

УДК 533.9

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ГЕНЕРАТОРА НА ВИРТУАЛЬНОМ КАТОДЕ С МОДУЛЯЦИЕЙ ЭМИССИИ

© 2013 г. С. А. Куркин¹, А. А. Короновский^{1,2}, А. Е. Храмов^{1,2}, А. А. Кураев³, С. В. Колосов³

E-mail: kurkinsa@gmail.com; hramovae@gmail.com

Проведено численное исследование низковольтного виркатора с управляемой эмиссией с термокатода для случая, когда внешний сигнал воздействует на пучок в области его формирования, приводя к модуляции эмиссии. Обнаружено сильное влияние параметров модуляции эмиссии на характеристики осцилляций пучка с виртуальным катодом. Показано, что при настройке частоты модуляции на одну из гармоник свободных осцилляций виртуального катода в выходном спектре происходит существенное увеличение мощности высших гармоник частоты свободных колебаний виртуального катода.

DOI: 10.7868/S0367676513120156

ВВЕДЕНИЕ

В современной электронике больших мощностей актуальна задача повышения эффективности, мощности и частоты генерации генератора на виртуальном катоде (виркатора) как перспективного источника мощного СВЧ-излучения [1, 2], а также разработка методов управления характеристиками его генерации для применения в различных приложениях (зондирование атмосферы, задачи электромагнитной совместимости, технологические процессы, дальняя импульсная радиолокация и т.д.). Ранние исследования виркаторов с внешними резонансными системами показали [3–5], что одним из эффективных подходов может быть использование в генераторах на виртуальном катоде (ВК) модуляции электронного потока как по скорости [3, 4, 6–8], так и по плотности [5]. В последнем случае удобно использовать источник электронов с модуляцией эмиссии, что позволяет реализовать глубокую модуляцию по плотности формируемого пучка небольшим по мощности внешним сигналом. В данной работе были проведены исследования низковольтного виркатора [8–11] с управляемой эмиссией с термокатода, когда внешний сигнал воздействует на пучок в области его формирования, приводя к модуляции эмиссии.

ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Исследуемая система представляла собой пространство дрейфа электронного потока в виде замкнутого отрезка цилиндрического волновода длиной L и радиусом R , закрытого с обоих торцов сеточными электродами, прозрачными для электронного потока. Аксиально-симметричный монорезонансный промодулированный по плотности сплошной электронный пучок радиуса R_b с током I инжектируется в пространство дрейфа через левую и выводится через правую сетки, а также может оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Вдоль оси системы прикладывается внешнее однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией B . Численное моделирование нестационарных процессов проводили методом крупных частиц с использованием программы, разработанной для исследования генераторов с электронной обратной связью [12, 13], основанной на решении самосогласованной системы уравнений движения крупных частиц и уравнения Пуассона в цилиндрической геометрии в двумерном приближении. Конкретные геометрические параметры, используемые в данной работе, таковы: $L = 50$ мм, $R = 12.5$ мм, $R_b = 6.25$ мм, а ускоряющее напряжение составляет 2.1 кВ, что соответствует известным экспериментальным макетам низковольтного виркатора [9–11].

