

Теоретическое и экспериментальное исследование условий убегания электронов в газовом диоде с коническим катодом

Н.М. Зубарев^{1,2,*}, О.В. Зубарева¹, А.В. Козырев³, Л.Н. Лобанов¹, Н.С. Семенюк^{1,3},
К.А. Шарыпов¹, С.А. Шунайлов¹, М.И. Яландин^{1,2}

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

*nick@iep.uran.ru

Аннотация. Сопоставляются условия генерации убегающих электронов в воздушном зазоре при различной степени неоднородности распределения электрического поля, регулируемой углом раствора конического катода. Демонстрируется, что в слабонеоднородном поле (углы конуса от 98.6° до 180°) для перехода свободных электронов в режим убегания локальное поле в месте их старта – у вершины конуса – должно несколько превышать значение, критическое для убегания в условиях однородного поля. В сильнонеоднородном поле (углы от 0° до 98.6°) этого условия недостаточно для убегания во всем зазоре. Требуется выполнение более сильного нелокального условия. Оно заключается в превышении приложенной к зазору разности потенциалов некоторого порогового значения.

Ключевые слова: убегающие электроны, конический катод, угол Тейлора, воздушный диод, ведущее магнитное поле.

1. Введение

В однородном электрическом поле массовый переход электронов в режим убегания происходит, если его напряженность E превышает некоторое пороговое значение E_c , зависящее от типа газа и его плотности [1–7]. В воздухе (азоте) атмосферного давления согласно [3] можно взять $E_c = 270$ кВ/см; в работе [6] указывается большее значение в 450 кВ/см. В неоднородном поле, обусловленном использованием острижных катодов (см., например, [8–13]), ситуация несколько более сложная. С одной стороны, требование $E > E_c$ вблизи катодного острия является необходимым для перехода свободных электронов в режим убегания. С другой стороны, его может быть недостаточно для продолжения убегания на периферии, где напряженность поля значительно меньше величины E_c .

Целью работы является исследование зависимости условий убегания электронов в воздушном диоде от степени неоднородности распределения электрического поля. Неоднородность поля обеспечивается использованием конического катода. Степень неоднородности регулируется изменением угла раствора конуса: в экспериментах применяются сменные графитовые катоды с углами от 40° до 120° с шагом в 20°; в расчетах угол варьируется во всем допустимом диапазоне от 0° (резко неоднородное поле игольчатого катода) до 180° (однородное поле). Для идеального – с нулевым радиусом кривизны вершины – конуса напряженность поля E спадает с удалением z от острия как $E \sim z^{\gamma-1}$ [14], где показатель γ связан с углом конуса α формулой (P_γ – функция Лежандра порядка γ)

$$P_\gamma(-\cos(\alpha/2)) = 0. \quad (1)$$

Согласно (1) при увеличении α от 0 до π показатель γ монотонно растет от 0 до 1.

Важной особенностью экспериментов является использование аксиального магнитного поля с индукцией в ≈ 2 Тл, что позволяет сфокусировать весь пучок убегающих электронов (УЭ) на коллекторе датчика тока, повысив тем самым чувствительность используемой методики регистрации. В отсутствие магнитного поля электроны распространяются в основном вдоль силовых линий электрического поля. Их расходимость при использовании

острижных катодов приводит к тому, что поток УЭ расширяется в значительный телесный угол порядка π и, как следствие, его плотность многократно падает с удалением от катода.

Как экспериментальные, так и теоритические исследования продемонстрировали, что характер условий убегания электронов существенно зависит от степени неоднородности электрического поля. Качественные изменения происходят при $\gamma \approx 0.5$, что соответствует так называемому углу Тейлора [15] в 98.6° . В слабонеоднородном поле ($\gamma > 0.5$) условие убегания носит локальный характер: напряженность поля вблизи катодного острия должна несколько превышать критическое значение E_c . В сильнеоднородном поле ($\gamma < 0.5$) требуется выполнение более сильного, нелокального условия превышения приложенного к промежутку напряжения некоторого порогового значения.

2. Эксперимент

Для анализа порогов эмиссии УЭ от вершины конических катодов использовался газовый (атмосферный) диод (ГД), представленный на Рис. 1. Такие эксперименты диктуют специфические подходы, так как требуется регулировка амплитуды импульса напряжения на катоде, и при этом не должны меняться условия эмиссии начальных тепловых (автоэмиссионных) электронов, ионизирующих газ у катода и порождающих плазменные образования – источники интенсивных потоков УЭ.

