

УДК 537.533.9, 533.9...1

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ В РАМКАХ ТРЕХМЕРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

© 2014 г. Н. С. Фролов^{1,2}, С. А. Куркин¹, А. А. Короновский^{1,2},
А. Е. Храмов^{1,2}, Ю. А. Калинин¹

E-mail: phrolovns@gmail.com

Подробно изучены процессы формирования в пучке виртуального катода (ВК) в виркаторной системе с торможением в рамках 3D-электромагнитной модели электронного потока. Показано, что генерируемое в такой системе СВЧ-излучение характеризуется высоким уровнем шума из-за сложной и сильно турбулентной динамики пучка в пространстве дрейфа.

DOI: 10.7868/S0367676514120059

ВВЕДЕНИЕ

Изучение пучков заряженных частиц имеет огромное значение для понимания физических свойств электронных и ионных приборов, а также прикладное значение, связанное с генерацией импульсов мощного электромагнитного излучения в вакуумных и плазменных устройствах электроники больших мощностей. В частности, интенсивные релятивистские электронные потоки в настоящее время находят широкое применение в ряде задач, связанных с нагревом плазмы, ядерным синтезом с инерционным удержанием плазмы, генерации мощного СВЧ-излучения и т.д. [1–8].

Одним из важных и перспективных направлений исследований в области вакуумной и плазменной СВЧ-электроники, привлекающих научное сообщество, является изучение пространственно-временных колебаний электронных пучков в режимах формирования виртуального катода (ВК). СВЧ-приборы, чей принцип генерации электромагнитного излучения основан на формировании ВК в пучках со сверхкритическим током, получили название виркаторов [2]. Генераторы на ВК были разработаны в 70-х годах и с тех пор вызывают серьезный интерес у исследователей в силу многих характерных особенностей. К ним можно отнести простоту конструкции (в частности, виркаторы могут работать без внеш-

него магнитного поля), легкость в перестройке частоты и режима колебаний, а также высокая выходная мощность [2, 4, 9]. Эти аспекты обуславливают фундаментальную и прикладную значимость работ по изучению нелинейной динамики электронных потоков с ВК.

Известно, что образование ВК связано с развивающейся в пучке пирсовской неизлучательной неустойчивостью, возникающей при превышении током пучка некоторого критического значения [1, 4, 10–12]. Ранее был проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение процессов, приводящих к формированию нестационарного ВК в интенсивных электронных пучках, и выявление механизмов генерации пучково-плазменных систем с ВК.

Детальный анализ процессов образования ВК был проведен в рамках одномерного моделирования полностью замагниченного электронного потока [6, 11, 13–17]. В связи с этим представляет огромный интерес исследование нелинейной нестационарной динамики электронного потока со сверхкритическим первансом в рамках полностью электромагнитной трехмерной модели, которая позволит в ходе численного исследования получить результаты, приближенные к экспериментальным данным. Эффективно проводить численные исследования подобного рода позволяет программный комплекс CST Particle Studio, предназначенный для анализа процессов, протекающих в потоках заряженных частиц.

ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Исследование динамики электронного потока в режиме формирования ВК проводили на основе

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”.

модели низковольтного виркатора [3, 13–17]. Этот прибор представляет собой нерелятивистский генератор широкополосного СВЧ-излучения среднего уровня мощности. Особый интерес к исследованию этой модели вызван тем, что, как показывают проведенные ранее экспериментальные работы, электронный поток в данной системе демонстрирует сложную динамику с высокой степенью турбулентности. Также эта система демонстрирует интересные эффекты в случае неавтономной динамики [18–20]. В такой нерелятивистской низковольтной системе формирование ВК происходит за счет дополнительного торможения электронного потока в пространстве дрейфа. Торможение потока определяется отрицательной разностью потенциалов между ускоряющим электродом и коллектором.

Основная особенность конструкции – прибор разделен на две части: электронная пушка и труба дрейфа. В пушечной части располагается термокатод, который осуществляет эмиссию электронов. Для фокусировки потока в пространстве пушки катод окружен кольцевым фокусирующим электродом. Эмитируемый катодом электронный поток разгоняется двумя ускоряющими электродами. На выходе из электронной пушки поток попадает в пространство дрейфа, при этом радиус трубы дрейфа существенно больше радиуса трубы электронной пушки. Разница между радиусом создается для снижения критического тока пучка, при котором формируется нестационарный ВК в пространстве дрейфа. Чтобы избежать разбегания электронного потока в пушечной части и в пространстве дрейфа, применяется магнитная фокусировка электронного потока с помощью соленоида.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Полностью электромагнитная трехмерная модель интенсивного электронного потока была реализована с помощью лицензионного программного продукта CST Particle Studio (CST PS). Данный программный комплекс позволяет проводить численное моделирование процессов, протекающих в реальных приборах и устройствах СВЧ-электроники, зная их основные конструктивные особенности, характеристики инжектируемого потока и подаваемые напряжения.

