

## Генерация электромагнитного излучения в релятивистской СВЧ системе вследствие развития сдвиговой неустойчивости

Н. С. Фролов<sup>1,2,\*</sup>, А. А. Короновский<sup>1,2</sup>, А. Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов  
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Научно-образовательный центр «Нелинейная динамика сложных систем»  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

(Статья поступила 25.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

В настоящей статье рассмотрены физические процессы, приводящие к генерации мощного электромагнитного излучения в виркаторной СВЧ системе, содержащей релятивистский электронный пучок, в случае одновременного развития неустойчивости Бурсиана и сдвиговой неустойчивости. В рамках трехмерной численной модели, основанной на методе крупных частиц, изучено влияние процессов в пучке на характеристики выходного излучения.

PACS: 52.35.-g, 52.35.Qz, 52.59.Sa. УДК: 533.9.12:533.951.7.

Ключевые слова: релятивистский электронный пучок, неустойчивость, СВЧ излучение, электроника больших мощностей.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время задачи по исследованию и разработке мощных источников микроволнового излучения являются важной частью современной СВЧ электроники. Необходимость проведения данного круга исследований обусловлена применением мощного СВЧ излучения в широком классе как фундаментальных задач, таких как ускорение частиц, нагрев и удержание плазмы и т.д., а также в ряде прикладных технологий (спектроскопия, космическая отрасль, широкополосная связь и т.д.) [1–3].

Интересным классом источников мощного СВЧ излучения являются генераторы на виртуальном катоде (ВК) или виркаторы — генераторы тормозного излучения, которые излучают микроволны за счет образования и колебаний ВК в электронном пучке со сверхкритическим током [3–5]. Виркаторы помимо высокого уровня выходной мощности имеют ряд положительных особенностей, а именно простоту конструкции, низкие требования к качеству пучка, возможность работы в отсутствие внешнего магнитного поля, возможность управления частотой и режимом колебаний за счет настройки параметров пучка, геометрии волновода или резонатора [3–5]. Несмотря на обозначенные преимущества, виркаторы обладают существенными недостатками. В частности, многие экспериментальные и теоретические работы посвящены вопросу повышения КПД виркатора с помощью различных методов контроля характеристик генерации или улучшения конструкции виркатора [6–9]. Другим существенным недостатком является низкая рабочая частота, связанная с собственной плазменной частотой пучка и, следовательно,

но, с плотностью пространственного заряда в области образования ВК. Одним из способов улучшения частоты работы виркатора является увеличение плотности пространственного заряда электронного пучка для повышения плазменной частоты пучка [3, 5, 10]. С этой точки зрения представляется перспективным разработать схему виркатора, в которой формируется такое экстремальное состояние пучка, как сжатое состояние [11], обладающее повышенной плотностью заряда, и обеспечить условия, при которых возможно установление колебаний ВК.

Кроме того, повышение плотности пространственного заряда пучка может привести не только к росту частоты, связанной с колебаниями виртуального катода при развитии в пучке неустойчивости Бурсиана, но и индуцировать развитие различных типов сдвиговой неустойчивости в пучке. Подобные типы неустойчивого поведения пучка, к примеру, диокотронная или слиппинг неустойчивость, являются следствием нарушения симметрии при распространении электронного пучка [12–14]. Сжатое состояние электронного пучка естественным образом выступает в роли своеобразной затравки для разрушения симметрии пучка в силу высокой плотности заряда и большого разброса по энергиям носителей заряда. В частности, как было показано ранее в работе [15], образование плотного сжатого состояния приводит к образованию быстро вращающихся сгустков в электронном пучке под действием диокотронной неустойчивости пучка. Формирование таких плотных вращающихся структур является перспективным способом генерации СВЧ излучения на более высоких частотах по сравнению с характерными частотами колебаний виркаторных приборов [16, 17].

