

09:10

Генерация хаотических сигналов в низковольтном генераторе на виртуальном катоде с экранированным от внешнего магнитного поля источником электронов

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

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: KurkinSA@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 сентября 2010 г.

В рамках двумерной численной модели проведено детальное исследование влияния степени экранировки источника электронов от внешнего однородного магнитного поля дрейфовой камеры на нелинейную динамику электронного потока с виртуальным катодом, а также на выходные характеристики СВЧ-излучения в низковольтной виркаторной системе. Обнаружено, что увеличение степени экранировки источника электронов от внешнего магнитного поля приводит к усложнению динамики виртуального катода в системе и, следовательно, к хаотизации выходного СВЧ-излучения. Проанализированы физические процессы, приводящие к наблюдаемому поведению системы с увеличением степени экранировки.

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.) [1–5].

С другой стороны, устройства, основанные на использовании электронного потока с ВК (виркаторы), являются перспективными источниками мощного широкополосного СВЧ-излучения и могут исполь-

зоваться в различных практических приложениях [1–3, 6–8]. Данные приборы характеризуются высоким уровнем мощности генерации СВЧ-излучения, простотой конструкции, возможностью работы без магнитных полей, легкостью перестройки частоты и режима генерации. Принцип работы виркаторов основан на формировании в электронном потоке с током, превышающим предельный вакуумный (критический) ток, виртуального катода, отражающего часть электронов обратно к плоскости инжекции [1–3]. Динамика ВК в электронном потоке характеризуется сложными пространственно-временными колебаниями, что часто приводит к генерации широкополосного СВЧ-излучения в виркаторных системах. В последнее время внимание исследователей привлекают также низковольтные системы с ВК, формирующимся в тормозящем поле (низковольтные виркаторы). В этих системах сложная динамика ВК в статическом тормозящем поле используется для генерации широкополосного хаотического сигнала среднего уровня мощности [6–8].

В работах [9–12] было обнаружено, что значительное влияние на процессы, происходящие в интенсивных электронных пучках с ВК, а также на динамику виркатора оказывают величина и конфигурация внешнего магнитного поля. Однако до сих пор не был исследован важный вопрос влияния степени экранировки источника электронов от внешнего магнитного поля на динамику пучка с ВК. Данные исследования важны, так как большинство электронных шушек, используемых в генераторах на ВК, имеют произвольную степень экранировки от внешнего магнитного поля и находятся обычно в полях рассеяния магнитной системы. Очевидно, что данные неоднородные поля в области формирования электронного потока будут оказывать сильное влияние на дальнейшую динамику ВК вследствие его высокой чувствительности к внешним условиям [7,9,11]. Данная работа посвящена исследованию влияния степени экранировки источника электронов от внешнего однородного магнитного поля дрейфовой камеры виркатора на нелинейную динамику электронного потока с ВК.

В качестве исследуемой модели была рассмотрена классическая модель для изучения динамики систем с ВК [13]. Пространство дрейфа пучка представляет собой замкнутый отрезок цилиндрического волновода длиной L и радиусом R , закрытый с торцов электродами. Аксиально-симметричный моноскоростной на входе трубчатый электронный пучок со скоростью v_0 , током I , радиусом $R_b = 0.5R$ и толщиной

$d = 0.1R$ 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.

Вдоль оси пространства дрейфа, в котором формируется ВК, прикладывается создаваемое соленоидом внешнее однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией B . Предполагается, что источник электронов (электронная пушка) имеет произвольную степень экранировки от внешнего магнитного поля соленоида. Введем параметр, определяющий степень экранировки электронной пушки $\Delta B = \frac{B - B_c}{B}$, где B_c — величина индукции внешнего магнитного поля в области пушки, а B — в пространстве дрейфа. Значения параметра ΔB лежат в интервале значений от 0 (абсолютно неэкранированная) до 1 (полностью экранированная пушка). Тогда по теореме Буша [14] наличие экранировки источника электронов от внешнего магнитного поля, т. е. наличие скачка магнитного поля при инжекции его в пространство дрейфа, приводит к появлению азимутальной составляющей скорости у инжектируемых в систему частиц. Эта скорость определяет одно из начальных условий при моделировании описанной выше системы и задается следующим соотношением:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B\Delta B}{2\gamma_0}, \quad (1)$$

где γ_0 — релятивистский фактор инжектируемых частиц.

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 [15].

