

04.1;01.1

## Кинетическая теория начальной стадии работы плоского вакуумного диода при импульсно-периодическом режиме эмиссии катодной плазмы

© А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, А.О. Коковин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 13 июня 2024 г.

В окончательной редакции 19 июля 2024 г.

Принято к публикации 20 июля 2024 г.

Проведено моделирование нестационарного процесса формирования электронного пучка в плоском вакуумном диоде с плазменным катодом, функционирующем в режиме последовательности импульсов длительностью 3 ns с паузами между импульсами 2 ns. Плазма описывается на основе бесстолкновительной кинетики электронов и однократно заряженных ионов в самосогласованном электрическом поле. Плотность тока электронного пучка зависит от концентрации катодной плазмы и может в несколько раз превышать плотность тока Чайлда–Ленгмюра. Движение эмиссионной границы плазмы в сторону анода обусловлено формированием в промежутке локальной области инверсного электрического поля. Показано, что в режиме генерации катодной плазмы область инверсии поля представляет собой структуру типа „виртуальный катод“, а в паузах между режимами генерации прикатодной плазмы область инверсии имеет структуру типа „горб потенциала“.

**Ключевые слова:** электронный пучок, вакуумная дуга, плазменный катод.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59131.20022

Данное исследование относится к области теоретического моделирования вакуумного разряда (вакуумная дуга), когда на катоде вакуумного диода с приложенным к нему напряжением возникают нестационарные плазменные эмиссионные центры, сокращенно называемые эктонами (Ecton от слов „emission centre“) [1,2]. Известно, что в такой ситуации с границы плазменных образований начинается эмиссия электронов, которые, ускоряясь в электрическом поле, формируют электронный пучок. В процессе генерации пучка катодная плазма расширяется в промежуток с характерными скоростями в единицы  $\text{cm}/\mu\text{s}$ , изменяя первеанс диода. Именно процесс заполнения плазмой промежутка определяет длительность импульса тока электронного пучка. Поэтому теоретическое описание механизма расширения плазмы, генерируемой в прерывистом режиме ее эмиссии, представляет большой фундаментальный и практический интерес.

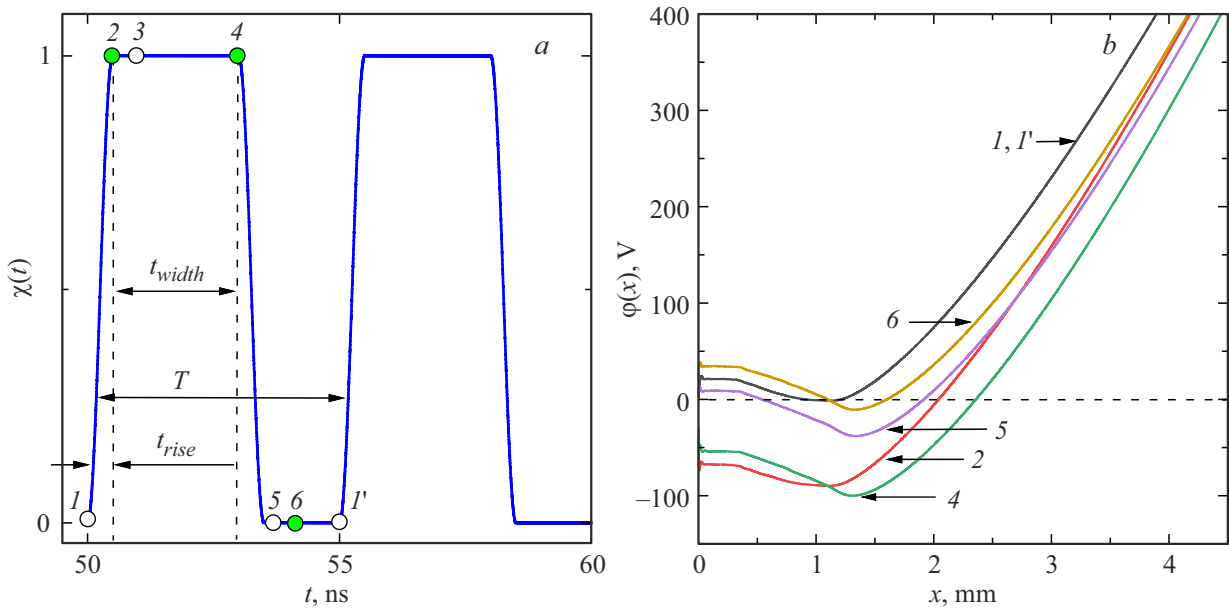
Движение плазмы в вакууме представляет собой трудный для теоретического описания процесс. Нужно математически корректно описать непрерывный переход от плотной квазинейтральной плазмы (с протекающими в ней электрическими токами) к движению в вакууме заряженных частиц (с сильно различающимися массами) с учетом генерируемых в промежутке неоднородных и нестационарных электрических полей [3–5]. Сделать это на базе гидродинамической модели плазмы удастся лишь частично, пока в расчете не появляются разрывные решения или иные виды неустойчивого поведения. Более адекватным в рассматриваемой ситуации представляется

