



О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СОСТАВНОЙ ТРУБЕ ДРЕЙФА

А. Г. Петрик

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

В работе проведено полномасштабное численное трехмерное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в виркаторной системе с составным пространством дрейфа с трубами разного диаметра. Был обнаружен механизм формирования сжатого состояния пучка через образование двух виртуальных катодов вблизи анодной сетки и на скачке радиуса пространства взаимодействия, которые со временем смыкаются в один распределенный в пространстве дрейфа виртуальный катод (сжатое состояние пучка).

Ключевые слова: Численное моделирование, сжатое состояние, виртуальный катод, нелинейная динамика, релятивистский электронный пучок.

Введение

Исследования, направленные на изучение образования и динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках, представляют большой интерес и являются важной задачей в области современной вакуумной и плазменной электроники больших мощностей [1–5]. Интерес обусловлен как фундаментальной важностью подобных исследований, так и прикладным значением данных работ. Электронные потоки с виртуальным катодом имеют большой спектр практических применений. В частности, они используются в мощных источниках электромагнитного излучения [3–8], для коллективного ускорения пучков положительных ионов [9], для генерации широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний [10–12], для генерации мощных импульсов тормозного рентгеновского излучения [3], в мощной коммутационной технике [12], для измерения сверхглубокого вакуума [8] и т.д.

ВК, отражающий от себя часть электронного потока, формируется в пучках со сверхкритическим током, который существенно зависит от энергии инжектируемых электронов и геометрии пространства дрейфа [2, 3, 6]. После формирования ВК в промежутке «катод–ВК» устанавливается двухпотокное состояние пучка. В работе [13] было обнаружено и описано новое состояние, опережающее в своем развитии

двухпотокую неустойчивость, так называемое сжатое состояние пучка (ССП), характеризующееся малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков. Было показано, что один из сценариев формирования СПП носит волновой характер, причем волна переключения от двухпотокowego к сжатому состоянию движется от ВК к катоду, то есть против инжекции пучка. Следуя работе [14], можно сказать, что фактически СПП – это распределенный в пространстве дрейфа ВК, обнаруживаемый по специфическому профилю фазового портрета, когда встречные пучки на некотором участке смыкаются вдоль оси скоростей, образуя область сильно нагретого электронного облака.

В мощных системах с релятивистскими электронными пучками для получения СПП используют составное пространство дрейфа из труб разного радиуса [15]. В секции с меньшим диаметром размещены катод и анод, ток пучка в ней ниже критического тока возникновения ВК, а во второй трубе дрейфа ток превышает критический и реализуется СПП. В работе [15] были также рассмотрены сценарии установления СПП при различных условиях. Было показано, что, если разместить на скачке радиуса фольгу или сформировать тонкий плазменный слой, то скорость установления СПП несколько уменьшится. В работе [16] было обнаружено, что СПП устанавливается между осциллирующим и магнитным ВК, а волна переключения может двигаться в противоположную от катода сторону. В работе [17] также была изучена возможность формирования СПП в гладкой трубе дрейфа за счет дополнительного торможения электронов и были выявлены характерные особенности поведения подобной системы.

Практический интерес к изучению сжатого состояния определяется, например, возможностью применения СПП для коллективного ускорения ионов [9, 18]. Например, в работе [18] был оценен темп ускорения ионов в волне переключения от двухпотокowego к сжатому состоянию пучка, который составил порядка 1 МэВ/см.

Вместе с тем, детали механизма образования и нелинейной динамики сжатого состояния потоков до конца не изучены. В частности, не проведены детальные исследования поведения системы с изменением тока пучка, что можно осуществить, например, меняя расстояние «катод–анод» источника потока. Поэтому целью данной работы стало рассмотрение и анализ механизма установления сжатого состояния сильноточного электронного потока в составной трубе дрейфа при изменении расстояния «катод–анод» источника электронов.

1. Исследуемая модель

Как уже говорилось во Введении, типичной системой для изучения СПП является модель, имеющая составное пространство дрейфа из труб разного радиуса. В данной работе мы рассматриваем мощную релятивистскую виркаторную систему с двухсегментным пространством дрейфа пучка, аналогичную рассмотренной в работах [14, 15].

