

## Сверхширокополосные генераторы на основе Si-Ge транзистора с одним внешним реактивным элементом

Н.А. Максимов

Фрязинский Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова, Российской Академии Наук,  
141190, г. Фрязино, Московская обл., площадь им. акад. Б.А. Введенского, дом 1,  
E-mail: maksna49@mail.ru

Приводятся результаты моделирования и экспериментального исследования сверхширокополосных генераторов хаоса. Показано, что такие генераторы могут быть изготовлены на сосредоточенных элементах и демонстрировать устойчивые хаотические колебания в полосе 0.5-8ГГц и выше по уровню 10дБ с к.п.д.~7%.

Results of modelling and experimental research of the ultrawideband generator are presented. It is shown, that such generator can be made on the chip-elements and Si-Ge transistor BFP620F and stable chaotic oscillations are excited in the system in the frequency band 0.5-8GHz on a level 10dB with efficiency~ 7 %.

### Введение

Многообразие режимов работы генераторов динамического хаоса, возможность оптимизации энергетической эффективности, делает их привлекательными для применения в различных областях, как-то: средства связи, шумовая радиолокация, радиопротиводействие, медицина и т.д.. Развитие элементной базы, появление чип-компонентов и миниатюрных транзисторов, работающих в диапазоне частот до десятков гигагерц, позволяет перейти от микрополосковой технологии изготовления СВЧ генераторов к схемам на сосредоточенных элементах, по крайней мере для транзисторов малой мощности.

### 1 Моделирование

Одним из простейших по структуре транзисторных генераторов хаоса является генератор, собранный по классической схеме емкостной трехточки. При наличии трех реактивных элементов система имеет 1.5 степени свободы и при определенных значениях параметров, в ней потенциально могут быть реализованы хаотические колебания. В области низких частот странный аттрактор в такой системе впервые наблюдался в работе [1].

Для продвижения в СВЧ диапазон необходимо выбрать соответствующие номиналы реактивных и активного элементов. На рис.1 приведена схема одного из возможных вариантов такого генератора:

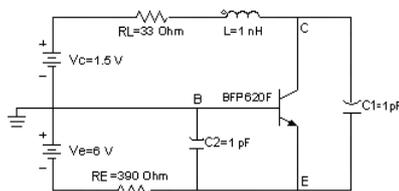
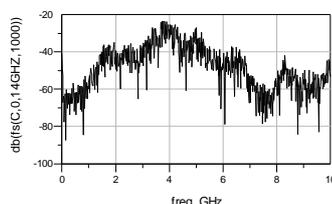


Рис. 1.  $RL=33\text{Ом}$ ,  $RE=390\text{Ом}$ ,  $L=1\text{нГ}$ ,  $C1=1\text{пФ}$ ,  $C2=1\text{пФ}$

В качестве активного элемента в данной схеме используется кремний – германиевый транзистор BFP 620F, с частотой отсечки  $\sim 65$  ГГц. Как было показано в [2,3] схему такого генератора можно рассматривать, как RLC фильтр нижних частот, активизированный биполярным транзистором. Соответственно и распределение мощности по диапазону, и верхняя граница спектральной характеристики колебаний, возникающих в такой системе, определяются амплитудно-частотной характеристикой этого фильтра, [ 4,5,6].

При данных параметрах схемы пик АЧХ находится в окрестности  $f = 4$  ГГц, тем самым, создавая более предпочтительные условия для генерации в этой области.

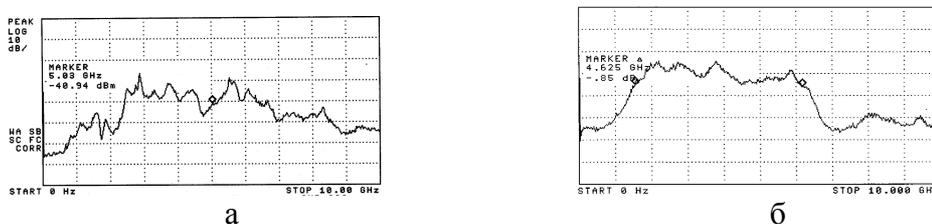
Один из спектров хаотических колебаний, полученный при моделировании в пакете ADS, приводится на рис.2:



