

## Численное моделирование нового способа формирования виртуального катода в релятивистском электронном потоке в коаксиальном пространстве дрейфа с приложенным внешним магнитным полем

А. А. Короновский (мл.),\* С. А. Куркин,† А. А. Бадарин,‡ А. Е. Храмов§

<sup>1</sup>Саратовский государственный национальный исследовательский университет имени Н. Г. Чернышевского. Факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем  
Россия, 410012. Саратов, Астраханская, д. 83, корп. 8

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,  
Институт электронной техники и машиностроения,  
кафедра «Автоматизация, управление, мехатроника»  
Россия, 410008, Саратов, Политехническая, д. 77, корп. 2

В данной работе рассмотрена динамика электронного пучка в коаксиальном пространстве дрейфа во внешнем неоднородном магнитном поле. Проведенное численное моделирование показало возможность формирования виртуального катода за счет сжатия релятивистского электронного пучка внешним магнитным полем.

PACS: 52.59.Mv      УДК: 533.95

Ключевые слова: коаксиальное пространство дрейфа, неоднородное магнитное поле, релятивистский электронный пучок, виртуальный катод.

При движении электронов в пространстве дрейфа минимум распределения потенциала будет находиться на некотором расстоянии от поверхности катода. При больших значениях плотности тока эмиссии в пространстве дрейфа формируется виртуальный катод — потенциальный барьер, отражающий часть электронного потока к плоскости инжекции и на боковую поверхность пространства дрейфа.

Возникновение потенциального барьера определяется пространственным зарядом инжектируемого в камеру дрейфа электронного потока. Часть электронов, имеющих энергию большую значения высоты потенциального барьера (значения потенциала в минимуме), продолжают движение к аноду, другая часть отражается от барьера обратно к катоду. Глубина потенциальной ямы «виртуального катода» равна средней кинетической энергии электронного потока.

При малых токах пучка глубина провисания потенциала мала, и электронный пучок полностью проходит без отражений к выходной плоскости пространства (режим стационарной транспортировки потока). С ростом тока пучка (при фиксированной энергии ускорения электронов) плотность пространственного заряда пучка также растет и, как следствие, увеличивается глубина потенциальной ямы.

При некотором токе пучка, называемом предельным вакуумным (или критическим) током глубина потенциального барьера становится достаточной для отражения электронов — происходит формирование виртуального катода. Виртуальный катод в пучке принципиаль-

но ведёт себя нестационарным образом, совершая колебания как во времени, так и в пространстве. Это позволяет использовать электронные потоки с виртуальным катодом для генерации мощного СВЧ-излучения [1].

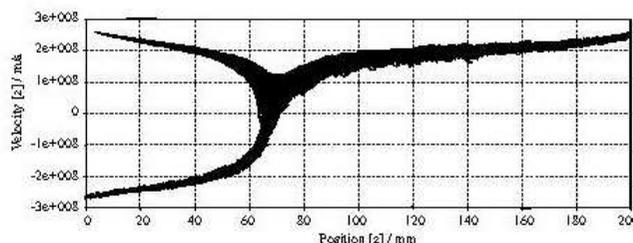


Рис. 1: Вид фазового портрета виртуального катода в программе CSTParticleStudio

Значение величины предельного вакуумного тока пучка в цилиндрическом пространстве дрейфа определяется законом Богданкевича–Рухадзе (1).

$$I_{:\text{@}} = \frac{mc^2}{e} \frac{(\gamma^{\frac{2}{3}} - 1)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\Delta}{r} + 2 \ln \frac{R}{r}}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса электрона,  $e$  — величина заряда электрона,  $c$  — скорость света,  $\gamma$  — релятивистский параметр электронного пучка,  $R$  — радиус трубы цилиндрического пространства дрейфа,  $r$  — внешний радиус электронного пучка,  $\Delta$  — толщина электронного пучка.

Из соотношения (1) видно, что при изменении геометрических параметров цилиндрического пространства дрейфа при заданном значении поданного на катод напряжения  $U_0$ , также изменяется значение предельного вакуумного тока для рассматриваемой системы.

\*E-mail: alexander.korovovskiy@gmail.com

†E-mail: kurkinsa@gmail.com

‡E-mail: badarin.a.a@mail.ru

§E-mail: hramovae@gmail.com

В рассматриваемых системах на области пространства дрейфа задано постоянное однородное магнитное поле, которое фокусирует электронный пучок. Значение такого приложенного внешнего магнитного поля для релятивистских виркаторов составляет величину порядка 0.2–1 Тл [2].