В уравнениях, описывающих динамику электронного пучка, использовались безразмерные величины потенциала φ и напряженности E поля пространственного заряда, индукции B внешнего магнитного поля, плотности ρ и импульса P электронов, а также пространственных координат z и r , времени t (штрихом обозначены соответствующие

размерные величины) [9,10]:

$$\varphi' = \frac{v_0^2}{\eta_0} \varphi, \quad E' = \frac{v_0^2}{L\eta_0} E, \quad B' = \frac{v_0}{L\eta_0} B, \quad \rho' = \rho_0 \rho,$$

$$P' = m_e v_0 P, \quad z' = Lz, \quad r' = Lr, \quad t' = \frac{L}{v_0} t,$$

где $\eta_0 = e/m_e$ — удельный заряд покоящегося электрона, v_0 и ρ_0 — не зависящие от радиуса статические (невозмущенные) скорость и плотность электронного потока на входе в систему. В цилиндрических координатах и безразмерных величинах уравнение движения для каждой частицы, записанное через компоненты ее импульса в векторном виде, имеет следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{E} + \left[\frac{\mathbf{P}}{\gamma}, \mathbf{B} \right], \quad (2)$$

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).

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

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

где α — это безразмерный управляющий параметр (критерий подобия задачи), пропорциональный току пучка как $\alpha \sim \sqrt{I}$ и длине пространства взаимодействия как $\alpha \sim L$. Для нахождения плотности пространственного заряда использовалась снижающая сеточный шум процедура билинейного взвешивания крупных частиц на двумерной сетке (PIC-метод); уравнение Пуассона решалось сеточным методом [15].

Исследуем влияние степени экранировки источника электронного потока от внешнего магнитного поля ΔB на нелинейную динамику ВК в системе. Для этого на рис. 1 показана карта режимов колебаний ВК в системе на плоскости управляющих параметров „степень экранировки источника электронного потока ΔB — безразмерное внешнее магнитное поле B “ для заданного значения тока пучка. На карте выделены характерные области динамики системы. Из рис. 1 следует, что с увеличением

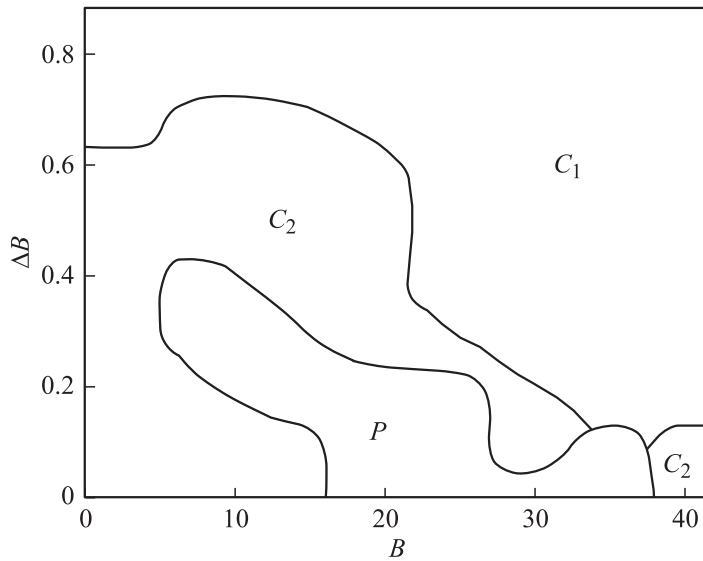


Рис. 1. Карта режимов колебаний ВК на плоскости безразмерных параметров „степень экранировки источника электронного потока ΔB —безразмерное внешнее магнитное поле B “ при $\alpha = 32$. Символами C_1 и C_2 обозначены области хаотической и слабохаотической динамики ВК в потоке соответственно, а символом P — область периодической регулярной динамики.

степени экранировки ΔB электронной пушки при различных значениях внешнего магнитного поля B наблюдается усложнение режима динамики ВК в исследуемой системе. Система демонстрирует следующие типы переключений режима динамики ВК с увеличением ΔB : периодический режим \rightarrow хаотическая динамика \rightarrow развитый хаотический режим, характеризующийся широкополосным выходным излучением.

Например, при малой степени экранировки ($\Delta B = 0.2$) в случае внешнего магнитного поля $B = 20$ и безразмерного тока пучка $\alpha = 32$ система демонстрирует регулярный режим динамики. Характерные спектр и проекция фазового портрета колебаний продольной компоненты напряженности электрического поля $E_z(t)$ пространственного заряда в области ВК, соответствующие данному режиму, приведены на рис. 2, а. Из рисунка видно, что на спектре выделяется основная

