

09

Сверхширокополосные микроволновые генераторы с электронной обратной связью

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Л.Н. Волкова

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: StarodubovAV@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 3 августа 2009 г.

Экспериментально установлено, что такие генераторы, как низковольтные виркаторы с электронной обратной связью, обладают сверхширокой полосой генерации (4 и более октавы). Минимальная частота колебаний составляет порядка 50 MHz, а максимальная 3–3.5 GHz. Установлено, что низкочастотная часть спектра обусловлена колебаниями положительных ионов в пространстве взаимодействия генератора.

В настоящее время потребность в источниках широкополосного хаотического излучения обусловлена не только классическими задачами радиоэлектронной борьбы [1], но и перспективными способами передачи информации, где в качестве носителей информации могут использоваться хаотические сигналы [2]. Для генерации подобных сигналов необходимы перестраиваемые по частоте и мощности генераторы хаотических сигналов. В настоящее время известны [3] генераторы хаотических колебаний, в которых используется тормозящее электрическое поле для создания сгустков (уплотнений плотности тока) в турбулизированном электронном пучке. Такие приборы названы низковольтными виркаторами с электронной обратной связью [3].

Представляет интерес исследование полосы генерируемых частот такими устройствами и ее зависимости от управляющих параметров. На рис. 1 приведен эскиз макета низковольтного виркатора с электронной обратной связью. Одним из основных элементов исследования является коаксиальный высокочастотный (ВЧ) зонд (рис. 1), состоящий из трубки диаметром 1–15 mm и центрального проводника, изолированного от трубки. Зонд имеет два отверстия: поперечное и продольное диаметром 20–25 μm . Зонд вводится в пространство между спиралью и электронным пучком и с помощью координатной системы

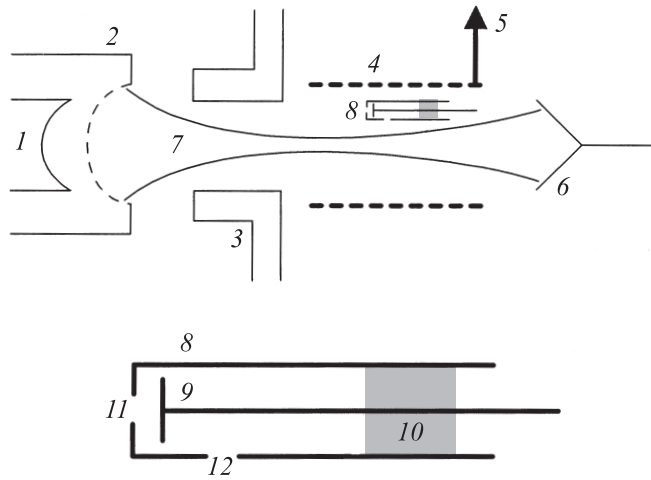


Рис. 1. Эскиз макета низковольтного виркатора с электронной обратной связью: 1 — катод, 2 — управляющая сетка, 3 — анод, 4 — отрезок спирали, 5 — вывод энергии, 6 — коллектор, 7 — электронный пучок, 8 — зондовое устройство, 9 — центральный проводник ВЧ-зонда, 10 — изолятор, 11 — отверстие для регистрации продольного движения электронов, 12 — отверстие для регистрации поперечного движения электронов.

перемещается в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1). Исследования проводились с помощью разборной вакуумной установки при непрерывной откачке [4] в импульсном режиме при длительности импульса $5\text{--}50\ \mu\text{s}$, ускоряющем напряжении $1500\text{--}2000\ \text{V}$ и токе пучка $150\text{--}200\ \text{mA}$. Поперечное отверстие зонда предназначено для регистрации электронов, имеющих в основном продольную составляющую скорости V_z , а продольное — для электронов, имеющих в основном поперечную составляющую скорости V_n .

На рис. 2 приведены распределения плотности тока пучка вдоль продольной оси Z при разных значениях торможения параметра электронного пучка $K = 1 - \frac{U_c}{U_0}$, где U_c — напряжение на коллекторе, U_0 — ускоряющее напряжение. При малых значениях параметра торможения ($K = 0.3$) наблюдается одно уплотнение плотности тока, которое состоит из электронов, имеющих значительную радиальную скорость