В настоящей работе в рамках численного моделирования рассматриваются эффекты, протекающие в релятивистском электронном пучке, когда сжатое состояние индуцирует развитие сдвиговой неустойчивости и при-

\*E-mail: phrolovns@gmail.com

водит к генерации мощного СВЧ-излучения. В статье также приводится анализ физических процессов в пучке и расчет характеристик выходного микроволнового излучения.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования процессов развития и взаимодействия неустойчивостей в релятивистском электронном пучке использовался лицензионный программный пакет CST Particle Studio 2016. С его помощью была спроектирована и рассмотрена система, в которой кольцевой электронный пучок с внутренним радиусом  $r_b$  и толщиной  $\Delta$  распространяется в двухсекционном пространстве дрейфа. При этом, первая секция пространства дрейфа пучка представляет собой цилиндрическую трубу с радиусом  $R_1$  и длиной  $L_1$ , а вторая (выходная секция) — трубу с радиусом  $R_2$  и длиной  $L_2$ . Наличие двух секций пространства дрейфа, для которых выполняется условие  $R_1 < R_2$ , является обязательным для формирования в пучке сверхплотного сжатого состояния. Дальняя граница выходной секции нагружена на коаксиальный волновод для вывода энергии электромагнитных колебаний с внешним радиусом, равным радиусу выходной трубы и радиусом внутренней вставки  $R_c$ . Численное моделирование проводилось с учетом того, что пространство дрейфа заполнено идеальным вакуумом, а граничные условия стенок пространства дрейфа соответствуют граничным условиям идеального проводника.

Конкретные геометрические параметры двухсекционной СВЧ системы были выбраны следующим образом:  $r_b = 6$  мм,  $\Delta = 2$  мм,  $R_1 = 15$  мм,  $L_1 = 50$  мм,  $R_2 = 22$  мм,  $L_2 = 150$  мм,  $R_c = 12$  мм.

Ранее, в работе [15] было показано, что сжатое состояние в аналогичной двухсекционной СВЧ системе формируется при превышении током пучка  $I_0$  величины порядка 2.5 кА при энергии инжектированных частиц  $V_0 = 400$  кэВ и величине внешнего продольного магнитного поля  $B_0 = 2.5$  Т. Кроме того, было показано, что формирование сжатого состояния в такой системе естественным образом является затравкой для развития диокотронной неустойчивости.

Прежде чем переходить к описанию основных результатов, полученных в рамках проведенного исследования необходимо отметить, что сформированное в пучке сжатое состояние не является стационарным — при указанных параметрах виртуальный катод в первой трубе дрейфа теряет устойчивость и совершает стабильные во времени колебания с «эффективной» плазменной частотой пучка, которая пропорциональна плотности пространственного заряда в области формирования виртуального катода [10, 16]. Колебания виртуального катода в данной системе хорошо согласуются с фундаментальной модой выходного коаксиального волновода.

## 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Увеличение тока пучка приводит к развитию физических эффектов, существенно влияющих на характер транспортировки носителей заряда в пространстве дрейфа и, следовательно, на свойства генерации электромагнитного излучения в изучаемой СВЧ системе. Для детального рассмотрения возникающих физических процессов увеличим ток пучка до  $I_0 = 3.5$  кА и зафиксируем его.

На рис. 1 приведена иллюстрация возбуждения мод выходного коаксиального волновода. В первую очередь видно, что колебания виртуального катода с характерной частотой 8.32 ГГц, возбуждающие фундаментальную моду выходного волновода, затухают с течением времени. По истечении временного отрезка продолжительностью  $\tau \approx 30$  нс наблюдается полное подавление колебаний электромагнитного поля, согласующихся с фундаментальной модой (рис. 1, а). При этом, после момента времени  $\tau \approx 30$  нс в системе возбуждаются колебания электромагнитного поля с частотой 12.74 ГГц, структура которых согласуется с модами выходного волновода, представленными на рис. 1, б и рис. 1, в. Таким образом, в рассматриваемой релятивистской СВЧ системе в режиме формирования сжатого состояния пучка увеличение тока пучка  $I_0$  приводит к переключению режима колебаний.