В рамках численного моделирования в среде CST PS была создана модель электронного потока в описанной геометрии исследуемого прибора, которая позволяет провести анализ механизмов генерации и формирования ВК в низковольтной виркаторной системе. Были взяты все параметры, соответствующие экспериментальному макету виркатора [3, 14, 15]. В численной модели формирование электронного потока осуществлялось следующим образом: катод производит эмиссию электронов с начальной энергией 1 эВ и током пучка $I_0 = 400$ мА.

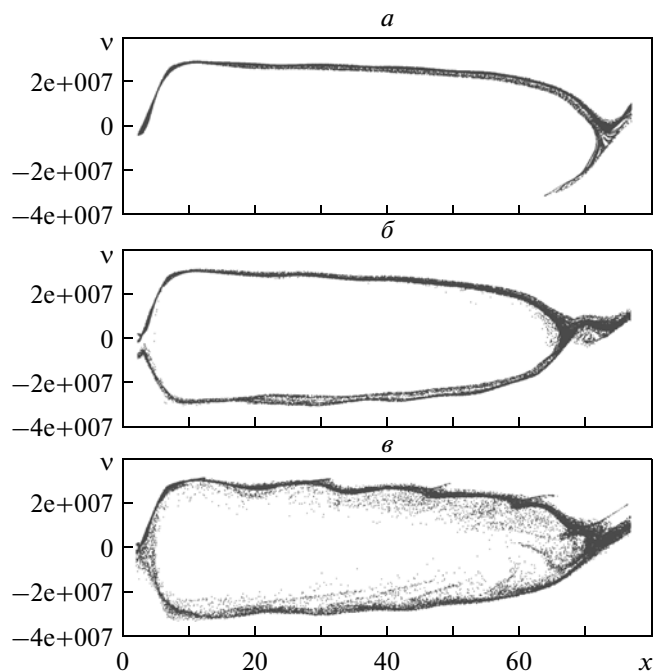


Рис. 1. Фазовые портреты электронного потока в низковольтном виркаторе: $a - t = 7$ нс; $b - t = 15$ нс; $v - t = 34$ нс.

Электронный поток попадает в ускоряющее поле, создаваемое электродами, которые находятся под напряжением $V_0 = 1.5$ кВ. Ускоренный в трубе электронной пушки имеющий радиус $r_{eg} = 3.5$ мм, плотный электронный поток попадает в трубу дрейфа радиусом $r_d = 15$ мм – заданной геометрии, ток пучка $I_0 = 400$ мА становится критическим. Электронный поток попадает в тормозящее поле в пространстве дрейфа, создаваемое коллектором, которое определяется разностью потенциалов между катодом и коллектором $V = -500$ В. Электронный поток фокусируется постоянным магнитным полем соленоида, имеющим максимум $B_0 = 0.1$ Тл.

Анализ поведения пучка в низковольтном виркаторе показал, что в при заданных параметрах в системе возникает колебательная динамика. В потоке происходит формирование двух ВК: в пространстве дрейфа электронного потока и в пушечной части. На рис. 1 приведены фазовые портреты электронного потока в низковольтном виркаторе. Видно, что первичным является формирование ВК в пространстве дрейфа (рис. 1а), создающий обратный поток заряженных частиц, который порциями отражается к области инжекции. Встречный поток повышает плотность заряда в области источника электронов и способствует развитию неустойчивости в прикатодной области, что приводит к образованию вторичного ВК, совершающего колебания на частоте первичного

