

04;10

## **Нелинейная динамика электронного потока с виртуальным катодом во внешнем неоднородном магнитном поле**

© С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет  
E-mail: KurkinSA@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 ноября 2009 г.

В рамках двумерной численной модели исследована нелинейная динамика виртуального катода в электронном потоке во внешнем сильно неоднородном магнитном поле, создаваемом кольцевым магнитом. Обнаружено сильное влияние характеристик внешнего неоднородного магнитного поля на нелинейную динамику виртуального катода в системе. Изучены физические процессы, ответственные за обнаруженную зависимость динамики электронного потока с виртуальным катодом от параметров внешнего неоднородного магнитного поля. Исследованы зависимости выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом от характеристик внешнего неоднородного магнитного поля.

Исследование пучково-плазменных систем с виртуальным катодом (ВК) является в настоящее время актуальной задачей электроники сверхвысоких частот (СВЧ) и физики плазмы. Во-первых, это обусловлено фундаментальной значимостью подобных исследований, так как пучково-плазменные системы с ВК являются характерными распределенными активными электронно-волновыми системами, которые могут демонстрировать различные нелинейные эффекты (образование и взаимодействие электронных структур, хаотическую генерацию, электронную турбулентность и др.) [1–4]. Во-вторых, данные устройства являются перспективными источниками мощного широкополосного СВЧ-излучения и могут использоваться в различных практических приложениях [3,5–7]. В последнее время особый интерес вызывают низковольтные системы с ВК, рассматриваемые как источники сверхширокополосного хаотического сигнала сантиметрового диапазона длин

волн, так называемые низковольтные виркаторы. Данные приборы характеризуются простотой конструкции и широкой полосой частот генерируемого хаотического излучения [7–10]. В качестве источника внешнего фокусирующего магнитного поля в низковольтном виркаторе частот используются либо один кольцевой магнит, располагаемый в области формирования ВК, либо система кольцевых магнитов (магнитная периодическая система), которые характеризуются сильной неоднородностью поля в пространстве [11,12]. Отметим, что в работах [13,14] было обнаружено сильное влияние величины внешнего однородного магнитного поля на нелинейную динамику ВК. Однако детального исследования характеристик генерации и физических процессов, наблюдающихся в низковольтных виркаторах с неоднородным магнитным полем, до сих пор проведено не было. В связи с этим исследование данных вопросов представляется важной и актуальной задачей.

В качестве исследуемой модели была рассмотрена классическая модель для изучения динамики ВК [15]. Пространство дрейфа пучка представляет собой замкнутый отрезок цилиндрического волновода длиной  $L$  и радиусом  $R$ , закрытый с торцов электродами. Аксиально-симметричный моноскоростной на входе сплошной электронный пучок со скоростью  $v_0$  и током  $I$  инжектируется в пространство взаимодействия. Электроны могут покидать пространство взаимодействия через выходную (оседать на коллекторе) и входную (отражаться от ВК) сетки, а также оседать на боковой стенке. Предполагается, что внешнее неоднородное магнитное поле создавалось магнитным кольцом, располагаемым в области ВК. Основными параметрами, описывающими внешнее постоянное магнитное поле, являются координата кольца  $z_m/L$  и параметр  $B$  магнитного поля кольца, определяемый как максимальное значение индукции магнитного поля на оси симметрии системы. В качестве вывода мощности рассматривался отрезок спиральной замедляющей системы, который возбуждался колебаниями ВК [7–9].

Численное моделирование нестационарных процессов в пучке заряженных частиц при инжекции его в пространство дрейфа проводилось методом крупных частиц. Рассматривалась нестационарная двумерная модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия, которая основана на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц для моделирования динамики электронного пучка и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда [16]. В цилиндрических координатах в

безразмерных величинах (выражение безразмерных величин через размерные можно найти в работах [13,14], где использовалась аналогичная модель) уравнение движения для каждой частицы, записанное через компоненты ее импульса  $\mathbf{P}$  в векторном виде, имеет следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{E} + \left[ \frac{\mathbf{P}}{\gamma}, \mathbf{B} \right], \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля в точке нахождения частицы, а  $\gamma = \sqrt{1 + P^2/m_0^2 c^2}$  — релятивистский фактор частицы ( $m_0$  — масса покоя электрона).

