

## 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,  
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.  
[alexander.koronovskiy@gmail.com](mailto:alexander.koronovskiy@gmail.com)

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 принципиально 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].

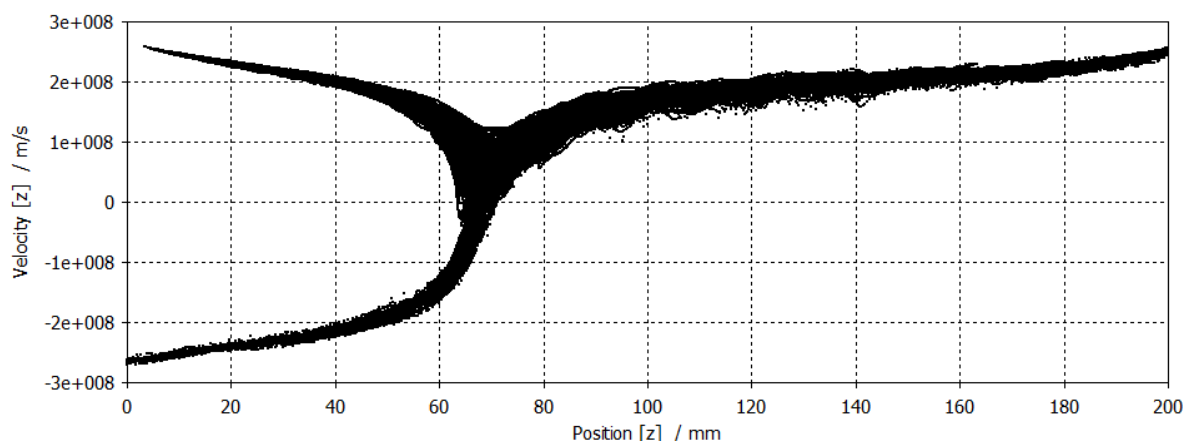


Рис. 1. Вид фазового портрета виртуального катода в программе CSTParticleStudio

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

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

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.

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].

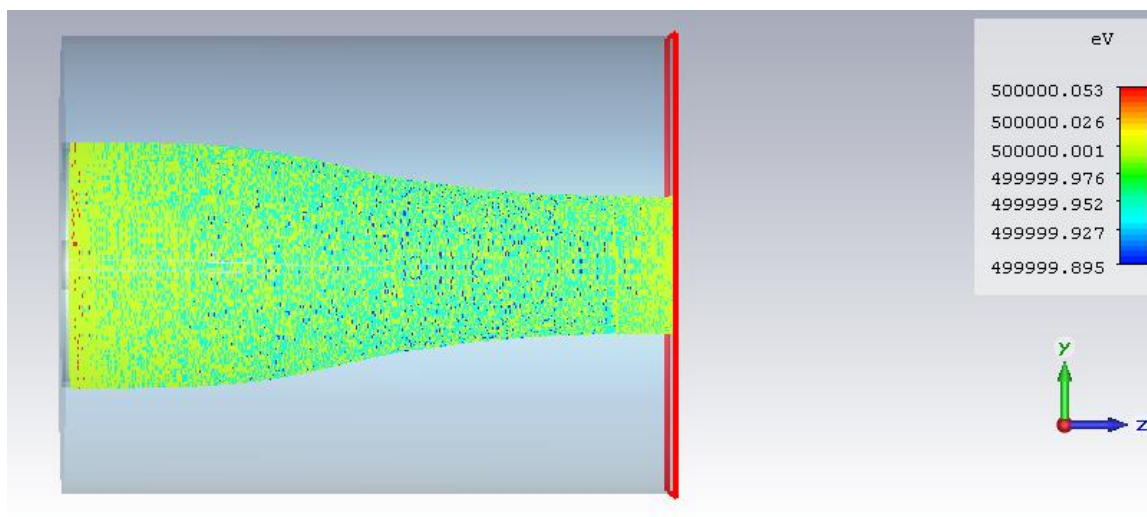


Рис. 2. Изменение радиуса электронного пучка магнитным полем, рассчитанное в программе CST Particle Studio. Параметры модели пространства дрейфа: радиус 75 – мм, длина – 200 мм, радиус внутреннего проводника – 10 мм, внешний радиус кольцевого эмиттера – 50 мм, внутренний радиус кольцевого эмиттера – 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. 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 CST Particle Studio.