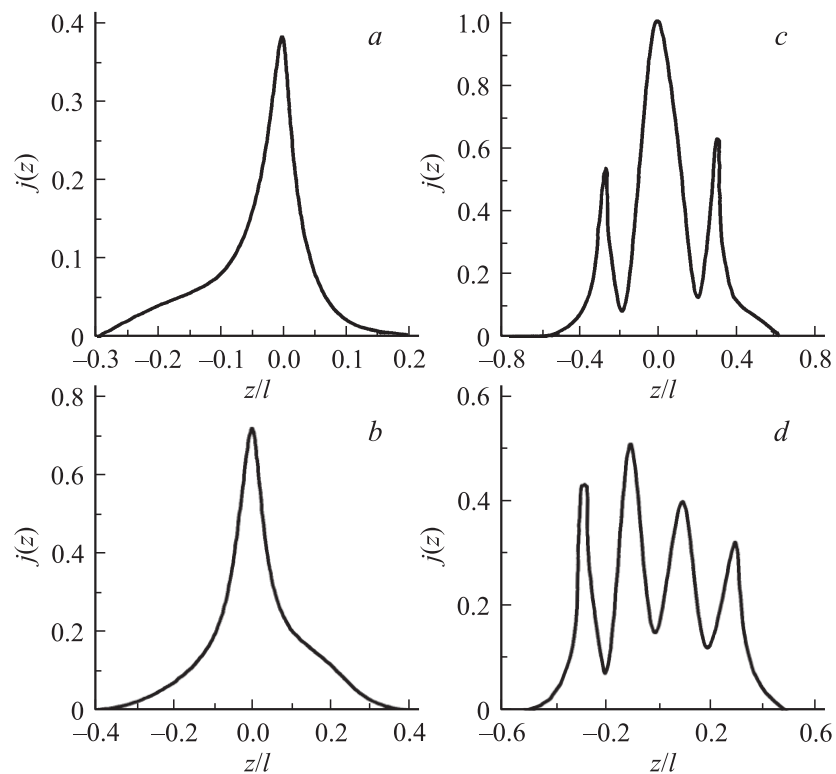


Рис. 2. Распределения плотности тока пучка вдоль продольной оси Z (l — расстояние анод-коллектор) при разных значениях тормозящего параметра K : a — $K = 0.3$, b — $K = 0.35$, c — $K = 0.6$, d — $K = 0.8$.

и минимальную продольную скорость. При больших значениях K распределение плотности тока становится многогорбым, при этом образуется несколько уплотнений. При $K = 0.6$ наблюдается наибольшее количество сгустков плотности тока. При $K = 0.8$ количество сгустков уменьшается и они перемещаются ко входу пространства взаимодействия. Одновременно было проведено детальное исследование спектров мощности генерируемых сигналов при различных величинах тормозящего потенциала. Основными инструментами исследования

выступали цифровые анализаторы спектра E4402B/E4408B ESA-E/L Series Spectrum Analyzers Agilent Technologies. Исследование спектров мощности генерируемых колебаний при различных значениях величины параметра торможения K показало, что при $K = 0.2$ вследствие наличия небольшого количества сгустков (рис. 2, *a*) наблюдается генерация узкого спектра с максимальной частотой генерации до 300 МГц. По мере увеличения параметра K до 0.6 возрастает количество сгустков плотности тока (рис. 2, *c*) и, следовательно, возрастает частота колебаний, при этом существенно расширяется спектр генерируемых частот. Следует отметить, что полоса генерируемых частот составляет 4–5 октав при интегральной мощности 200 мВт–1 Вт.

Особенно обращает на себя внимание область генерации длинноволновых колебаний в этом устройстве. Низковольтные виркаторы, в которых используется тормозящее электростатическое поле, представляют собой устройства с распределенным виртуальным катодом, который состоит из сгустков плотности пространственного заряда. Вблизи таких сгустков происходит наиболее интенсивная ионизация газа в силу того, что здесь скорость электронов мала, а плотность электронов многократно превышает плотность электронов вблизи плоскости катода. Особенностью этой схемы является тот факт, что весь объем пространства взаимодействия занимают электроны (первичные, отраженные, вторичные, образованные в результате ионизации). Все это приводит к тому, что возрастает вероятность ионизации молекул остаточного газа и, следовательно, образуется большое число положительных ионов. Конструкция виркатора сходна с многоступенчатым коллектором лампы бегущей волны. При относительно больших длительностях модулирующего импульса возникают ионные колебания (релаксационные, плазменные), а также колебания медленных электронов. Частота этих колебаний может достигать десятков и сотен МГц [5–7]. Таким образом, низкочастотные ионные колебания модулируют колебания распределенных виртуальных катодов и являются источником длинноволновых колебаний в спектре частот. При уменьшении длительности импульса до 100 нс влияние таких колебаний на процессы виркатора становится незначительным.

