

10

Мощность выходного СВЧ-излучения низковольтного генератора на виртуальном катоде с внешним неоднородным магнитным полем

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

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

Поступило в Редакцию 27 октября 2010 г.

В рамках двумерной численной модели проведено исследование влияния параметров внешнего неоднородного магнитного поля на мощность генерации широкополосного СВЧ-излучения в низковольтном генераторе на виртуальном катоде. Обнаружено, что существуют оптимальные параметры генератора (конфигурация внешнего магнитного поля и ток электронного пучка), при которых СВЧ-мощность максимальна. Проанализированы физические механизмы, определяющие оптимальные параметры генератора. Установлена связь между оптимальными условиями формирования виртуального катода в пучке заряженных частиц и режимом ВЧ-генерации.

Исследование нелинейных нестационарных процессов в распределенных активных средах, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, является одной из важных задач современной сверхвысокочастотной радиофизики и электроники больших мощностей [1–3]. Данные исследования имеют несомненное фундаментальное значение, связанное с выявлением общих закономерностей нелинейной динамики пучково-плазменных систем. Одновременно весьма важным представляется и прикладное значение подобных работ, так как они позволяют предложить новые модификации мощных приборов СВЧ-диапазона, которые будут иметь новые функциональные возможности и лучшие характеристики.

Одними из активно исследуемых в последнее время приборов мощной СВЧ-электроники являются генераторы на основе интенсивных электронных потоков с виртуальным катодом (ВК) — генераторы с электронной обратной связью или низковольтные виркаторы [2,4–6], ко-

торы рассматриваются как перспективные источники СВЧ-излучения (в частности, широкополосного с шириной полосы порядка октавы и слабоизрезанным частотным спектром) для целей телекоммуникации с использованием хаотических сигналов, шумовой радиолокации, модулей нелинейных антенн, а также могут быть использованы в различных технологических процессах, например для очистки нефти и т.д. [7–10]. В настоящее время достигнуто определенное понимание принципов работы подобных устройств, проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования низковольтных виркаторов [1–6, 11–15].

В частности, в работах [6, 13–15] было обнаружено значительное влияние величины и конфигурации внешнего магнитного поля на процессы, происходящие в интенсивных электронных пучках с ВК. Однако важный вопрос о зависимости характеристик выходного СВЧ-излучения низковольтного виркатора (и в первую очередь выходной мощности излучения) от величины и конфигурации внешнего неоднородного магнитного поля остается слабоизученным. Заметим, что в низковольтных генераторах на ВК в качестве магнитной системы часто используется кольцевой магнит [1, 5, 12, 14], поэтому исследование влияния создаваемого им магнитного поля на характеристики генерации прибора с ВК является важной задачей. Таким образом, данная работа посвящена численному изучению влияния характеристик внешнего магнитного поля, создаваемого кольцевым магнитом, на мощность СВЧ-генерации в низковольтном виркаторе.

Исследуемая модель генератора с электронной обратной связью состоит из трех основных частей: источника электронов (электронной пушки); пространства дрейфа в виде отрезка цилиндрического волновода длиной L и радиусом R ; коллектора электронов отработанного пучка, а также электродинамического элемента, предназначенного для вывода СВЧ-излучения из пространства взаимодействия (см. подробнее [6, 14]).

В качестве источника электронного потока выступает электронная пушка с изолированным от магнитного поля термокатодом, формирующая аксиально-симметричный электронный поток на входе в пространство взаимодействия [16]. Сформированный сплошной моноскоростной электронный пучок с током I инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку и выводится через правую (выходную) сетку на коллектор, электроны также могут оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Обозначим внешний

радиус пучка как R_b и положим для определенности геометрический параметр электронного пучка $\sigma = R_b/R$ равным 0.5.

Для анализа выходной мощности моделировался отрезок широкополосной электродинамической системы (отрезок спирали) методом эквивалентных схем [1,17].

Вдоль оси пространства дрейфа, в котором формируется ВК, прикладывается внешнее фокусирующее неоднородное в пространстве магнитное поле, создаваемое кольцевым магнитом. Введем параметр магнитного поля B_0 , определяемый как максимальная величина поля на оси симметрии системы. При этом внешнее магнитное поле характеризуется как продольной, так и поперечной составляющими, в то время как азимутальная составляющая в силу аксиальной симметрии системы равна нулю. Расположение магнитного кольца в пространстве характеризуется координатой z_m .

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 [2,3,14]. 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, времени t (штрихом обозначены соответствующие размерные величины) [9,10,14]:

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

$$\rho' = \rho_0 \rho, \quad P' = m_e v_0 P, \quad z' = Lz, \quad t' = \frac{L}{v_0} t,$$

где $\eta_0 = e/m_e$ — удельный заряд покоящегося электрона, v_0 и ρ_0 — не зависящие от радиуса скорость и плотность электронного потока на входе в систему.