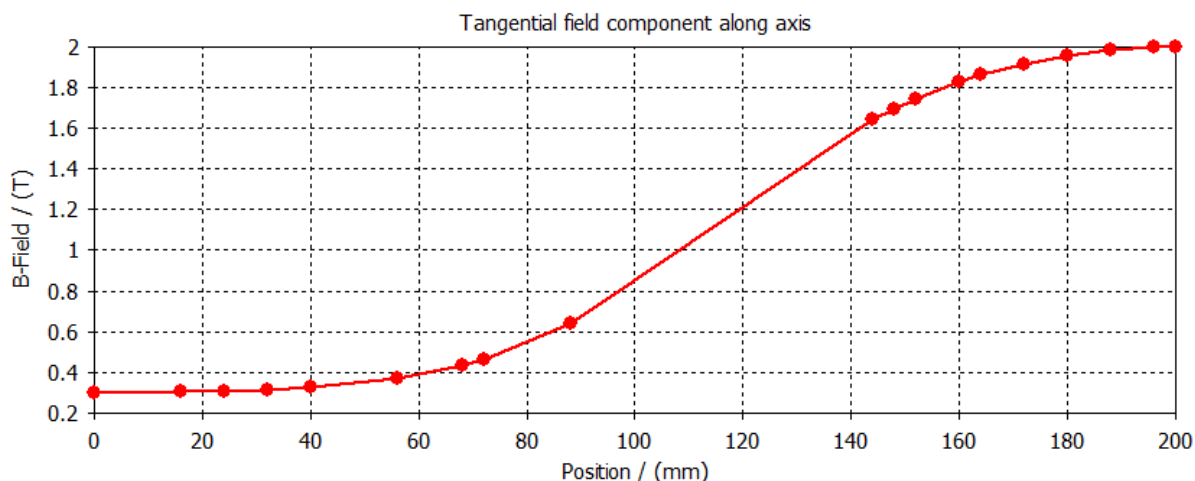


Рис. 3. Вид функции распределения магнитного поля, заданной на оси в программе CST Particle Studio

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 приблизительную 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.

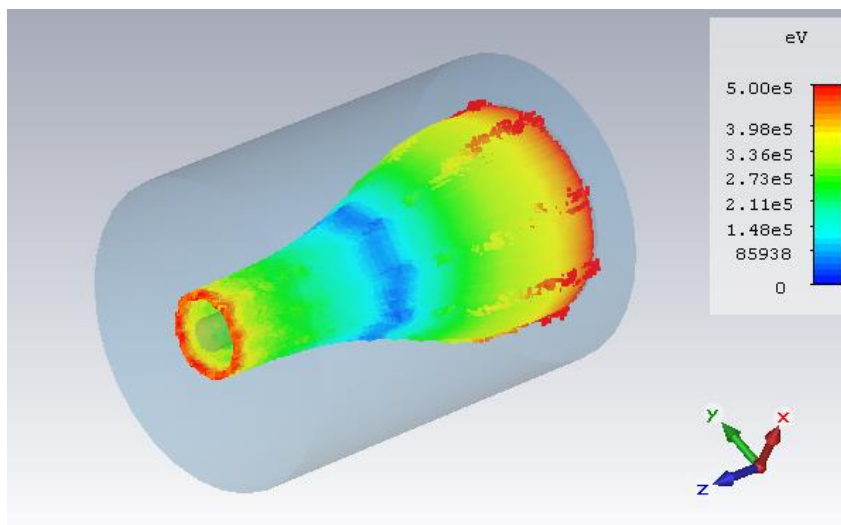


Рис. 4. Виртуальный катод, полученный за счет изменения радиуса релятивистского электронного пучка магнитным полем в коаксиальном цилиндрическом пространстве дрейфа в программе CST Particle Studio

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 системе 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).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов "Лекции по СВЧ электронике для физиков. Том 2" М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир// Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 13
3. Петрик А.Г. //Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 22, 6 (2014) 35-41
4. M. I. Fuks, E. Schamiloglu //Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), 15361016