

12

## **Трехмерное моделирование формирования сжатого состояния электронного пучка в составе трубе дрейфа и анализ его характеристик**

© А.Г. Петрик<sup>1</sup>, С.А. Куркин<sup>1,2</sup>, А.А. Короновский<sup>2,1</sup>,  
А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: hramovae@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 марта 2016 г.

Проведено трехмерное численное электромагнитное моделирование виркатора в режиме формирования сжатого состояния пучка. Проведены детальные численные исследования и анализ динамики заряженных частиц в сжатом состоянии. Показана возможность существенного повышения плотности электронного потока в области сжатого состояния пучка и, как следствие, повышение эффективной плазменной частоты пучка, что может способствовать увеличению частоты и мощности генерации виркатора.

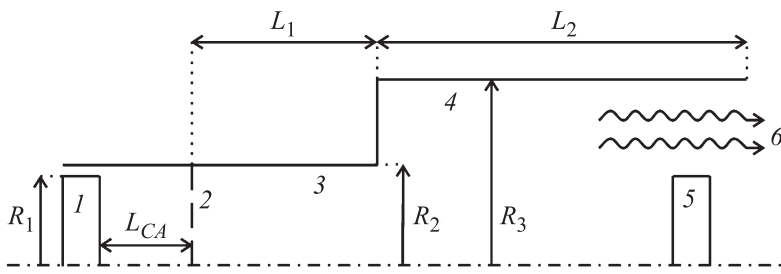
Электронные приборы с виртуальным катодом (ВК) — виркаторы — представляют большой интерес как перспективные источники сверхмощного СВЧ-излучения современной электроники больших мощностей [1–3]. В качестве примеров систем с ВК, которые имеют важное практическое применение, можно привести генераторы импульсов мощного электромагнитного излучения [2,4], генераторы широкополосных шумоподобных колебаний [1.5], устройства, применяемые в мощной коммутационной технике [5], системы ускорения ионов [6], усилители мощного СВЧ-сигнала [7]. Поэтому актуальность исследования физических процессов в пучках заряженных частиц с ВК обусловлена как фундаментальными вопросами физики плазмы в области изучения различных неустойчивостей пучков заряженных частиц, так и возможностью практического использования полученных знаний для оптимизации процессов в приборах электроники больших мощностей.

Следует отметить, что электронные потоки с ВК демонстрируют разнообразные нелинейные явления, в частности, хаотическую динамику и турбулентность пучка [1,2]. Особый интерес в настоящее время вызывает возможность формирования сжатого состояния пучка (ССП) в системе с ВК. СПП было впервые обнаружено в двухсекционном виркаторе в работе [8], в которой показано, что часть электронов отражается от ВК, который формируется на границе двух секций, где имеет место скачок радиуса пространства взаимодействия (а, следовательно, резкое изменение величины критического тока пучка [1]). В результате в двухсекционном виркаторе формируется двухпоточное состояние между анодом и ВК, которое преобразуется в СПП, рассматриваемое как распределенный в пространстве ВК. СПП проще всего обнаружить, исследовав фазовые портреты пучка в различные моменты времени: после определенного момента времени пролетный и отраженный пучки „смыкаются“ вдоль оси скоростей, и можно видеть плотно сжатое электронное облако, напоминающее распределенный в пространстве дрейфа ВК [8–10]. Такое состояние характеризуется большой плотностью электронов, которые имеют сравнительно малые скорости, кроме того в этой области присутствуют метастабильные частицы, дрейфующие на скоростях, близких к нулю. В дальнейшем между катодом и ВК в СПП происходят продольные колебания пространственного заряда [9]. Также следует отметить, что в области сжатого состояния может наблюдаться сложная нерегулярная динамика движения частиц вплоть до хаотической [8,10].

Целью данной работы стало исследование характеристик сжатого состояния пучка в системе с двухсекционным пространством дрейфа, а именно анализ и сравнение плотности электронного потока и его эффективной плазменной частоты в исследуемом двухсекционном виркаторе с СПП и односекционной системе без реализации СПП.

Численное моделирование нелинейных нестационарных процессов формирования СПП процессов проводилось с помощью лицензионного программного продукта CST Particle Studio (CST PS). Пакет CST PS широко используется для проведения численного трехмерного электромагнитного моделирования процессов, протекающих в электронных приборах различного класса [11–14]. В пакете реализована самосогласованная модель, моделирующая динамику релятивистского пучка с использованием метода крупных частиц и динамику электромагнитного поля путем решения полной системы уравнений Максвелла.

