ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2014, том 78, № 2, с. 231–234

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ В НЕРЕЛЯТИВИСТСКОМ ВИНТОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ

© 2014 г. Е. Н. Егоров[1], А. А. Короновский[1], А. А. Кураев[3], С. В. Колосов[3], А. О. Рак[3], А. Е. Храмов[1, 2]

E-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com

Приведены результаты численного исследования формирования и нелинейной динамики сжатого состояния в нерелятивистском винтовом электронном потоке. Обсуждается влияние управляющих параметров системы на динамику потока в сжатом состоянии; показано, что возникновение сжатого состояния в винтовом электронном потоке в системе с торможением сопровождается низкочастотной продольной динамикой заряда.

DOI: 10.7868/S0367676514020136

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию сжатого состояния пучка (ССП) обусловлен как фундаментальной важностью исследований сложного нелинейного поведения распределенных пучково-плазменных систем, так и прикладным значением, связанным с разработкой генераторов на виртуальном катоде (виркаторов) и их различных модификаций. Впервые понятие *сжатое состояние пучка* для распределенного в пространстве виртуального катода (ВК) было введено в работе [1], где было обнаружено формирование ССП в магнитоизолированном виркаторе. Известно, что ССП характеризуется высокой плотностью и малой скоростью электронов потока в некоторой области пространства взаимодействия [1–5] и наблюдается обычно в релятивистских системах с ВК. В последнем случае для реализации режима ССП используют составное пространство дрейфа из труб разного радиуса, помещенные в сильное продольное магнитное поле. В первой трубе дрейфа (с меньшим радиусом) ток пучка ниже критического тока возникновения ВК [6], а в другой (с большим радиусом) – выше. Нестационарный ВК формируется на входе во вторую трубу дрейфа, приводя к формированию в отрезке пространства дрейфа с меньшим радиусом ССП [2, 3].

Следует отметить, что формирования ВК можно достичь в низковольтных системах с токами пучка, далекими от предельного вакуумного тока, с помощью введения дополнительного торможения пучка. На основе этого принципа была предложена и экспериментально реализована модификация виркатора – низковольтный виркатор (НВ), в котором нестационарный ВК формируется в интенсивном (с высоким первеансом) электронном потоке за счет дополнительного торможения [7, 8]. Можно ожидать, что в низковольтной системе с торможением и большим внешним магнитным полем также возможно установление ССП.

Цель данной работы – исследование возможности возникновения режима ССП в нерелятивистском винтовом электронном потоке с дополнительным торможением пучка, а также анализ нелинейной динамики пучка в режиме формирования ССП.

ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Исследование формирования сжатого состояния пучка проводили на примере НВ с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [9]. Схематическое изображение НВ с МИП приведено на рис. 1*а*. Рассматривалась аксиально-симметричная модель исследуемой системы. Заштрихованная область на катоде *1* соответствует эмитирующему пояску МИП *3*, на котором формируется электронный поток *4*. Пространство дрейфа системы, как показано на рис. 1*а*, делится на две секции. Первая часть трубы дрейфа (электрод *2*) имеет потенциал $V_2 = V_a$ и выполняет, кроме того, роль ускоряющего электрода. На вторую часть трубы дрейфа (электрод *5*) подается тормозящий потенциал $V_5 = V_r < V_2$. Этот электрод выполняет роль тормозящего электрода.

Для формирования винтового электронного потока в МИП используется внешнее магнитное

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского.

[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

[3] Белорусский университет информатики и радиоэлектроники, Минск.

