**07;11**

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ КОНТУРОМ**

*Н.А. Максимов*

ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

(Фрязинский филиал), 141190, Московская область, г. Фрязино,

пл. Введенского д.1

[maksna49@mail.ru](mailto:maksna49@mail.ru)

Показана возможность генерации сверхширокополосных хаотических колебаний в диапазоне частот до 60GHz с использованием биполярного SiGe гетеротранзистора. Верхняя частота диапазона определяется частотой отсечки 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, микроволновой диапазон

Развитие и рост количества различных радиоэлектронных устройств, приводит к необходимости использования различных участков электромагнитного спектра с тенденцией продвижения в более высокочастотную его часть, вплоть до 100GHz. Развитие коммуникационных технологий на основе сверхширокополосных хаотических сигналов, навигации, радиолокации и других задач прикладного характера требует создания источников таких сигналов с определенными требованиями от каждого из конкретных приложений, [1-4]. В данной работе описывается подход для создания 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 технологий различного уровня, [5].

В работе [6] описан и экспериментально исследован модифицированный генератор Колпитца, с одним навесным реактивным элементом, в котором в качестве активного элемента использовался Si-Ge транзистор BFP 620F с граничной частотой ~ 65GHz. Показана возможность генерации сверхширокополосных хаотических колебаний в СВЧ диапазоне до 8GHz, c шириной полосы генерации ~ 7.4GHz по уровню 10dB, что значительно превышает диапазон генерации (с полосой 4.6GHz) устройства, собранного по классической схеме Колпитца, [8], с таким же активным элементом, [6].

Спектр колебаний генератора, рассмотренного в [6] можно значительно расширить, если в соответствии с моделью [3,9] добавить в схему пассивный нелинейный контур с использованием р-п переходов транзистора BFP620F.

Рассмотрим нелинейный колебательный контур. Известно, [7], что при гармоническом воздействии на колебательный контур, содержащий нелинейную емкость р-п перехода, в системе возбуждаются хаотические колебания. В качестве нелинейного элемента можно использовать варакторный диод или один из p-n переходов биполярного транзистора. В нашем случае использовался один из р-п переходов (коллектор-база) транзистора BFP620F, последовательно соединенный с индуктивностью L=1nH. При воздействии на такой контур внешним сигналом достаточной амплитуды в нем происходит возбуждение сверхширокополосных хаотических колебаний, так при внешнем сигнале с частотой 8.5GHz и амплитудой 3V в контуре развиваются хаотические колебания с достаточно равномерным спектром от 2GHz до 20GHz, рис.1:

Рис.1

Резонансная частота контура Fрез.=8.5GHz задается барьерной емкостью p-n перехода при нулевом смещении на переходе и индуктивностью L, в данном случае равной 1nH.

Достаточно детально динамика нелинейного контура исследована в [3]. Было установлено, что развитие хаотических колебаний различной интенсивности в контуре возможно при различных частотах и амплитудах внешнего сигнала, при этом частота внешнего сигнала не должна превышать удвоенной резонансной частоты контура при нулевом смещении на p-n переходе. Воздействие внешним гармоническим сигналом с частотой близкой к резонансной частоте контура и достаточной амплитуды вызывает развитие в контуре наиболее интенсивных широкополосных хаотических колебаний. В самосогласованной системе генератор - нелинейный контур происходит взаимное влияние этих структур друг на друга, что приводит к развитию хаотических колебаний в системе с полосой генерации определяемой добротностью этой системы. Достаточным условием развития хаоса в такой системе является сильная связь между генератором и нелинейным контуром, [3,5].

Добавим нелинейный контур в коллекторную цепь транзистора генератора [6], рис.2(а). Емкость С=100pF осуществляет как развязку по постоянному току, так и создает сильную взаимную связь между контуром и генератором, рис.2(a):

Рис.2

Невысокая добротность, как резонансной цепи генератора, так и нелинейного контура создают условия для существования сверхширокополосных хаотических колебаний в системе. Спектр хаотических колебаний на р-п переходе нелинейного контура (т. B) имеет верхнюю границу ~ 60GHz, которая является практически паспортной частотой отсечки транзистора BFP620F, рис.2(b).