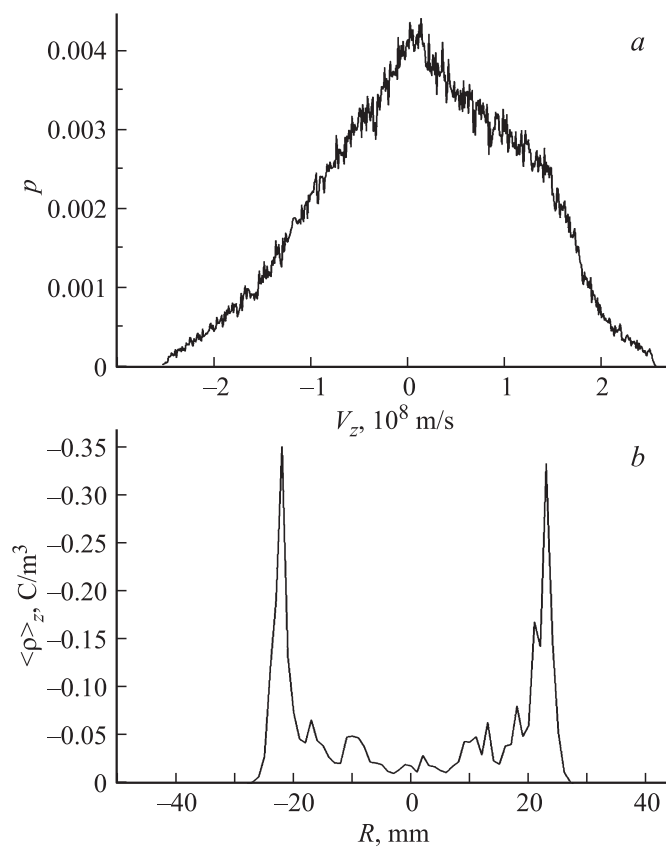
Для исследования была выбрана модель с двухсекционным пространством дрейфа, которая представляет собой две составные трубы



**Рис. 1.** Схема исследуемой системы. 1 — катод, 2 — анодная сетка, 3 — анодная секция, 4 — секция дрейфа, 5 — коллектор, 6 — вывод СВЧ-мощности. Геометрические параметры системы:  $L_1 = 70$  mm,  $L_2 = 100$  mm,  $R_1 = 24$  mm,  $R_2 = 27$  mm,  $R_3 = 50$  mm.

с различными диаметрами (рис. 1). Аналогичная модель была использована ранее в работе [8]. В качестве источника электронов выступает цилиндрический катод 1, который размещен соосно с первой секцией пространства дрейфа 3. Под действием ускоряющего напряжения, подаваемого на анодную сетку 2, происходит ускорение электронов, которые эмитируются с катода. Стоит уточнить, что анодная сетка считается полностью прозрачной, и заряженные частицы без потерь проходят сквозь нее. Амплитуда импульса напряжения была выбрана равной 500 kV, время нарастания импульса — 3 ns. Пучок, прошедший через ВК, осаждается на коллекторе электронов 5. Для вывода электромагнитной мощности используется коаксиальный волновод 6, центральным проводником которого выступает коллектор. Для удерживания и фокусирования электронного пучка на всю систему накладывается внешнее продольное однородное магнитное поле с индукцией  $B = 50$  kG. В качестве основного управляющего параметра исследуемой системы выступает расстояние от катода до анодной сетки  $L_{CA}$ , которое меняется в диапазоне значений 10–20 mm за счет того, что катод отодвигался от анодной сетки.

В результате численного исследования анализируемой системы были получены следующие основные результаты. После начала инжекции пучка в двухсекционный виркатор в системе формируется ССП, которое характеризуется большим числом дрейфующих заряженных частиц, которые имеют скорости близкие к нулю (рис. 2, а показано распределение частиц по скоростям в области ССП), именно они способствуют



**Рис. 2.** Распределение  $p$  частиц по продольным скоростям ( $a$ ) и зависимость усредненного по продольной координате значения плотности пространственного заряда от радиуса ( $b$ ).

формированию сверхплотного сгустка в области ССП. Кроме того, обнаружены метастабильные частицы, которые осциллируют вместе с ВК в течение нескольких периодов, после чего они пролетают ВК или возвращаются в область сжатого состояния.

