

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ГЕНЕРАТОРА НА ВИРТУАЛЬНОМ КАТОДЕ С МОДУЛЯЦИЕЙ ЭМИССИИ

С.А. Куркин¹, А.А. Короновский^{1,2}, А.Е. Руннова², А.Е. Храмов^{1,2}¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,²Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

KurkinSA@gmail.com, hramovae@gmail.com

В современной электронике больших мощностей актуальной задачей является повышение 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 тут может являться использование в генераторах на виртуальном катоде (ВК) источников электронов с модуляцией эмиссии (модуляцией по плотности формируемого пучка). В данной работе были проведены численные исследования низковольтного виркатора с управляемой эмиссией с термокатода, когда внешний сигнал воздействует на пучок в области его формирования, приводя к модуляции эмиссии.

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 моноскоростной 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 проводилось методом крупных частиц с использованием программы, разработанной для исследования генераторов с электронной обратной связью [6, 7], 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, равны: $L=50$ мм, $R=12.5$ мм, $R_b=6.25$ мм, а ускоряющее напряжение составляет 2.1 кВ.

Модуляция плотности инжектируемого в систему тока пучка производилась путем модуляции внешним гармоническим сигналом ускоряющего напряжения в электронной пушке. Основные управляющие параметры в виркаторной системе с модуляцией эмиссии были следующие: пара-

метр надкритичности пучка по току A , равный отношению безразмерного параметра тока пучка к критическому значению данного параметра, при котором 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 .

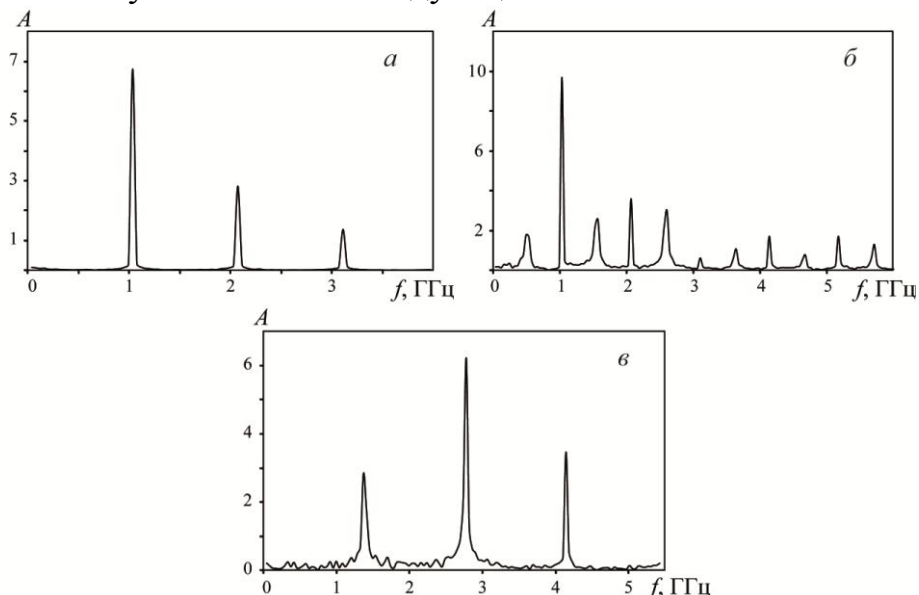


Рис. 1. Спектры колебаний электрического поля в области ВК при $A=2.1$, $D=100\%$, $\omega=1.03$ ГГц (*a*); $A=6.3$, $D=100\%$, $\omega=0.51$ ГГц (*б*) и $A=4.9$, $D=80\%$, $\omega=1.38$ ГГц (*в*)

Было получено, что при введении в систему глубокой модуляции ($D > 80\%$) по току 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. рис. 1а), в выходном спектре излучения присутствуют составляющие на частотах около 1 ГГц, 2 ГГц 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, при введении в систему глубокой модуляции ($D > 80\%$) по току при относительно невысоких значениях параметра надкритичности происходит разрушение механизмов формирования ВК.

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. рис 1б). В спектре, наряду с составляющими, соответствующими

щими частоте модуляции и её гармоникам, начинают проявляться гармоники 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.

Наиболее интересным является случай, когда частота модулирующего сигнала оказывается настроенной на одну из гармоник свободных осцилляций ВК, а глубина модуляции принимает меньшие значения ($50\% < D < 80\%$). 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. рис. 1в), что соответствует частоте первой гармоники 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 из низкочастотных гармоник в высокочастотные. Данный режим работы виркатора с модуляцией эмиссии является весьма интересным, когда необходимо многократное увеличение частоты генерации прибора, например, при создании модификации генератора на ВК – виркатора-умножителя частоты

Работа поддержана РФФИ (проекты № 12-02-00345, 11-02-00047 и 12-02-33071) и Президентской программой поддержки молодых российских ученых (проекты МД-345.2013.2 и МК-818.2013.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dubinov A.E., Selemir V.D. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2002. V. 47. No 6. P. 575.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. “High Power Microwaves” CRC Press, Taylor and Francis. 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. No 1. P. 54.
5. Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
6. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др. // Математическое моделирование. 2011. Т.23. С.3.
7. Birdsall C.K., Langdon A.B. “Plasma physics, via computer simulation” NY: McGraw-Hill, 1985.