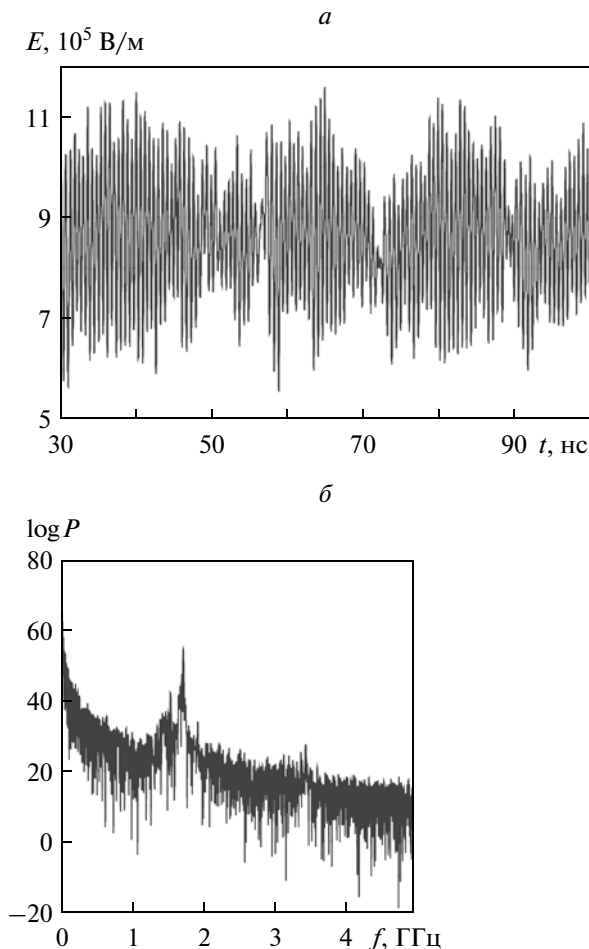


Рис. 2. Временная реализация колебаний продольной компоненты электрического поля в точке $x = 60$ мм (а) и ее спектральный состав (б).

ВК (рис. 1б). Формирование нестационарного ВК в пушечной части приводит к модуляции потока на входе в пространство дрейфа и усиливает колебания первичного ВК. Таким образом, сформированные виртуальные катоды взаимодействуют, обмениваясь друг с другом порциями отраженных электронных сгустков. Стоит отметить, что совместная динамика двух ярко выраженных ВК с течением времени приводит к серьезному усложнению структуры потока, в котором формируется несколько электронных структур с большим разбросом скоростей (рис. 1в).

Колебания ВК в трубе дрейфа приводят к появлению пространственно-временных осцилляций электромагнитного поля. В частности, изучение эволюции поля на основной частоте колебаний ВК показало, что в системе реализуется бегущая волна, распространяющаяся от входа в пространство дрейфа до коллектора.

На рис. 2 приведены характерная реализация колебаний продольной компоненты поля в обла-

сти формирования виртуального катода у коллекторного конца прибора (а) и ее спектральная характеристика (б). Видно, что колебания поля носят нерегулярный характер, что отражается на спектре: в нем присутствует основная частота $f_0 = 1.7$ ГГц, соответствующая колебаниям виртуального катода, с высоким уровнем шума, сопоставимым по уровню со второй гармоникой основной частоты. Шумовой пьедестал объясняется тем, что для рассматриваемого потока характерны колебания носителя заряда на разных временных масштабах, соответствующих различным электронным сгусткам, возбуждающим колебания электромагнитного поля на различных частотах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы по исследованию нестационарной динамики нерелятивистского электронного потока в низковольтном генераторе на ВК выявлены особенности возникновения генерации и особенности образования электронных структур в рамках трехмерной электромагнитной модели. В частности, показано, что в исследуемом приборе СВЧ-излучение возникает за счет формирования и совместной колебательной динамики двух виртуальных катодов. Также показано, что интенсивный пучок заряженных частиц в низковольтном виркаторе характеризуется сильным разбросом по скоростям и высоким уровнем турбулентности, что обеспечивает широкополосный спектр генерируемого излучения и высокий шумовой пьедестал.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (задание № 3.59.2014/К и проект 931 (СГТУ-146)), а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-02-31204, 12-02-33071, 12-02-00345) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-345.2013.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sullivan D.J., Walsh J.E., Coutsias E.A. Virtual Cathode Oscillator (Vircator) Theory, High Power Microwave Sources. N.Y.: Artech House Microwave Library, 1987.
2. Dubinov A.E., Selemir V.D. // J. Commun. Technol. Electron. 2002. V. 47. P. 575.
3. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т.31. №11. С. 1009.
4. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. Boca Raton: CRC Press, 2007.
5. Biswas D. // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. 063104.
6. Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P. et al. // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. 033106.
7. Singh G., Shashank C. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. 063104.

8. *Hramov A.E., Kurkin S.A., Koronovskii A.A. et al.* // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. 112101.
9. *Mahaffey R.A., Sprangle P., Golden J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 39. P. 843.
10. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ-электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2004.
11. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ-электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
12. *Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А.* // Прикладная радиоэлектроника. 2012. Т. 11. № 4. С. 489.
13. *Jiang W., Masugata K., Yatsui K.* // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. P. 982.
14. *Егоров Е.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 9. С. 1.
15. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др.* // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51.
16. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 10. С. 139.
17. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724; *Egorov E.N., Kalinin Ju.A., Levin Ju.I., Trubetskov D.I., Hramov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2005. V. 69. № 12. P. 1921.
18. *Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 22. С. 78.
19. *Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 12. С. 1485; *Frolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Kalinin Ju.A., Starodubov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2012. V. 76. № 12. P. 1329.
20. *Короновский А.А., Москаленко О.И., Павлов А.С. и др.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 5. С. 1.