

07;11;13.4

## Модель источника хаотических колебаний диапазона 30–50 GHz в интегральном исполнении

© Е.В. Ефремова

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия  
Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия  
E-mail: efremova@cplire.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2019 г.

В окончательной редакции 15 июля 2019 г.

Принято к публикации 5 августа 2019 г.

Предложена и исследована модель источника сверхширокополосных хаотических колебаний диапазона 30–50 GHz в интегральном исполнении на основе кремний-германиевой технологии 130 nm.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные хаотические колебания, интегральная микросхема, кремний-германиевая технология.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48709.17983

Развитие беспроводных сетей поколения 5G [1] ставит перед исследователями и разработчиками новые задачи, одной из которых является освоение частотных диапазонов от 6 до 100 GHz [2]. Архитектура таких сетей будет гетерогенной, так как в нее будут входить беспроводные сети с различной площадью покрытия: от магистральных сетей (передача данных на десятки и сотни километров) до пикосетей (зона покрытия не превышает нескольких десятков метров). Беспроводные приемопередающие системы, работающие в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне на частотах выше 6 GHz, будут иметь небольшой радиус действия вследствие высокого уровня затухания сигнала на высоких частотах. Одним из практически интересных вариантов организации связи в сетях малого радиуса действия в СВЧ-диапазоне может стать использование в качестве несущей сверхширокополосных хаотических колебаний [3,4].

Практический интерес при использовании таких колебаний обусловлен следующими обстоятельствами: сверхширокополосные хаотические сигналы демонстрируют высокую степень устойчивости при многолучевом распространении через беспроводной канал; для приема таких сигналов можно использовать устройства на основе детектора огибающей [4]; генераторы хаотических колебаний с точки зрения схемотехнической реализации являются структурно простыми устройствами, которые формируют сигнал непосредственно в требуемой полосе частот без применения операций по переносу сигнала из одного частотного диапазона в другой.

В настоящее время имеется развитая теория формирования широкополосных и сверхширокополосных хаотических колебаний при помощи автоколебательной системы на базе транзистора с частотно-избирательным четырехполосником в цепи обратной связи, с помощью которой можно формировать колебания в заранее заданном частотном диапазоне [5,6]. При этом ширина полосы

и диапазон генерируемого сигнала могут варьироваться в широких пределах. Например, экспериментально было показано, что относительная ширина полосы может варьироваться от 50 до 130% в диапазоне частот 2–10 GHz [6].

В настоящей работе предложена и исследована модель источника сверхширокополосных хаотических колебаний диапазона 30–50 GHz (относительная ширина полосы 50%) в интегральном исполнении на основе кремний-германиевой (SiGe) технологии 130 nm.

Единственная возможность разработать и исследовать модель микросхемы источника колебаний на основе сверхвысокочастотных интегральных технологий микроэлектроники, к которым, например, относится кремний-германиевая технология, — использовать средства автоматизированного проектирования и соответствующие технологические библиотеки. Связано это с необходимостью учета в процессе разработки и моделирования физических эффектов, свойственных интегральной микроэлектронике, в частности влияния топологической структуры (взаимного расположения элементов интегральной микросхемы), особенностей электронных элементов конкретной технологии.

Особенность систем с динамическим хаосом состоит в том, что зоны хаотических режимов могут быть достаточно узкими или чередоваться с зонами периодических колебаний. Это значит, что отклонение параметров системы (значений номиналов компонентов электрической схемы и/или значений управляющих токов и напряжений, подаваемых на систему извне, например напряжения питания) от предписанных при разработке значений может приводить к срыву режима генерации хаотических колебаний. При этом фактически единственным параметром, с помощью которого можно управлять динамикой системы, является напряжение

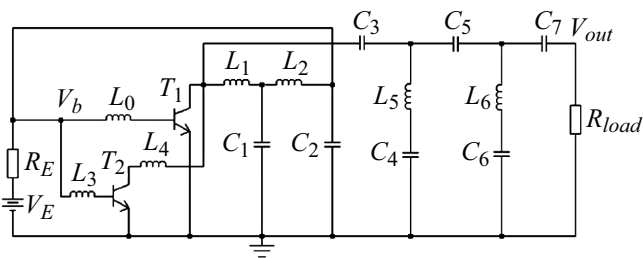


Рис. 1. Электрическая схема генератора.