применение методов физической кинетики заряженных частиц в сочетании с уравнениями Максвелла для самосогласованного электрического поля [6,7]. Далее кратко изложены результаты применения кинетического подхода к расчету электронного тока вакуумного диода с импульсным режимом генерации катодной плазмы, в котором естественным образом появляются эффекты как „виртуального катода“, так и „горба потенциала“.

В рамках простейшей (бесстолкновительной) кинетической модели двухкомпонентной плазмы (электроны и ионы одного сорта) с самосогласованным электрическим полем решалась нестационарная задача для следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_e}{\partial t} + v \frac{\partial f_e}{\partial x} + \frac{e}{m} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial f_e}{\partial v} &= 0, \\ \frac{\partial f_i}{\partial t} + V \frac{\partial f_i}{\partial x} - \frac{e}{M} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial V} &= 0, \\ \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} &= -e \left( \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x, V, t) dV - \int_{-\infty}^{\infty} f_e(x, v, t) dv \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $e$  — элементарный заряд,  $m$  и  $M$  — массы электрона и иона соответственно,  $\varphi(x, t)$  — электрический потенциал,  $v$  и  $V$  — скорости электронов и ионов в ансамблях с соответствующими функциями распределения по скоростям  $f_e(x, v, t)$  и  $f_i(x, V, t)$ . Численные алгоритмы решения системы уравнений Власова (1), используемые в расчете и подробно описанные в работе [7], обеспечивают высокую степень достоверности.



**Рис. 1.** Временной профиль эмиссии катодной плазмы (а) и соответствующие его характерным точкам 1–2–4–5–6–I' мгновенные пространственные профили электрического потенциала (b) для 11-го импульса эмиссии плазмы (50–55 ns от начала разряда).

В начальный момент  $t = 0$  вакуумный промежуток предполагался пустым,  $f_e(x, v, 0) = f_i(x, V, 0) = 0$ , но к нему приложено постоянное напряжение  $\varphi(0, t) = 0$ ,  $\varphi(D, t) = +U_0$ . Инициирование вакуумного разряда задавалось „включением“ неравновесной плазмы ( $T_e \neq T_i$ ) в катодной плоскости  $x = 0$  путем задания максвелловских функций распределения

$$f_e(0, v, t) = \chi(t) \frac{n_0}{\sqrt{2\pi m k T_e}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_e}\right),$$

$$f_i(0, V, t) = \chi(t) \frac{n_0}{\sqrt{2\pi M k T_i}} \exp\left(-\frac{MV^2}{2kT_i}\right), \quad (2)$$