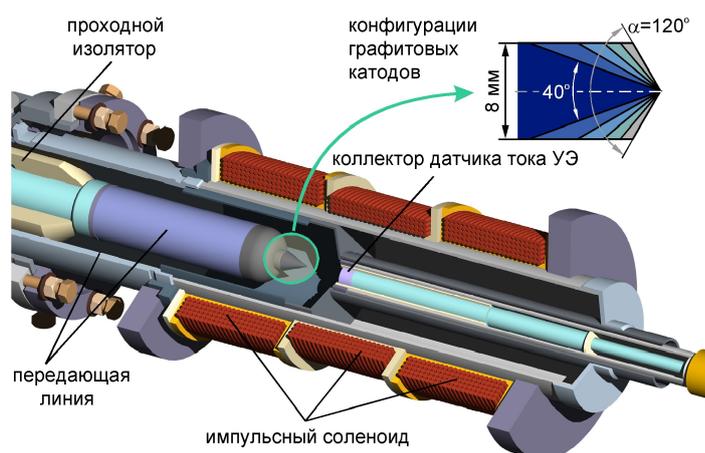


Рис. 1. Конфигурация магнитоизолированного газового (воздушного) диода со сменными графитовыми коническими катодами для изучения порогов генерации УЭ.

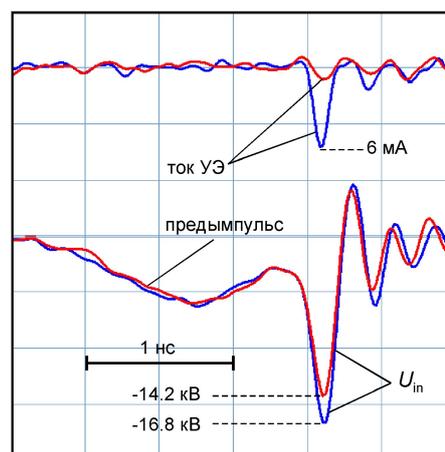


Рис. 2. Пример падения тока УЭ при вариации амплитуды импульса питания U_{in} для катода с углом раствора 40° .

Применялся набор катодов из графита, так как графит в силу свойств микроструктуры поверхности и её регенерации разрядным током, следующим после прохождения УЭ, отличается пикосекундной стабильностью возникновения автоэлектронной эмиссии от включения к включению. Для этого начальный участок напряжения на катоде не должен меняться, что в полной мере относится к предымпульту напряжения (Рис. 2), возникающему из-за проходной емкости обостряющего разрядника, присутствующего в системе формирования субнаносекундных импульсов (см. Рис. 2d в работе [16]). Поэтому зазор обостряющего разрядника не менялся, а амплитуда основного субнаносекундного импульса напряжения варьировалась плавной настройкой срезающего разрядника. Наличие/отсутствие УЭ фиксировалось коллекторным датчиком в виде появления/отсутствия минимального всплеска тока на фоне шумов луча осциллографа при статистической вариации напряжения пробоя неуправляемого срезающего разрядника. На Рис. 2 представлена реализация, когда при изменении напряжения импульса на $\approx 15\%$ поток УЭ наблюдается или почти исчезает.

Принципиальным моментом для интерпретации данных экспериментов является определение амплитуды реального напряжения на катоде (U_{exp}), которое отличается от импульса питания U_{in} , подаваемого в ГД по передающей линии (ПЛ). Казалось бы, до начала эмиссии УЭ на катоде реализуется холостой ход ($U_{\text{exp}} \approx 2U_{\text{in}}$), однако на самом деле $|U_{\text{exp}}| > 2|U_{\text{in}}|$, т.к. переход от однородной ПЛ к вершине конического катода – это неоднородный участок длиной ≈ 2 см с нарастающим импедансом. Поскольку прямые измерения рефлектометрическим методом [17] из-за неоднородности неприменимы, мы рассчитывали U_{exp} с помощью кода KARAT [18], доставляя «экспериментальный» пик U_{in} (без предымпульса) по ПЛ на конический катод. В расчётах для всех углов раствора конуса катода оказалось, что для амплитудных значений выполняется $U_{\text{exp}} \approx 2.76U_{\text{in}}$. Результаты для набора измеренных пороговых значений U_{in} в пересчёте для U_{exp} представлены в Таблице 1.

