

12

Низкоэнергетическое состояние электронного пучка в коаксиальном диоде с однородным анодом и неоднородным профилем магнитного поля

© А.В. Громов¹, М.Б. Гойхман¹, Н.Ф. Ковалев¹, А.В. Палицин¹,
М.И. Fuks², Е. Schamiloglu²

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

² The University of New Mexico, Albuquerque, USA

E-mail: gromov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2018 г.

Для коаксиального диода с однородным цилиндрическим анодом впервые показана возможность формирования протяженного низкоэнергетического состояния электронного пучка в умеренных магнитных полях с неоднородным профилем. Показано, что в зависимости от конфигурации магнитного поля в такой системе возможно образование виртуальных катодов двух типов: стационарного с локализованной плоскостью отражения и движущегося виртуального катода, формирующего двухпотокное низкоэнергетическое состояние электронного пучка.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.20.46812.17456

Основными характеристиками, определяющими процессы формирования и транспортировки сильноточных релятивистских электронных пучков, являются федосовский J_F [1] и предельный J_{lim} [2] токи. Для тонкого трубчатого электронного пучка, формируемого в коаксиальном диоде с однородным цилиндрическим анодом и однородным ведущим магнитным полем, федосовский ток всегда меньше предельного: $J_F < J_{lim}$, и виртуальный катод (ВК) в такой системе не образуется. При транспортировке электронного пучка с заданным током электроны могут находиться в двух возможных состояниях [3]: высокоэнергетическом, в котором их энергия γ лежит в пределах $\gamma_a^{1/3} \leq \gamma \leq \gamma_a$, и низкоэнергетическом с $\gamma \leq \gamma_a^{1/3}$, где $\gamma_a = 1 + eU_a/mc^2$, e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, U_a — потенциал анода,

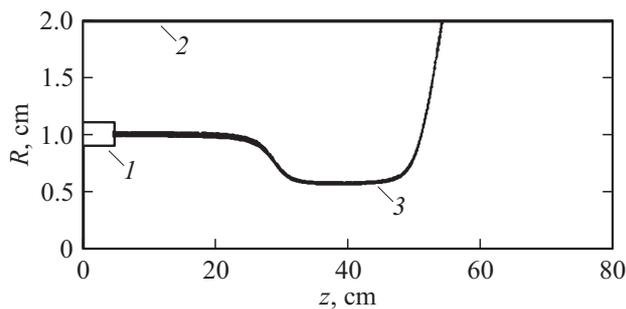


Рис. 1. Геометрия диода. 1 — катод, 2 — анод, 3 — электронный пучок.

$\gamma = (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$ — релятивистский фактор электронов, V — их скорость. Ранее считалось [3,4], что для получения электронного пучка с низкоэнергетическим состоянием, называемым также „сжатым“, необходимо образование ВК в нерегулярном канале транспортировки, состоящем из нескольких секций разного диаметра. В работе [5] показано, что „сжатое“ состояние реализуется и в случае, если в подобной системе с нерегулярным анодом и локализованным ВК дополнительно используется магнитное зеркало для полного отражения электронов пучка. При этом в области магнитного зеркала требуется создание сильных магнитных полей.

В отличие от предыдущих публикаций в настоящей работе впервые показана возможность формирования „сжатого“ состояния электронного пучка в системах с однородным цилиндрическим анодом и сниженным магнитным полем на всем протяжении электронно-оптической системы диода. В рассматриваемой конфигурации магнитных полей без учета пространственного заряда пучка не должно возникать отражения электронов за счет эффекта магнитного зеркала. Задача снижения магнитных полей очень важна для практических приложений сильноточных электронных пучков, в частности, в релятивистских магнетронах [6–8], где „сжатое“ состояние пучка может быть использовано в качестве катода [6]. При уменьшении магнитного поля в области отражения электронов пучка значительно упрощается магнитная система релятивистского магнетрона и уменьшается ее энергопотребление.

В работе рассматривается коаксиальный диод (рис. 1) с магнитной изоляцией, в котором профиль магнитного поля $B(z)$ состоит из двух однородных участков: $B(z) \approx B_1$ при $z = 0-25$ см, $B(z) \approx B_2$ при $z = 35-45$ см со значениями $B_1 < B_2$ — и переходной области между ними. Вся система полагается аксиально-симметричной со следующими параметрами: радиусы анода и катода $R_a = 2$ см и $R_c = 1$ см соответственно, толщина пучка на катоде $d \leq 0.05$ см, разность потенциалов между катодом и анодом $U_a = 430$ кВ. Численное моделирование процессов формирования и динамики ВК в диоде проводилось в универсальном коде КАРАТ [9], основанном на разностном методе решения уравнений Максвелла совместно с релятивистским вариантом метода крупных частиц.