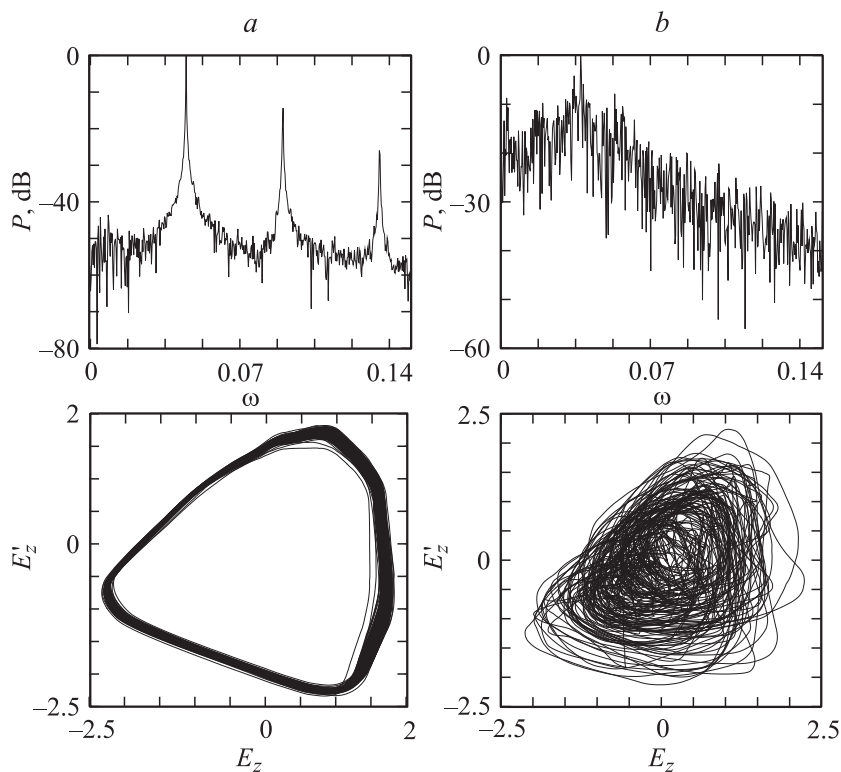


Рис. 2. Безразмерные спектры мощности и проекции фазовых портретов колебаний продольной компоненты напряженности электрического поля пространственного заряда $E_z(t)$ в системе в области ВК для следующих значений управляющих параметров: $B = 20$, $\alpha = 32$, $\Delta B = 0.2$ (*a*) и $\Delta B = 0.8$ (*b*)

спектральная гармоника, соответствующая регулярным осцилляциям ВК в системе, а фазовый портрет представляет собой предельный цикл. В случае большей степени экранировки ($\Delta B = 0.8$) при тех же управляющих параметрах ($B = 20$ и $\alpha = 32$) режим колебаний виртуального катода является развитым хаотическим. Спектр и фазовый портрет колебаний электрического поля в области ВК для данных параметров системы приведены на рис. 2, *b*. Колебания демонстрируют сложный

спектральный состав, а фазовый портрет соответствует хаотическому аттрактору.

Физические процессы, ответственные за обнаруженное поведение ВК в системе с увеличением степени экранировки ΔB , а также за характерный вид полученной карты режимов, определяются известными факторами [9–11]. Так, экранировка электронной пушки от внешнего магнитного поля обеспечивает наличие у частиц потока начального вращательного момента при его инжекции в пространство дрейфа с однородным магнитным полем, что, в свою очередь, приводит к появлению в системе долгоживущих частиц, совершающих циклотронное вращение. Такие долгоживущие частицы хаарктеризуются сложной пространственно-временной динамикой и формируют вторичные электронные структуры (сгустки) в системе. Данные структуры могут оказывать воздействие на динамику основной электронной структуры (виртуального катода) за счет общего поля пространственного заряда, возмущая и хаотизируя колебания ВК. Такое взаимодействие электронных структур в пространстве дрейфа может трактоваться как появление внутренней дополнительной обратной связи в системе с ВК, что, как известно, при определенных параметрах приводит к хаотизации автоколебаний [4,5], которая наблюдается на полученной в данной работе карте режимов (рис. 1) с увеличением экранировки ΔB . Отметим также характерную форму кривых, разделяющих различные режимы на рис. 1: с увеличением внешнего магнитного поля B величина экранировки ΔB , при которой происходит переход к более сложному режиму динамики ВК, монотонно уменьшается. Это обусловлено увеличением начального вращательного момента у потока с ростом внешнего магнитного поля при фиксированной экранировке ΔB .

Таким образом, в работе в рамках численного моделирования с помощью разработанной двумерной математической модели показано, что виртуальный катод в электронном потоке во внешнем фокусирующем магнитном поле при наличии экранировки источника электронов от магнитного поля демонстрирует различные режимы колебаний. Обнаружено, что в зависимости от величины экранировки и внешнего магнитного поля колебания ВК могут быть как регулярными, так и хаотическими. Полученные результаты необходимо учитывать при создании систем на ВК с фокусировкой пучка магнитным полем.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы“ и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-02-00255).

Список литературы

- [1] *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [2] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [3] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // РЭ. 2002. Т. 47. С. 575.
- [4] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 722.
- [5] *Hrakov A.E., Rempen I.S.* // Int. J. Electronics. 2004. V. 91. N 1. P. 1.
- [6] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Лёвин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Известия РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [7] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 12. С. 80.
- [8] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 83.
- [9] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 10. С. 119.
- [10] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 8. С. 684.
- [11] *Hrakov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A.* // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 3057.
- [12] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 13. С. 64.
- [13] *Кузелев М.В., Рухадзе А.А.* Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
- [14] *Tsimring Sh.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2007.
- [15] *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics, via computer simulation. NY: McGraw-Hill, 1985.