



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ ПУЧКА

А. Г. Петрик

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В работе проведено численное трехмерное электромагнитное моделирование сжатого состояния релятивистского электронного пучка в двухсекционной системе, состоящей из труб разных диаметров. Исследовано влияние геометрических параметров двухсекционной системы на нелинейную динамику электронного пучка, получены зависимости эффективной плазменной частоты от параметров системы. Из рассчитанных зависимостей можно сделать вывод, что плотность пучка и эффективная плазменная частота могут быть увеличены более чем в 2 раза относительно системы без формирования сжатого состояния.

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

Введение

В радиофизике и электронике больших мощностей представляет интерес изучение образования и динамики виртуального катода в интенсивных электронных потоках плазменных и электровакуумных приборов [1–5]. Виртуальный катод – это нескомпенсированный электрический заряд, который образуется в пучках со сверхкритическим током [6] и приводит к значительному провисанию потенциала в пространстве дрейфа до величин, превышающих ускоряющее напряжение, что приводит к отражению части электронного потока обратно к плоскости инжекции [2–4]. Приборы с виртуальным катодом имеют ряд важных практических применений, например, подобные устройства могут использоваться: в качестве мощных источников электромагнитного излучения [3–8], для генерации широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний [9–11], в мощной коммутационной технике [2, 4], для ускорения ионов [12] и т.д.

Для продвижения подобных устройств в более высокочастотный диапазон требуется исследование вопросов повышения частоты генерации в системах с виртуальным катодом. Типичные значения рабочих частот виркаторов лежат в диапазоне 1...10 ГГц, хотя в последнее время показано, что, используя эффекты генерации высших гармоник [13] или переключения пучковых мод [7], можно повысить рабочие частоты подобных систем до 40...80 ГГц. Фундаментальным ограничением частоты виркаторов является тот факт, что частота колебаний виртуального катода определяется эффективной плазменной частотой пучка. Поэтому повышение частоты генерации виркаторных систем определяется, в основном, возможностью повышения плотности заряда в области виртуального катода, что сложно реализовать на практике. Одним из методов решения задачи является использование более плотных релятивистских интенсивных пучков, однако повышение плотности заряда в пучке ограничено технологическими сложностями, в первую очередь, предельно допустимыми эмиссионными способностями современных катодов [14, 15].

Поэтому представляет интерес исследование альтернативных подходов к повышению плотности пространственного заряда в области виртуального катода за счет формирования более плотных сгустков электронов (см., например, [16]). Одним из возможных подходов в данном направлении является формирование сжатого состояния пучка (ССП), описание которого впервые дано авторами работы [17]. СПП является распределенным в пространстве дрейфа виртуальным катодом, который можно обнаружить по специфическому профилю фазового портрета электронного потока, когда эмитируемые с катода и отраженные от виртуального катода пучки смыкаются вдоль оси скоростей, образуя область сильно нагретого электронного облака, при этом на начальном этапе волна переключения в сжатое состояние распространяется от виртуального катода к эмиттеру, то есть против инжекции пучка [17]. (Альтернативный сценарий развития СПП рассмотрен в работе [18].) Формирование волны переключения ранее было использовано для ускорения ионов. Для СПП характерны большая плотность и малые скорости частиц, а также сильная турбулентность, развивающаяся во встречных потоках. Таким образом, с точки зрения СВЧ-электроники, интерес к исследованию СПП, в первую очередь, связан с тем, что такой распределенный в пространстве виртуальный катод может выступать в роли активной среды для генерации СВЧ-колебаний или усиления внешних сигналов, в том числе и близких по своему спектральному составу к шумоподобным [19, 20].

Целью данной работы стало исследование влияния геометрических параметров системы с двухсекционным пространством дрейфа на плотность электронного потока в сжатом состоянии для выявления возможностей увеличения эффективной плазменной частоты пучка в сжатом состоянии.

