

УДК 537.533.9

МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ТОКОМ

© 2015 г. А. А. Бадарин^{1,2}, С. А. Куркин^{1,2}, А. Е. Храмов^{1,2}

E-mail: badarin.a.a@mail.ru

В численном исследовании обнаружен эффект мультистабильности динамики релятивистского электронного потока, а именно сосуществование трех характерных режимов динамики. Данные режимы характеризуются образованием виртуального катода с двумя, четырьмя или пятью минимумами потенциала в азимутальном направлении, вращающимися вокруг оси пространства дрейфа.

DOI: 10.7868/S0367676515120054

Известно, что интенсивные релятивистские электронные потоки (РЭП) часто демонстрируют сложные режимы динамики [1]. В частности, для них характерно развитие различных неустойчивостей, например пирсовской, бурсиановской, тококонвективной, диокотронной, слиппинг-неустойчивости и др. С одной стороны, развитие данных неустойчивостей может играть положительную роль. Например, пирсовская и бурсиановская неустойчивости приводят к образованию нестационарного виртуального катода (ВК), на использовании колебаний которого основан целый класс мощных СВЧ-приборов – генераторы (усилители) на виртуальном катоде или виркаторы [2–5]. С другой стороны, данные неустойчивости могут оказывать и негативное влияние на функционирование мощных СВЧ-устройств и накладывают определенные ограничения на режимы их работы. Так, например, развитие тех же пирсовской и бурсиановской неустойчивостей ограничивает максимальный ток электронного потока, который может быть транспортирован без отражений через эквипотенциальное вакуумное дрейфовое пространство. Диокотронная и слиппинг-неустойчивость существенно влияют на форму интенсивного РЭП при его распространении в системе, приводя к развитию в нем различных азимутальных и радиальных неоднородностей, в частности вихревых и спиральных структур [6, 7]. Последнее может приводить к выходу прибора, использующего интенсивный РЭП, из рабочего режима, и может быть использовано для улучшения характеристик его генера-

ции. Важен вопрос о взаимодействии и сосуществовании различных неустойчивостей интенсивного электронного потока, так как при определенных параметрах системы выполняются условия для одновременного развития нескольких неустойчивостей [1]. Таким образом, исследование нелинейной динамики РЭП и возникающих в них неустойчивостей, а также их сосуществования представляет собой важную задачу высокомошной вакуумной и плазменной электроники как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

В качестве исследуемой системы была рассмотрена модель релятивистского виркатора, ранее изученная в работах [6, 7]. Она представляет собой цилиндрическое пространство дрейфа длиной $L = 45$ мм и радиусом $r = 10$ мм, с одного торца которого располагается кольцевой источник заряженных частиц (кольцевой катод) с внутренним радиусом $r_{\text{внутр}} = 3.5$ мм и внешним радиусом $r_{\text{внеш}} = 5$ мм, инжектирующий трубчатый монорельсовый РЭП, а с другого – коаксиальный вывод мощности. Импульс тока имеет форму гладкой ступенчатой функции, характеризующейся временем нарастания τ до постоянного значения $I_0 = 40$ кА. К системе прикладывается внешнее продольное однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией $B_0 = 1.1$ Тл. Было проведено численное моделирование с помощью лицензионного пакета трехмерного электромагнитного моделирования CST Particle Studio.

В ходе исследований при изменении времени нарастания τ было обнаружено, что для динамики РЭП характерно сосуществование трех характерных режимов, каждый из которых характеризуется формированием виртуального катода со сложной структурой в азимутальном направлении. Первый режим отличается образованием двух электронных сгустков (двух минимумов потенциала) в азимутальном направлении пучка, вращающихся вокруг оси пространства дрейфа и формирующих

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 Гагарина Ю.А.”.

двухзаходную вихревую структуру в пролетном промежутке. Такая динамика РЭП соответствует образованию в системе ВК со сложной структурой, характеризующейся наличием областей отражения электронов в азимутальном направлении. Будем называть данный тип поведения режимом-II по числу электронных сгустков и областей отражения виртуального катода. Второй и третий сосуществующие режимы характеризуются образованием четырех и пяти электронных сгустков (режим-IV и режим-V) и, как следствие, формированием четырехзаходного и пятизаходного вихрей. На рис. 1 показаны распределения плотности пространственного заряда в области формирования ВК, усредненные по радиусу, от азимутальной координаты при различных начальных условиях (разных τ), для характерных режимов динамики РЭП (максимумам плотности (по модулю) соответствуют сгустки электронов, формирующиеся в областях минимумов потенциала (областях отражения ВК) в азимутальном направлении). Данный рисунок хорошо иллюстрирует качественное различие между режимом-II, режимом-IV и режимом-V: наличие двух, четырех или пяти минимумов потенциала и сгустков электронов в азимутальном направлении, соответствующих зонам отражения ВК.