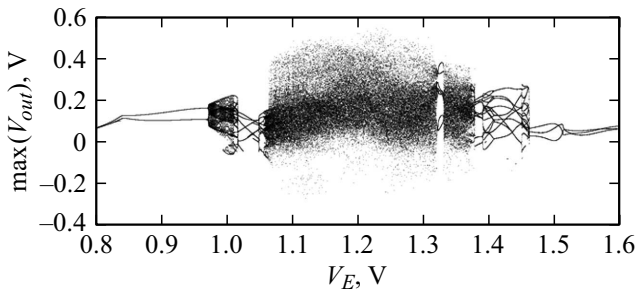


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма режимов генератора.

питания. Номиналы элементов электрической схемы не могут быть изменены после изготовления микросхемы.

Поэтому ключевым моментом при создании микросхемы генератора хаоса является разработка такой топологии, которая была бы устойчивой к возможным погрешностям, возникающим при производстве кристалла интегральной микросхемы, и которая обеспечивала бы наличие достаточно широких зон хаоса по управляющему параметру (напряжению питания).

В основу настоящей модели генератора хаоса диапазона 30–50 GHz положен подход, предложенный в [5,6]. Генератор строится на основе биполярного транзистора и цепочки  $RLC$ -элементов, замкнутых в цепь обратной связи. Также в колебательную цепь могут быть включены дополнительные  $RLC$ -цепи, например фильтр высоких частот. Амплитудно-частотная характеристика получившейся системы определяет возможную форму спектра сигнала на выходе генератора.

Ранее на основе этого подхода была разработана и экспериментально апробирована интегральная микросхема генератора хаотических колебаний на основе технологии SiGe 250 nm [7] в диапазоне частот 3–7 GHz, на примере которой была продемонстрирована возможность создания источника хаотических колебаний СВЧ-диапазона в виде интегральной микросхемы. Затем в работе [8] была показана принципиальная возможность генерации сверхширокополосных хаотических колебаний микроволнового диапазона 10–30 GHz в автоколебательной системе в интегральном исполнении на основе технологии SiGe 130 nm.

При дальнейшем продвижении вверх по частотному диапазону (здесь в диапазон 30–50 GHz) возникает ряд

дополнительных трудностей. Во-первых, доступны не все номиналы элементов микросхемы. Во-вторых, оказывает влияние геометрия размещения и соединения элементов схемы (топология микросхемы): появляются паразитные емкости, индуктивности, сопротивления, значения которых могут быть сопоставимы со значениями номиналов элементов электрической схемы генератора. Влияние этих факторов приводит к подавлению развития хаотической динамики системы. Поэтому необходимо искать решения, которые позволили бы преодолеть эти ограничения.

Известен подход к разработке генераторов хаотических колебаний, предусматривающий создание структуры из двух или нескольких взаимодействующих осцилляторов, использование которого приводит к расширению полосы частот хаотического сигнала [9].

В ходе разработки настоящей модели генератора в диапазоне 30–50 GHz для того, чтобы попытаться обогатить динамику системы и расширить зоны хаотических режимов, в электрическую схему генератора был добавлен дополнительный контур, состоящий из второго биполярного транзистора и двух индуктивных элементов. В результате была получена двухконтурная автоколебательная система с двумя активными элементами и пассивным четырехполюсником, замкнутыми в кольцо обратной связи. Отвод сигнала, циркулирующий в кольце обратной связи, организован через фильтр высоких частот, который ограничивает полосу частот сигнала снизу и в то же время непосредственно участвует в формировании динамики системы.

