

07;11

Сверхширокополосный генератор хаотических колебаний микроволнового диапазона с дополнительным нелинейным контуром

© Н.А. Максимов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал), Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: maksna49@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2019 г.

В окончательной редакции 20 августа 2019 г.

Принято к публикации 5 сентября 2019 г.

Показана возможность генерации сверхширокополосных хаотических колебаний в диапазоне частот до 60 GHz с использованием биполярного SiGe-гетеротранзистора. Верхняя частота диапазона определяется граничной частотой активного элемента генератора. Такая возможность появляется с введением в структуру генератора дополнительного нелинейного контура, в котором могут развиваться хаотические колебания вплоть до указанной частоты. Приводятся результаты экспериментального исследования одного из вариантов генератора на сосредоточенных элементах.

Ключевые слова: сверхширокополосные хаотические колебания, нелинейный контур, спектр, биполярный SiGe-транзистор, микроволновый диапазон.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48721.17932

Развитие и рост количества радиоэлектронных устройств приводят к необходимости использования различных участков электромагнитного спектра с тенденцией продвижения в более высокочастотную его часть (вплоть до 100 GHz). Развитие коммуникационных технологий на основе сверхширокополосных хаотических сигналов, навигации, радиолокации и других задач прикладного характера требует создания источников таких сигналов с определенными требованиями для каждого из конкретных приложений [1–4]. В настоящей работе описывается подход к созданию источника хаотических колебаний с максимально возможным диапазоном генерации, характерным для гетеротранзистора BFP620F, который может быть применен и для более высокочастотных $p-n$ -структур, в том числе и на базе кремний-германиевых (SiGe) технологий различного уровня [5].

В работе [6] описаны и экспериментально исследованы классический генератор Колпитца [7] и его модифицированный вариант упрощенной структуры с одним навесным реактивным элементом. В этих генераторах в качестве активного элемента использовался SiGe-транзистор BFP620F с граничной частотой ~ 65 GHz. Показана возможность генерации в модифицированном варианте сверхширокополосных хаотических колебаний в СВЧ-диапазоне до 8 GHz с шириной полосы генерации ~ 7.4 GHz по уровню 10 dB, что значительно превышает диапазон генерации (с полосой 4.6 GHz) устройства, собранного по классической схеме Колпитца [7].

Спектр колебаний генераторов, рассмотренных в [6], можно значительно расширить, если добавить в схему пассивный нелинейный контур с использованием $p-n$ -переходов транзистора BFP620F и использовать его как выходной контур генератора.

Рассмотрим отдельно нелинейный колебательный контур. Известно [8], что при гармоническом воздействии на колебательный контур, содержащий нелинейную емкость $p-n$ -перехода, в системе возбуждаются хаотические колебания. Такая динамика характерна для нелинейного контура как в области низких частот, так и в СВЧ-диапазоне [3,9]. В качестве нелинейного элемента можно использовать варакторный диод или один из $p-n$ -переходов биполярного транзистора. В нашем случае использовался один из $p-n$ -переходов (коллектор–база) транзистора BFP620F, последовательно соединенный с индуктивностью $L = 1$ nH [3]. При воздействии на такой контур внешним гармоническим сигналом достаточной амплитуды в нем происходит возбуждение сверхширокополосных хаотических колебаний. Так, при внешнем сигнале с частотой 8 GHz и амплитудой 3 V в контуре развиваются хаотические колебания с довольно равномерным спектром от 2 до 20 GHz.

Резонансная частота контура $F_{res} = 8$ GHz задается барьерной емкостью $p-n$ -перехода при нулевом смещении на переходе и индуктивностью L , в данном случае равной 1 nH.

Развитие хаотических колебаний разной интенсивности в контуре возможно при различных частотах и амплитудах внешнего сигнала. Воздействие внешним гармоническим сигналом с частотой, близкой к резонансной частоте контура, и достаточной амплитудой вызывает развитие в контуре наиболее интенсивных широкополосных хаотических колебаний.

