

## Особенности образования виртуального катода в рамках 3D моделирования электронного потока в виркаторе с помощью CST Particle Studio

Н.С. Фролов<sup>1,3,\*</sup>, С.А. Куркин<sup>1,†</sup>, А.А. Короновский<sup>2,3,‡</sup>, А.Е. Храмов<sup>1,3,§</sup>, Ю.А. Калинин<sup>1,¶</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра электроники, колебаний и волн  
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83, корп. 8

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем  
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83, корп. 8

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем»  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77, корп. 5

В настоящей работе были проведены разработка и исследование 3D модели интенсивного электронного потока в генераторе на виртуальном катоде с помощью программного продукта CST Particle Studio. Было показано, что в виркаторной системе с торможением потока генерация происходит благодаря формированию в пучке двух нестационарных виртуальных катодов — в пространстве дрейфа и в пушечной части. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с полученными ранее экспериментальными данными.

PACS: 41.75.Fr, 52.35.Hg, 52.35.Mw.

УДК: 537.533.9, 533.9.1.

Ключевые слова: виркатор, интенсивный электронный поток, виртуальный катод, пучково-плазменные системы.

Изучение пучков заряженных частиц имеет огромное значение в плане понимания физических свойств плазмы, а также имеет явное прикладное значение. К примеру высокомошные релятивистские электронные потоки в настоящее время находят широкое применение в ряде задач, связанных с нагревом плазмы, ядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы, генерации мощного СВЧ излучения и т.д. [1–8]. Одним из наиболее важных и перспективных направлений исследований в области вакуумной и плазменной СВЧ электроники, привлекающих научное сообщество, является изучение пространственно-временных колебаний виртуального катода (ВК). СВЧ приборы, чей принцип генерации электромагнитного излучения основан на колебаниях ВК в пучках со сверхкритическим током, получили название виркаторов. Генераторы на ВК были разработаны в 70-х годах и с тех пор вызывают серьёзный интерес у исследователей в силу многих характерных особенностей. К ним можно отнести простоту конструкции (в частности, виркаторы могут работать без внешнего магнитного поля), лёгкость 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 развива-

ющейся в пучке неустойчивостью, возникающей при превышении током пучка некоторого критического значения [1, 10]. 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]. В связи с этим представляет огромный интерес исследование нелинейной нестационарной динамики электронного потока со сверхкритическим первеансом в рамках полностью электромагнитной 3D модели, которая позволит в ходе численного исследования получить результаты приближенные к экспериментальным данным.

Подобный анализ 3D модели возможно провести с помощью 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.

Исследование динамики электронного потока в режиме формирования ВК проводилось на основе модели низковольтного виркатора [3, 12, 13]. Этот прибор представляют собой нерелятивистский генератор широкополосного СВЧ излучения среднего уровня мощности. В ходе проведенного исследования была разработана полностью электромагнитная 3D модель этого устройства в среде CST PS, которая позволяет провести анализ механизмов генерации и формирования

\*E-mail: phrolovns@gmail.com

†E-mail: kurkinsa@gmail.com

‡E-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

§E-mail: hramovae@gmail.com

¶E-mail: noios@sgu.ru

ВК в такой низковольтной системе. Анализ поведения пучка в низковольтном виркаторе показал, что в системе формируется два виртуальных катода - в пространстве дрейфа электронного потока и в пушечной части. Причем первичным является ВК в пространстве дрейфа, создающий обратный поток заряженных частиц, который порциями отражается к области инжекции. Встречный поток способствует развитию неустойчивости в прикатодной области, что приводит к образованию вторичного ВК, совершающего колебания на частоте первичного ВК. Формирование нестационарного ВК в пушечной части приводит к модуляции потока на входе в пространство дрейфа и усиливает колебания первичного ВК. Широкий спектр излучения объясняется тем, что в такой системе формируется турбулентный электронный пучок. Колебания заряженных частиц на разных временных масштабах обеспечивают богатый спектральный состав выходного сигнала.

Также в работе проводится оптимизация параметров

существующей схемы низковольтного виркатора, для того чтобы добиться лучшего эффекта формирования ВК в пространстве дрейфа. Как и ожидалось, оптимизация, касающаяся в основном изменения некоторых геометрических параметров и элементов конструкции СВЧ прибора, привела к более быстрому развитию неустойчивости в потоке и образованию более плотного колеблющегося сгустка электронов в пространстве дрейфа.