При такой сверхширокополосности колебаний можно использовать, как весь диапазон до 60GHz, так и, с помощью фильтров, любой требуемый участок этого диапазона в зависимости от конкретной задачи.

В схеме генератора, рис.2, используются два источника питания. Для практических применений удобнее использовать схему с одним источником. Видоизменяя предыдущую схему можно перейти к варианту, рис.3а:

Рис.3

Эта схема отличается от предыдущей не только количеством источников питания. Для создания нелинейного контура используется индуктивность L=1nH, которая является составным элементом самого генератора и в совокупности с коллекторным p-n переходом транзистора С1 (BFP620F) образует дополнительный нелинейный контур. Емкость С=300pF развязывает активный транзистор и р-п переход по постоянному току и одновременно выполняет роль элемента связи. Таким образом, переход от генератора детерминированных колебаний к генератору сверхширокополосных хаотических колебаний происходит за счет добавления в схему двух элементов: р-п перехода транзистора или варактора и разделительной емкости С достаточно большого номинала, рис.3а.

Из спектральной характеристики, полученной при схемотехническом моделировании в пакете ADS, видно, рис.3b, что хаотические колебания с небольшим спадом интенсивности сохраняются в системе до частоты ~ 60GHz, которая является практически граничной частотой используемого транзистора, далее следует резкое уменьшение интенсивности колебаний.

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что такие сверхширокополосные колебания в генераторе возникают только при наличии в схеме дополнительного р-п перехода. Регулярные колебания разрушаются уже при напряжении 1V. По мере роста напряжения в диапазоне до 5V в системе существуют только развитые сверхширокополосные хаотические колебания.

По схеме рис.3а изготовлен и исследован экспериментальный макет генератора. Топология создавалась на подложке материала RF-4 толщиной 0.5mm. Схема была собрана на ЧИП - элементах типоразмера 0402.

Динамика режимов генератора в зависимости от напряжения питания следующая: генерация возникает на частоте ~ 8GHz при напряжении порядка U=2V, далее при U= 2.4V появляются субгармоники и гармоники основной частоты. Этот режим сменяется многочастотным с зонами хаоса у основания спектральных составляющих при U= 2.6V, а при U=2.8V и выше система переходит в режим хаотических колебаний, рис.3(c). В физическом эксперименте было установлено, что в генераторе возможно существование сверхширокополосных хаотических режимов в диапазоне частот от 2GHz до, более чем 12GHz, c энергетической эффективностью ~5%. Диапазон генерации хаотических колебаний, полученный в эксперименте, значительно превышает диапазон таких колебаний, описанный в работе [6]. Более низкая, чем при моделировании верхняя частота диапазона генерации связана с технологией изготовления устройства.

На основании проведенного исследования двух схемотехнических моделей и экспериментального макета можно сделать заключение, что добавление нелинейного пассивного элемента в схему генератора в виде колебательного контура с р-п 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.

**Список литературы**

[1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.:Физматлит, 2002. 252с.

[2] *C.Chong, S.K. Young*.// IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.57, No. 3, 2008, pp.67-70

[3] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса М.:

2012, изд. Техносфера, 424с.

[4] *J. X. Li, Y. C. Wang, F. C.* Ma, Nonlinear Dyn., 2013, Vol. 72, pp. 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] *Linsay P.S.* // Rev. Lett. 1981. V. 7. N. 12. P. 1349-1352

[8] *Kennedy M.P.* IEEE Transactions on Circuits and Systems 1: Theory and Applications, 1994, Vol. 41, No. 11, pp. 771-774.

[9*] Максимов Н.А., Кислов В.Я.* // РЭ. 1997. Т.42. №12. с.1487-1492.