После установления ССП сплошной пучок заряженных частиц приобретает вид полого цилиндра под действием сил пространственного заряда (рис. 2,  $b$  показано усредненное распределение плотности

пространственного заряда вдоль радиуса). Вид и форма пучка при этом меняется слабо в связи с фокусировкой пучка в сильном внешнем продольном магнитном поле.

Эффективная плазменная частота пучка в области ССП рассчитывалась согласно формуле

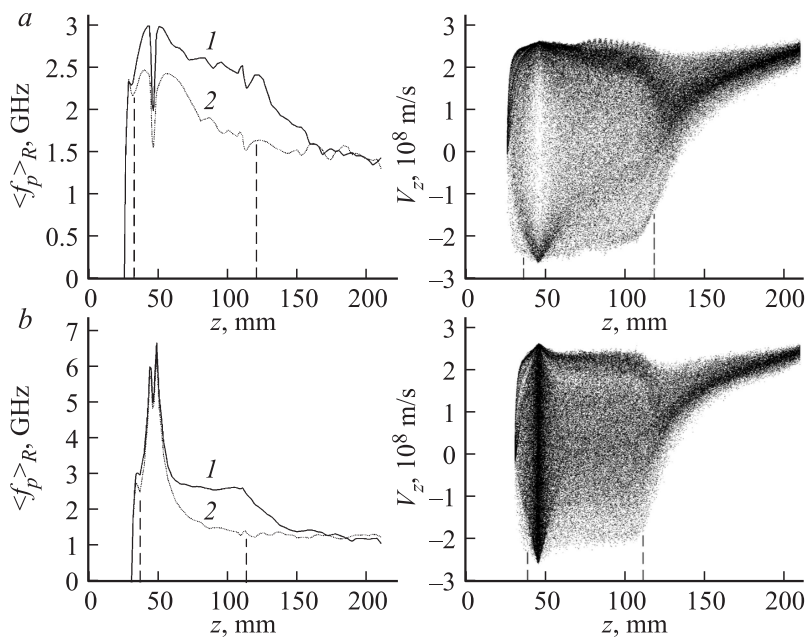
$$\langle f_p \rangle_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\langle \rho \rangle_R e}{m_r \epsilon_0}},$$

где  $e$  — заряд электрона;  $m_r$  — релятивистская масса электрона;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\langle \rho \rangle_R$  — плотность заряда, усредненная по радиусу.

На рис. 3 проиллюстрированы зависимости эффективной плазменной частоты, определяемой локальной плотностью пространственного заряда в системе от продольной координаты для двухсекционного виркатора в режиме формирования ССП и для односекционного пространства дрейфа без ССП, а также характерные фазовые портреты пучка для двухсекционного пространства дрейфа в координатах „продольная координата  $z$ –продольная скорость пучка  $v_z$ “ для различных характерных значений управляющего параметра расстояние „катод-анод“  $L_{CA}$ . После сравнения двухсекционной системы с системой без скачка радиуса, когда ССП в системе не формируется, можно сделать вывод, что при эквивалентном значении управляющего параметра (а следовательно, и таком же значении инжектируемого в пространство взаимодействия тока пучка) в системе с реализацией ССП мы наблюдаем примерно двукратное увеличение плотности пространственного заряда и плазменной частоты в области ССП (ср. кривые 1 и 2 на рис. 3).

При значении управляющего параметра  $L_{CA} = 20 \text{ mm}$  (рис. 3, *a*) на фазовом портрете потока можно видеть разряженное электронное облако, ток пучка в системе еще недостаточно близок к критическому току для формирования ССП и смыкание пролетного и обратного потока происходит не полностью. В области около анодной сетки видна область, где практически отсутствуют замедленные частицы, данный факт также легко обнаружить на зависимости плазменной частоты, на которой в области координат вблизи анодной сетки наблюдается резкое уменьшение величины эффективной плазменной частоты.

С уменьшением значения управляющего параметра  $L_{CA}$  до 10 mm (и соответственно, с увеличением инжектируемого тока) происходит рост эффективной плазменной частоты в области первой секции с



**Рис. 3.** Отношения усредненного по радиусу значения плазменной частоты к продольной координате и фазовые портреты пучка для двухсекционного пространства взаимодействия. Значения управляющих параметров: *a* —  $L_{CA} = 20$  mm, *b* —  $L_{CA} = 15$  mm, *c* —  $L_{CA} = 10$  mm. Обозначения: 1 — двухсекционная система с реализацией ССП, 2 — односекционная система без реализации ССП (радиус трубы в системе без реализации сжатого состояния  $R = 50$  mm), вертикальными пунктирными линиями показана область сжатого состояния.