Исследуемая модель

В качестве модели для исследования была выбрана система с пространством дрейфа, состоящим из двух сегментов (двух труб с разными диаметрами) и пронизываемым релятивистским электронным потоком. Аналогичная релятивистская виркаторная система с двухсегментным пространством дрейфа пучка была использована в работах [4, 21].

Схема исследуемой системы изображена на рис. 1. В качестве источника электронов выступает трубчатый катод I , размещенный соосно с первой и второй

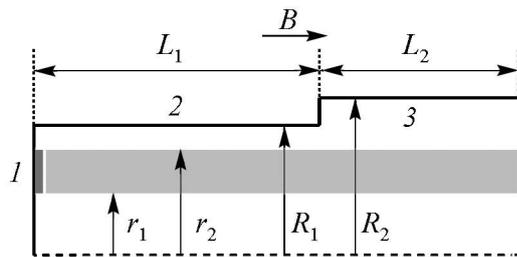


Рис. 1. Схема исследуемой численной модели: 1 – трубчатый катод, 2 – анодная секция, 3 – секция дрейфа

секциями дрейфа. Ток пучка был выбран в данном исследовании равным 7 кА и не менялся. Начальная энергия эмитируемых частиц 500 кэВ. Невозмущенная плазменная частота инжектируемого потока равна 11.5 ГГц. Пучок движется в эквипотенциальном пространстве дрейфа в первой секции, которая на расстоянии L_1 от катода испытывает скачок радиуса, переходя во вторую секцию длиной L_2 , в результате чего на границе между первой и второй секциями дрейфа образуется виртуальный катод за счет превышения критическим током предельного вакуумного значения [6, 22]. Вся система находится во внешнем продольном однородном магнитном поле с индукцией $B = 50$ кГс, которое фокусирует и удерживает электронный пучок, ограничивая движение частиц в поперечном направлении.

В качестве основных геометрических параметров, зависимость от которых исследуется в данной статье, были выбраны следующие: длина первой секции L_1 , радиус первой трубы R_1 и толщина пучка $\Delta r = r_2 - r_1$, где r_2 – внешний и r_1 – внутренний радиусы пучка. Значения остальных геометрических параметров фиксировались: $L_2 = 70$ мм, $r_2 = 8$ мм, $R_2 = 22$ мм.

Все вычисления проводились с использованием лицензионного программного комплекса CST Particle Studio (CST PS) [23]. CST PS является хорошим инструментом для трехмерного моделирования динамики потока заряженных частиц в электромагнитных полях электродинамических систем и все шире используется для современных исследований в электронике большой мощностей [24–26]. При расчетах используется PIC (particle-in-cell) вычислитель, 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). Моделирование электронного потока осуществлялось методом крупных частиц, при этом для каждой частицы решались уравнения движения самосогласованным образом с уравнениями поля. При моделировании источника электронного потока использовалась модель эмиссии постоянного тока.

Результаты

Рассмотрим полученные результаты численного моделирования с использованием модели, описанной в предыдущем разделе.

На рис. 2 показан процесс формирования сжатого состояния в исследуемой системе на примере построенных в последовательные моменты фазовых портретов (по оси ординат – импульс, нормированный на произведение массы электрона и скорости света). Первоначально виртуальный катод формируется вблизи плоскости