Схема рассматриваемой нами системы показана на рис. 1, а. В качестве источника электронов выступает цилиндрический катод 1, размещенный соосно с первой секцией пространства дрейфа 3. С катода происходит эмиссия электронов за счет ускоряющего напряжения, подаваемого на ускоряющую сетку 2 (анод), которая считается полностью прозрачной для электронов. Форма моделируемого импульса напряжения показана на рис. 1, б. Амплитуда импульса 500 кВ, время нарастания импульса 3.0 нс. Ускоренный пучок движется в эквипотенциальном пространстве

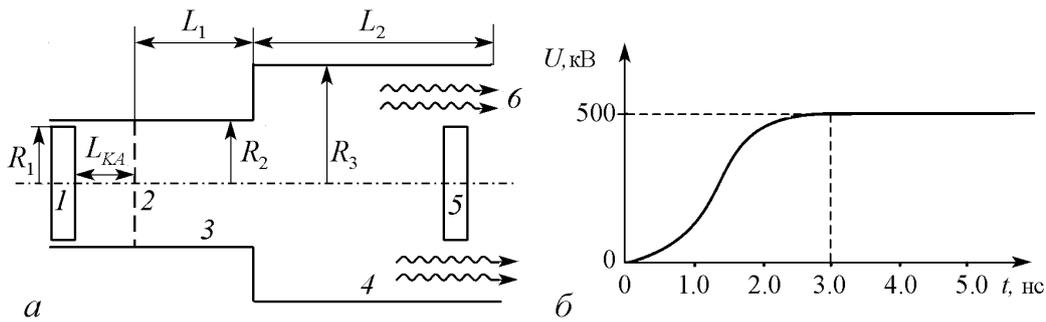


Рис. 1. *a* – схема моделирования (масштаб сохранен): 1 – катод, 2 – анодная сетка, 3 – анодная секция, 4 – секция дрейфа, 5 – коллектор, 6 – вывод СВЧ-мощности; геометрические параметры: $L_1 = 70$ мм, $L_2 = 100$ мм, $R_1 = 24$ мм, $R_2 = 27$ мм, $R_3 = 50$ мм. *б* – форма импульса напряжения, время нарастания импульса 3.0 нс

дрейфа в первой секции, которая на расстоянии L_1 от анодной сетки испытывает скачок радиуса, переходя во вторую секцию длиной L_2 . Пучок, прошедший через ВК, осаждается на коллекторе электронов 5. Вывод электромагнитной мощности 6 располагается в плоскости коллектора и представляет собой коаксиальный волновод, центральным проводником которого выступает коллектор. Вся система находится во внешнем продольном однородном магнитном поле с индукцией $B = 50$ кГс, которое фокусирует и удерживает электронный пучок.

В качестве основного управляющего параметра выступало расстояние от катода до анодной сетки L_{KA} , которое менялось в диапазоне 3.0...11.0 мм за счет того, что катод отодвигался от анодной сетки.

Все вычисления проводились с использованием лицензионного программного комплекса CST ParticleStudio (CST PS) [19]. Данный продукт представляет собой специализированный инструмент для моделирования динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных полях электродинамических систем. При расчетах используется particle-in-cell вычислитель CST PS, предназначенный для моделирования самосогласованной задачи распространения электромагнитных волн и движения заряженных частиц во временной области. При этом электромагнитные поля вычисляются в дискретных узлах путем решения полной системы уравнений Максвелла по схеме с перешагиванием (метод сеток), тогда как крупные частицы движутся в непрерывном фазовом пространстве, для каждой крупной частицы решаются уравнения движения, далее для нахождения величин тока и пространственного заряда частицы взвешиваются на пространственной сетке [20]. При моделировании источника электронного потока используется модель эмиссии постоянного тока.