Известно, что реализуя переход электронного пучка в цилиндрическое пространство дрейфа большего радиуса, можно сформировать виртуальный катод в области пространства дрейфа большего радиуса при выполнении условия  $I_{кр2} < I_0 < I_{кр1}$ , где  $I_{кр1}$  — величина критического тока в области пространства дрейфа меньшего радиуса,  $I_{кр2}$  — величина критического тока в области пространства дрейфа большего радиуса,  $I_0$  — значение величины тока, эмитируемого с катода.

Такой тип реализации формирования виртуального катода был применен в вакуумных плазменных генераторах для создания сжатого состояния пучка [3].

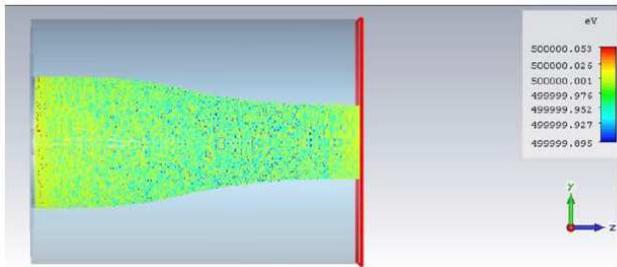


Рис. 2: Изменение радиуса электронного пучка магнитным полем, рассчитанное в программе CSTParticleStudio. Параметры модели пространства дрейфа: радиус 75 мм, длина 200 мм, радиус внутреннего проводника 10 мм, внешний радиус кольцевого эмиттера 50 мм, внутренний радиус кольцевого эмиттера 48 мм, изменение величины внешнего магнитного поля в системе 1.7 Тл. Инжектируемое напряжение 500 кВ

Принципиально новая идея создания виртуального катода связана с изменением радиуса электронного пучка, который движется в цилиндрическом пространстве дрейфа, имеющим постоянный радиус (рис. 2). Так как при сжатии электронного пучка, то есть уменьшении его внешнего радиуса, согласно закону Богданкевича–Рухадзе, будет уменьшаться значение предельного вакуумного тока.

Рассматривается система, представляющая коаксиальное пространство дрейфа. Радиус цилиндрического пространства дрейфа 75 мм, длина 200 мм, радиус внутреннего проводника 10 мм, внешний радиус кольцевого эмиттера 50 мм, внутренний радиус кольцевого эмиттера 48 мм, изменение величины внешнего магнитного поля в системе 1.7 Тл. Инжектируемое напряжение 500 кВ. Значение предельного вакуумного тока в системе 9400 А, при постоянном внешнем магнитном поле, равном 0.5 Тл.

Приложенное внешнее магнитное поле задано функцией распределения магнитного поля на оси (рис. 3). Модуль и направление вектора магнитной индукции

в каждой точке рассматриваемой системы определяется из теоремы Гаусса для вектора магнитной индукции.

Численное моделирование проводилось с помощью лицензионного пакета трехмерного электромагнитного моделирования CSTParticleStudio.

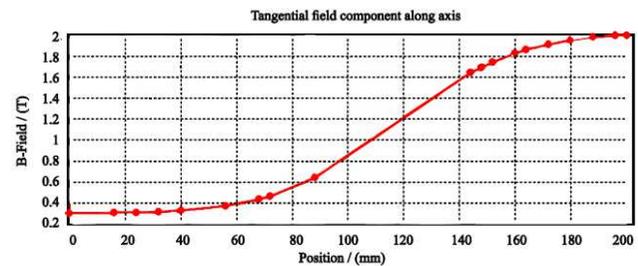


Рис. 3: Вид функции распределения магнитного поля, заданной на оси в программе CSTParticleStudio

Изменить радиус электронного пучка позволяет приложенное внешнее неоднородное статическое магнитное поле, заданное на оси. Однако, следует учитывать тот факт, что образование виртуального катода при сжатии пучка может также достигаться за счет эффекта «магнитной ловушки», образующейся за счет сильной неоднородности статического магнитного поля. Виртуальный катод в области сильной неоднородности магнитного поля образуется для величины тока сильно ниже значения, при котором образуется ограничивающий пространственный заряд при постоянном магнитном поле.

Заданное плавное изменение величины магнитного поля на оси (рис. 3) будет постепенно сжимать электронный пучок, уменьшая значение его внешнего радиуса. При таком задании магнитного поля эффект «магнитной ловушки» не проявляется, в области изменения внешнего магнитного поля колебания энергии частиц значительно меньше энергии пучка для значений тока порядка 3000 А.