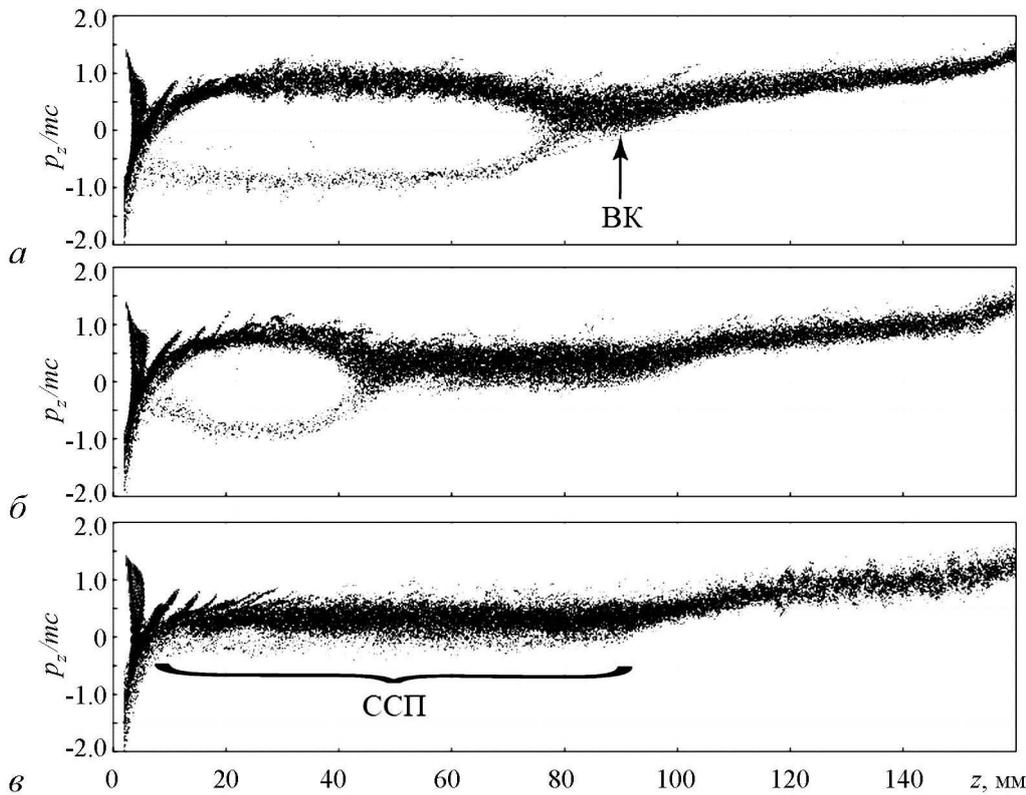


Рис. 2. Мгновенные фазовые портреты пучка, демонстрирующие эволюцию образования сжатого состояния пучка в моменты времени: 2.0 нс (а), 3.1 нс (б) и 4.6 нс (в). Геометрические параметры системы, при которых были сняты фазовые портреты: $R_1 = 16$ мм, $L_1 = 90$ мм, $r_1 = 6$ мм

инъекции, однако проходящий через виртуальный катод ток оказывается достаточно большим, чтобы в области скачка дрейфа ($L = 90$ мм) наблюдалось существенное провисание потенциала. Данный потенциальный барьер с течением времени возрастает, все сильнее тормозя электроны. Как следствие, в системе в области скачка радиуса между секциями дрейфа формируется второй виртуальный катод (отмечен на рис. 2, а стрелкой ВК). В результате на протяжении всей первой трубы дрейфа возникает двухпотоковое состояние. Электронный поток, проходящий через виртуальный катод, формируемый в области инъекции, и поток, отраженный от второго виртуального катода, постепенно смыкаются вдоль оси скоростей, при этом можно видеть, что волна переключения от двухпотокового к сжатому состоянию распространяется от второго виртуального катода к эмиттеру, то есть против направления распространения инжектируемого пучка (см. рис. 2, б).

Рассмотрим влияние длины первой секции дрейфа L_1 на динамику и формирование ССП. На рис. 3 показана зависимость эффективной плазменной частоты f_p от длины первой секции L_1 , а также зависимость накопленного в ССП пространственного заряда q от L_1 при $R_1 = 16$ мм, $r_1 = 6$ мм.

Эффективная плазменная частота в области ССП оценивалась в соответствии с формулой

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\langle \rho \rangle_{T,ve}}{m_{\text{рел}} \varepsilon_0}}, \quad (1)$$