2. Численные результаты

Рассмотрим результаты изучения поведения исследуемой системы при изменении основного управляющего параметра – расстояния «катод–анод». На рис. 2 и 3 приведены фазовые портреты электронного потока в различные моменты времени при двух различных характерных значениях управляющего параметра. Данные графики демонстрируют эволюцию во времени установления и развития сжатого состояния электронного потока, которая сопровождается накоплением частиц и, соответственно, дополнительного электрического заряда в области пространства дрейфа пучка.

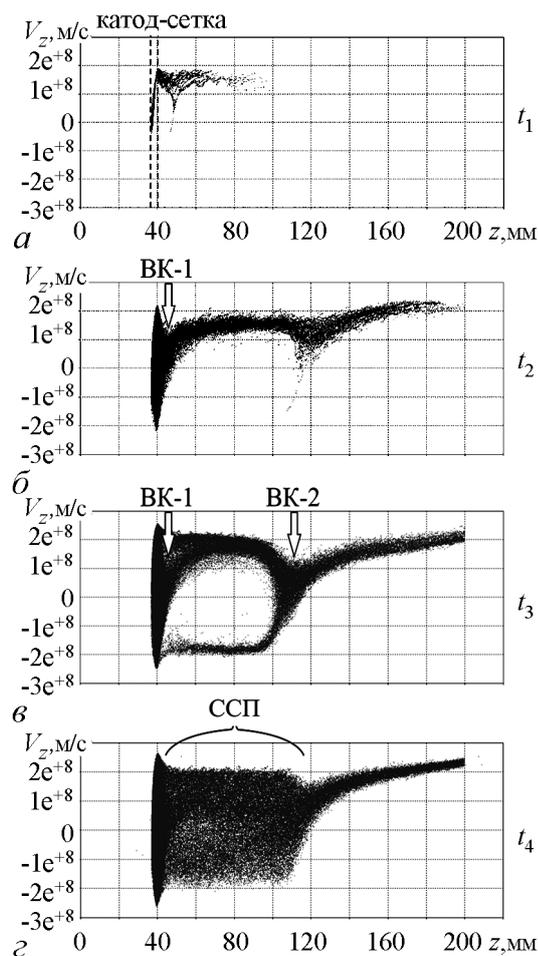


Рис. 2. Фазовые портреты для $L_{KA} = 3.0$ мм в моменты времени t , нс: $t_1 = 2.2$, $t_2 = 2.8$, $t_3 = 3.4$, $t_4 = 10.0$

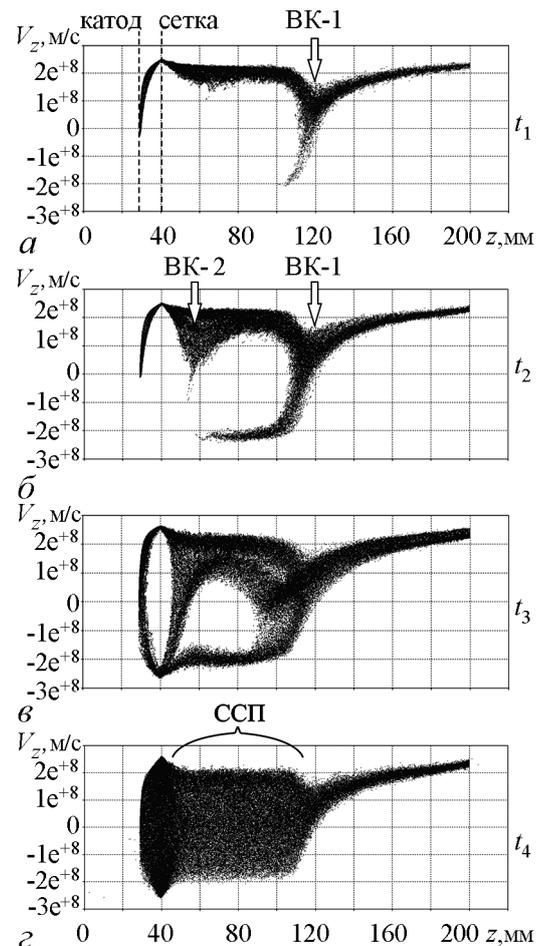


Рис. 3. Фазовые портреты для $L_{KA} = 11$ мм в моменты времени t , нс: $t_1 = 2.8$, $t_2 = 3.0$, $t_3 = 3.4$, $t_4 = 10.0$