Изменение структуры колебаний электромагнитного поля свидетельствует о качественных изменениях в динамике релятивистского электронного пучка. Так, на рис. 2 приведены фазовые портреты пучка до и после переключения режима колебаний (рис. 2, а и рис. 2, б соответственно). По оси абсцисс на фазовых портретах отложена продольная координата  $z$ , а по оси ординат — нормированный релятивистский импульс частицы в продольном направлении  $p_n = p_z / (m_0 c)$ , где  $p_z$  — продольный импульс крупной частицы,  $m_0$  — масса электрона,  $c$  — скорость света. Видно, что структура фазового портрета пучка до переключения режима колебаний имеет характерную форму для случая колебаний виртуального катода (рис. 2, а). Под действием колебаний виртуального катода вблизи области инжекции пучок оказывается промодулирован на частоте его колебаний. Таким образом, формируются волны пространственного заряда, распространяющиеся вдоль оси транспортировки пучка и характеризующиеся достаточно большой длиной волны, порядка 3.5 см, что согласуется с частотой колебаний виртуального катода, составляющей 8.32 ГГц. После переключения режима колебаний в пучке исчезают длинноволновые модуляционные волны, обусловленные колебаниями виртуального катода, и преобладают мелкомасштабные электронные структуры с существенным разбросом продольного импульса заряженных частиц (рис. 2, б).

Численное моделирование показало, что такое изменение структуры и динамики релятивистского пучка является следствием развития в пучке так называ-

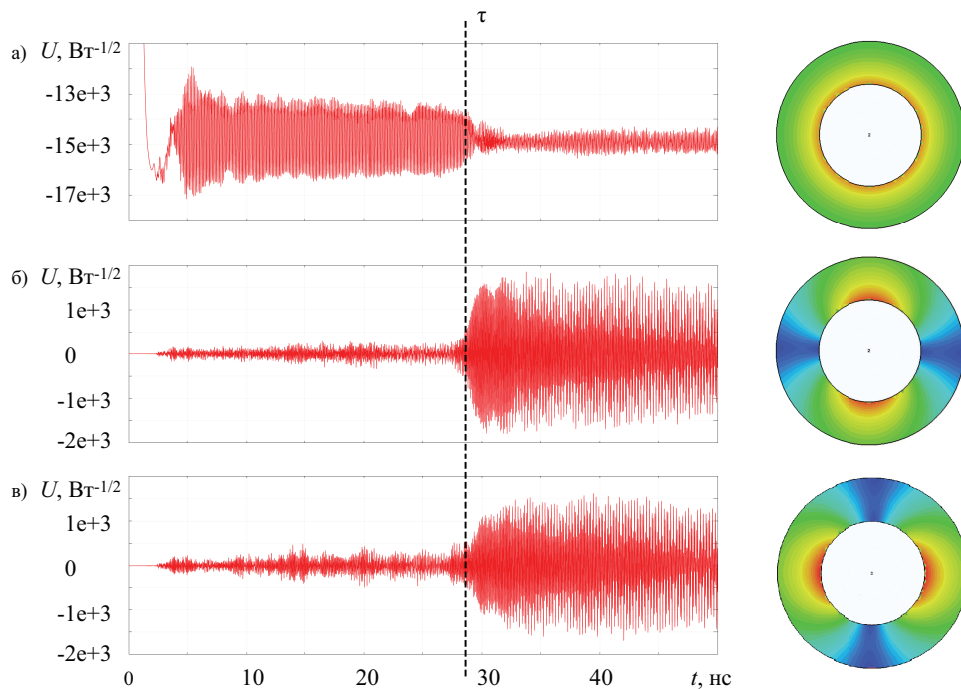


Рис. 1: Слева — временные ряды колебаний электромагнитного поля  $U$ , справа — соответствующие им моды выходного коаксиального волновода.  $a$  — основная мода коаксиального волновода,  $b, v$  — моды более высокого порядка

