

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ ПУЧКА
В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ТОРМОЖЕ-
НИЕМ

Е.Н. Егоров¹, А.Е. Храмов^{1,2}

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский государственный технический университет имени Ю.А.Гагарина
evgeniy.n.egorov@gmail.com

Важной задачей современной электроники СВЧ является исследование образования и нелинейной динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках (см., например, работы [1-3]). Интерес к этой задаче обусловлен как фундаментальной важностью исследований сложного поведения распределенных пучково-плазменных систем, так и прикладным значением, связанным с разработкой виркаторов и их различных модификаций.

Одним из перспективных и активно развиваемых направлений здесь является изучение *сжатых состояний пучков* (ССП) [4,5]. Сжатое состояние пучка характеризуется высокой плотностью и малой скоростью электронов потока в некоторой области пространства взаимодействия. В мощных приборах СВЧ электроники, содержащих релятивистские электронные пучки, для реализации СПП обычно используют составное пространство дрейфа из труб разного радиуса [6], так что во второй трубе большего радиуса образуется нестационарный ВК. Вся система помещается в сильное продольное магнитное поле, в результате в первой трубе большего радиуса между ВК и катодом пушки скапливается пространственный заряд и устанавливается СПП.

Ранее была предложена модификация виркатора, в которой нестационарный ВК формируется в интенсивном (с высоким первеансом) электронном потоке за счет дополнительного торможения электронов – низковольтный виркатор (НВ) [7,8]. Ввиду сходства процессов образования и колебаний ВК в системе без торможения и с торможением можно ожидать, что в последней также возможно установление СПП. Целью данной работы является исследование особенностей процесса возникновения режима СПП в винтовом нерелятивистском электронном потоке с дополнительным торможением пучка.

Исследование формирования сжатого состояния пучка проводилось на примере низковольтного виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [9]. В МИП формируется внешнее продольное магнитное поле в конфигурации *магнитной ловушки*, а электронный пучок, формируемый МИП, обладает высоким первеансом, что необходимо для возникновения ВК в НВ. Схематическое изображение НВ с МИП (верхняя полуплоскость сечения (r,z)) приведено на рис. 1.

Математическая модель исследуемой системы представляет собой 2.5-мерную самосогласованную систему уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона (подробно модель описана в работе [10]). Система имеет три безразмерных управляющих параметра: α – безразмерный ток пучка, $\Delta\varphi$ – тормозящая разность потенциалов, определяемая разностью потенциалов на электродах 5 и 2, и величина магнитного поля B_0 в области трубы дрейфа. В численном моделировании указанной системы использовался метод крупных частиц (интегрирование уравнения движения) и пятиточечная разностная схема (интегрирование уравнения Пуассона).

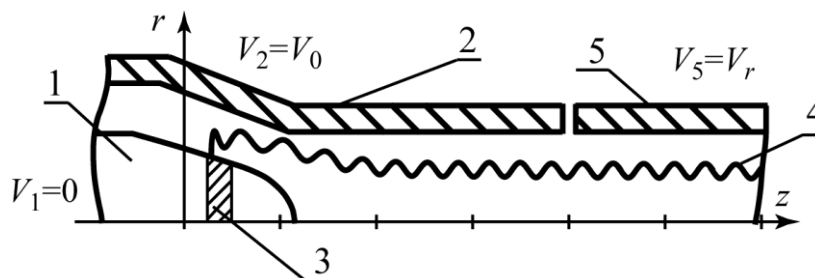


Рис. 1. Схема магнетронно-инжекторной пушки: 1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – эмитирующий пояс, 4 – электронный поток, 5 – тормозящий электрод. Предполагается, что катод заземлен $V_1=0$, ускоряющее напряжение подается на электрод 2: $V_2=V_0$, на тормозящий электрод подается напряжение $V_5=V_r < V_2$.

Итак, в области отражающего электрода 5 при превышении тормозящей разности потенциалов некоторого критического значения $\Delta\varphi_c$ в трубе дрейфа пушки образуется ВК. Вследствие отражения частиц от ВК, между ВК и катодом пушки скапливается пространственный заряд и образуется ССП. На рис. 2 приведён фазовый портрет электронного пучка в безразмерных координатах (z, v_z) для пучка в сжатом состоянии.