В основе подхода к созданию максимально сверхширокополосной автоколебательной системы с хаотическим поведением лежит замена однонаправленного воздействия на нелинейный контур сигнала

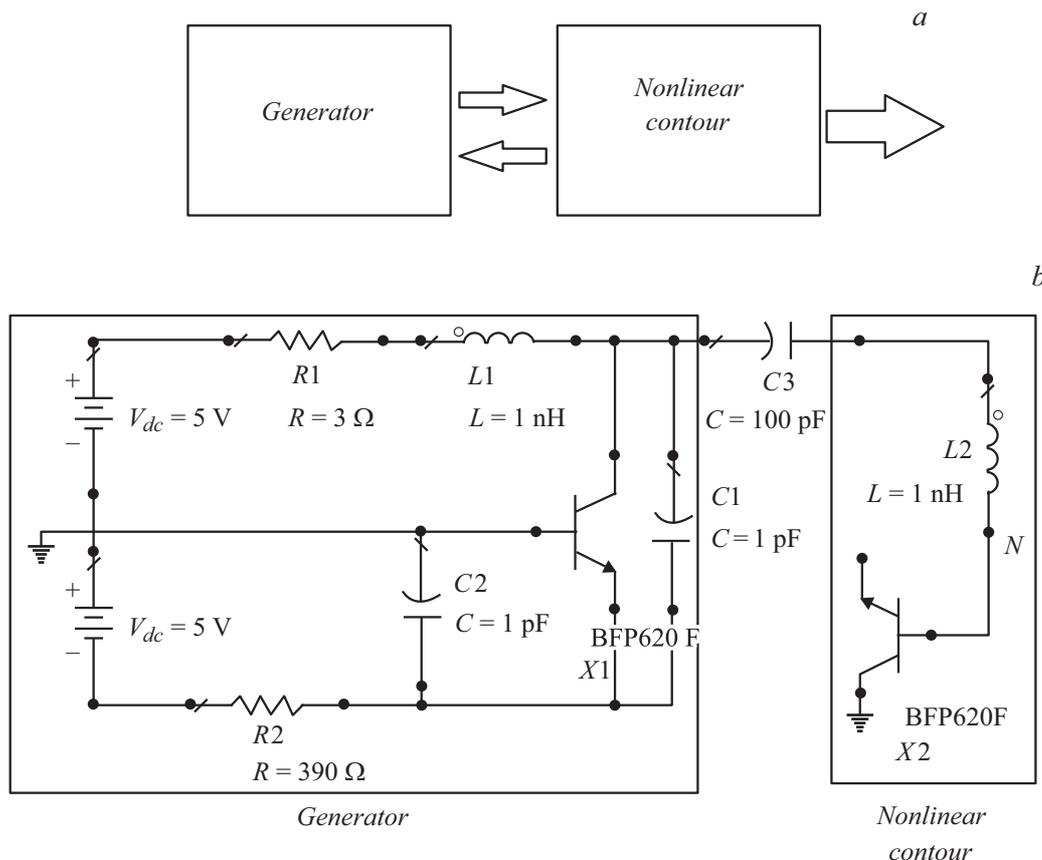


Рис. 1. *a* — общая блок-схема генератора с дополнительным нелинейным контуром; *b* — реальная схема генератора, структурно повторяющая блок-схему.

от внешнего источника самосогласованной системой генератор–нелинейный контур. Блок-схема предлагаемого генератора представлена на рис. 1, *a*.

Общая блок-схема системы состоит из генератора и взаимно связанного с ним нелинейного контура. В такой системе происходит взаимное влияние этих структур друг на друга, что приводит к развитию хаотических колебаний с полосой генерации, определяемой добротностью возбужденного нелинейного контура. В качестве генератора может использоваться источник одночастотных или многочастотных колебаний, режим генерации которого меняется в результате обмена энергией с нелинейным контуром и может переходить в хаотический. Таким образом, благодаря взаимной связи первоначальное одночастотное или многочастотное воздействие на контур переходит в воздействие хаотическим сигналом, что в свою очередь приводит к исчезновению в спектре колебаний выделенных частот и его расширению. Выходной сигнал системы снимается с нелинейного контура. Достаточным условием развития хаоса в такой системе являются сильная взаимная связь между генератором и нелинейным контуром и воздействие сигналом генератора в окрестности резонансной частоты контура.