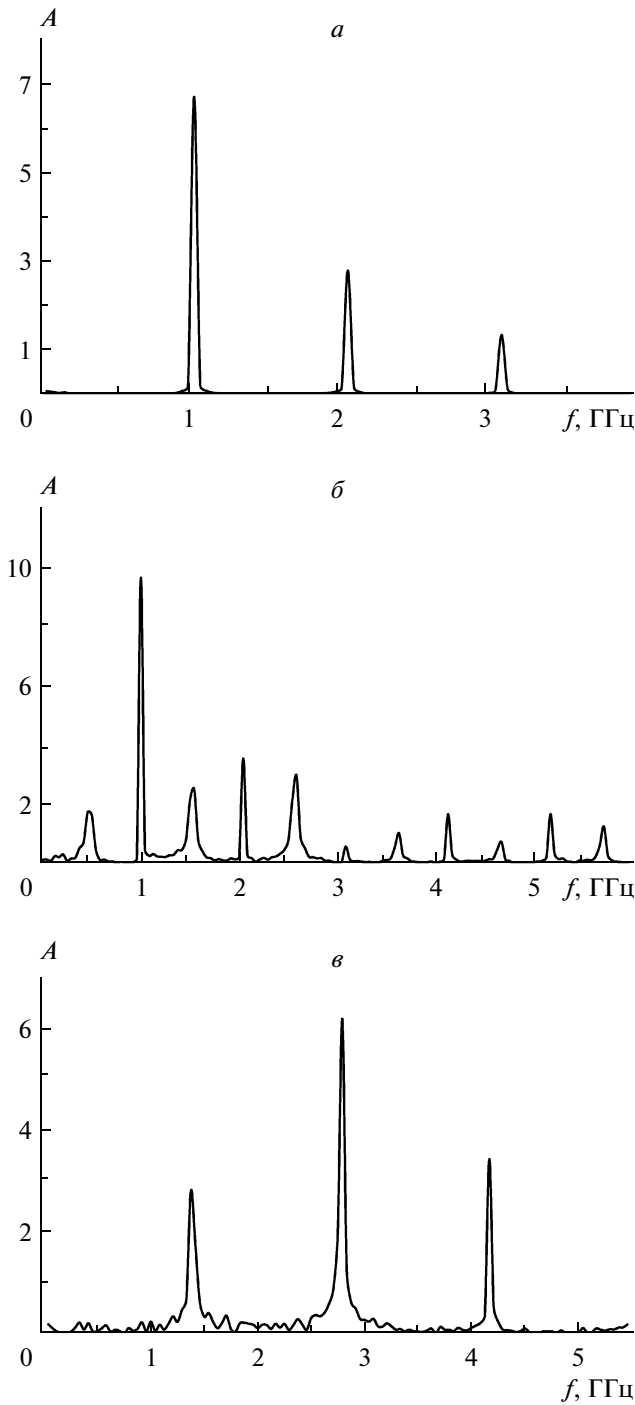
Модуляцию по плотности пучка проводили за счет модуляции внешним гармоническим сигналом ускоряющего напряжения в электронной пушке с термокатодом. Основные управляющие параметры в виркаторной системе с модуляцией эмиссии были следующие: параметр надкритичности пучка по току A , равный отношению тока пучка к критическому значению, при котором в

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

³ Белорусский университет информатики и радиоэлектроники, Минск.

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ



Спектры колебаний электрического поля в области ВК при $A = 2.1$, $D = 100\%$, $\omega = 1.03$ ГГц (*а*); $A = 6.3$, $D = 100\%$, $\omega = 0.51$ ГГц (*б*) и $A = 4.9$, $D = 80\%$, $\omega = 1.38$ ГГц (*в*).

электронном потоке образуется ВК; глубина модуляции плотности тока D , измеряемая в процентах, равная отношению разности максимальной и минимальной величин плотности тока к максимальной величине плотности тока пучка и частота модуляции ω .

Численное моделирование показало, что при глубокой модуляции $D > 80\%$ плотности тока пучка при относительно невысоких значениях параметра надкритичности $1 < A < 3$ спектральный состав выходного излучения определяется частотой модулирующего гармонического сигнала и содержит 1-ю, 2-ю и 3-ю гармоники данной частоты. Например, при $A = 2.1$, что соответствует току пучка $I = 11$ А, $D = 100\%$ и $\omega = 1.03$ ГГц (см. рисунок *а*) в выходном спектре излучения присутствуют составляющие на частотах около 1, 2 и 3 ГГц, причем соотношение их амплитуд следующее: 6 : 3 : 1; частота свободных осцилляций ВК в данном случае равна 1.4 ГГц. Также в спектре при определенных параметрах могут присутствовать комбинационные составляющие гармоник частоты модулирующего сигнала и гармоник, соответствующих свободным осцилляциям ВК в системе без модуляции, однако, их амплитуда оказывается незначительной. Таким образом, в случае глубокой модуляции ($D > 80\%$) плотности тока при относительно невысоких значениях параметра надкритичности происходит разрушение механизмов формирования ВК. Электронный поток начинает инжектироваться в систему в виде последовательности электронных сгустков, частота следования и плотность которых определяются параметрами модулирующего сигнала. Это приводит к снижению плотности заряда в пространстве взаимодействия, поэтому ВК не успевает сформироваться в течение одного импульса тока. Данный эффект наиболее ярко выражен при больших периодах модулирующего гармонического сигнала. В этом случае за время, пока модулирующий сигнал находится в отрицательной фазе, когда инжекция новых электронов в систему оказывается запертой, пространственный заряд практически полностью выходит из системы, так что необходимая для формирования ВК критическая плотность пространственного заряда не достигается. Одновременно промодулированный электронный поток в виде последовательности сгустков эффективно возбуждает на частоте модуляции и ее гармоник электродинамическую систему генератора, выполненную, например, в виде спиральной замедляющей системы. Другими словами, внешний модулирующий сигнал “навязывает” свою динамику и разрушает механизм формирования ВК, что отражается на спектре выходного излучения.