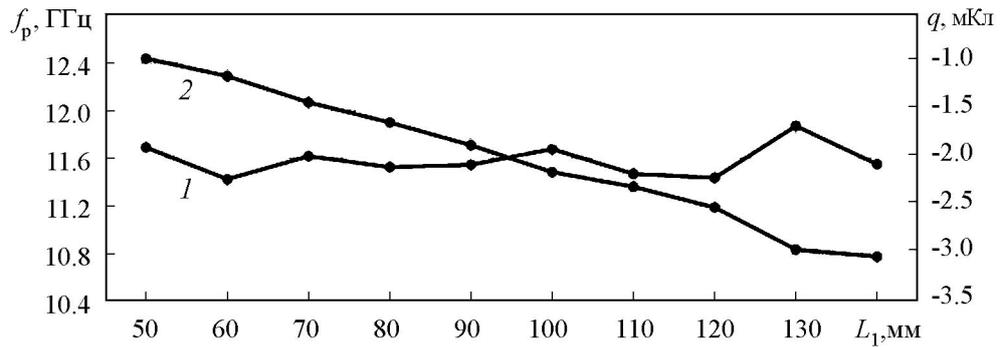


Рис. 3. Зависимость эффективной плазменной частоты f_p (кривая 1) и пространственного заряда q (кривая 2) от длины первой секции дрейфа L_1 . $R_1 = 16$ мм, $r_1 = 6$ мм

где e – заряд электрона; $m_{\text{рел}} = \gamma m_0$ – релятивистская масса электрона с массой покоя m_0 (релятивистскую поправку необходимо использовать в связи с тем, что большое число электронов характеризуются большими значениями лоренцевского фактора – см. рис. 4, на котором показано типичное распределение электронов по величине лоренцевского фактора $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$); ϵ_0 – электрическая постоянная; $\langle \rho \rangle_{T,V}$ – плотность заряда, усредненная по объему пучка в первой секции (в пределах которой образуется ССП)

$$\langle \rho(t_0) \rangle_V = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{L_1} \rho(l, r, \varphi) r dl dr d\varphi \quad (2)$$

и по времени после окончания переходного процесса (интервал $t_2 - t_1$, $t_1 = 20$ нс, $t_2 = 30$ нс)

$$\langle \rho \rangle_{T,V} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \langle \rho(t) \rangle_V dt \quad (3)$$

Из зависимости, соответствующей величине эффективной плазменной частоты (кривая 1 на рис. 3), видно, что при увеличении длины первой секции (то есть протяженности сжатого состояния) отсутствует какая-либо тенденция к росту или падению плазменной частоты, ее значение колеблется с малой амплитудой порядка 0.2 ГГц в окрестности значения 10.2 ГГц, то есть значения, близкого величине плазменной частоты пучка в плоскости инжекции до формирования виртуального катода. Одновременно, накопленный в системе пространственный заряд монотонно растет с увеличением длины первой секции L_1 , которая фактически определяет протяженность формируемого ССП. Важно, что величина накопленного пространствен-

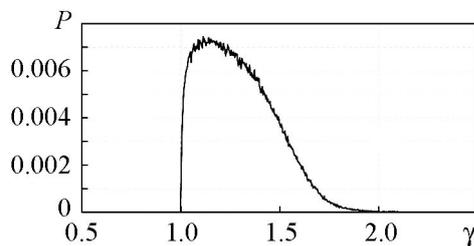


Рис. 4. Распределение лоренцевского фактора электронов релятивистского пучка, инжектируемого в составную трубу дрейфа. Параметры системы: $R_1 = 16$ мм, $R_2 = 22$ мм, $L_1 = 90$ мм, $L_2 = 70$ мм, $r_1 = 6$ мм, $r_2 = 8$ мм

ный заряд монотонно растет с увеличением длины первой секции L_1 , которая фактически определяет протяженность формируемого ССП. Важно, что величина накопленного пространствен-

ного заряда в области ССП зависит от длины секции линейно, что позволяет реализовать значительные величины q . Этот факт может способствовать реализации методов увеличения мощности выходного излучения подобной системы, например, при усилении сигналов за счет увеличения протяженности ССП. Можно сделать вывод, что увеличение длины первой секции дрейфа L_1 , в которой образуется ССП, слабо влияет на значение плотности пространственного заряда и плазменной частоты, но способствует накоплению суммарного пространственного заряда в ней. Для дальнейшего моделирования было выбрано значение длины первой секции $L_1 = 130$ мм, при котором наблюдается небольшой локальный максимум эффективной плазменной частоты в области ССП.