Частицы при влете в пространство дрейфа имеют ненулевую азимутальную скорость, пропорциональную продольному магнитному полю в пространстве дрейфа. Эта скорость определяется из теоремы Буша, которая в случае экранированного от внешнего магнитного источника электронов имеет вид [11]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B_z}{2\gamma_0}, \quad (2)$$

где  $\gamma_0$  — релятивистский фактор инжектируемых частиц.

Уравнение Пуассона в цилиндрической системе координат в безразмерных переменных записывается в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \alpha^2 \rho. \quad (3)$$

Для нахождения плотности пространственного заряда использовалась снижающая сеточный шум процедура билинейного взвешивания крупных частиц на двумерной сетке (PIC-метод), уравнение Пуассона решалось сеточным методом [16].

Численное моделирование вывода мощности в виде отрезка спиральной замедляющей системы проводилось с помощью метода эквивалентных схем [17,18].

Рассмотрим нелинейную динамику электронного потока с ВК во внешнем неоднородном магнитном поле, формируемом одним кольцевым магнитом. В частности, исследуем влияние характеристик внешнего магнитного поля на режим динамики ВК в системе. Для этого на рис. 1 приведена карта режимов динамики ВК на плоскости

безразмерных параметров „положение кольцевого магнита  $z_m/L$  — параметр внешнего магнитного поля  $B$ “. Связь безразмерного параметра внешнего магнитного поля  $B$  с соответствующей размерной величиной  $B'$  определяется следующим соотношением:

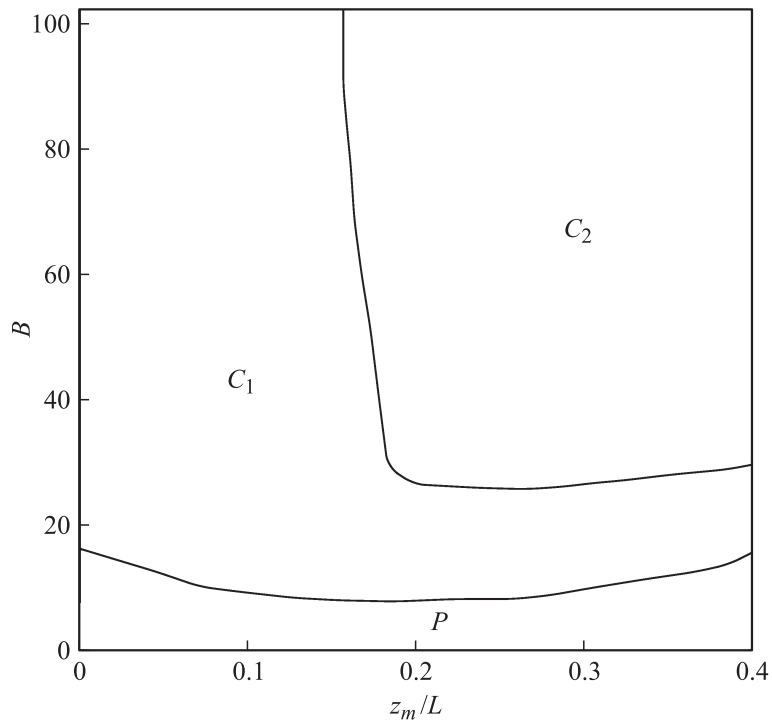
$$B' = \frac{v_0}{L\eta_0} B,$$

где  $\eta_0 = e/m_e$  — удельный заряд покоящегося электрона. Заметим, что для типичных параметров макета низковольтного виркатора [7–9], рассматриваемых в данной статье (ускоряющее напряжение  $V_0 = 4$  kV, длина пространства дрейфа  $L = 5$  см), безразмерной величине  $B = 1$  соответствует внешнее магнитное поле  $B' = 42$  Gs.