При малых величинах расстояния «катод–анод», например, при $L_{KA} = 3.0$ мм (этот случай показан на рис. 2), изначально накопление частиц происходит возле анодной сетки за счет торможения потока в результате действия сил пространственного заряда (2.2 нс, рис. 2, а), которое спустя приблизительно 0.6 нс приводит к формированию первого виртуального катода вблизи анодной сетки. А около границы скачка радиуса трубы дрейфа образуется второе уплотнение в потоке, в котором имеется значительное провисание потенциала, так что в этой области пучок начинает интенсивно тормозиться (рис. 2, б). Формирование второй области торможения связано со скачком радиуса пространства дрейфа, в этой области величина критического тока пучка понижается. В ходе дальнейшей эволюции системы вторая область торможения развивается во второй виртуальный катод (показан стрелкой на рис. 2, в), отражающий электроны, так что в первой секции пространства дрейфа формируется двухпоточное состояние (см. рис. 2, в). Виртуальные катоды постепенно сливаются в один распределенный по пространству ВК, и примерно в момент времени 10 нс в системе формируется ССП между сеткой и скачком диаметра труб системы (отмечен скобкой на рис. 2, г).

При больших расстояниях катод–анод (например, $L_{КА} = 11.0$ мм, см. рис. 3) наблюдается картина эволюции, отличающаяся от вышеописанной. До момента времени $t \sim 2.2$ нс все частицы пролетают через систему, не задерживаясь в ней, в области скачка дрейфа имеет место провисание потенциала, которое постепенно возрастает, тормозя электроны. Как следствие в системе в области скачка радиуса между трубами дрейфа формируется первый ВК (показан стрелкой на рис. 3, а). В результате в первой трубе дрейфа возникает двухпотокное состояние, отраженный поток от первого виртуального катода понижает потенциал в области первой трубы дрейфа, благодаря чему в ней спустя 0.2 нс формируется второй ВК (рис. 3, б), который имеет более «размытый» профиль, чем первый. Далее, как и в предыдущем случае, имеет место слияние обоих ВК (рис. 3, в), так что к моменту времени в 10 нс виртуальные катоды сливаются, и в системе снова устанавливается сжатое состояние потока (отмечено скобкой на рис. 3, г).

Таким образом, в ходе численного моделирования было показано, что в пучке, распространяющемся в составной трубе дрейфа со скачком радиуса, последовательно возникают два виртуальных катода в первой и второй секциях с различными радиусами. ВК в такой системе первоначально формируется либо в первой, либо во второй трубе пространства дрейфа, в зависимости от того, в какой трубе меньше величина критического тока. Таким образом, в зависимости от значения управляющего параметра первый ВК появляется вблизи анодной сетки или около границы между трубами дрейфа, далее по мере развития процессов в системе виртуальные катоды двигаются навстречу друг другу и объединяются в состояние, которое носит название распределенного в пространстве ВК или ССП.

На рис. 4 схематично показаны области по параметру $L_{КА}$, представлены два режима образования виртуальных катодов. Как было описано ранее, при изменении значения управляющего параметра $L_{КА}$ реализуются различные режимы поведения электронного пучка со сверхкритическим током в системе. В случае, когда расстояние «катод–анод» меньше 7 мм, реализуется первый режим, для которого характерно образование ВК вначале около анодной сетки, а уже после этого в области скачка радиуса поперечного сечения труб дрейфа образуется второй ВК. Второй режим образования виртуальных катодов реализуется в случае, когда управляющий параметр $L_{КА} > 7$ мм. Для данного режима характерен обратный сценарий: первый ВК образуется в области на границе между составными трубами дрейфа и только спустя какое-то время после установления двухпотокного состояния в системе образуется второй ВК около анодной сетки.