Рассмотрим теперь зависимость эффективной плазменной частоты f_p от радиуса первой секции дрейфа R_1 . С помощью данной зависимости можно проиллюстрировать, как влияет величина скачка радиуса системы на плотность пучка и эффективную плазменную частоту в области ССП. Зависимость f_p от радиуса цилиндрического пространства первой секции R_1 изображена на рис. 5. Значения остальных параметров системы указаны в подписи к рисунку. Из рисунка хорошо видно, что радиус первой секции дрейфа и приближение внешней границы пучка, определяемое величиной r_2 , к поверхности границы пространства дрейфа сильно влияет на эффективную плазменную частоту. С уменьшением радиуса R_1 и, как следствие, с уменьшением расстояния между пучком и поверхностью трубы наблюдается рост значения плазменной частоты до величины порядка 20 ГГц при $R_1 = 8.5$ мм. Физически подобное поведение объясняется тем, что с увеличением радиуса пучка и приближением его к поверхности пространства дрейфа увеличивается влияние эффекта компенсации сил пространственного заряда (эффект редукции) за счет наличия проводящего экрана [27], что позволяет существенно увеличить (более чем в 4 раза) плотность пространственного заряда в области сжатого состояния потока. Рост плотности происходит до определенного значения величины радиуса, пока R_1 не станет меньше 8.5 мм. При данном критическом значении R_1 электронный пучок, несмотря на сильное внешнее фокусирующее магнитное поле, начинает осаждаться на стенках трубы дрейфа первой секции за счет увеличивающихся дефокусирующих сил пространственного заряда, что и приводит к уменьшению величины накопленного пространственного заряда, а следовательно, и эффективной плазменной частоты в ССП.

Стоит также отметить, что, когда радиус пучка R_1 превышает значение 17 мм (показано стрелкой на рис. 5), происходит разрушение сжатого состояния. Это выражается в том, что на фазовом портрете ССП более не представляет сжатую область близких к нулю продольных скоростей, а в системе наблюдается постепенное «размывание» ССП. На рис. 6 представлены соответствующие иллюстрации фазовых портретов

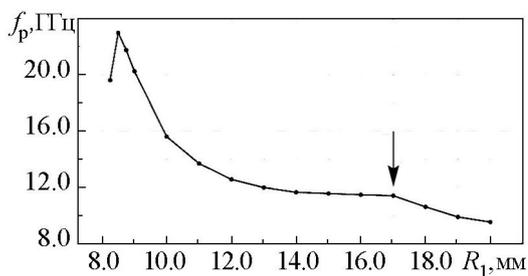


Рис. 5. Зависимость эффективной плазменной частоты f_p от радиуса первой секции дрейфа R_1 при $L_1 = 130$ мм, $r_1 = 6$ мм