Из анализа рис. 1 следует, что с увеличением параметра внешнего магнитного поля  $B$  электронный поток с ВК последовательно демонстрирует различные режимы динамики. При величинах внешнего магнитного поля, соответствующих области  $P$  на карте режимов (рис. 1), в системе наблюдается регулярная динамика ВК. Таким образом, регулярный режим динамики ВК возникает при малых параметрах внешнего магнитного поля  $B$ . С дальнейшим ростом магнитного поля поведение ВК в системе усложняется. Сначала электронный поток с ВК начинает демонстрировать слабохаотический режим динамики (область  $C_1$  на рис. 1), который может рассматриваться как переходный режим между периодическим и развитым хаотическим режимами динамики ВК. Последний наблюдается при значительных параметрах внешнего магнитного поля  $B$  и больших токах в системе (область  $C_2$  на рис. 1).

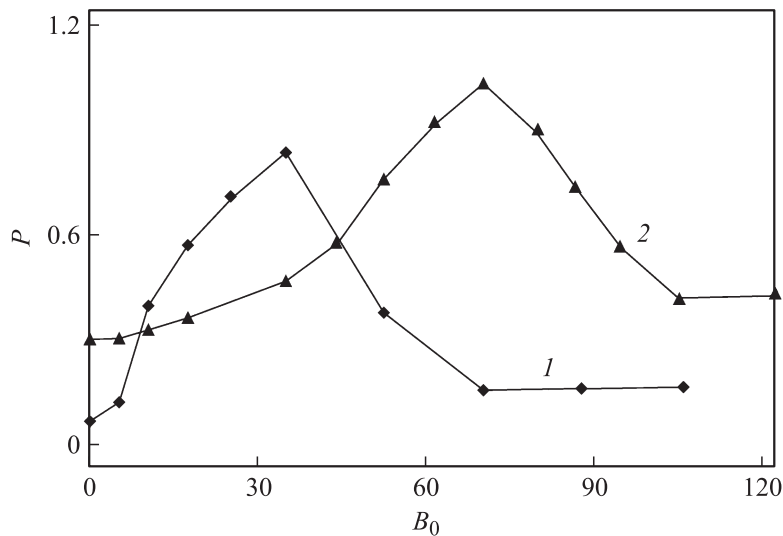
Обнаруженная зависимость динамики электронного потока с ВК от параметра внешнего неоднородного магнитного поля  $B$  обусловлена образованием и взаимодействием электронных структур в потоке. Так, при малой величине внешнего магнитного поля (область  $P$  на рис. 1), когда система демонстрирует регулярную динамику, в потоке существует одна основная электронная структура — виртуальный катод. Он совершает периодические пространственно-временные осцилляции, определяющие спектр выходного излучения рассматриваемой системы.

При параметрах магнитного поля, соответствующих областям  $C_1$  и  $C_2$  на карте режимов (рис. 1), т.е. при значительных величинах внешнего фокусирующего магнитного поля, радиальная динамика заряженных частиц в системе ограничивается, и начинает преобладать динамика в продольном направлении. Главная электронная структура



**Рис. 1.** Карта режимов колебаний ВК на плоскости безразмерных параметров „параметр внешнего магнитного поля  $B$  — положение магнита  $z_m/L$ “.  $P$  — область периодической регулярной динамики ВК в системе,  $C_1$  и  $C_2$  — области слабохаотической и развитой хаотической динамики ВК в потоке соответственно.

(ВК) в данном случае формируется во внутренних слоях электронного потока, где тормозящие поля пространственного заряда достигают максимальных значений. Сильная неоднородность внешнего магнитного поля кольца вдоль радиальной оси приводит к тому, что внешние слои потока оказываются в значительно более сильном магнитном поле по сравнению с внутренними слоями. При определенном параметре  $B$  внешнего магнитного поля (при безразмерном магнитном поле  $B > 18$ ) внешние слои электронного потока попадают в магнитную ловушку,



**Рис. 2.** Зависимости нормированной интегральной мощности выходного СВЧ-излучения в системе от параметров внешнего магнитного поля  $B$  при безразмерных токах пучка  $\alpha = 10$  (кривая 1) и  $\alpha = 20$  (кривая 2).

которая приводит к тому, что траектории заряженных частиц данных слоев сильно искривляются. Этот эффект приводит к формированию вторичной электронной структуры в системе — вторичного электронного сгустка. Взаимодействие между главной и вторичной электронными структурами приводит к появлению внутренней обратной связи, что, как известно, вызывает наблюдающуюся на карте режимов (рис. 1) хаотизацию колебаний ВК в системе аналогично тому, как было показано в работах [13,19].