Следует отметить, что полученные результаты находятся в хорошем согласии с известными экспериментальными результатами, полученными в рамках экспериментов с низковольтным виркатомом [3, 14–17].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-02-31204, 12-02-33071, 12-02-00345, 13-02-01209) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (МД-345.2013.2).

- 
- [1] *Sullivan D. J., Walsh J. E., Coutsias E. A.* Virtual Cathode Oscillator (Vircator) Theory, High Power Microwave Sources. (NY:Artech House Microwave Library, 1987).
- [2] *Dubinov A. E., Selemir V. D.* J. Commun. Technol. Electron. **47**. P. 575. (2002).
- [3] *Калинин Ю.А. и др.* Физика плазмы. **31**, №11. С. 1009. (2005).
- [4] *Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. (CRC Press, Boca Raton, 2007).
- [5] *Biswas D.* Phys. Plasmas. **16**. 063104. (2009).
- [6] *Filatov R. A. et al.* Phys. Plasmas. **16**. 033106. (2009).
- [7] *Singh G., Shashank C.* Phys. Plasmas. **18**. 063104. (2011).
- [8] *Hramov A. E.* Phys. Plasmas. **19**. 112101. (2012).
- [9] *Mahaffey R. A. et al.* Phys. Rev. Lett. **39**. P. 843. (1977).
- [10] *Hramov A.E. et al.* Physics of Plasmas. **19**, N.8. 082302. (2012).
- [11] *Jiang W. et al.* Phys. Plasmas. **2**. P. 982. (1995).
- [12] *Егоров Е.Н. и др.* Радиотехника и электроника. **52**, №1. С. 51. (2007).
- [13] *Егоров Е.Н. и др.* ЖТФ. **77**, №10. С. 139 (2007).
- [14] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Кузнецов Н.Н.* ЖТФ. **83**, 6. С. 151. (2013).
- [15] *Фокин А.С. и др.* Изв. РАН. Сер. физическая. **76**, №12 С. 1489. (2012).
- [16] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* Письма в ЖТФ. **37**, №16. С. 37. (2011).
- [17] *Калинин Ю.А. и др.* Письма в ЖТФ. **37**, №1. С. 56 (2011).

## Features of virtual cathode formation in the framework of 3D simulation of electron flow in vircator by means of CST Particle Studio

**N.S. Phrolov<sup>1,3,a</sup>, S.A.Kurkin<sup>1,b</sup>, A.A. Koronovskii<sup>2,3,c</sup>, A.E. Hramov<sup>1,3,d</sup>, Yu.A. Kalinin<sup>1,e</sup>**

<sup>1</sup>Department of Electronic, Oscillations and Waves, Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University. Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Department of Physics of Open Systems, Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University. Saratov 410012, Russia

<sup>3</sup>Scientific Educational Centre «Nonlinear Dynamics of Complex Systems», Saratov State Technical University. Saratov 410054, Russia

E-mail: <sup>a</sup>phrolovs@gmail.com, <sup>b</sup>kurkinsa@gmail.com, <sup>c</sup>alexey.koronovskii@gmail.com, <sup>d</sup>hramovae@gmail.com, <sup>e</sup>noios@sgu.ru

The following work is devoted to the development and research of 3D model of intensive electron flow in virtual cathode generator in the framework of program CST Particle Studio. It is shown that in vircator system with additional deceleration generation appears due to the formation of two non-stationary virtual cathodes in the beam — in the drift space and in the electron gun area. The results of numerical simulation are in a good qualitative agreement with the data obtained during previous experimental research.

PACS: 41.75.Fr, 52.35.Hr, 52.35.Mw.

Keywords: vircator, intensive electron flow, virtual cathode, beam-plasma systems.

**Сведения об авторах**

1. Фролов Никита Сергеевич — аспирант, младший научный сотрудник; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: phrolovns@gmail.com.
2. Куркин Семён Андреевич — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: kurkinsa@gmail.com
3. Короновский Алексей Александрович — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
4. Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: hramovae@gmail.com.
5. Калинин Юрий Александрович — докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: (8452) 51-44-12, e-mail: noios@sgu.ru.