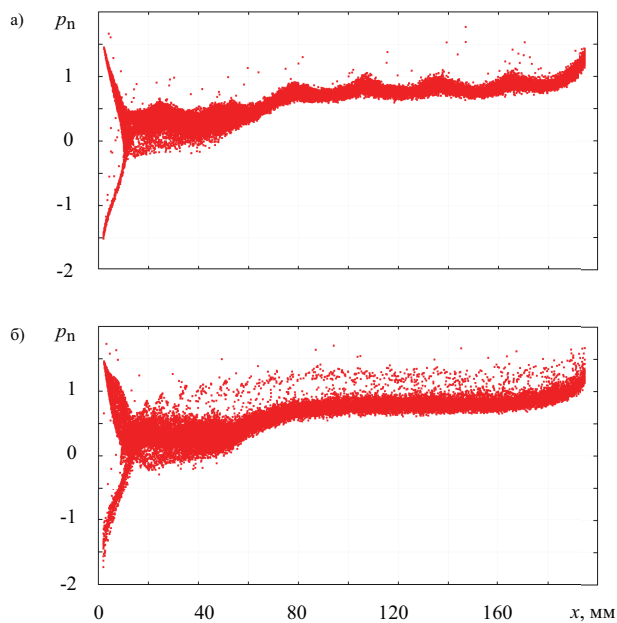


Рис. 2: Фазовые портреты релятивистского пучка до (а) и после (б) переключения режима колебаний. Фазовый портрет (а) соответствует моменту времени  $t = 20$  нс, фазовый портрет (б) соответствует моменту времени  $t = 35$  нс

емой сдвиговой неустойчивости, результатом которой является перекачка энергии продольного движения частиц во вращательное [13]. Таким образом, в пучке об-

разуются и доминируют спиральные волны пространственного заряда. Переход к сдвиговой неустойчивости с ростом тока обусловлен накоплением критической плотности пространственного заряда в области сжатого состояния пучка, а конкретно в области образования и колебаний виртуального катода. Высокая концентрация пространственного заряда создает интенсивное собственное магнитное поле пучка, которое самосогласованным образом влияет на изменение импульса крупных частиц, распределение плотности пространственного заряда пучка и появление асимметрии в его структуре. Указанные факторы обуславливают появление вращающихся спиральных волн пространственного заряда.

Кроме того, описанный физический эффект подтверждается иллюстрацией, приведенной на рис. 3. На данном рисунке приведены колебания тока вдоль оси транспортировки пучка и в поперечном ей направлении. Видно, что до переключения в пучке реализуются продольные колебания в виде модуляционных волн пространственного заряда (рис. 3,а), в то время как после переключения сдвиговая неустойчивость подавляет колебания виртуального катода и доминируют колебания тока в направлении, перпендикулярном оси пучка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был изучен эффект переключения колебаний под действием развития сдвиговой

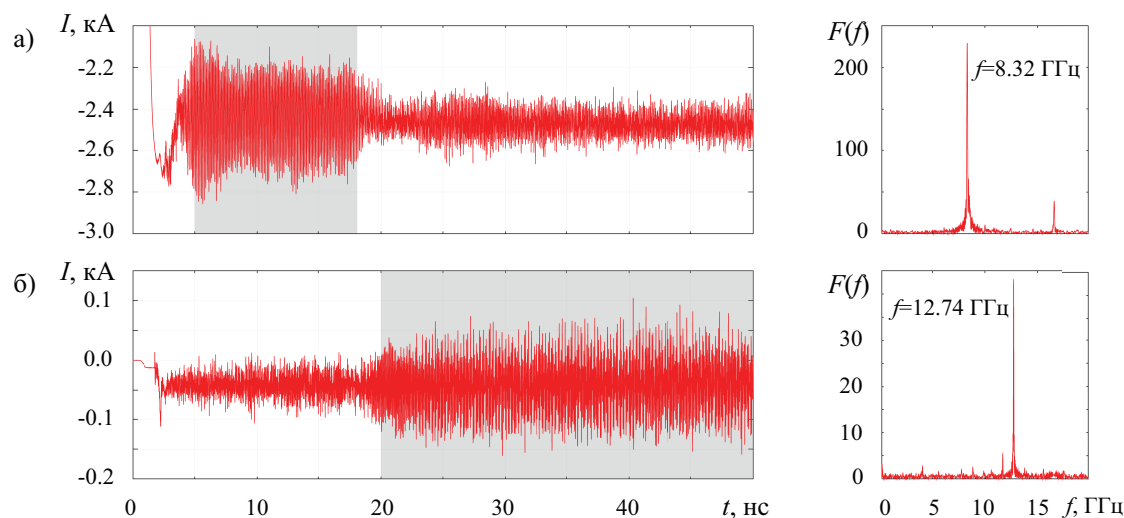


Рис. 3: Слева — временные ряды колебаний тока пучка в направлении вдоль оси его распространения (а) и в перпендикулярном направлении (б), справа — соответствующие временным рядам Фурье–спектры колебаний  $F(f)$ , построенные по временным областям, выделенным серым цветом