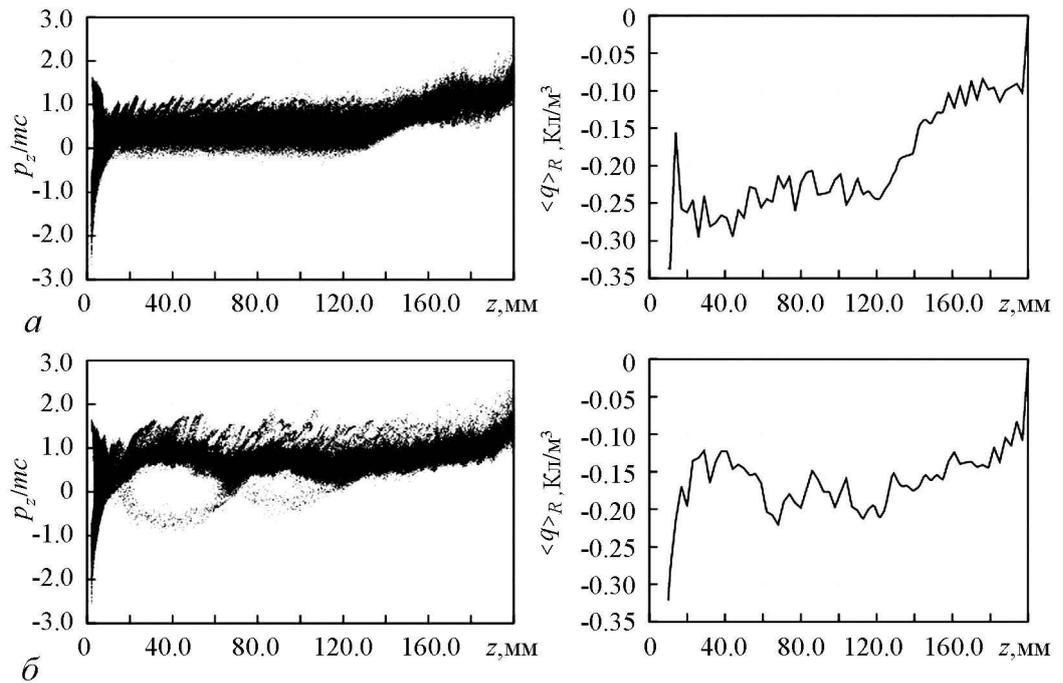


Рис. 6. Характерные фазовые портреты пучка и соответствующие им зависимости усредненного по радиусу значения плотности заряда от продольной координаты. При значении $R_1 = 16$ мм (а) ССП формируется, а при $R_1 = 20$ мм (б) происходит разрушение ССП и количество накопленного заряда в области первой секции уменьшается

для $R_1 = 16$ мм и $R_1 = 20$ мм. Видно, что во втором случае на фазовом портрете не наблюдается хорошо выраженное ССП. В первой трубе дрейфа происходит рост скоростей электронов, а следовательно, существенно снижается плотность накопленного в первом пространстве дрейфа заряда и эффективная плазменная частота. На зависимости $f_p(R_1)$ (см.рис. 5) заметно более резкое уменьшение эффективной плазменной частоты по сравнению со случаем, когда ССП сформировано. Соответствующие зависимости усредненного по радиусу значения плотности заряда от продольной координаты (см.рис.6, б) также демонстрируют уменьшение накопленного заряда в области первой секции дрейфа.

Рассмотрим теперь влияние толщины пучка Δr на величину эффективной плазменной частоты пучка в области ССП. Для определенности внешний радиус

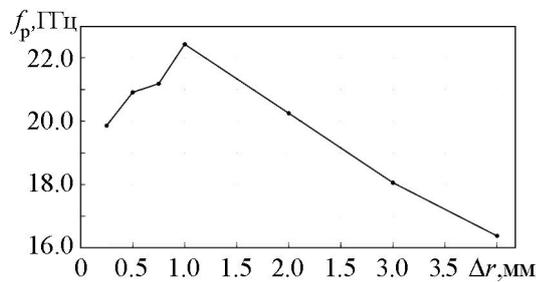


Рис. 7. Зависимость эффективной плазменной частоты f_p от толщины пучка Δr при $R_1 = 9$ мм, $L_1 = 130$ мм

пучка r_2 зафиксируем и будем менять внутренний радиус r_1 пучка для варьирования Δr . Рассчитанная зависимость эффективной плазменной частоты f_p от толщины Δr представлена на рис. 7. Значения остальных параметров расчета: $R_1 = 9$ мм, $L_1 = 130$ мм. Из полученной зависимости можно сделать вывод, что эффективная плазменная частота при больших толщинах пучка уменьшается с ростом Δr линейно. Это спра-

ведливо для относительно больших толщин пучка $\Delta r \geq 1$ мм, тогда как для $\Delta r < 1$ мм эффективная плазменная частота начинает быстро уменьшаться, что связано со значительным увеличением расфокусировки пучка за счет увеличивающихся сил пространственного заряда при уменьшении толщины пучка и, следовательно, увеличении невозмущенной плазменной частоты пучка. Следует также отметить, что при переходе через критическое значение параметра Δr пролетный и отраженный пучки на фазовом портрете перестают смыкаться вдоль оси скоростей, сжатое состояние более не образуется. Можно сделать вывод, что для рассматриваемых параметров системы максимальная плотность заряда, которую возможно достичь в ССП, составляет величину порядка 20 ГГц.