В случае сильного ведущего магнитного поля, когда электронный пучок можно считать сильно замагниченным и поперечным движением электронов можно пренебречь, электроны пучка двигаются вдоль силовых линий магнитного поля. При уменьшении радиуса электронного пучка в области нарастания магнитного поля плотность пространственного заряда пучка увеличивается и может превысить предельное значение, соответствующее J_{lim} . При адиабатическом характере увеличения магнитного поля, проводя те же качественные рассуждения, которые обычно используются при выводе соотношений для J_F , J_{lim} , можно ожидать появления отраженных частиц в точке z_* , где радиус электронного пучка

$$R_b(z_*) \approx R_a \exp \left[- \ln(R_a/R_c) \frac{(\gamma_a^{2/3} - 1)^{3/2} \gamma_F}{(\gamma_a - \gamma_F) \sqrt{\gamma_F^2 - 1}} \right] \quad (1)$$

и $\gamma_F = -0.5 + \sqrt{0.25 + 2\gamma_a}$. Величина магнитного поля в точке z_* может быть получена из закона сохранения потока магнитного поля через поперечное сечение силовой трубки

$$B(z_*) \approx B_1 \left[R_c/R_b(z_*) \right]^2, \quad (2)$$

где B_1 — величина магнитного поля на однородном участке у катода.

Для случая сильного магнитного поля с $B_1 = 4$ Т и $B_2 = 12$ Т из (1) и (2) следуют координаты точки отражения $R_b(z_*) \approx 0.7$ см, $z_* \approx 30$ см и величина магнитного поля в данной точке $B(z_*) \approx 8$ Т.

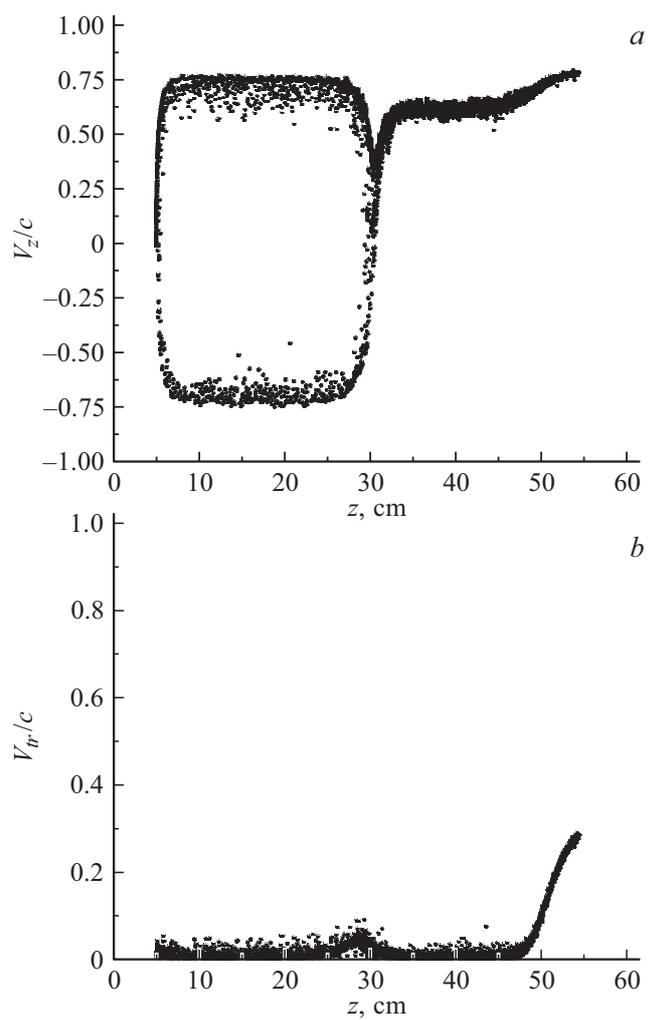


Рис. 2. Распределение продольных (а) и поперечных (b) скоростей электронов вдоль оси системы в момент времени $t = 30$ ns в случае стационарного локального ВК.