При инжекции в пространство дрейфа РЭП с током $I_0 > I_{cr}$ (I_{cr} – предельный вакуумный ток) в системе развивается бурсиановская неустойчивость и формируется ВК. Одновременно с этим РЭП обладает сильным собственным магнитным полем, что приводит к развитию диокотронной неустойчивости. Результатом взаимодействия данных неустойчивостей является формирование ВК со сложной конфигурацией, характеризующейся образованием нескольких электронных сгустков (вихрей) в азимутальном направлении, вращающихся вокруг оси пространства дрейфа. Это, в свою очередь, приводит к появлению вихревых структур далее в пролетном промежутке. Конфигурация образующихся структур (в том числе количество электронных сгустков в азимутальном направлении) обусловлена реализацией той или иной азимутальной моды в конкурентной борьбе между ними в РЭП. Действительно, в работе [8], посвященной изучению диокотронной неустойчивости, показано, что в зависимости от начальных условий в системе могут реализовываться различные азимутальные моды, что, в свою очередь, приводит к формированию в системе различного количества вихревых структур в азимутальном направлении. В рассматриваемой системе заданием различных начальных условий (разных τ) удается получить режим-II, режим-IV и режим-V. Заметим, что режим-IV для заданных значений инжектируемого тока $I_0 = 40$ кА и внешнего магнитного поля $B_0 = 1.1$ Тл реализуется значительно чаще по сравнению с “режимом-II” и

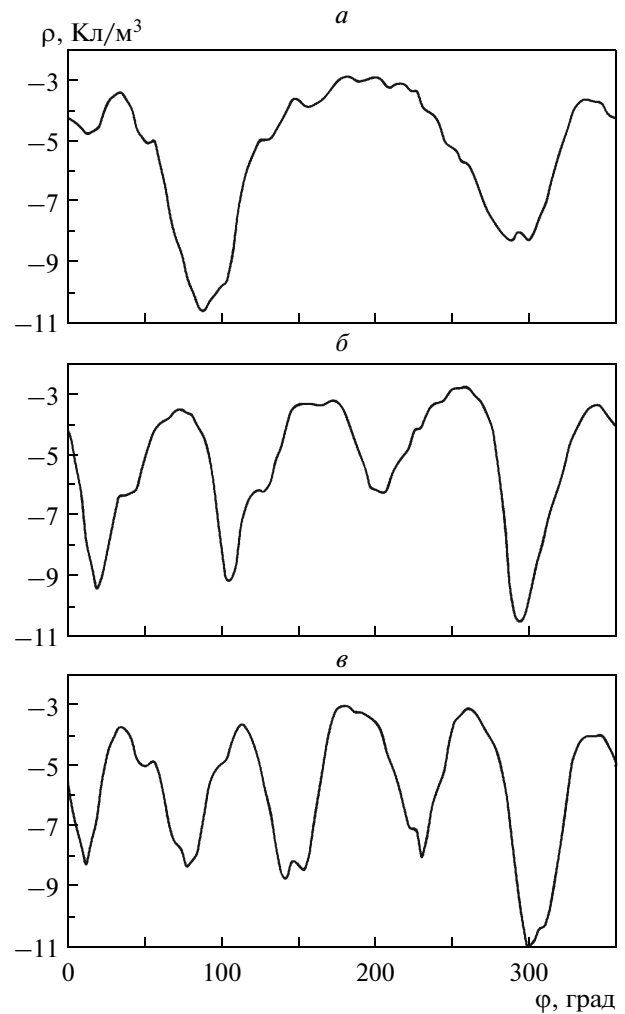


Рис. 1. Распределения плотности пространственного заряда в области формирования ВК, усредненные по радиусу, от азимутальной координаты (фрагменты *a*, *b*, *v*) при различных начальных условиях (для фрагмента *a* – $\tau = 50$ нс, для *b* – $\tau = 45$ нс, для *v* – $\tau = 50.5$ нс) для характерных режимов динамики РЭП (Фрагмент *a* соответствуют режиму-II, *b* – режиму-IV, *v* – режиму-V).