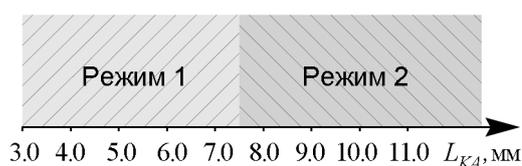


Рис. 4. Режимы реализации различных сценариев формирования сжатого состояния в пучке со сверхкритическим током в зависимости от управляющего параметра (расстояние «катод–анод»)

Выводы

В работе проведено полномасштабное 3D численное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в виркаторной системе с составным пространством дрейфа с трубами разного диаметра. Был обнаружен новый механизм формирования сжатого состояния пучка через образование двух виртуальных катодов вблизи анодной сетки и на скачке радиуса пространства взаи-

модействия, которые со временем смыкаются в один распределенный в пространстве дрейфа виртуальный катод (сжатое состояние пучка). Следует отметить, что новый обнаруженный механизм формирования сжатого состояния затрудняет возможность использования данного состояния потока для ускорения ионов, так как в этом случае не имеет места формирование волны переключения, на фронте которой могут ускоряться ионы [9,14].

Автор благодарит научного руководителя профессора А.Е. Храмова, доцентов Е.Н. Егорова и С.А. Куркина за помощь в выполнении исследования и обсуждение полученных результатов.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (№ 14-02-31149-мол_а).

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
3. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.
4. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35, Вып. 2. С. 462.
5. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф., Фоменко Г.П. Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 6. С. 321.
6. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
7. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21, № 9. P. 093105.
8. Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. Microwave radiation power of relativistic electron beam with virtual cathode in the external magnetic field // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103. P. 043507.
9. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // УФН. 2002. Vol. 172, № 11. С. 1225.
10. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1009.
11. Калинин Ю.А., Храмов А.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скоростям на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 5. С. 25-34.
12. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. Numerical study of chaotic oscillations in the electron beam with virtual cathode in the external non-uniform magnetic fields // Physics Letters A. 2010. Vol. 374, № 30. P. 3057.
13. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. Squeezed state of high-current electron beam // Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1, № 3. P. 741.

14. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35, № 2. С. 462.
15. Дубинов А.Е. Сценарии установления «сжатого состояния» электронного потока в магнитоизолированном виркаторе // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 22. С. 29.
16. Дубинов А.Е. Особенности динамики электронов в виркаторе с магнитной пробкой // Радиоэлектроника. 2000. Т. 45, № 7. С. 875.
17. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Формирование и нелинейная динамика сжатого состояния винтового электронного пучка с дополнительным торможением // Физика плазмы. 2013. Vol. 39, № 11. Р. 1033.
18. Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Тараканов В.П. О возможности коллективного ускорения ионов в магнитоизолированном виркаторе в режиме бегущей границы распределенного виртуального катода // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 4. С. 71.
19. <https://www.cst.com/products/cstps>
20. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma physics via computer simulation. Taylor and Francis Group, 2005.

Поступила в редакцию 28.11.2014

ON THE MECHANISM OF «COMPRESSED»-STATE FORMATION AT RELATIVISTIC ELECTRON BEAM IN TWO-SECTION DRIFT TUBE

A. G. Petrik

Saratov State Technical University

This paper is devoted to the three-dimensional numerical simulation of the «compressed» state of the relativistic electron beam in two-section vircator system with drift tubes with different diameters. We have discovered the mechanism of formation of the «compressed» state of the relativistic beam through the formation of two virtual cathode near the anode grid and between connected sections, which will eventually merged into one distributed in the drift space virtual cathode (compressed state of the beam).

Keywords: Numerical simulation, «compressed» state, virtual cathode, nonlinear dynamic, relativistic electron beam.



Петрик Алексей Георгиевич – родился в Саратове (1992). Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Физика открытых нелинейных систем» (2014). С 2014 года – аспирант Саратовского государственного технического университета. Область научных интересов – исследование интенсивных электронных пучков, изучение механизмов образования и динамики виртуального катода.

410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет
E-mail: a.g.petrik@gmail.com