На рис. 3 приведены зависимости интегральной мощности (*c*), максимальной (*b*) и минимальной (*a*) частоты колебаний от параметра торможения. Видно, что при $T = 50 \mu\text{s}$ низкочастотные колебания начинаются даже при практически $K = 0.0$ (торможение практически отсутствует), в то время как при $T = 5 \mu\text{s}$ (за это время ионы не успевают накопиться в объеме) минимальная частота регистрируется

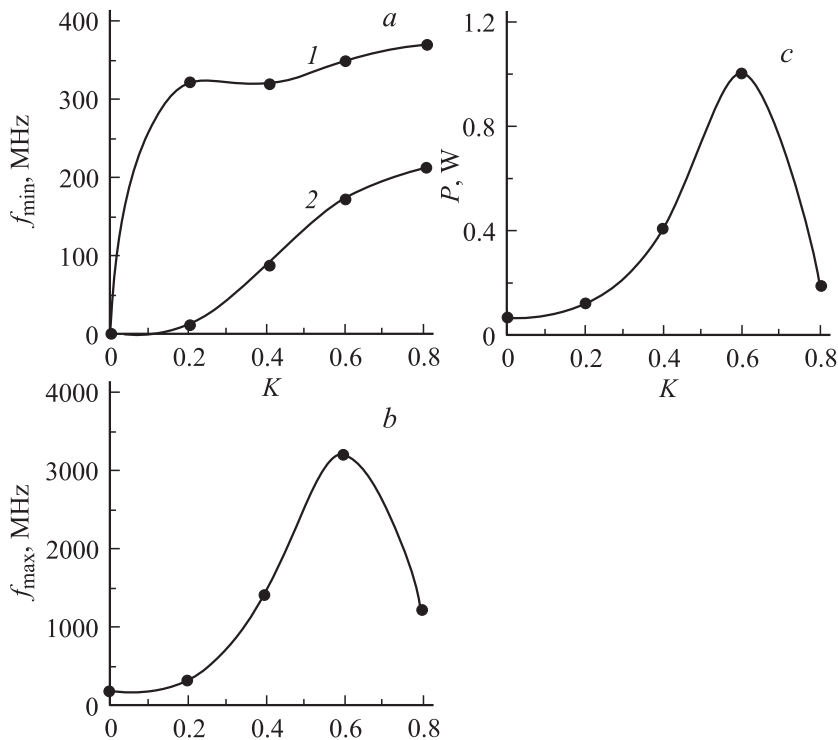


Рис. 3. Зависимости минимальной частоты колебаний (a), максимальной частоты колебаний (b) и интегральной мощности (c) от параметра торможения K . 1 — длительность импульса $T = 50 \mu s$, 2 — $T = 5 \mu s$.

с $K = 0.2$, когда начинаются колебания, связанные с образованием сгустков плотности тока.

Таким образом, низковольтный виркатор с электронной обратной связью является перспективным сверхширокополосным генератором ВЧ- и СВЧ-диапазона с полосой частот более 4 октав при интегральной мощности порядка 1 W. В качестве областей применения исследуемого генератора сверхширокополосных хаотических сигналов могут быть информационно-телекоммуникационные системы (методы передачи информации, основанные на использовании свойств динамического хаоса),

системы радиопротиводействия и радиоподавления. Также подобные сигналы могут быть использованы в технологических процессах по предварительной очистке нефти (обезвоживание) и нефтепродуктов с целью уменьшения вязкости высоковязких сортов нефти [8]. Решение задачи по уменьшению вязкости нефти будет способствовать значительному энергосбережению при ее транспортировке до нефтеперерабатывающих заводов доставкой и дистанционным высвобождением капсулированного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-02-00102), президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-355.2008.2) и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (РНП 2.1.1/235), а также CRDF (REC-006).

Список литературы

- [1] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [2] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [3] *Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 53–59.
- [4] *Калинин Ю.А., Ессин А.Д.* // Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ электронике. Ч. 1. Саратов: Изд-во СГУ, 1991. С. 212.
- [5] *Юрьев В.И., Ильин А.А.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. Вып. 5. С. 106–118.
- [6] *Балакирев В.А., Цотт Л.Э.* // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 8. С. 1691.
- [7] *Филатов Р.А., Калинин Ю.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 61–67.
- [8] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В.* // Труды XII Всерос. школы-семинара „Физика и применение микроволн“. М.: МГУ, 2009. Ч. 4. С. 48–51.