неустойчивости в релятивистском электронном пучке в режиме формирования сжатого состояния. В рамках проведенного численного моделирования на основе трехмерной полностью электромагнитной модели, были выявлены и описаны физические процессы, приводящие к качественному изменению структуры пучка и механизму генерации электромагнитного излучения в такой системе. Показано, что электромагнитное излучение, получаемое за счет сдвиговой неустойчивости в пучке, обладает более высокой частотой по срав-

нению с излучением за счет неустойчивости Бурсиана. Таким образом, обнаруженный эффект, можно рассматривать как перспективный механизм повышения частоты генерации в СВЧ приборах, содержащих сильные плотные релятивистские электронные пучки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-32-60701). А.Е. Храмов благодарит Министерство образования и науки РФ (проект № 3.4593.2017/6.7).

- 
- [1] Granatstein V. L., Gaponov–Grekhov A. V. Applications of high-power microwaves. Artech House Publishers, 1994.
  - [2] Benford J. IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. **36**. P. 569.
  - [3] Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2015.
  - [4] Sullivan D. J., Walsh J. E., Coutsias E. A. Virtual cathode oscillator (vircator) theory (Granatstein V. L. and Alexeff I. ed., High Power Microwave Sources, Vol. 13). Artech House Microwave Library, 1987.
  - [5] Дубинов А. Е., Селемир В. Д. Радиотехника и электроника. 2002. **47**, № 6. С. 575.
  - [6] Zhi-Qiang L., Hui-Huang Z., Yu-Wei F. et al. Chinese Physics Letters. 2008. **25**. P. 2566.
  - [7] Shlapakovski A. S., Queller T., Bliokh Y. et al. IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2012. **40**. P. 1607.
  - [8] Phrolov N. S., Koronovskii A. A., Kalinin Ju. A. et al. Phys. Lett. A. 2014. **378**, N. 32–33. P. 2423.
  - [9] Champeaux S., Gouard P., Cousin R. et al. IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. **43**, N. 11. P. 3841.
  - [10] Hramov A. E., Kurkin S. A., Koronovskii A. A. et al. Physics of Plasmas. 2012. **19**, N 11. 112101.
  - [11] Ignatov A. M., Tarakanov V. P. Physics of Plasmas. 1994. **1**. P. 741.
  - [12] Davidson R. C., Qin H. Physics of Intense Charged Particle Beams in High Energy Accelerators. World Scientific Publishing Company, 2001.
  - [13] Antonsen Jr. T. M., Ott E. The Physics of Fluids. 1975. **18**, N 9. P. 1197.
  - [14] Booske J. H., Basten M. A., Kumbasar A. H. et al. Physics of plasmas. 1994. **1**, N 5. P. 1714.
  - [15] Фролов Н. С., Короновский А. А., Храмов А. Е. Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. **81**, № 1. С. 34.
  - [16] Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A. et al. Physics of Plasmas. 2015. **22**. 122110.
  - [17] Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A. et al. Physics of Plasmas. 2014. **21**. 093105.

**Microwave emission in relativistic system under shear instability development****N. S. Frolov<sup>1,2,a</sup>, A. A. Koronovskii<sup>1,2</sup>, A. E. Hramov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky, Saratov 410012, Russia*<sup>2</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov 410054, Russia**E-mail: <sup>a</sup>phrolovns@gmail.com*

In present paper, we observe physical processes leading to the emission of the powerful microwave radiation in vircator system, which contains relativistic electron beam in case of simultaneous development of Bursian and shear instability. We have studied the influence of beam dynamics on the output radiation characteristics via 3D particle-in-cell simulation.

PACS: 52.35.-g, 52.35.Qz, 52.59.Sa

*Keywords:* relativistic electron beam, instability, microwave radiation, high power electronics.*Received 25 July 2017.***Сведения об авторах**

1. Фролов Никита Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; (845) 251-42-94, e-mail: phrolovns@gmail.com.
  2. Короновский Алексей Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, проректор по научной работе; тел.: (845) 227-14-96, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
  3. Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (845) 299-88-31, e-mail: hramovae@gmail.com.
-