Заключение

Проведено трехмерное электромагнитное моделирование в лицензионной среде CST Particle Studio релятивистского электронного пучка в двухсекционной системе с двумя составными трубами разных диаметров. Показано, что геометрические параметры системы, а именно скачок радиуса между первой и второй секциями дрейфа, радиус и толщина электронного пучка существенно влияют на значение эффективной плазменной частоты пучка в области ССП. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров релятивистских пучково-плазменных генераторов со сверхкритическим током для повышения их рабочей частоты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-02-31149.

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. 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.
10. 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.
11. 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 // Applied Physics Letters. 2010, Vol. 374, № 30. P. 3057.
12. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // УФН. 2002. Т. 172, № 11. С. 1225.
13. Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Effect of the electron beam modulation on the sub-THz generation in the vircator with the field-emission cathode // J. Plasma Physics. 2015. Vol. 81. P. 905810320.
14. Krasik Ya.E., Dunaevsky A., Felsteiner J. Plasma sources for high-current electron beam generation // Physics of Plasmas. 2001. Vol. 8, № 5. P. 2466.
15. Shlapakovski A.S., Kweiler T., Hadas Y., Krasik Ya.E., Polevin S.D., Kurkan I.K. Effects of different cathode materials on submicrosecond double-gap vircator operation // IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. Vol. 37, № 7. P. 1233.
16. Дубинов А.Е., Макаров И.В., Садовой С.А., Сайков С.К., Тараканов В.П. Особенности накопления зарядов в сильноточной электронной ловушке // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 5. С. 81.
17. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. Squeezed state of high-current electron beam // Physics of Plasmas. 1994. Vol. 1, № 3. P. 741.
18. Петрик А.Г. О механизме формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в составной трубе дрейфа // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т.22, №6. С.35.
19. 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. Т. 39, № 11, С. 1033.
20. Дубинов А.Е., Ефимова И.А. Колебания сжатого состояния электронных пучков в виркаторе на встречных потоках // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8, № 11–12. С. 55.
21. Дубинов А.Е. Сценарии установления «сжатого состояния» электронного потока в магнитоизолированном виркаторе // Письма в ЖТФ, 1997, Т. 23, № 22, С. 29.
22. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Устойчивость релятивистских электронных по-

- токов в плазме и проблема критических токов // Успехи физических наук. 1971. Т. 103, № 4. С. 609.
23. <https://www.cst.com/products/cstps>.
24. *Champeaux S., Gouard P., Cousin R., Larour J.* 3-D PIC numerical investigations of a novel concept of multistage axial vircator for enhanced microwave generation // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 43, № 11. P. 3841.
25. *Kurkin S.A., Frolov N.S., Rak A.O., Koronovskii A.A., Kurayev A.A., Hramov A.E.* High-power microwave amplifier based on overcritical relativistic electron beam without external magnetic field // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 106. P. 153503.
26. *Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Rak A.O.* Optimization of the double-gap vircator with electromagnetic feedback in CST particle studio // *IEEE International on Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. 2014, P. 389.
27. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. Ч. I и II. М.: Высшая школа, 1972.

Поступила в редакцию 22.11.2015
После доработки 10.12.2015

**NUMERICAL SIMULATION
OF ELECTRON-BEAM «SQUEEZED» STATE
IN PURPOSE TO STUDY THE POSSIBILITY
OF EFFECTIVE PLASMA FREQUENCY INCREASE**

A. G. Petrik

Saratov State Technical University

Three-dimensional electromagnetic numerical simulation is carried out of «squeezed» state of the electron beam in two-section vircator system with drift tubes of different diameters. We have studied the influence of two-section system geometric parameters on the nonlinear dynamics of electron beam. We have obtained an effective plasma frequency depending on the system parameters. From the calculated dependencies it can be concluded that the density of the beam and the effective plasma frequency can be increased more than twice relative to the system without the formation of the «squeezed» state.