**Рис. 2. Спектральная характеристика сигнала снятая в точке С схемы (рис.1).  
Моделирование в пакете ADS**

## 2 Эксперимент

Макет генератора был собран с использованием чип-элементов, для изготовления топологии выбирался материал FR-4. Эксперимент показал, что существует два режима питания транзистора, при которых в системе существуют хаотические колебания. Напряжения питания транзистора для первого режима были близки к полученным при моделировании в ADS, малое на коллекторе  $U_{CB} \sim 0.2-2$ В и большое на эмиттере  $U_{EB} \sim 5-7$ В. Работающий в таком режиме транзистор давал на выходе генератора  $\sim 1$ мВт выходной мощности. К.п.д. генератора при этом находилось в пределах 1%. При втором режиме работы транзистора выходная мощность на нагрузку 50Ом достигала 4.5 мВт, а к.п.д. генератора составлял  $\sim 2\%$ . Спектральные характеристики приведены на рис.3:



**Рис. 3. Спектры хаотических колебаний генератора, а- $U_{CB}=1$ В,  $U_{EB}=6$ В;  
б-  $U_{CB}=12$ В,  $U_{EB}=1.5$ В, по уровню  $\sim 15$ дБ ширина спектра  $\sim 5$ Гц, (1.5-6.5Гц)**

Второй режим работы,  $U_{CB}=12V$ ,  $U_{EB}=1.5V$ , рис.3б, оказался более предпочтительным, как с точки зрения к.п.д. устройства, так и по выходному сигналу, который имеет менее изрезанную и более сформированную в полосе  $\sim 5ГГц$  спектральную характеристику.

В диапазоне сверхвысоких частот, когда значения индуктивностей и емкостей измеряются единицами нГ и пФ, начинают оказывать влияние емкости р-п переходов и паразитные индуктивности СВЧ-транзисторов. Влияние межэлектродных емкостей приводит к тому, что генерация колебаний в схеме может происходить и при отсутствии внешних емкостей. Обратная связь коллектор-эмиттер в этом случае осуществляется за счет внутренней емкости этого перехода транзистора. Для кремний-германиевого транзистора BFP620F, который использовался как в процессе моделирования, так и при реализации лабораторных макетов генераторов эта емкость составляет  $C_{CE}=0.2пФ$ . Емкости других переходов для данного транзистора соответственно  $C_{CB}=0.12пФ$ ,  $C_{EB}=0.45пФ$ . Используя эти особенности в схеме генератора можно оставить только один внешний реактивный элемент, а именно, индуктивность, которая в совокупности с емкостями р-п переходов транзистора формирует частотно-избирательную цепь генератора, рис.4:

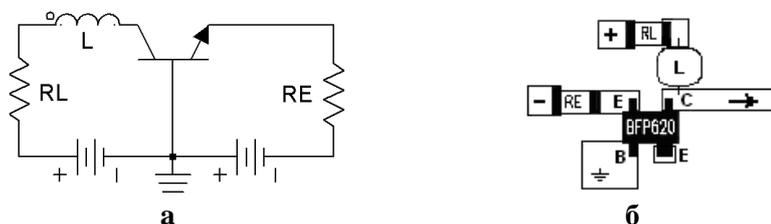


Рис. 4. а- радиотехническая схема генератора; б- Эскиз топологии и чип-элементы генератора.  $RL=330\Omega$ ,  $RE=390\Omega$ ,  $L=1нГ$

Был создан лабораторный макет генератора и проведено экспериментальное исследование его режимов при различных значениях внешней индуктивности  $L$ . Типичная картина развития колебаний в системе приведена на рис.5. Напряжение питания эмиттер-база было фиксированным и составляло  $U_{EB}=0.75V$ , роль управляющего параметра выполняло напряжение коллектор-база, изменяемое в пределах  $U_{CB}=0-12V$ . Вплоть до  $U_{CB}=9V$  в системе существовало колебание на частоте  $\sim 5.6ГГц$ , рис.5(а). Дальнейшее увеличение напряжения приводило к возникновению субгармонических колебаний удвоенного периода, рис.5(б) и при изменении  $U_{CB}=11-12V$ , развивались устойчивые хаотические колебания, рис.5(в,г).