ПРОВЕРЕНО КОРРЕКТОРОМ.
Материал отправлен на согласование

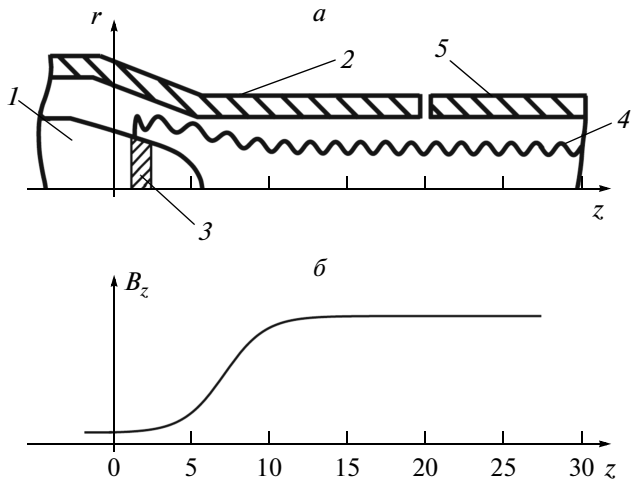

Рис. 1. *а* – схема магнетронно-инжекторной пушки (верхняя полуплоскость плоскости сечения (r, z)): *1* – катод с потенциалом $V_1 = 0$, *2* – ускоряющий электрод с потенциалом $V_2 = V_a$, *3* – эмитирующий поясок, *4* – электронный поток, *5* – тормозящий электрод $V_5 = V_r < V_2$; *б* – распределение продольной составляющей магнитного поля B_z в пространстве дрейфа.

поле (см. рис. 1*б*). Явный вид зависимости $B(z)$ и $B(r)$ задавали аналитически (см. подробности [10]), исходя из условия параксиальности $B_z(r, z) = B_z$ и условия $\mathrm{div}B = 0$ таким образом, что в пространстве дрейфа сразу после катода МИП формируется магнитное поле в конфигурации магнитной ловушки (см. рис. 1*б*).

Математическая модель исследуемой системы представляет собой самосогласованную систему уравнений движения электронного потока, моделируемого методом частиц, и уравнения Пуассона для нахождения поля пространственного заряда в квазистатическом приближении (подробно математическая и численные модели описаны в [11]).

Исследуемая система имеет три основных управляющих параметра: α – безразмерный ток пучка, $\Delta\varphi$ – тормозящая разность потенциалов, определяемая потенциалами электродов *5* и *2*, и величина магнитного поля B_0 в области трубы дрейфа.

Параметры пушки для численного моделирования выбирали, согласно работе [12], по экспериментальному исследованию сложной динамики пучка, формируемого МИП. В численном эксперименте плотность тока пучка составляла величину 4.7 А/см, при ускоряющем напряжении в 2000 В и ведущем магнитном поле $B_0 = 300$ Гс (в области катода) и $B_0 = 800$ Гс в пространстве дрейфа. Далее в статье и на рисунках все величины указаны в безразмерных единицах.

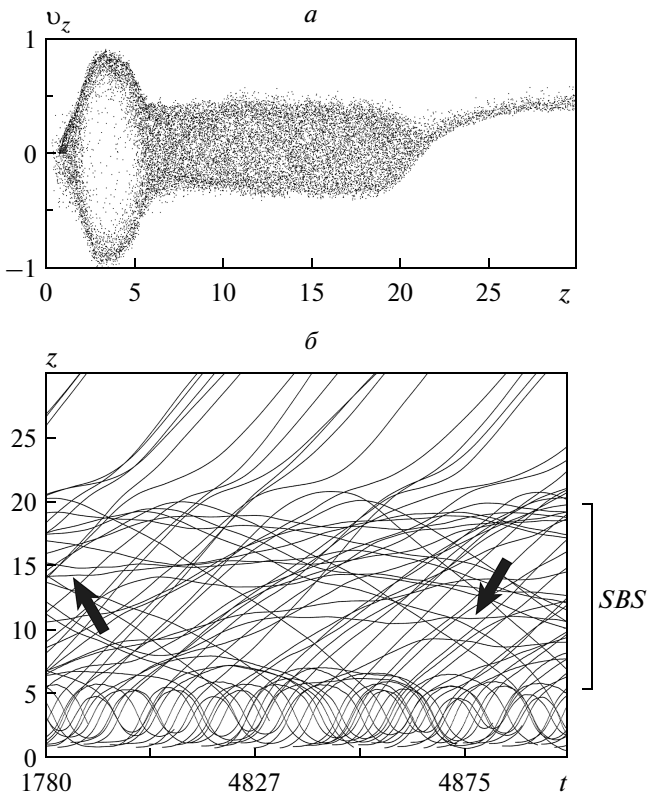

Рис. 2. *а* – фазовый портрет для пучка в сжатом состоянии; *б* – траектории заряженных частиц в пучке в сжатом состоянии. Скобкой *SBS* обозначена область сжатого состояния пучка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим подробнее результаты численного моделирования процессов образования в винтовом пучке ССП.