В цилиндрических координатах в безразмерных величинах уравнение движения для каждой заряженной частицы 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 $\gamma = \sqrt{1 + P^2/m_0^2c^2}$ — релятивистский фактор частицы (m_0 — масса покоя электрона).

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

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

где $\alpha = \omega_p L/v_0$ — безразмерный управляющий параметр, пропорциональный току пучка как $\alpha \sim \sqrt{I}$, ω_p — плазменная частота инжектируемого потока. Для нахождения плотности пространственного заряда использовалась снижающая сеточный шум процедура билинейного взвешивания крупных частиц на двумерной сетке (PIC-метод); уравнение Пуассона (2) решалось сеточным методом (неявным методом Либмана) [3].

Исследуем численно влияние параметров генератора на мощность его выходного излучения. На рис. 1 приведена зависимость нормированной интегральной выходной мощности излучения P генератора от нормированной координаты магнитного кольца z_m/L и от безразмерного параметра тока пучка α . Характерной особенностью данной зависимости является наличие экстремальной точки — максимума выходной мощности при $z_m/L \sim 0.2$ и $\alpha \sim 10$. Выходная мощность в данной точке превышает среднюю мощность при других значениях z_m и α приблизительно в 3–5 раз.

Рассмотрим физические процессы, которые ответственны за существование обнаруженного максимума мощности генерации. Отметим, что в области параметров, отвечающих максимальной выходной мощности, режим генерации прибора оказывается близким к периодическому (см. рис. 2, *a*, на котором приведен спектр мощности выходного поля при данных параметрах). При $z_m/L \sim 0.2$ и малых токах ($\alpha < 10$), когда выходная мощность уменьшается, режим генерации становится хаотическим — спектр мощности сильно зашумляется (рис. 2, *b*). Итак,

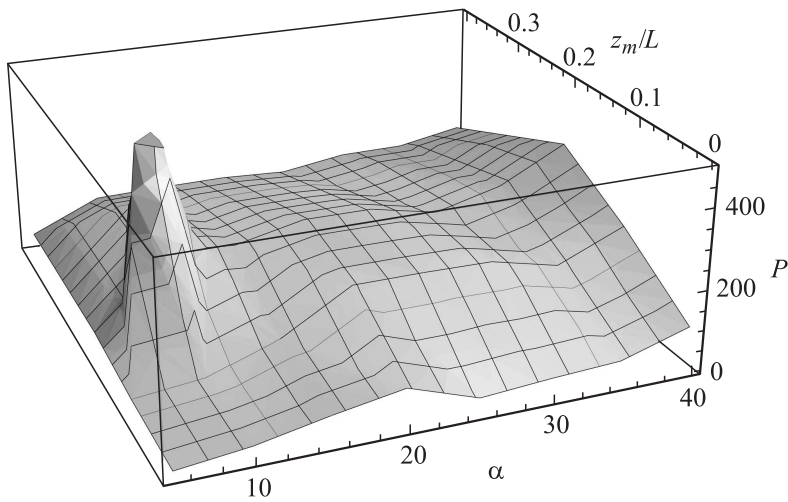


Рис. 1. Зависимость безразмерной выходной мощности излучения P генератора от электронной обратной связи с одним кольцевым магнитом от нормированной координаты магнитного кольца z_m/L и от безразмерного параметра тока пучка α при $B_0 = 40$.

уменьшение выходной мощности генератора при отстройке тока пучка от оптимального значения в сторону меньших значений связано с хаотизацией выходного излучения, а также, одновременно, с уменьшением тока инжектируемого потока, т.е. с приближением к стартовому току прибора.

При отстройке положения магнитного кольца от значения $z_m/L \sim 0.2$ также наблюдается достаточно резкое уменьшение выходной мощности (рис. 1). Физические причины существования оптимального положения магнитного кольца, при котором выходная мощность излучения прибора максимальна, связаны с сильной неоднородностью магнитного поля кольца в пространстве взаимодействия [14]. Существует такое оптимальное расположение магнитного кольца, при котором поперечная динамика электронного потока в области ВК, обусловленная силами кулоновского расталкивания, существенно ограничена сильным магнитным полем. Плотность пространственного заряда в области ВК в данном случае достаточно велика и значительно превосходит плотность ВК при таких положениях магнитного кольца, когда создаваемое им