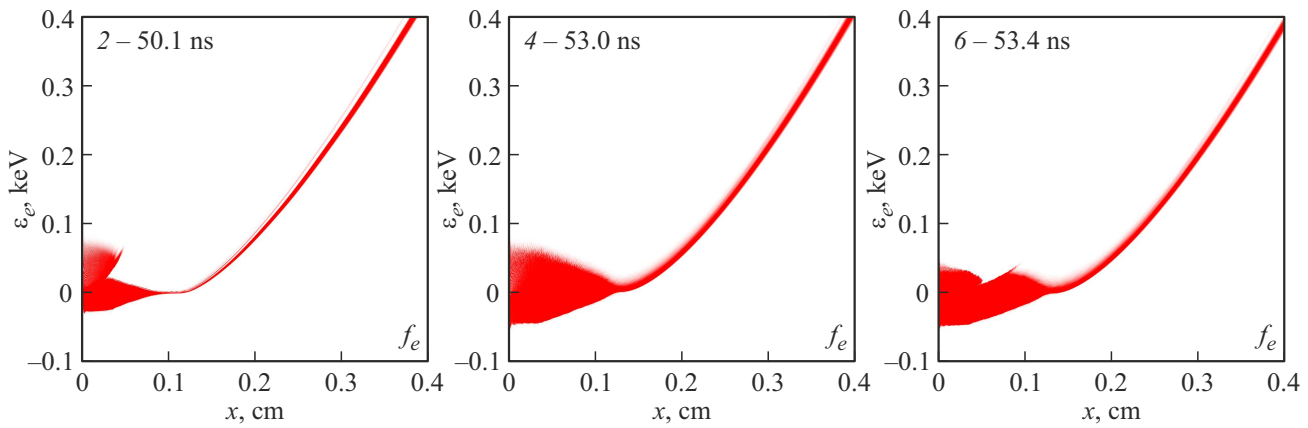
которые были модулированы во времени периодической ступенчатой функцией  $\chi(t)$ , показанной на рис. 1, а.

Далее проиллюстрированы результаты расчета системы (1) для следующих параметров задачи: длина промежутка  $D = 1$  см, приложенное напряжение  $U_0 = 2$  кВ, плазмообразующий металл — сурьма ( $M = 121$  а.е.м.), концентрация катодной плазмы  $n_0 = 10^{16}$  см $^{-3}$ , температуры ансамблей в катодной плазме  $T_e = 5$  эВ,  $T_i = 1$  эВ. Модулирующая функция  $\chi(t)$  имела период  $T = 5$  ns, длительность переднего и заднего фронтов  $t_{rise} = 0.1$  ns, длительность эмиссии  $t_{width} = 2.9$  ns. Были протестированы и другие параметры задачи ( $D$ ,  $n_0$ ,  $U_0$ , параметры функции  $\chi(t)$ ) в широком диапазоне, но качественно результаты были похожими.

Рис. 1 иллюстрирует пространственно-временную динамику электрического потенциала в течение одного периода функционирования катодной плазмы. Для примера выбран 11-й импульс эмиссии, начинающийся на

50-й наносекунде быстрым включением эмиссии, эмиссия продолжается до конца 53-й наносекунды и затем быстро выключается на 2 ns до конца 55-й наносекунды включительно. Для подробного анализа выбран 11-й импульс, поскольку к этому моменту граница плазмы уже заметно продвинулась, но еще довольно далека от анода.

Видно, что общий характер пространственного профиля потенциала не меняется в течение всего процесса, но сформированная на предыдущих стадиях разряда прикатодная плазма заряжается до положительного значения потенциала в паузе между импульсами эмиссии и до отрицательного значения, пока эмиссия имеет место. Именно в паузе между фазами эмиссии имеет место так называемый „горб потенциала“ (кривые 5 и 6 на рис. 1, b), наличие которого уже долгое время является предметом бурных научных дискуссий среди специалистов по вакуумному разряду [1,2,8]. А в фазе, соответствующей ситуации, когда в катодной плоскости ( $x = 0$ ) генерируется плотная плазма (в нашем расчете она имеет концентрацию  $10^{16}$  см $^{-3}$ ), более разреженная плазма катодного факела приобретает отрицательное значение потенциала. Здесь имеет место типичное для вакуумного диода распределение потенциала типа „виртуальный катод“. Именно формирование области инверсии направления электрического поля в плазме катодного факела обеспечивает монотонное ускорение ионов (и продвижение эмиссионной границы катодного факела со скоростью  $2.6 \cdot 10^6$  см/с) в сторону анода как на стадиях эмиссии катодной плазмы, так и в паузах между ними. Механизм этого ускорения детально описан в нашей работе [7]. Отметим лишь, что скорость