меньшим радиусом. Одновременно растет отношение между плазменной частотой в системе с реализацией ССП и без него, что хорошо иллюстрируют зависимости, показанные на рис. 3, *b* и *c*). Таким образом, с увеличением тока пучка происходит увеличение плотности электронного облака в области ССП. Это связано с наблюдающимся снижением средних продольных скоростей потока в области сжатого состояния — формированием распределенного виртуального катода. Одновременно, значительный рост плотности накопленного пространственного заряда наблюдается в области вблизи анодной сетки. Данный

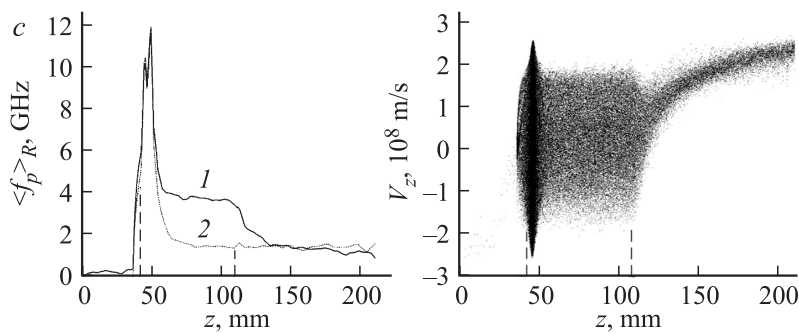


Рис. 3 (продолжение).

факт иллюстрирует пик на зависимости эффективной плазменной частоты на рис. 3, *b* и *c*. Этот эффект не наблюдается в односекционном пространстве дрейфа.

С дальнейшим уменьшением расстояния катод-анод и, как следствие, с увеличением тока пучка продолжает наблюдаться рост отношения между плотностью пространственного заряда в области ССП (которая пропорциональна эффективной плазменной частоте).

Для анализа колебательных характеристик в системе были проанализированы зависимости колебания электрического поля в области сжатого состояния от времени для различных значений управляющего параметра. По данным временным реализациям колебаний электрического поля были построены спектры мощности колебаний. Следует отметить, что типичный спектр выходного излучения в режиме с реализацией ССП характеризуется шумоподобным видом со слабой изрезанностью спектральной характеристики, диапазон генерируемых частот составляет 0.5–12 GHz. Вместе с тем, наблюдается несколько ярко выраженных пиков, соответствующих типичным значениям эффективной плазменной частоты пучка — наиболее яркий пик спектральной мощности наблюдается в области частот 5–6 GHz, что соответствует примерно удвоенной эффективной плазменной частоте в области ССП. Ширина полосы выходного сигнала имеет тенденцию к увеличению с ростом плотности пространственного заряда в области ССП.

Таким образом, в представленной работе проведен анализ характеристик сжатого состояния в двухсекционном пространстве дрейфа виркатора. В результате численного моделирования было показано, что

в системе присутствуют метастабильные частицы и частицы, дрейфующие на очень низких скоростях близких к нулевым. Спектр колебаний электрического поля в области сжатого состояния исследуемой системы характеризуется шумоподобным видом. Из полученных результатов можно сделать вывод, что в исследуемой системе с двухсекционным пространством дрейфа в области сжатого состояния реализуется плотный полый пучок электронов, что способствует повышению эффективной плазменной частоты и мощности генерации в такой системе.

Исследование характеристик сжатого состояния были выполнены при поддержке гранта РФ (№ 14-12-00222). Построение модели системы с сжатым состоянием было поддержано проектом Минобрнауки РФ (проекты № 3.59.2014/К и 931) и РФФИ (№ 14-02-31149).

## Список литературы

- [1] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [2] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002, Т. 47. № 6. С. 575.
- [3] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves, Third edition. CRC Press, Taylor and Francis, 2015.
- [4] Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 043 507.
- [5] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. N 30. P. 3057–3066.
- [6] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225.
- [7] Kurkin S.A., Frolov N.S., Rak A.O., Koronovskii A.A., Kuraev A.A., Hramov A.F. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 153 503.
- [8] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1, N 3. P. 741.
- [9] Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2013. Т. 39, № 11. С. 1033.
- [10] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. № 2, С. 462.
- [11] Einat M., Pilonosof M., Ben-Moshe R., Hirshbein H., Borodin D. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 185 101.
- [12] Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 122 110.
- [13] Balk M.C. // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC-2008). 2008. P. 459.
- [14] Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 23. С. 72.