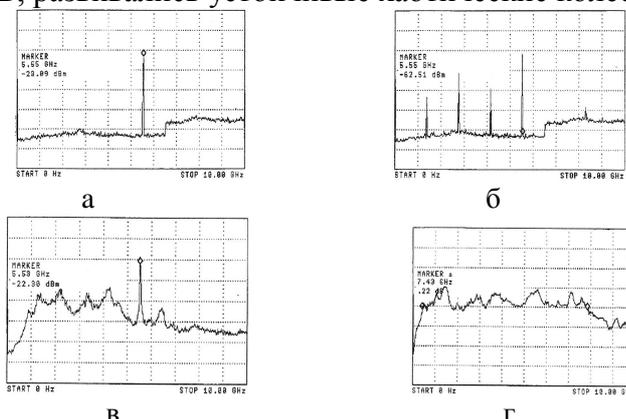
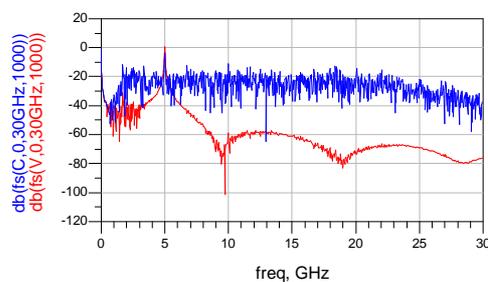


Рис. 5. Динамика спектральных характеристик колебаний в генераторе при фиксированном  $U_{EB}=0.75V$  и изменении  $U_{CB}$  в пределах 0-12В

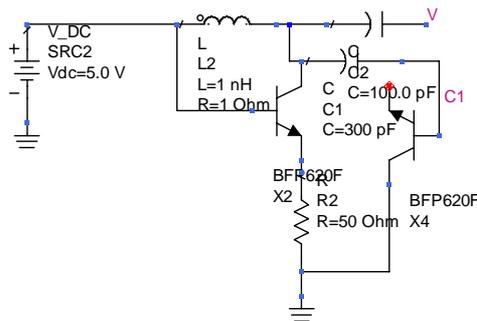
При  $L = 1 \text{ нГ}$  на выходе генератора, нагруженного на  $50 \text{ Ом}$ , наблюдались хаотические колебания в полосе частот  $0.5\text{--}8 \text{ ГГц}$ . Выходная мощность составляла  $2.5 \text{ мВт}$ , при потребляемом токе  $3 \text{ мА}$  и суммарном напряжении питания  $11.5 \text{ В}$ , что соответствует к.п.д. устройства  $\sim 7\%$ .

Полосу генерации можно значительно расширить, если использовать дополнительный пассивный нелинейный элемент. Известно [7], что при гармоническом воздействии на колебательный контур, содержащий нелинейную емкость р-п перехода в системе возбуждаются хаотические колебания. В нашем случае использовался один из р-п переходов (коллектор-база) транзистора BFP620F, соединенный с индуктивностью  $L=1 \text{ нГн}$ . При воздействии на такой контур внешним сигналом достаточной амплитуды в нем происходит возбуждение сверхширокополосных хаотических колебаний, рис.6:



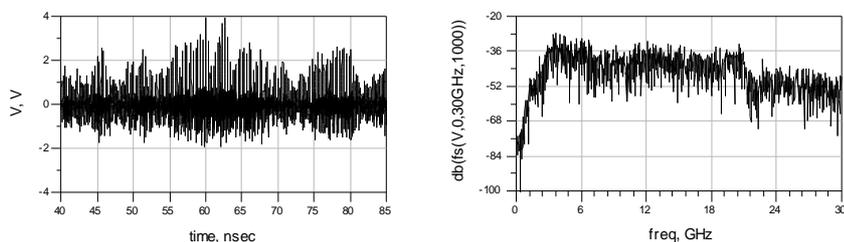
**Рис. 6. Спектральная характеристика колебаний возбуждаемых в нелинейном контуре (верхняя кривая) и спектр внешнего гармонического сигнала воздействия (нижняя кривая). Частота воздействия  $5 \text{ ГГц}$ , амплитуда  $5 \text{ В}$ . Моделирование в ADS**

Перейдем к одному источнику питания, видоизменяя схему генератора рассмотренного выше, оставляя основные элементы схемы, рис.7:



**Рис. 7. Схема генератора с дополнительным нелинейным элементом: р-п переход коллектор-база транзистора BFP620F**

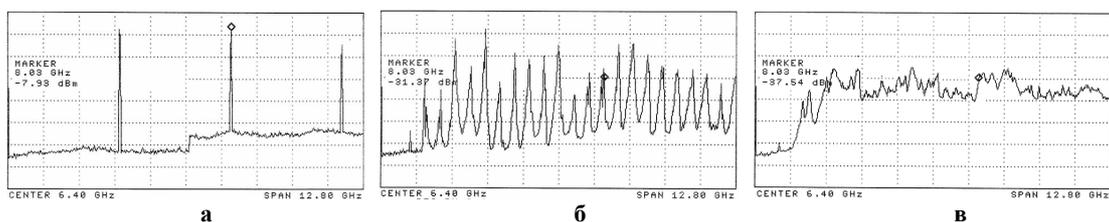
Индуктивность  $L=1 \text{ нГн}$ , в данном случае, выполняет двойную роль, она является составным элементом схемы генератора и элементом нелинейного контура, образованного совместно с р-п переходом коллектор-база дополнительного транзистора BFP620F. На рис.8 приведены характеристики выходного сигнала генератора промоделированного в пакете ADS:



**Рис. 8. Временная и спектральная характеристики сигнала генератора**

Вид спектральной характеристики свидетельствует о том, что хаотические колебания примерно одинаковой интенсивности сохраняются в системе до 22ГГц, что значительно превышает диапазон колебаний в схемах рассмотренных выше.

Экспериментальный макет генератора был собран по технологии описанной ранее. Динамика режимов генератора в зависимости от напряжения питания приведена на рис.9. Генерация возникает на частоте  $\sim 8$ ГГц при напряжении порядка  $U=2$ В, далее при  $U=2.4$ В появляются субгармоники этой частоты, рис.9а. Этот режим сменяется многочастотным с зонами хаоса у основания спектральных составляющих при  $U=2.6$ В, рис.9б и при  $U=2.8$ В система переходит в режим хаотических колебаний, рис. 9в.



**Рис. 9. Спектральные характеристики демонстрирующие динамику режимов генератора при увеличении напряжения питания**

Спектральные характеристики снимались на анализаторе спектра, верхняя граничная частота которого составляла 12.8ГГц, поэтому оценить значение верхней частоты спектральной характеристики не представлялось возможным.

### **Заключение**

В пакете ADS был промоделирован и исследован во временной и частотной областях в СВЧ диапазоне генератор Колпитца. На основе результатов симулирования был изготовлен и экспериментально проверен макет такого генератора. Как при моделировании, так и в физическом эксперименте было установлено, что в генераторе возможно существование сверхширокополосных хаотических режимов в требуемом диапазоне частот ( $\Delta f/f_c \sim 1.25$ ,  $\Delta f=5$ ГГц,  $f_c=4$ ГГц). В другом экспериментальном макете генератора при отсутствии внешних емкостей и использовании только индуктивного элемента  $L=1$ нГ, и емкостей переходов Si-Ge транзистора VFP620F были получены устойчивые хаотические колебания в более широкой полосе частот,  $\Delta f=7.5$ ГГц и более высоким к.п.д.  $\sim 7\%$ . Добавление нелинейного пассивного элемента в этот генератор в виде колебательного контура с р-п переходом, позволяет значительно расширить диапазон генерации хаотических колебаний. По данным численного моделирования до  $\sim 20$ ГГц.

*Эта работа была выполнена при поддержке Российского Фонда  
Фундаментальных Исследований (Проект 08-07-00298).*

### **Литература**

1. Kennedy M.P. Chaos in the Colpitts oscillator. // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Theory and Applications, V.41, №.11, 1994, P.771-774.
2. Максимов Н.А., "Сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ диапазона на сосредоточенных элементах", *Труды Всероссийской конф. "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике (СРСА-2006)"*, 2006, 4-7 июля, Муром. Россия. С. 154-157.
3. Maximov N.A., "S-band transistor chaotic oscillators on lumped elements", 2005 15<sup>th</sup> International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2005), Conference Proceedings, In Two volumes, Volume 1, September 12-16, 2005. –Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005. 192 p.
4. N.A. Maksimov and A.I. Panas, "Three-point circuit for generating band-limited chaotic oscillators", Proc. Int. Symp. Signals Circuits Systems (SCS'2001), Iasi, Romania, July 10-11, 2001, pp. 65-68.
5. Efremova E.V., Maksimov N.A. and Panas A.I., "Control of Power Spectrum Envelope in Single-Transistor Chaotic Oscillator", Proc. Int. Symp. Signals, Circuits and Systems (SCS-2003), July 10-11, 2003, Iasi, Romania, pp. 17-20.
6. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А. "Управление огибающей спектра мощности в однотранзисторном генераторе хаотических колебаний", *Радиотехника и электроника*, 2004, т. 49, № 2, с. 22-27.
7. Lindsay P.S. Period doubling and chaotic behaviour in a driven anharmonic oscillator.// *Phys. Rev. Lett.* 1981. V. 47. P. 1349-1352.