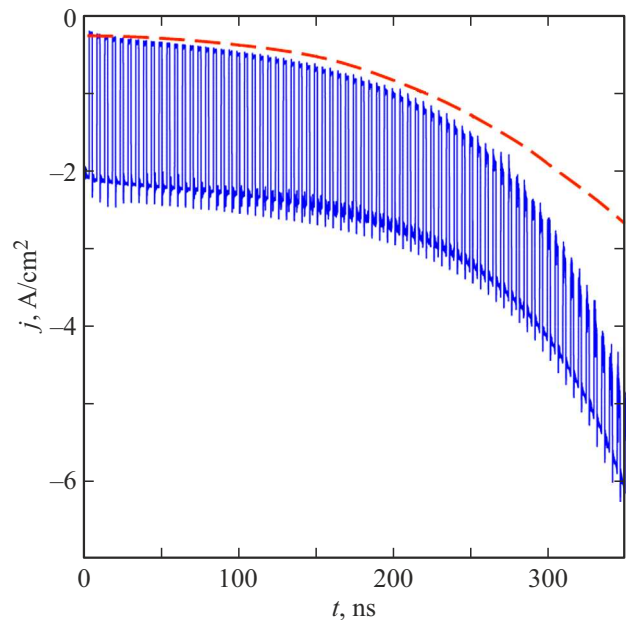
**Рис. 2.** Фазовые портреты электронной функции распределения в разные моменты одного (11-го по счету от начала разряда) импульса эмиссии на катоде. Номера портретов соответствуют моментам времени на рис. 1, а.

продвижения фронта катодного факела  $u_f$  определяется самосогласованной кинетикой плазмы в нестационарном электрическом поле и может в несколько раз превышать  $u_f$ , которая формально следует из формулы  $u_f \approx \sqrt{2e|\Delta\phi|/M}$ , где  $|\Delta\phi| = 70-100$  V — примерная величина падения потенциала на плазме факела.

Более интересную информацию о механизме электронной эмиссии из плазмы прикатодного факела дают фазовые портреты электронного ансамбля. На рис. 2 показаны фазовые портреты электронной функции распределения для трех моментов времени:  $t_2 = 50.1$  ns (момент включения новой порции катодной плазмы, прикатодная плазма приобретает отрицательный относительно катода потенциал  $-70$  V),  $t_4 = 53.0$  ns (завершение фазы активной эмиссии на катоде, потенциал дна виртуального катода  $-97$  V),  $t_6 = 53.4$  ns (пауза между импульсами эмиссии, прикатодная плазма заряжается до положительного потенциала  $+37$  V, и вблизи катода формируется структура типа „горб потенциала“).

Сразу после „включения“ плазмы (50.1 ns) на фазовом портрете наблюдается инжекция порции электронов с повышенной энергией (до 70 eV), которые постепенно притормаживаются в поле виртуального катода и формируют к концу стадии эмиссии сильно разогретую (средняя энергия  $\varepsilon_{VC} \sim 20$  eV) прикатодную плазму (53.0 ns). В паузе между стадиями эмиссии (53.4 ns) плазма катодного факела заряжается до положительного потенциала  $+37$  V. „Горб потенциала“ обеспечивает непрерывный перенос электрического тока в катодном сечении ( $x = 0$ ) в паузах как ионами, так и обратными электронами. В плазме катодного факела средняя концентрация плазмы намного ниже, чем в катодной плазме ( $n_0 = 10^{16}$  см $^{-3}$ ), и монотонно падает от  $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$  вблизи катодного сечения до  $\sim 10^{11}$  см $^{-3}$  на эмиссионной границе катодного факела.

На рис. 3 показана зависимость плотности тока вакуумного диода от времени, из которой видно, что ток „жестко“ модулируется режимом эмиссии катодной плазмы. Обращает на себя внимание тот факт,



**Рис. 3.** Временной профиль электронного тока в вакуумном диоде. Штриховая линия соответствует расчетному току Чайлда–Ленгмюра.