На рис. 2 приведены полученные при численном моделировании распределения продольной V_z и поперечной V_{tr} скоростей электронов пучка по координате z в момент времени $t = 30$ ns, когда ВК уже полностью сформировался. Из рис. 2 видно, что условие замагниченности электронов выполняется. Первые отраженные электроны появляются в момент времени $t = 4.6$ ns при $z = 30.6$ см, что хорошо согласуется с приближенной оценкой (1). С течением времени местоположение ВК несколько смещается от начального в сторону катода, а в области между катодом и ВК происходит накопление отраженных электронов, что приводит к торможению электронов пучка, т.е. уменьшению $\max |V_z|$ в этой области пространства. Электроны, прошедшие за ВК, находятся в высокоэнергетическом состоянии с энергией $\gamma = 1.28$, превышающей $\gamma_a^{1/3} = 1.22$, ток прошедшего пучка $J_{tr} = 2.3$ кА. Таким образом, в случае больших магнитных полей, когда поперечными движениями в электронном пучке можно пренебречь, в рассматриваемой системе реализуются локализованный стационарный ВК и высокоэнергетическое состояние электронного пучка.

При умеренных магнитных полях $B_1 = 0.6$ Т и $B_2 = 8$ Т, когда поперечные движения электронов пучка становятся существенными, в рассматриваемом диоде ВК перестает быть стационарным. Как показывают результаты численного моделирования (рис. 3), сразу после возникновения ВК двигается в область магнитного поля $B = B_1$ вплоть до катода, оставляя за собой низкоэнергетическое состояние электронного пучка. Отраженные электроны появляются в момент времени $t \sim 1.6$ ns при $z_* \sim 29.5$ см, после чего плоскость отражения смещается в сторону катода со средней скоростью $V_{vc} \sim 0.9$ см/ns. В процессе движения плоскости отражения ее скорость уменьшается, и при $t \sim 100$ ns плоскость отражения доходит до эмитирующей кромки катода, а в области прохождения ВК происходит накопление электрического заряда и формируется двухпотокное низкоэнергетическое состояние электронного пучка с максимальной энергией $\max(\gamma) = 1.12$, меньшей $\gamma_a^{1/3} = 1.22$. После завершения процесса накопления электрического заряда ток прошедшего электронного пучка составляет $J_{tr} = 0.9$ кА. Отметим, что данный сценарий не реализуется в случае сильных магнитных полей, в которых виртуальный катод не заходит в область однородного поля $B = B_1$ и низкоэнергетическое состояние не образуется (рис. 2).

Результаты, полученные в настоящей работе с помощью кода КАРАТ [9], были также проверены и подтверждены численным модели-

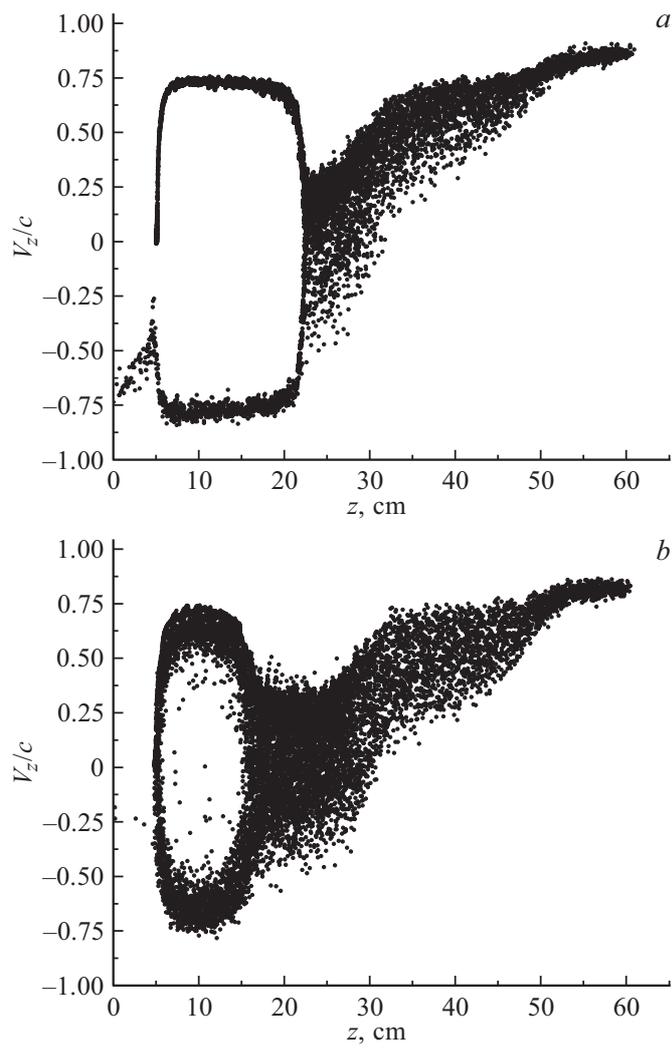


Рис. 3. Распределение продольных скоростей электронов вдоль оси системы при формировании низкоэнергетического состояния электронного пучка. $t = 3$ (a), 10 (b) и 120 ns (c).