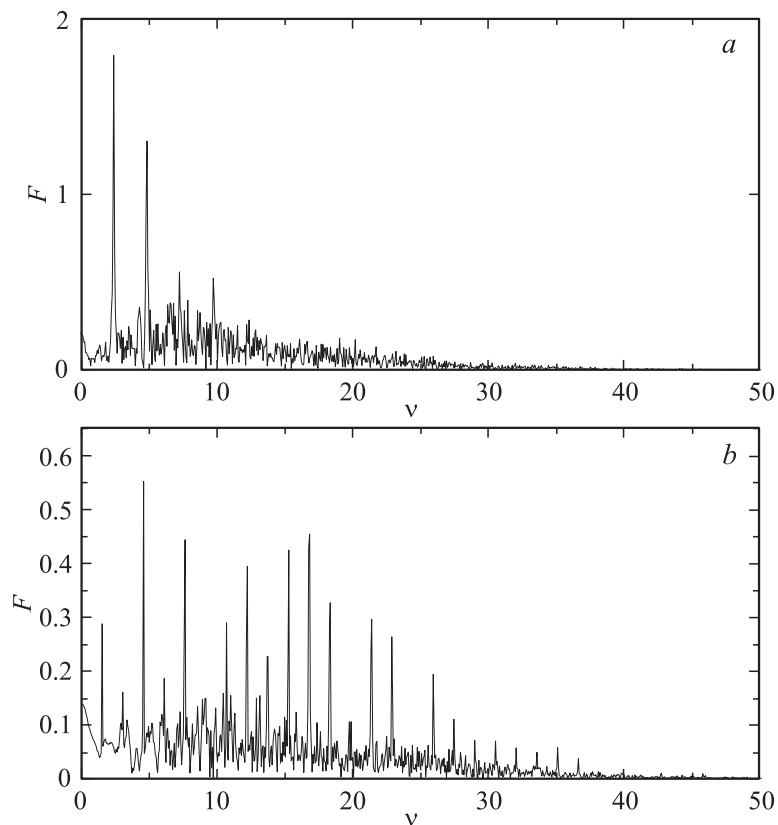


Рис. 2. Спектры мощности выходного поля, регистрируемого отрезком спиральной электродинамической системы при $\alpha = 9$ (a) и $\alpha = 7$ (b). Параметры системы: $z_m/L = 0.2$, $B_0 = 40$.

магнитное поле в области ВК имеет меньшую величину и слабо ограничивает поперечную динамику электронов в системе. Мощность выходного излучения генератора пропорциональна плотности пространственного заряда формирующегося электронного сгустка (ВК), возбуждающего электродинамическую систему, поэтому в данном случае мощность также будет достигать высоких значений. При отстройке положения магнитного кольца от оптимального значения мощность выходного излучения уменьшается за счет уменьшения плотности

сгустка электронов в области ВК, одновременно наблюдается хаотизация выходного излучения, которая вызвана образованием вторичных электронных сгустков в магнитной ловушке кольца (см. подробнее [14]). При $z_m/L \sim 0.2$ генератор демонстрирует режим регулярной генерации при любых значениях B_0 и хаарктеризуется максимальной выходной мощностью.

С ростом тока пучка при $\alpha > 10$ также наблюдается резкое уменьшение выходной мощности генератора (рис. 1). Данный эффект связан с разрушающим действием возрастающих вместе с током пучка сил кулоновского расталкивания на главную структуру электронного потока — ВК. С другой стороны, с увеличением тока инжектируемого пучка растет его энергия, поэтому при $\alpha > 30$ вновь начинается рост выходной мощности генерации прибора (рис. 1). При $z_m/L \sim 0.2$ и $\alpha \sim 25$ на рис. 1 наблюдается локальный максимум выходной мощности, обусловленный компенсирующим действием двух описанных выше эффектов при изменении тока пучка.

Таким образом, в работе в рамках двумерного численного моделирования показано, что параметры генератора с электронной обратной связью, в особенности величина и конфигурация внешнего неоднородного магнитного поля, сильно влияют на характеристики его выходного излучения. Обнаружена характерная зависимость мощности выходного СВЧ-излучения низковольтного виркатора от положения кольцевого магнитного, создающего в системе фокусирующее неоднородное магнитное поле, а также от тока электронного пучка. Главной особенностью данной зависимости является наличие хорошо выраженного максимума выходной мощности при оптимальных значениях параметров генератора. Важным результатом стал вывод о том, что достижение максимальной выходной мощности и режимов широкополосной хаотической генерации является взаимоисключающим требованием и не может быть реализовано одновременно в низковольтном виркаторе. Расширение полосы частот в режиме генерации хаотических колебаний приводит к одновременному уменьшению выходной мощности СВЧ-излучения виртуального катода.

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

Список литературы

- [1] *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
- [2] *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [3] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [4] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Известия РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [5] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
- [6] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 10. С. 119.
- [7] *Meadows B.K., Heath T.H., Neff J.D. et al.* // Proceedings IEEE. 2002. V. 90. N 5. С. 882.
- [8] *Dmitriev B.S., Hramov A.E., Koronovskii A.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. N 7. P. 074101.
- [9] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [10] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В.* // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 28.
- [11] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 83.
- [12] *Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 53.
- [13] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 8. С. 684.
- [14] *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A.* // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 3057.
- [15] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 13. С. 64.
- [16] *Tsimring Sh.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2007.
- [17] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 71.