“режимом-V”. Это хорошо видно из рис. 2, на котором точками изображена зависимость количества формирующихся электронных сгустков в азимутальном направлении N от времени нарастания импульса тока τ . Данный эффект связан с тем, что возбуждаемые азимутальные моды, соответствующие режиму-II и режиму-V, менее устойчивы, чем мода режима-IV. Заметим, что в рассматриваемой системе могут возбуждаться и другие азимутальные моды, но из-за того что они обладают меньшим инкрементом, вероятность их возбуждения мала [8], и в ходе исследования они не реализовывались.

Рассмотрим характерные фурье-спектры колебаний обратного тока, создаваемого электрона-

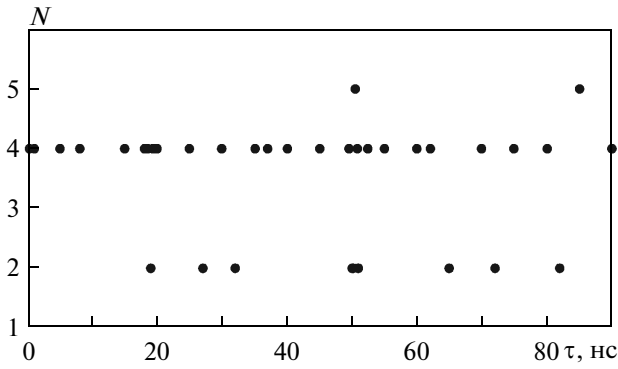


Рис. 2. Зависимость количества формирующихся электронных сгустков в азимутальном направлении N от времени нарастания импульса тока τ .

ми, отразившимися от ВК (см. рис. 3). Хорошо видно, что для всех трех режимов характерно наличие высших гармоник. Более того, в спектрах, соответствующих режиму-II и режиму-IV (см. рис. 3а и рис. 3б), максимальна вторая гармоника, что свидетельствует о сильно нелинейном режиме динамики РЭП. Характерная отличительная особенность данных режимов – различие в частоте основной спектральной составляющей: режиму-II соответствует частота $f_2 \approx 45.8$ ГГц (см. рис. 3а), режиму-IV – $f_4 \approx 69.6$ ГГц (см. рис. 3б), а режиму-V – $f_5 \approx 75.4$ ГГц (см. рис. 3в). Заметим, что частота вращения электронных сгустков вокруг оси пространства дрейфа совпадает с частотой основной спектральной составляющей. Таким образом, наблюдается связь между структурой ВК и частотой излучения: увеличение количества сгустков в азимутальном направлении приводит к росту частоты выходного СВЧ-сигнала в релятивистском виркаторе. Также из спектров видно, что значения амплитуд основных спектральных составляющих отличаются для данных режимов, причем в режиме-II амплитуда максимальная.

Вращение электронных сгустков в азимутальном направлении вызывает азимутальный ток. Оценим величину этого тока, аппроксимировав форму электронных сгустков эллипсоидом. По результатам численного моделирования был определен средний объем электронных сгустков и их средняя плотность для каждого из режимов. В случае образования двух электронных сгустков (режиму-II) средний объем одного сгустка $V \approx 8.4$ мм³, а средняя плотность $\rho \approx 7$ Кл/м³. Для режима-IV средний объем $V \approx 2.8$ мм³, средняя плотность $\rho \approx 6.75$ Кл/м³. Для режима-V средний объем одного сгустка $V \approx 2$ мм³, средняя плотность $\rho \approx 7$ Кл/м³. Таким образом, вращение электронных сгустков вокруг оси пространства дрейфа создает азимутальные токи $I_2 \approx 2690$ А, $I_4 \approx 1314$ А, $I_5 \approx 1056$ А ($I = V\rho f$, V – объем одного сгустка, ρ – плотность одного