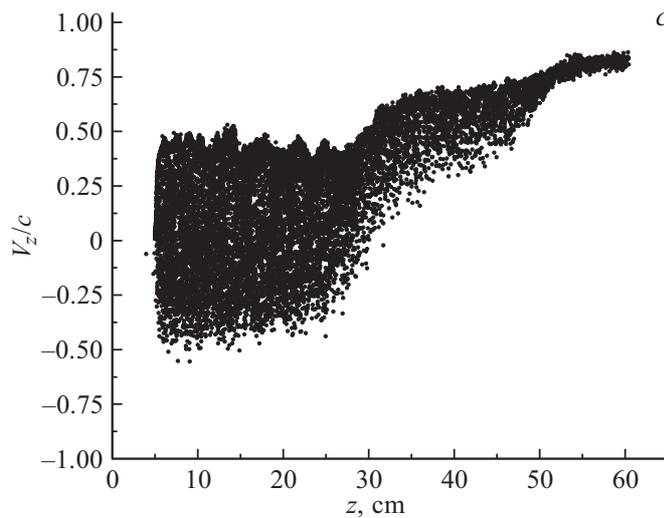


Рис. 3 (продолжение).

рованием в коммерческом коде CST Particle Studio [10]. В релятивистской СВЧ-электронике коды [9,10] широко используются для расчетов взаимодействия электронных пучков с электромагнитными полями и многократно проверены путем сравнения с точными эталонными решениями.

Очевидно, что две рассмотренные в настоящей работе ситуации различаются степенью закрутки электронного пучка, т.е. величинами поперечных скоростей электронов. В случае малых поперечных скоростей (сильных магнитных полей), несмотря на возможность образования ВК, низкоэнергетическое состояние не реализуется. При существенных поперечных скоростях электронов процессы накопления заряда между эмитирующей кромкой и виртуальным катодом проходят по-другому, что приводит к смещению ВК в область однородного поля V_1 вплоть до эмитирующей кромки и образованию низкоэнергетического состояния электронного пучка.

Электронный пучок после локализованного стационарного ВК, образующегося в сильных магнитных полях, обладает малым разбросом скоростей (что следует из сравнения результатов, представленных

на рис. 2, а и 3, с), а величина прошедшего тока определяется конфигурацией магнитного поля. На основе данного эффекта возможно создание взрывоэмиссионных электронных пушек с управлением параметрами получаемого электронного пучка, что может быть востребовано в приложениях, связанных с физикой сильноточных электронных пучков. Применительно к релятивистской СВЧ-электронике создание таких электронных инжекторов позволило бы реализовать управление параметрами выходного излучения релятивистских СВЧ-приборов. В частности, рассмотренный в работе механизм может послужить основой для развития метода управления длительностью импульса выходного излучения гигаваттной релятивистской лампы обратной волны [11]. Низкоэнергетическое состояние, как отмечалось выше, может использоваться в качестве катода в релятивистских магнетронах [6].

Таким образом, в работе впервые показано, что в коаксиальном диоде с однородным цилиндрическим анодом в зависимости от конфигурации магнитного поля возможно образование ВК двух типов: локализованного стационарного ВК и движущегося ВК, формирующего двухпотокное низкоэнергетическое состояние.

Работа поддержана в рамках выполнения государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме № 0035-2014-0025.

Список литературы

- [1] Федосов А.И., Литвинов Е.А., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П. // Изв. вузов. Физика. 1977. № 10. С. 134–135.
- [2] Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990. 333 с.
- [3] Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А., Коровин С.Д., Полевин С.Д., Рыжов В.В., Ячный А.П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 22. С. 74–81.
- [4] Гришков А.А., Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22. С. 46–52.
- [5] Fuks M.I., Schamiloglu E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. // Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). London, 2017. DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289558
- [6] Fuks M.I., Prasad S., Schamiloglu E. // IEEE Transact. Plasma Sci. 2016. V. 44. N 8. P. 1298–1302.

- [7] Винтизенко И.И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 1. С. 115–120.
- [8] Shi D., Qian B., Wang H., Li W., Du G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. N 46. P. 465104. DOI: 10.1088/0022-3727/49/46/465104
- [9] Tarakanov V.P. User's Manual for Code Karat. Springfield: BRA, 1992. 176 p.
- [10] CST — computer simulation technology AG. Darmstadt, Germany. Available: <http://www.cst.com>
- [11] Гойхман М.Б., Громов А.В., Кладухин В.В., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицин А.В. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 6. С. 145–148.