Важным вопросом также является рассмотрение зависимости мощности выходного излучения низковольтного виркатора от параметра внешнего магнитного поля  $B$ . Данные зависимости представлены на рис. 2 для двух различных величин тока пучка. Видно, что зависимости демонстрируют аналогичное поведение. Важно отметить, что существует оптимальная величина внешнего магнитного поля  $B_{opt}$ , при которой мощность выходного излучения максимальна. При  $B < B_{opt}$  с ростом параметра внешнего магнитного поля  $B$  выходная мощность монотонно

увеличивается. Напротив, при  $B > B_{opt}$  наблюдается монотонное уменьшение, а затем — насыщение мощности выходного излучения с ростом  $B$  на низком уровне.

Обнаруженное поведение зависимостей мощности выходного излучения от параметра внешнего магнитного поля  $B$  является следствием физических процессов, происходящих в системе при изменении внешнего магнитного поля. При  $B < B_{opt}$  вследствие значительных сил кулоновского расталкивания в области ВК в пучке преобладает поперечная динамика заряженных частиц к боковой стенке пространства дрейфа, поэтому главная электронная структура (ВК) в данном случае оказывается сильно растянутой вдоль радиального направления и характеризуется малой плотностью пространственного заряда. Мощность выходного излучения пропорциональна плотности пространственного заряда электронного сгустка, возбуждающего систему, и в рассматриваемом случае она также будет невелика. С ростом величины магнитного поля поперечная динамика заряженных частиц в системе ограничивается, и плотность пространственного заряда в области ВК возрастает. Как следствие, увеличивается величина мощности выходного излучения (рис. 2). При  $B \sim B_{opt}$  поперечная динамика в системе оказывается практически подавленной фокусирующим магнитным полем, и выходная мощность достигает максимального значения. С дальнейшим ростом величины внешнего магнитного поля ( $B > B_{opt}$ ) часть заряженных частиц (в основном из внешних слоев) оказываются захваченными магнитной ловушкой. Данные частицы формируют вторичный электронный сгусток и перестают участвовать в осцилляциях ВК, не возбуждая выходную электродинамическую систему. Это приводит к уменьшению мощности выходного излучения в системе. Количество таких частиц увеличивается с ростом параметра внешнего магнитного поля  $B$  и, следовательно, выходная мощность уменьшается (рис. 2).

Таким образом, в работе обнаружена сильная зависимость динамики электронного потока с ВК от параметров внешнего неоднородного магнитного поля, формируемого кольцевым магнитом, получены характерные зависимости мощности выходного излучения системы с ВК от параметра внешнего неоднородного магнитного поля  $B$ . Данные зависимости обусловлены физическими процессами, развивающимися в электронном потоке с виртуальным катодом в сильно неоднородном магнитном поле.

Работа поддержана Федеральной целевой программой „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.“.

## Список литературы

- [1] *Klinger T., Schroder C., Block D. et al.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. N 5. P. 1961.
- [2] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 722.
- [3] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003–2004.
- [4] *Hramov A.E., Rempen I.S.* // Int. J. Electronics. 2004. V. 91. N 1. P. 1.
- [5] *Granatstein V.L., Alexeff I.* High Power Microwave Sources. Artech House Microwave Library, 1987.
- [6] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // РЭ. 2002. Т. 47. С. 575.
- [7] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Лёвин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [8] *Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P., Koronovskii A.A., Felsteiner J.* // Physics of Plasmas. 2009. V. 16. P. 033106.
- [9] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
- [10] *Gursharn Singh, Shashank Chaturvedi.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. V. 36. N 3. С. 694.
- [11] *Tsimring Shulim E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2007.
- [12] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Короновский А.А.* Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Гл. 3. М.: Физматлит, 2010.
- [13] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 10. С. 119.
- [14] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 8. С. 684.
- [15] *Кузелев М.В., Рухадзе А.А.* Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
- [16] *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics, via computer simulation. NY: McGraw-Hill, 1985.
- [17] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 139.
- [18] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. Р. 71.
- [19] *Егоров Е.Н., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 8. С. 742.