С точки зрения применения в реальных генераторах на виртуальном катоде (виркаторах) особый интерес представляет поведение значения величины критического тока при введении в цилиндрическое пространство дрейфа дополнительного элемента- внутреннего проводника [4].

Закон Богданкевича–Рухадзе (1) дает лишь приближительную оценку для расчета величины предельного вакуумного тока в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа, т. к. значение предельного вакуумного тока зависит также от взаимного расположения электронного пучка и внутреннего проводника в пространстве дрейфа.

В настоящей работе построена модель коаксиального цилиндрического пространства дрейфа. Исследовано поведение значений критического тока в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа в зависимости от геометрических параметров системы. Установлено, что наличие внутреннего проводника в систе-

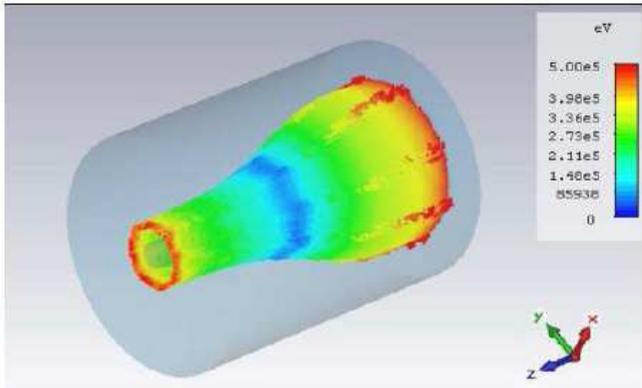


Рис. 4: Виртуальный катод, полученный за счет изменения радиуса релятивистского электронного пучка магнитным полем в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа в программе CSTParticleStudio

ме увеличивает значение предельного вакуумного тока. Заданы параметры внешнего магнитного поля, при котором не проявляется эффект «магнитной ловушки», и электронный пучок плавно выводится на новый радиус. При увеличении значения инжектируемого тока релятивистского электронного пучка до 6000 А в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа в области меньшего радиуса электронного пучка удалось сформировать ВК. Таким образом виртуальный катод сформирован за счет изменения радиуса релятивистского электронного пучка внешним магнитным полем в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа постоянного радиуса.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых-кандидатов наук (МК-5426.2015.2), грантов РФФИ (№ 15-32-20299, № 16-32-60059).

- [1] Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.  
 [2] Дубинов А. Е., Селемир В. Д. Письма в ЖТФ. 27, вып. 13. (2001).  
 [3] Петрик А. Г. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная ди-

намика. 22, № 6. С. 35. (2014).

- [4] Fuks M. I., Schamiloglu E. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), 15361016.

## Numerical simulation of new technique of forming virtual cathode in relativistic electron beam in coaxial drift space with attached external magnetic field

A. A. Koronovskiy<sup>a</sup>, S. A. Kurkin<sup>b</sup>, A. A. Badarin<sup>c</sup>, A. E. Hramov<sup>d</sup>

<sup>1</sup>Department of open systems physics, Faculty of nonlinear processes. National Research Saratov State University Saratov 410012, Russia. Astrakhanskaya Street, 83, bldg. 8

<sup>2</sup>Department of Automation science and engineering, Institute of electrical and mechanical engineering Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Saratov 410008, Russia, Politechnicheskaya Street, 77, bldg. 2

E-mail: <sup>a</sup>alexander.koronovskiy@gmail.com, <sup>b</sup>kurkinsa@gmail.com, <sup>c</sup>badarin.a.a@mail.ru, <sup>d</sup>hramovae@gmail.com

In this paper is considering dynamics of electron beam in coaxial drift space in external inhomogeneous magnetic field. Numerical simulation, which was conducting, show possibility forming of virtual cathode with help of compression relativistic beam by external magnetic field.

PACS: 52.59.Mv

Keywords: coaxial space drift, inhomogeneous magnetic field, relativistic electron beam, virtual cathode.

### Сведения об авторах

1. Короновский Александр Алексеевич — студент (бакалавр), лаборант-исследователь; тел.: (927) 150-93-64, e-mail: alexander.koronovskiy@gmail.com.
2. Куркин Семен Андреевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (927) 055-77-70, e-mail: kurkinsa@gmail.com.
3. Бадарин Артем Александрович — студент (магистрант), мл. науч. сотрудник; тел.: (987) 803-23-94, e-mail: badarin.a.a@mail.ru.
4. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (927) 123-32-94, e-mail: hramovae@gmail.com.