В области отражающего электрода *5* при превышении тормозящей разности потенциалов некоторого критического значения $\Delta\varphi_c$ в трубе дрейфа образуется ВК. Вследствие отражения частиц от ВК, а также ограничивающего поперечные движения частиц магнитного поля между ВК и катодом пушки устанавливается двухпотоковое состояние. В результате накопления пространственного заряда в этой области устанавливается сжатое состояние.

На рис. 2*а* приведен фазовый портрет электронного пучка в безразмерных координатах (z, υ_z) для пучка в сжатом состоянии. Как отмечено выше, ССП представляет собой распределенный ВК, который характеризуется малой скоростью движения частиц пучка (значительно меньше средней скорости потока в отсутствие ВК) и локализацией в ограниченной области пространства. На фазовом портрете (рис. 2*а*) видно, что продольная скорость самых быстрых электронов в пучке в области такого протяженного ВК не превышает безразмерной величины $\upsilon_z \approx 0.5$, что

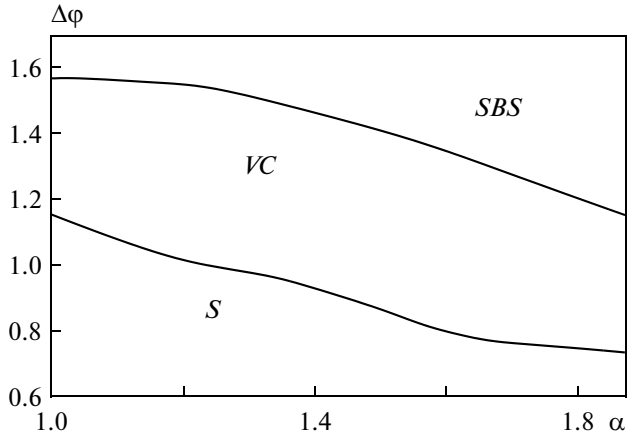

Рис. 3. Карта режимов на плоскости управляющих параметров (α, Δ). Область, обозначенная *S*, соответствует области значений параметров, при которых не возникает ВК; *VC* – область возникновения нестационарного ВК; *SBS* – область значений параметров, при которых в винтовом пучке формируется сжатое состояние.

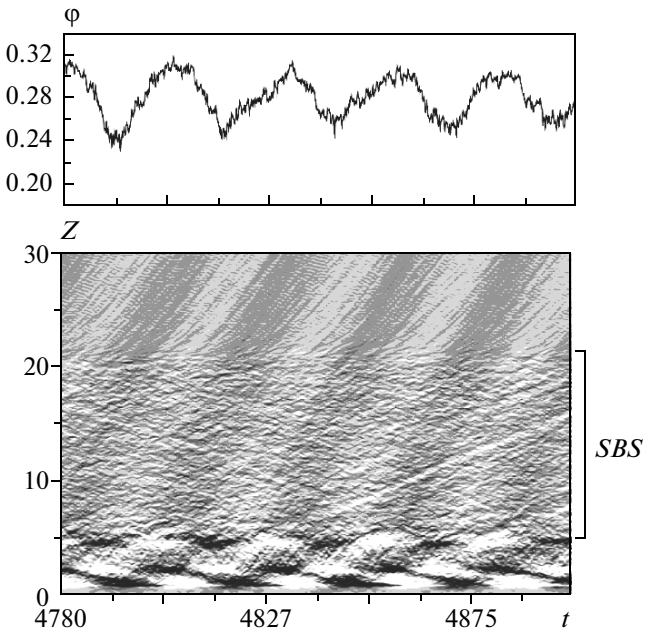

Рис. 4. *а* – зависимость потенциала точки пространства дрейфа от времени (в нормированных единицах); *б* – зависимость плотности пространственного заряда пучка (показана оттенками серого) в пространстве и времени для пучка в сжатом состоянии.

вдвое меньше скорости, которую электроны приобретают в ускоряющем промежутке между катодом и анодом пушки ($\upsilon_z \approx 1$). Кроме того, на рис. 2*б* приведены траектории частиц пучка, находящегося в сжатом состоянии. Видно, что в области ССП (обозначена скобкой SBS на рис. 2*б*) присутствуют частицы, движущиеся в этой области с малой продольной скоростью (две из них обозначены стрелками).