Виртуальный катод вновь начинает формироваться в системе с глубокой модуляцией эмиссии при дальнейшем увеличении надкритичности. Так, при $A > 3$ и $D = 100\%$ вид выходного спектра качественно трансформируется, по сравнению с описанным выше случаем меньшей надкритичности (см. рисунок *б*). В спектре наряду с составляющими, соответствующими частоте модуляции и ее гармоникам, начинают проявляться гармони-

ки свободных осцилляций ВК, а также комбинационные составляющие данных частот, причем в большинстве случаев амплитуда последних оказывается максимальной в спектре. Это свидетельствует о сильно нелинейном режиме работы системы. Так, при $A = 6.4$, $D = 100\%$ и $\omega = 0.51$ ГГц в спектре выходного излучения (рисунок б) присутствуют следующие составляющие: составляющая 0.5 ГГц с безразмерной амплитудой 2, соответствующая частоте модуляции внешним сигналом; составляющая 1.5 ГГц с безразмерной амплитудой 2.5, соответствующая частоте свободных осцилляций ВК; составляющая на частоте 1 ГГц с амплитудой 9.7, которая является комбинационной составляющей частоты модуляции и частоты осцилляций ВК и равняется их полусумме. Также в выходном спектре содержится ее вторая гармоника 2 ГГц с амплитудой 3.6. Наибольшая энергия выходного сигнала (порядка 50%) сосредоточена в комбинационной спектральной составляющей на частоте 1 ГГц, остальная часть энергии практически равномерно распределена между другими спектральными компонентами. Таким образом, в виркаторной системе с глубокой модуляцией эмиссии и высокой надкритичностью происходит нелинейное взаимодействие двух процессов: колебаний ВК, который вновь начинает формироваться в данной системе с модуляцией благодаря увеличившейся надкритичности (данные колебания пропорциональны плазменной частоте пучка), и динамики электронных сгустков с частотой повторения, определяемой частотой модулируемого напряжения. Это приводит к появлению интенсивных комбинационных составляющих в спектре выходного излучения системы с ВК.

Отметим отдельно ситуацию, когда модуляция эмиссии при $D > 80\%$ производится с частотой, равной частоте свободных колебаний ВК. В данном случае спектр выходного сигнала существенно упрощается и содержит 1-ю, 2-ю и 3-ю гармоники данной частоты, в которых сосредоточено более 90% энергии. С физической точки зрения, данный результат понятен, так как в рассматриваемом случае электронные сгустки промодулированного электронного потока приходят в область ВК в одной фазе с его осцилляциями. КПД генерации в этом режиме возрастает по сравнению со случаем свободных колебаний ВК.