На рис. 1, *b* приведена реальная схема, построенная по принципу блок-схемы, в которой в качестве источника

сигнала использовался генератор Колпитца на базе транзистора BFP620F, работающий в СВЧ-диапазоне. При указанных параметрах схемы на выходе этого генератора в автономном режиме наблюдался многочастотный сигнал. Нелинейный контур был построен с использованием коллекторного перехода транзистора BFP620F и индуктивности $L2 = 1$ нГн. Взаимная связь между блоком генератора и нелинейным контуром определялась величиной емкости $C3 = 100$ пФ. При схемотехническом моделировании транзистор BFP620F был представлен в виде модели Гуммеля–Пуна с учетом паразитных параметров.

Невысокая добротность нелинейного контура в режиме возбуждения и высокая граничная частота используемого p – n -перехода создают условия для существования сверхширокополосных колебаний в системе. Спектр хаотических колебаний на p – n -переходе нелинейного контура (в точке N) имеет верхнюю границу ~ 60 ГГц, которая является практически паспортной граничной частотой транзистора BFP620F (рис. 2, *a*).

Изменяя параметры генератора (в данном случае генератора Колпитца), можно влиять на характеристики выходного сигнала системы, а именно изменять неравномерность спектральной характеристики, управляя выходной мощностью по диапазону генерации.