Также на рис. 2*а* видно, что в области катода ССП не наблюдается, продольные скорости υ_z электронов пучка здесь примерно соответствуют скорости, которую электроны приобретают в ускоряющем поле анода. Это связано с тем, что вблизи катода электроны пучка попадают в область с меньшим значением магнитного поля, что препятствует установлению сжатого состояния в этой области электронной пушки.

Была построена карта режимов на плоскости управляющих параметров (α, Δφ) (рис. 3). Видно, что при увеличении безразмерного тока пучка α или тормозящей разности потенциалов Δφ система с винтовым пучком последовательно проходит три состояния: 1) режим, при котором в системе не возникает ВК, при котором наблюдается полное прохождение пучка через пространство дрейфа (обозначен буквой *S* на рис. 3); 2) режим образования нестационарного ВК (обозначен буквами *VC*); и 3) режим ССП (обозначен как *SBS*). Увеличение параметров α и Δφ приводит к накоплению пространственного заряда в области дрейфа НВ и соответственно способствует формированию ССП, что хорошо видно на рис. 3.

В ходе исследований было обнаружено, что для системы с дополнительным торможением пучка характерно возникновение продольных колебаний пространственного заряда в сжатом состоянии потока. На рис. 4*а* приведена зависимость потенциала точки пространства дрейфа от времени (в нормированных единицах), который модулируется низкочастотными колебаниями. На рис. 4*б* приведено распределение плотности пространственного заряда (показано цветом) на плоскости (*t*, *z*). Видно, что на рисунке четко прослеживаются колебания пространственного заряда в области около катода как чередование по времени черных и белых пятен в области $z \approx 5$ (в нормированных единицах), что является нижней границей ССП – распределенного ВК. В области ССП, отмеченного на рисунке скобкой *SBS*, хорошо видны колебания пространственного заряда с малой амплитудой, определяемые неупорядоченным движением отдельных заряженных частиц в сложной конфигурации скрещенных электрических и магнитных полей.

Также вдоль пространства взаимодействия отчетливо видны разряжения и сжатия в электронном облаке (светлые и темные полосы на рис. 4*б*), начинающиеся от области с координатой $z \approx 5$ до выхода из пространства дрейфа $z = 30$. Частота следования этих возмущений определяется частотой, с которой пространственный заряд накапливается и рассасывается в области $z \approx 5$, т.е. частотой колебаний ВК. Этот процесс сопровождается колебаниями потенциала пространства

дрейфа, которое показано на рис. 4*а* (потенциал снимался в точке с координатой $z = 15$ пространства дрейфа). Возникновение продольных колебаний в системе определяется возникновением возмущений плотности пучка в режиме ССП, которые возбуждаются колебаниями в области магнитной ловушки и двигаются вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда. Последнее подтверждается хорошо заметным на рис. 4*б* изменением скорости возмущения вдоль пространства дрейфа пучка, плотность которого меняется вдоль пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты численного моделирования установления сжатого состояния в интенсивном винтовом электронном потоке в низковольтном виркаторе с дополнительным торможением электронного пучка.

Показано, что в такой системе может образоваться ССП в результате накопления пространственного заряда в области дрейфа НВ. Были определены области значений управляющих параметров, при которых в системе реализуется ССП. Кроме того, было обнаружено, что для винтового электронного потока в НВ характерно возникновение продольной динамики пространственного заряда в сжатом состоянии потока.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашения № 14.B37.21.0764, 14.B37.21.0903, 14.B37.21.1171), грантами РФФИ (№ 12-02-00345 и 12-02-33071), а также Президентской программы поддержки молодых российских ученых (МК-818.2013.2 и МД-345.2013.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ignatov A.M., Tarakanov V.P.* // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 3. P. 741.
2. *Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П.* // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
3. *Дубинов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 22. С. 29.
4. *Барабанов В.Н., Дубинов А.Е., Лойко М.В. и др.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 2. С. 189.
5. *Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д.* // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225.
6. *Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С.* Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
7. *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
8. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX. № 10. С. 843.
9. *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2007.
10. *Егоров Е.Н., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19. №4. С. 40.
11. *Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др.* // Мат. моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3.
12. *Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г. и др.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 7. С. 83.