2)$$

решение которого относительно произведения L_dC_d есть

$$L_dC_d = \frac{T^2}{4\pi^2 + \left(\ln(I_0/I(T))\right)^2} \approx \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$\Rightarrow \omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_dC_d}}. \qquad (3)$$

В соответствии с (3) наблюдаемый период колебаний (если они появляются), по крайней мере в исследуемом диапазоне параметров, определяется только произведением емкости и индуктивности C_dL_d эквивалентной схемы разрядного промежутка. На рис. 4, *b* для $U_0 = 8$ kV,

$R_b = 52\,\Omega$ приведен пример сравнения осциллограмм тока, полученных в эксперименте (рис. 2, *b*), с расчетными значениями, полученными из решения уравнения (1) с экспериментально определяемой циклической частотой. Аналогичное совпадение наблюдается и для других комбинаций U_0 и p и межэлектродного расстояния в коммутаторе, где есть колебания.

Таким образом, выявлены два принципиально разных режима горения разряда в гелии на исследуемой установке. При малом межэлектродном зазоре коммутатора S_1 импульс тока разряда имеет апериодическую форму, а по мере увеличения S_1 появляется отчетливый колебательный характер с почти постоянным периодом $T \approx 1.7\,\mu$s независимо от напряжения и давления. Колебательный режим сопровождается гораздо более однородным свечением без ярких катодных (анодных) пятен до 11 kV. Полученные результаты важны для оптимизации плазменных источников излучения и проектирования систем газового разряда в средах с повышенным давлением в несколько атмосфер, где требуются стабильные диффузные режимы горения на временах от $1\,\mu$s и более.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-20090).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Erofeev, V. Ripenko, M. Shulepov, V. Tarasenko, Eur. Phys. J. D, **71**, 117 (2017). DOI: 10.1140/epjd/e2017-70636-6
[2] S.M. Starikovskaia, J. Phys. D, **47**, 353001 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/35/353001
[3] N.A. Popov, Plasma Sources Sci. Technol., **20**, 045002 (2011). DOI: 10.1088/0963-0252/20/4/045002
[4] N.L. Aleksandrov, S.V. Kindysheva, I.N. Kosarev, S.M. Starikovskaia, A.Yu. Starikovskii, Proc. Combust. Inst., **32**, 205 (2009). DOI: 10.1016/j.proci.2008.06.124
[5] D.V. Tereshonok, N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, V.A. Panov, B.M. Smirnov, E.E. Son, Plasma Sources Sci. Technol., **27** (4), 045005 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aab6d4
[6] Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов* (Наука, М., 1991).
[7] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, Ю.В. Шутько, Письма в ЖТФ, **36** (8), 60 (2010). [V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, Yu.V. Shut'ko, Tech. Phys. Lett., **36** (4), 375 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010040255].
[8] В.В. Осипов, УФН, **170** (3), 225 (2000). DOI: 10.3367/UFNr.0170.200003a.0225 [V.V. Osipov, Phys. Usp., **43** (3), 221 (2000). DOI: 10.1070/pu2000v043n03ABEH000602].
[9] В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко, УФН, **174** (9), 953 (2004). DOI: 10.3367/UFNr.0174.200409b.0953 [V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko, Phys. Usp., **47** (9), 887 (2004). DOI: 10.1070/PU2004v047n09ABEH001790].
[10] Л.П. Бабич, Е.И. Бочков, И.М. Куцык, Письма в ЖЭТФ, **99** (7), 452 (2014). DOI: 10.7868/S0370274X14070066 [L.P. Babich, E.I. Bochkov, I.M. Kutsyk, JETP Lett., **99** (7), 386 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014070029].
[11] В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Г.Б. Рагимханов, Д.В. Терешонок, Письма в ЖТФ, **43** (18), 73 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45036.16844 [V.S. Kurbanismailov, O.A. Omarov, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, Tech. Phys. Lett., **43** (9), 853 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017090206].
[12] В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, ТВТ, **33** (3), 346 (1995).
[13] В.С. Курбанисмаилов, Д.В. Терешонок, Г.Б. Рагимханов, З.Р. Халикова, Письма в ЖТФ, **48** (5), 43 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52157.19067 [V.S. Kurbanismailov, D.V. Tereshonok, G.B. Ragimkhanov, Z.R. Khalikova, Tech. Phys. Lett., **48** (3), 41 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.03.53525.19067].
[14] N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, J. Phys. D, **54** (22), 223002 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/abe9e0
[15] A. Sobota, F. Manders, E.M. van Veldhuizen, J. van Dijk, M. Haverlag, IEEE Trans. Plasma Sci., **38** (9), 2289 (2010). DOI: 10.1109/TPS.2010.2056934
[16] V.S. Kurbanismailov, O.A. Omarov, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, Europhys. Lett., **123** (4), 45001 (2018). DOI: 10.1209/0295-5075/123/45001
[17] B.-D. Huang, Ch. Zhang, W. Zhu, X. Lu, T. Shao, High Voltage, **6** (4), 665 (2021). DOI: 10.1049/hve2.12067
[18] D.V. Tereshonok, N.Y. Babaeva, G.V. Naidis, A.G. Abramov, A.V. Ugryumov, IEEE Trans. Plasma Sci., **50** (3), 580 (2022). DOI: 10.1109/TPS.2022.3148545
[19] A. Sobota, O. Guaitella, A. Rousseau, Plasma Sources Sci. Technol., **23**, 025016 (2014). DOI: 10.1088/0963-0252/23/2/025016
[20] T.H. Chung, IEEE Trans. Plasma Sci., **42** (12), 3656 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2364056