В Таблице 1 также даны абсолютные значения напряженности поля (E_0) в контрольной точке, отстоящей от катода на 50 мкм, рассчитанные в электростатическом приближении [19] для пороговых напряжений U_{exp} . Подобный выбор контрольной точки обусловлен тем, что основной поток УЭ формируется не на катоде, а на внешней границе узкой плазменной области, возникающей вблизи катодного острия. Согласно результатам численного моделирования [9, 10] достаточно плотная плазма, обеспечивающая выравнивание электрического потенциала (вытеснение поля), формируется в области $25 < z < 75$ мкм у вершины острия. Это дает основание для оценок взять в качестве стартовой для УЭ точку $z = 50$ мкм и, следовательно, рассматривать напряженность поля в этой точке.

Таблица 1. Экспериментальные данные о пороговых напряжениях генерации УЭ (U_{exp}) и соответствующие этим напряжениям рассчитанные напряженности поля вблизи катодных острий (E_0) для катодов с различными углами раствора α . Также даны задаваемые (1) значения показателя неоднородности электрического поля γ .

α	γ	U_{exp} (кВ)	E_0 (кВ/см)
40°	0.275	39.2	694
60°	0.346	41.1	590
80°	0.422	42.8	489
98.6°	0.5	44.4	394
120°	0.601	55.2	364

Из данных Таблицы 1 следует, что только для катодов с наибольшими углами (98.6° и 120°) напряженность поля у катода попадает в диапазон предлагаемых в литературе критических значений от 270 кВ/см [3] до 450 кВ/см [6]. Для меньших углов поле E_0 явно превышает значение E_c . Так, например, для угла 40° имеем $E_0 \approx 700$ кВ/см. Можно сделать вывод, что условие превышения напряженностью поля вблизи острия значения E_c вполне применимо в качестве критерия убегания при углах $\alpha \geq \alpha_t \approx 98.6^\circ$ и неприменимо при $\alpha < \alpha_t$. Для малых углов, как видно из таблицы, близкими оказываются значения пороговых напряжений: $U_{\text{exp}} = 41 \pm 2$ кВ. Таким образом, переход в режим убегания при $\alpha < \alpha_t$ определяется такой нелокальной характеристикой движения электронов, как проходимость ими разность потенциалов. Для генерации УЭ требуется, чтобы она превышала некоторый порог U_{min} , составляющий примерно 40 кВ.

3. Кинетика убегających электронов

Рассмотрим теперь зависимость условий убегания электронов от степени неоднородности электрического поля теоретически. Будем использовать кинетический подход, основанный на решении одномерного уравнения Больцмана для функции

распределения электронов. Свободные электроны стартуют от катодного острия и движутся вдоль оси симметрии катода z в электрическом поле, распределение которого будем описывать степенным законом [14]

$$E(z) = U\gamma D^{-\gamma} z^{\gamma-1}, \quad (2)$$

где D – межэлектродное расстояние (фиксируем $D = 1$ см), U – приложенная к промежутку разность потенциалов, которую мы для простоты будем считать постоянной. Показатель γ , характеризующий степень неоднородности распределения поля, варьируется в интервале $0 < \gamma < 1$. Напомним, что связь между γ и углом конического катода α определяется формулой (1). Для использованных в экспериментах катодов рассчитанные по (1) значения γ приведены в Таблице 1. Из общих соображений понятно, что направление вдоль оси z электродной системы (см. Рис. 1) является преимущественным для движения УЭ. Именно это позволяет при анализе условий убегания ограничиться исследованием одномерного движения электронов. Методика учета взаимодействия электронов с молекулами газа (азота атмосферного давления) в рамках используемой кинетической модели изложена в [20].

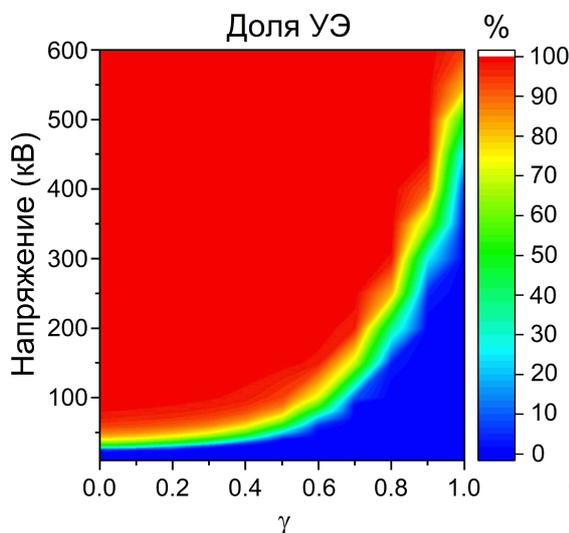


Рис. 3. Зависимость доли УЭ в общем числе исходных электронов от приложенного напряжения U при различных значениях показателя γ . Зазор 10 мм; азот атмосферного давления.