Рассмотрим результаты исследований виркаторной системы с модуляцией эмиссии по току при меньших значениях глубины модуляции ($50\% < D < 80\%$) и средних значениях надкритичности ($1 < A < 5$). В данном случае, когда частота модулирующего сигнала не кратна частоте свободных осцилляций ВК, спектр выходного излучения оказывается подобным рассмотренному выше случаю для высоких надкритичностей и большой глубины модуляции (рисунок б) и содержит гармоники модулирующего сигнала, колебаний

ВК, а также их комбинационные составляющие. Наиболее интересен случай, когда частота модулирующего сигнала оказывается настроенной на одну из гармоник свободных осцилляций ВК. При таких параметрах в выходном спектре происходит значительное увеличение амплитуд высших гармоник частоты колебаний ВК при уменьшении амплитуды первой гармоники. Так, при $A = 4.9$, $D = 80\%$ и $\omega = 1.38$ ГГц (см. рисунок в), что соответствует частоте свободных осцилляций ВК, амплитуда 3-й гармоники на частоте 4.14 ГГц в спектре выходного излучения увеличивается в 2 раза, 2-й – практически не изменяется, а 1-й – уменьшается приблизительно в 2 раза по сравнению со случаем отсутствия модуляции. Таким образом, происходит перекачка энергии колебаний от низкочастотных гармоник к высокочастотным. При настройке частоты модуляции на более высокие гармоники колебаний ВК можно получить увеличение мощности еще более высокочастотных спектральных составляющих, частоты которых кратны частоте осцилляций ВК. Данный режим работы виркатора с модуляцией эмиссии весьма интересен, когда необходимо многократное увеличение частоты генерации прибора, например при создании модификации генератора на ВК – виркатора-умножителя частоты.

С физической точки зрения, начальная предмодуляция электронного потока на частоте, кратной частоте свободных осцилляций ВК, способствует его более эффективному формированию, так как новые “порции” пространственного заряда в виде электронных сгустков приходят в область ВК, когда последний находится в фазе накопления заряда. Следовательно, группировка пучка в области ВК значительно улучшается и соответствующие гармоники колебаний пространственного заряда в области ВК резко возрастают, что соответствует лучшей группировкой потока. Уменьшение глубины модуляции позволяет инжектировать в систему ток, достаточный для формирования и поддержания ВК. Известно, что ВК демонстрирует сложные колебания релаксационного типа со спектром, богатым высшими гармониками [7, 14], поэтому модуляция потока на одной частоте, кратной свободным колебаниям ВК, приводит к увеличению амплитуды другой гармоники данной частоты в выходном спектре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено сильное влияние параметров модуляции эмиссии в виркаторе на характеристики осцилляций пучка с виртуальным катодом. Показано, что при настройке частоты модуляции на одну из гармоник свободных осцилляций ВК в выходном спектре происходит существенное увеличение мощности высших гармоник частоты свободных колебаний ВК. Данный режим работы виркатора с

модуляцией эмиссии перспективен для многократного увеличения частоты генерации при создании модификации генератора на ВК — виркатора-умножителя частоты.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашения 14.В37.21.1171, 14.В37.21.0903), Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых — кандидатов (МК-818.2013.2) и докторов (МД-345.2013.2) наук, ведущих научных школ (проект НШ-1430.2012.2), РФФИ (проекты № 12-02-31102, 12-02-33071, 11-02-00047 и 12-02-00345).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dubinov A.E., Selemir V.D.* // J. Commun. Technol. Electron. 2002. V. 47. № 6. P. 575.
2. *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. Taylor and Francis: CRC Press, 2007.
3. *Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е.* // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 5. С. 588.
4. *Jiang W., Shimada N., Prasad S.D., Yatsui K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. № 1. P. 54.
5. *Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др.* // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
6. *Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физическая. 2005. Т. 69. № 12. С. 1736; *Kalinin Yu.A., Rempen I.S., Khramov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2005. V. 69. № 12. P. 1936.
7. *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. № 5. С. 121.
8. *Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 12. С. 1485; *Frolov N.S., Koronovskii A.A., Khramov A.E., Kalinin Yu.A., Starodubov A.B.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2012. V. 76. № 12. P. 1329.
9. *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 3. С. 39.
10. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724; *Egorov E.N., Kalinin Yu.A., Levin Yu.I., Trubetskov D.I., Khramov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2005. V. 69. № 12. P. 1921.
11. *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
12. *Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др.* // Мат. моделирование. 2011. Т. 23. С. 3.
13. *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics, via computer simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.
14. *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 8. С. 684.