что в фазе катодной эмиссии ток электронов имеет плотность существенно более высокую, чем чайлденгмюровское значение, которое для зазора в 1 см равно  $(4\varepsilon_0/9)\sqrt{2e/m}U_0^{3/2}/D^2 \approx 0.21$  A/cm $^2$ . Этого и следовало ожидать, так как плотная катодная плазма обеспечивает эффективную нейтрализацию пространственного заряда в сечении виртуального катода. В паузах между фазами катодной эмиссии величина плотности тока в диоде падает всего в несколько раз, так как высокая концентрация ионов в прикатодной области ( $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$ ) способна обеспечить этот уровень с запасом. По мере расширения катодного факела происходит монотонный рост перванса диода за счет сокращения длины „бес-

плазменного“ промежутка между эмиссионной границей факела и анодом (соответственно растет оценочный ток Чайлда–Ленгмюра, как показано на рис. 3). В паузах между фазами активной эмиссии плазмы на катоде формула Чайлда–Ленгмюра дает хорошее приближение для электронного тока в диоде, но в фазе активной эмиссии электронный ток в несколько раз превышает эту оценку.

Подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы.

1. Создана модель процесса формирования электронного пучка в вакуумном диоде с плазменным катодом, симулирующая бесстолкновительную физическую кинетику заряженных частиц в режиме пороговых токов.

2. Установлено, что плотность электронного тока в диоде с плазменным катодом может на порядок превышать плотность тока Чайлда–Ленгмюра при плотностях катодной плазмы на уровне  $10^{16}$ – $10^{15}$  см<sup>-3</sup> за счет эффективной нейтрализации пространственного заряда в области эмиссионной границы факела.

3. Показано, что при работе диода с плазменным катодом происходит радикальная трансформация продольного распределения электрического потенциала. В стадии активной катодной эмиссии реализуется режим виртуального катода, когда плазма катодного факела заряжается до отрицательного потенциала в десятки вольт, а в режиме паузы катодной эмиссии плазма факела быстро заряжается до положительного потенциала  $+(20–30)$  В и плавно снижается в пространстве до локального минимума на эмиссионной границе факела. Именно в паузе между фазами активной эмиссии внутри плазмы катодного факела формируется „горб потенциала“.

4. В процессе расширения прикатодной плазмы внутри нее формируется область инверсии направления электрического поля, которая непрерывно обеспечивает ускорение ионов в сторону анода и движение эмиссионной границы катодного факела с характерными скоростями  $(2–5) \cdot 10^6$  см/с, экспериментально наблюдаемыми в вакуумных разрядах [1,2,8,9].

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по темам № FWRM-2021-0007, FWRM-2021-0014.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] G.A. Mesyats, *Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark, and the arc* (Nauka, M., 2000).
- [2] *Vacuum arcs: theory and application*, ed. by J.M. Lafferty (Wiley, N.Y., 1980).
- [3] M. Keidar, I. Beilis, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **8** (3), 376 (1999). DOI: 10.1088/0963-0252/8/3/306
- [4] Е.В. Неведцев, А.В. Батраков, *ЖЭТФ*, **153** (4), 648 (2018). DOI: 10.7868/S0044451018040120 [E.V. Nefedtsev, A.V. Batrakov, *JETP*, **126** (4), 541 (2018). DOI: 10.1134/S1063776118030159].
- [5] С.А. Баренгольц, Н.Ю. Казаринов, Г.А. Месяц, Э.А. Перельштейн, В.Ф. Шевцов, *Письма в ЖТФ*, **31** (4), 64 (2005). <https://journals.ioffe.ru/articles/11495> [S.A. Barengol'ts, N.Yu. Kazarinov, G.A. Mesyats, É.A. Perel'shtein, V.F. Shevtsov, *Tech. Phys. Lett.*, **31** (2), 164 (2005). DOI: 10.1134/1.1877636].
- [6] V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (10), 2762 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2726501
- [7] V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, V.S. Igumnov, N.S. Semenyuk, A.O. Kokovin, *Fluid Dyn.*, **58** (6), 1148 (2023). DOI: 10.1134/S0015462823601900
- [8] А.А. Плютто, В.Н. Рыжков, А.Т. Капин, *ЖЭТФ*, **47** (2), 494 (1965). [A.A. Plyutto, V.N. Ryzhkov, A.T. Kapin, *Sov. Phys. JETP*, **20** (2), 328 (1965). <http://jetp.ras.ru/cgi-bin/e/index/e/20/2/p328?a=list>].
- [9] V.I. Krasov, V.L. Paperny, *Plasma Phys. Rep.*, **43** (3), 298 (2017). DOI: 10.1134/S1063780X17030072