Keyword: Numerical simulation, «squeezed» state, virtual cathode, effective plasma frequency, relativistic electron beam, nonlinear dynamics.

References

1. *Trubetskoy D.I., Hramov A.E.* Lectures on Microwave Electronics for Physicists. Vol. 1. Moskva: Fizmatlit, 2003. (In Russian).
2. *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
3. *Dubinov A.E., Selemir V.D.* // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2002. Vol. 47, № 6. P. 575.

4. *Dubinov A.E., Efimova I.A., Kornilova I.Yu., Saikov S.K., Selemir V.D., Tarakanov V.P.* // Physics of Particles and Nuclei. 2004. Vol. 35, № 2. P. 251.
5. *Didenko A.N., Krasik Ya.E., Pereligin S.F., Fomenko G.P.* // Sov. J. Tech. Phys. Lett. 1979. Vol. 5. P. 128.
6. *Trubetskov D.I., Hramov A.E.* Lectures on microwave electronics for physicists. Vol. 2. Moskva: Fizmatlit, 2004. (In Russian).
7. *Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21, № 9. P. 093105.
8. *Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A.* // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103. P. 043507.
9. *Kalinin Yu.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Egorov E.N., Filatov R.A.* // Plasma Physics Reports. 2005. Vol. 31. P. 938.
10. *Kalinin Yu.A., Hramov A.E.* // Technical Physics. 2006. Vol. 51. P.558.
11. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A.* // Applied Physics Letters. 2010, Vol. 374, № 30. P. 3057.
12. *Dubinov A.E., Kornilova I.Yu., Selemir V.D.* // Physics-Uspekhi. 2002. Vol. 45, № 11. P.1109.
13. *Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* // J. Plasma Physics. 2015. Vol. 81. P. 905810320.
14. *Krasik Ya.E., Dunaevsky A., Felsteiner J.* // Physics of Plasmas. 2001. Vol. 8, № 5. P. 2466.
15. *Shlapakovski A.S., Kweller T., Hadas Y., Krasik Ya.E., Polevin S.D., Kurkan I.K.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. Vol. 37, № 7. P. 1233.
16. *Dubinov A.E., Makarov I.V., Sadovoy S.A., Saikov S.K., Tarakanov V.P.* // Technical Physics Letters. 2011, Vol. 37, Issue 3. P.230–232.
17. *Ignatov A.M., Tarakanov V.P.* // Physics of Plasmas. 1994. Vol. 1, № 3. P. 741.
18. *Petrik A.G.* // Izvestiya VUZ. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika. 2014. Vol.22, №6. S.35. (In Russian).
19. *Egorov E.N., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Hramov A.E.* // Plasma Physics Reports. 2013. Vol. 39, № 11. P. 925–935.
20. *Dubinov A.E., Efimova I.A.* // Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2003, Vol. 8, № 11–12. P. 55. (In Russian).
21. *Dubinov A.E.* // Tech. Phys. Lett. 1997. Vol.23. P. 870.
22. *Bogdankevich L.S., Ruhadze A.A.* // Sov. Physics Uspekhi. 1971, Vol. 14. P. 163.
23. <https://www.cst.com/products/cstps>.
24. *Champeaux S., Gouard P., Cousin R., Larour J.* 3-D PIC numerical investigations of a novel concept of multistage axial vircator for enhanced microwave generation // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43, № 11. P. 3841.
25. *Kurkin S.A., Frolov N.S., Rak A.O., Koronovskii A.A., Kurayev A.A., Hramov A.E.* // Applied Physics Letters. 2015. Vol. 106. P. 153503.
26. *Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Rak A.O.* // IEEE International on Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2014, P. 389.

27. *Lebedev I.V.* Microwave Devices. Vol. 1–2. Moskva: Vyschaya shkola, 1972. (In Russian).



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 в различных системах.

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