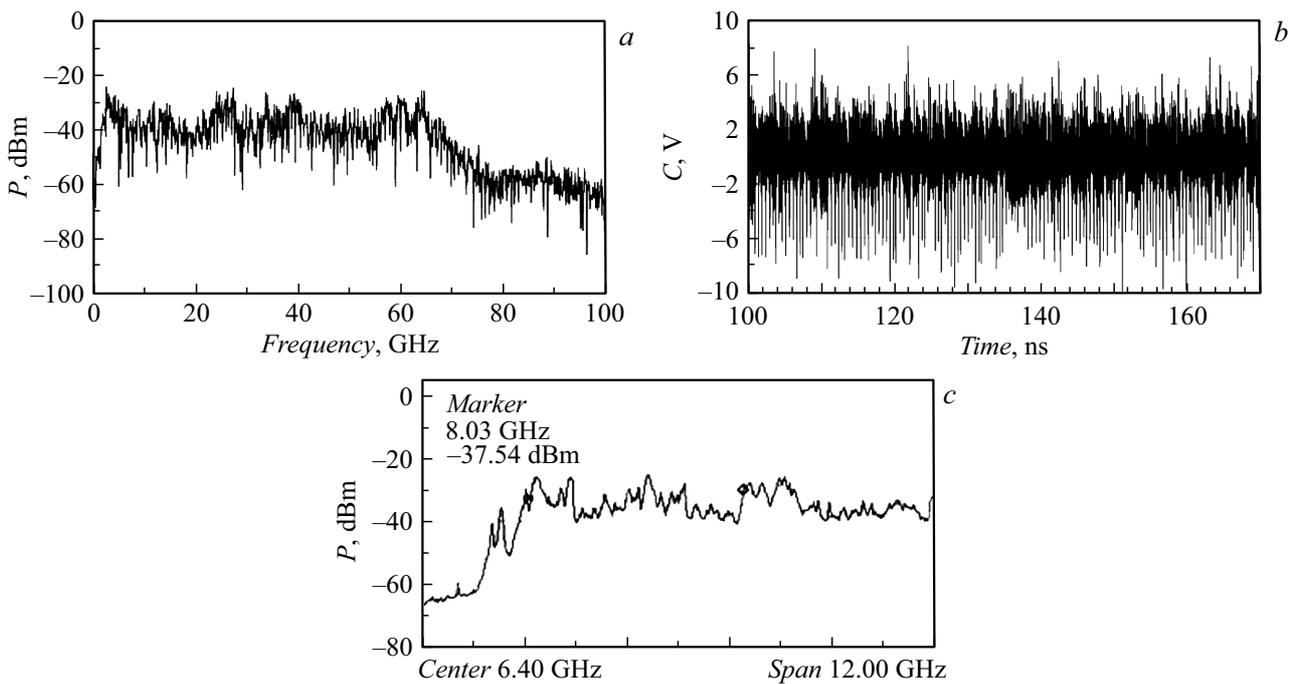


Рис. 2. *a* — спектральная характеристика колебаний в точке N нелинейного контура, схемотехническое моделирование; *b* — реализация выборки колебаний во временном интервале 100–170 ns; *c* — спектр выходного сигнала генератора, эксперимент.

При такой сверхширокополосности колебаний можно использовать как весь диапазон до 60 GHz, так и (с помощью фильтров) любой требуемый участок этого диапазона в зависимости от конкретной задачи. На рис. 2, *b* приведена реализация выборки во временной области 100–170 ns, демонстрирующая случайный характер колебаний в контуре.

В соответствии с блок-схемой (рис. 1, *a*) был изготовлен и исследован экспериментальный макет генератора. В отличие от схемотехнической модели воздействующий генератор был собран по схеме Колпитца на базе транзистора BFP620F с одним источником питания. Параметры нелинейного контура такие же, как при моделировании. Топология создавалась на подложке материала RF-4 толщиной 0.5 mm. Схема была собрана на ЧИП-элементах типоразмера 0402.

Динамика режимов генератора в зависимости от напряжения питания следующая: генерация возникает на частоте ~ 8 GHz при напряжении порядка $U = 2$ V, далее при $U = 2.4$ V появляются субгармоники и гармоники основной частоты. Этот режим сменяется многочастотным с зонами хаоса у основания спектральных составляющих при $U = 2.6$ V, а при $U = 2.8$ V и выше система переходит в режим хаотических колебаний (рис. 2, *c*). В физическом эксперименте было установлено, что в генераторе возможно существование сверхширокополосных хаотических режимов в диапазоне частот от 2 GHz до более 12 GHz с энергетической эффективностью $\sim 5\%$. Диапазон генерации хаотических колебаний, полученный в эксперименте, значительно превышает диапазон таких колебаний, описанный в ра-

боте [6]. Более низкая, чем при моделировании, верхняя частота диапазона генерации связана с технологией изготовления устройства.

На основании проведенного исследования схемотехнической модели и экспериментального макета можно сделать заключение, что добавление нелинейного пассивного элемента в схему генератора в виде колебательного контура с p - n -переходом позволяет значительно расширить диапазон генерации хаотических колебаний вплоть до граничной частоты активного элемента, содержащего этот p - n -переход. Для дальнейшего развития предлагаемого подхода необходимо при создании устройства использовать новые кремний-германиевые интегральные технологии.

Финансирование работы

Исследование проведено при выполнении планового госзадания.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
- [2] Chong C., Young S.K. // IEEE Trans. Vehicular Technol. 2008. V. 57. N 3. P. 67–70.

- [3] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. 424 с.
- [4] *Li J.X., Wang Y.C., Ma F.C.* // *Nonlinear Dyn.* 2013. V. 72. N 3. P. 575–580.
- [5] *Ефремова Е.В.* // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44. В. 9. С. 26–33.
- [6] *Максимов Н.А., Панас А.И.* // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43. В. 3. С. 88–94.
- [7] *Kennedy M.P.* // *IEEE Trans. Circ. Syst. 1: Theory and Applications.* 1994. V. 41. N 11. P. 771–774.
- [8] *Linsay P.S.* // *Phys. Rev. Lett.* 1981. V. 47. N 19. P. 1349–1352.
- [9] *Максимов Н.А., Кислов В.Я.* // *Радиотехника и электроника.* 1997. Т. 42. № 12. С. 1487–1492.