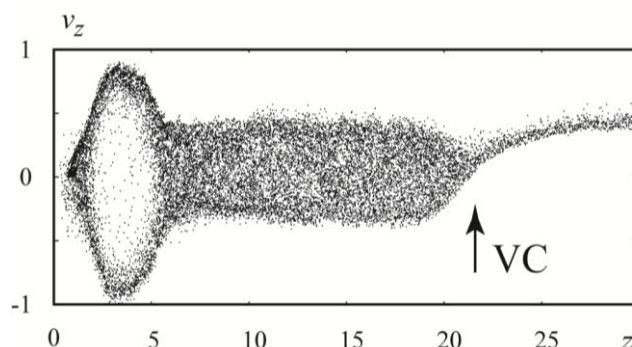


Рис. 2. Фазовый портрет для пучка в сжатом состоянии. Стрелкой VC обозначено местоположение ВК.

В ходе работы была исследована карта режимов на плоскости управляющих параметров $(\alpha, \Delta\varphi)$. Было показано, что при увеличении безразмерного тока пучка α или тормозящей разности потенциалов $\Delta\varphi$ 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; 2) режим образования нестационарного ВК; и 3) режим ССП.

В ходе дальнейших исследований было обнаружено, что для виркатора с дополнительным торможением пучка характерно возникновение продольных колебаний пространственного заряда в сжатом состоянии потока. На рис. 3 приведено распределение плотности пространственного заряда (показано цветом) на плоскости (t, z) . Видно, что на рисунке чётко прослеживаются колебания пространственного заряда в области около катода, как чередование по времени чёрных и белых пятен в области $z \approx 5$ (в нормированных единицах), что является нижней границей ССП – распределённого ВК. Плотность заряда, скапливающегося около катода, значительно выше плотности в области ССП, поэтому колебания заряда около катода значительно более ярко выражены, чем в остальном пространстве. В области ССП, отмеченной на рисунке скобкой *SBS*, хорошо видны колебания пространственного заряда с малой амплитудой, определяемые неупорядоченным движением (дрейфом) отдельных заряженных частиц.

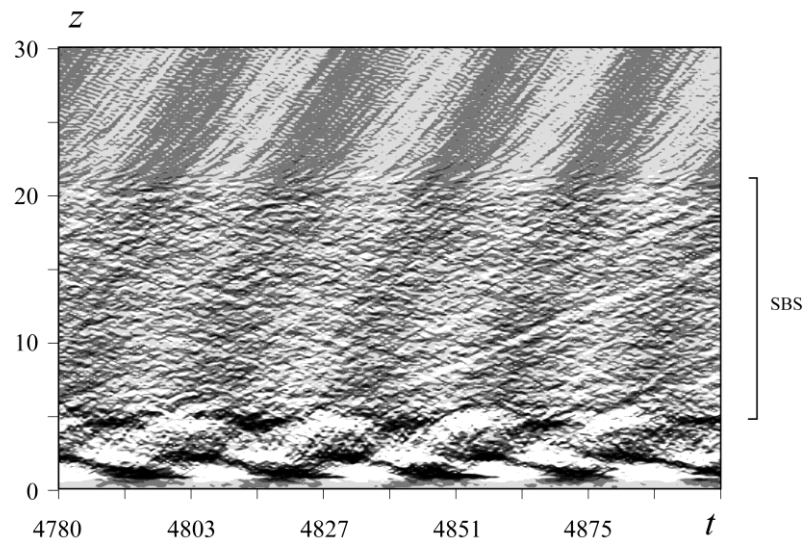


Рис. 3. Зависимость плотности пространственного заряда пучка (показана оттенками серого) в пространстве и времени для пучка в сжатом состоянии.

Также вдоль пространства взаимодействия отчётливо видны чередующиеся во времени светлые и тёмные полосы, 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 $z \approx 5$, то есть частотой колебаний ВК.

Как показал анализ траекторий заряженных частиц для ССП, в данном режиме продольных колебаний заряда, в пучке не возникает отчётливых пространственных сгустков электронов. 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 изменением скорости возмущения вдоль пространства дрейфа пучка, заметное на рис. 3.

Таким образом, в работе проведено исследование возникновения и динамики ССП в нерелятивистской системе с дополнительным торможением.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашения №№ 14.В37.21.0764, 14.В37.21.1171), грантами РФФИ (12-02-00345 и 12-02-33071), а также Президентской программы поддержки молодых российских учёных (МК-818.2013.2 и МД-345.2013.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
3. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6, С. 575
4. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 3. PP. 741-744.
5. Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ, 1997. Т. 23, № 22, С. 29-33.
6. Дубинов А.Е., Макаров И.В, Садовой С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 5. СС. 81-86.
7. Калинин Ю.А., Короновский, А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. СС. 1009-1025.
8. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX. № 10. СС. 843-852.
9. Tsimring S.E. Electron beams and microwave vacuum electronics. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
10. Куркин С.А., Короновский А.А., Егоров Е.Н. и др. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. № 6. СС. 106-137.