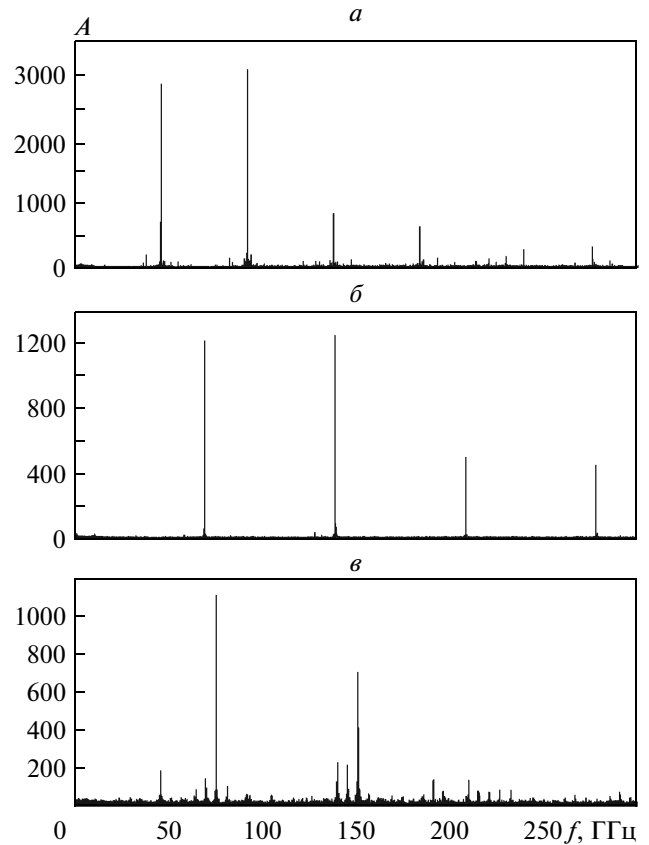


Рис. 3. Характерные фурье-спектры колебаний обратного тока, создаваемого электронами, отразившимися от ВК. Фрагмент а соответствует режиму-II ($\tau = 50$ нс), фрагмент б – режиму-IV ($\tau = 45$ нс), фрагмент в – режиму-V ($\tau = 50.5$ нс).

сгустка, f – частота вращения электронных сгустков, которая совпадает с частотой основной спектральной составляющей), которые соответствуют режиму-II, режиму-IV и режиму-V. Видно, что плотность пространственного заряда для всех режимов примерно одинакова, а объем сгустков и скорость их вращения разные, что вызывает различия в величине азимутального тока. Обратим внимание на хорошее соответствие этих оцененных азимутальных токов амплитудам основных спектральных составляющих рассматриваемых режимов (см. рис. 3), а также на то, что азимутальный ток, соответствующий режиму-IV, находится между токами режима-II и режима-V ($I_2 > I_4 > I_5$). Из чего следует, что увеличение количества электронных сгустков в азимутальном направлении (при фиксированном магнитном поле и токе инжекции) приводит к уменьшению азимутального тока и амплитуд спектральных составляющих.

Таким образом, в проведенном численном исследовании обнаружены три характерных режима динамики РЭП. Данные режимы характеризуются образованием ВК сложной структуры, а имен-

но образованием ВК с двумя, четырьмя или пятью минимумами потенциала в азимутальном направлении, которые вращаются вместе с электронным потоком вокруг оси пространства дрейфа, тем самым формируя вихревые структуры в камере дрейфа. Кроме того, все три режима имеют различные спектры колебаний обратного тока, создаваемого электронами, отразившимися от ВК. Характерная отличительная особенность данных режимов – различие в частоте основной спектральной составляющей, которая совпадает с частотой вращения электронных сгустков вокруг оси пространства дрейфа. Показано, что увеличение количества сгустков в азимутальном направлении приводит к росту частоты выходного СВЧ-сигнала в модели релятивистского виркатора. Также показано, что средняя плотность пространственного заряда в сгустках для всех трех режимов остается примерно одинаковой, а изменяются объем и скорость вращения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 15-52-04018 и № 15-32-20299) и гранта

Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-5426.2015.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
3. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. Taylor and Francis: CRC Press, 2007.
4. Kurkin S.A., Frolov N.S., Rak A.O. et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. № 153503. P. 1.
5. Li L., Cheng G., Zhang L. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. 074504.
6. Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. 043507.
7. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A. et al. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21(9). 093105.
8. Kartashov I.N., Kuzelev M.V. // Plasma Phys. Rep. 2010. V. 36. № 6. P. 524.