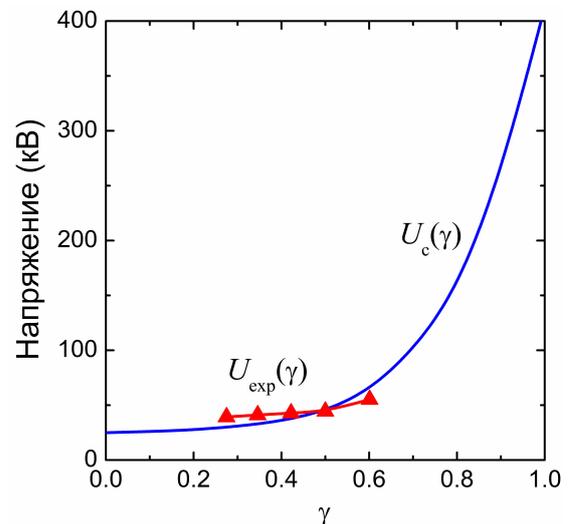


Рис. 4. Зависимости от показателя γ порогового для убегания электронов значения напряжения: U_{exp} – результаты экспериментов, U_c – расчеты, соответствующие доле УЭ в 10%.

Будем считать электрон убегающим, если он достигает анода за время 200 пс (для сравнения свет пересекает зазор шириной в 1 см за 33 пс). Задача расчетов состояла в определении доли электронов, достигающих анода при заданном показателе степени неоднородности поля γ в зависимости от приложенного напряжения U . Их результаты показаны на Рис. 3. В параметрической плоскости $\{\gamma, U\}$ отчетливо видна область, в которой происходит переход электронов в режим убегания. С заострением катода (т.е. с уменьшением γ) напряжение, требуемое для перехода электронов в режим убегания, монотонно падает. Важно, что можно указать минимальное значение напряжения (U_{min}), требуемое для перехода электронов в режим убегания. Такой минимум реализуется в пределе резко неоднородного поля $\gamma = 0$, где вероятность убегания меняется от 20% до 80% при росте напряжения от 27 до 44 кВ.

Примем для определенности в качестве критерия генерации УЭ требование, что вероятность убегания электронов составляет 10%. Обозначим соответствующее пороговое

значение напряжения за U_c . Зависимость U_c от γ показана на Рис. 4 синей линией. Для сравнения красными точками показаны данные экспериментов – значения U_{exp} из Таблицы 1. Видно хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими результатами. Обращает на себя внимание, что величина U_c весьма слабо (от 25 до 45 кВ) меняется в области $0 < \gamma < 0.5$, что позволяет в ней, т.е. для сильнонеоднородного поля, использовать в качестве критерия убегания простое условие $U > U_{\text{min}}$. Оно явно неприменимо в области $0.5 < \gamma < 1$, в которой U_c меняется на порядок – от 45 до 413 кВ. В этой области, т.е. для слабонеоднородного поля, как следует из результатов экспериментов, вполне применимо условие убегания $E_0 > E_c$. Отметим, что в рамках используемой модели анализ такого локального условия не имеет смысла, поскольку согласно (2) напряженность поля формально бесконечна на вершине идеального конуса, т.е. заведомо превышает порог E_c .

4. Заключение

В настоящей работе целенаправленно, как экспериментально, так и теоретически, изучалось влияние степени неоднородности распределения электрического поля в газовом зазоре на условия генерации УЭ. Степень неоднородности, которую характеризует параметр γ , регулировалась изменением угла α конического катода. В экспериментах она варьировалась в диапазоне от 0.275 до 0.601 (углы от 40° до 120°), а в расчетах от 0 до 1 (углы от 0° до 180°).

Основной результат нашего исследования заключается в том, что условия убегания электронов качественно отличаются для $\gamma < 0.5$ и $\gamma \geq 0.5$ (сильнонеоднородные и слабонеоднородные поля). В слабонеоднородном поле для убегания электронов необходимо, чтобы напряженность поля вблизи вершины конического катода E_0 превышала критическое значение E_c , т.е., фактически, применимо классическое условие убегания в однородном электрическом поле. Для сильнонеоднородного поля на основании анализа экспериментальных данных и результатов расчетов в рамках кинетической модели можно сделать вывод, что для убегания электронов требуется превышение приложенной к промежутку разности потенциалов U некоторого порогового значения U_{min} , а выполнения локального условия $E_0 > E_c$ недостаточно для генерации УЭ.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053, <https://rscf.ru/project/23-19-00053/>.

5. Список литературы

- [1] H. Dreicer, Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas, *Phys. Rev.*, **115**, 238, 1959, doi: 10.1103/PhysRev.115.238
- [2] G.A. Mesyats, Yu.I. Bychkov, and V.V. Kremnev, Pulsed Nanosecond Electric Discharges in Gases, *Sov. Phys. Usp.*, **15**(3), 282, 1972, doi: 10.1070/PU1972v015n03ABEH004969
- [3] L.P. Babich, T.V. Loiko, and V.A. Tsukerman, High-Voltage Nanosecond Discharge in a Dense Gas at a High Overvoltage with Runaway Electrons, *Sov. Phys. Usp.*, **33**(7), 521, 1990, doi: 10.1070/PU1990v033n07ABEH002606
- [4] A.V. Gurevich and K.P. Zybin, Runaway Breakdown and Electric Discharges in Thunderstorms, *Phys. Usp.*, **44**, 1119, 2001, doi: 10.1070/PU2001v044n11ABEH000939
- [5] V.F. Tarasenko and S.I. Yakovlenko, The Electron Runaway Mechanism in Dense Gases and the Production of High-Power Subnanosecond Electron Beams, *Phys. Usp.*, **47**, 887, 2004, doi: 10.1070/PU2004v047n09ABEH001790

- [6] G.A. Mesyats, Similarity Laws for Pulsed Gas Discharges, *Phys. Usp.* **49**, 1045, 2006, doi: 10.1070/PU2006v049n10ABEH006118
- [7] J.R. Dwyer, D.M. Smith, and S.A. Cummer, High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.*, **173**, 133, 2012, doi: 10.1007/s11214-012-9894-0
- [8] N.M. Zubarev, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, S.A. Barengolts, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, and O.V. Zubareva, Experimental and Theoretical Investigations of the Conditions for the Generation of Runaway Electrons in a Gas Diode with a Strongly Nonuniform Electric Field, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51** (28), 284003, 2018, doi: 10.1088/1361-6463/aac90a
- [9] N.M. Zubarev, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, G.A. Mesyats, N.S. Semeniuk, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, and M.I. Yalandin, Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29** (12), 125008, 2020, doi: 10.1088/1361-6595/abc414
- [10] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, and N.S. Semeniuk, How Short is the Runaway Electron Flow in an Air Electrode Gap?, *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 063501, 2020, doi: 10.1063/1.5143486
- [11] D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, D.A. Sorokin, and V.A. Shklyaev, Generation of Two Pulses of Runaway Electron Beam Current, *Tech. Phys.*, **66**(4), 548, 2021, doi: 10.1134/S1063784221040046
- [12] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, An Ultra-Short Dense Paraxial Bunch of Sub-Relativistic Runaway Electrons, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **43**(4), 627, 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3155173
- [13] V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, and D.A. Sorokin, Duration of Runaway Electron Current Pulses when Applying Voltage Pulses with a Subnanosecond Rise Time, *Tech. Phys.*, **67**(5), 586, 2022, doi: 10.21883/TP.2022.05.53674.317-21
- [14] N.M. Zubarev, O.V. Zubareva, and M.I. Yalandin, Specific Features of Electron Runaway in a Gas Gap with a Conical Cathode, *Dokl. Phys.*, **68**(9), 279, 2023, doi: 10.1134/S1028335823090070
- [15] G.I. Taylor, Disintegration of Water Drops in an Electric Field, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **280**(1382), 383, 1964, doi: 10.1098/rspa.1964.0151
- [16] V.G. Shpak, S.A. Shunailov, and M.I. Yalandin. The 40 Years to RADAN – Compact Multi-Purposed Sources for Various Pulsed Power Investigations, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2064**, 012002, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012002
- [17] K.A. Sharypov, M.R. Ul'masculov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, V.V. Rostov, and M.D. Kolomiets, Current Waveform Reconstruction from an Explosively Emissive Cathode at a Subnanosecond Voltage Front, *Rev. Sci. Instrum.*, **85**(12), 125104, 2014, doi: 10.1063/1.4902853
- [18] V.P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT*. Springfield, VA, USA: Berkley Research Associates, Inc., 1992.
- [19] M.A. Tiunov, B.M. Fomel, and V.P. Yakovlev, *SAM – An Interactive Code for Electron Gun Evaluation*, Novosibirsk, USSR: Budker Institute of Nuclear Physics, Tech. Rep. INP-89-159, 1989.
- [20] Y. Mamontov, I. Uimanov, A. Kozyrev, N. Zubarev, and N. Semeniuk, *Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, 140, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242135