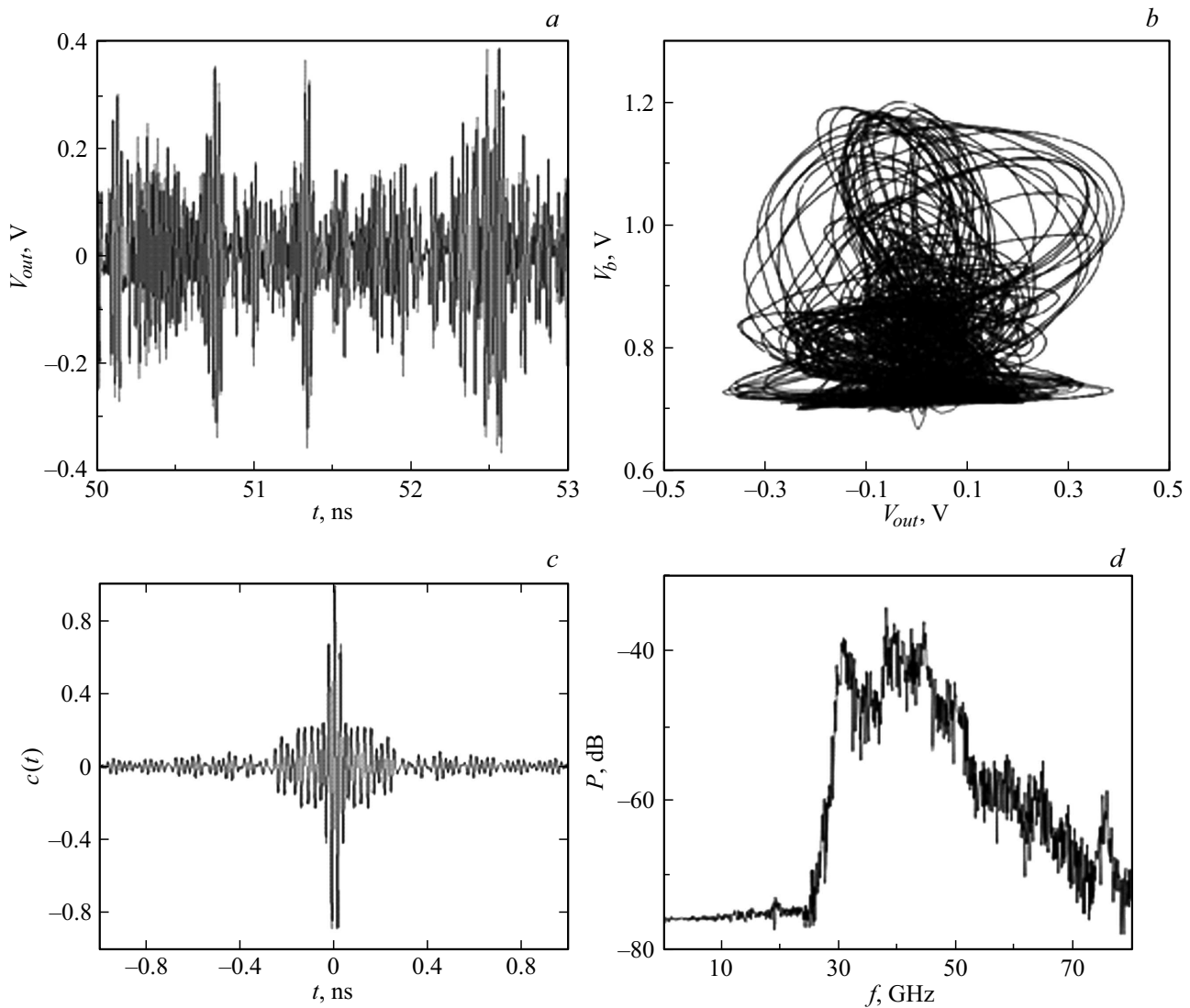
На первом этапе была разработана схемотехническая модель генератора и в ней получены хаотические колебания в требуемом диапазоне частот. Электрическая схема модели генератора хаоса представлена на рис. 1.

При моделировании использовались элементы технологической библиотеки кремний-германиевой технологии IHP SG13S.

Структура автоколебательной системы и номинальные значения элементов выбраны таким образом, чтобы основная мощность хаотических колебаний на выходе системы лежала в диапазоне частот 30–50 GHz.

Использование второго контура позволило значительно обогатить динамику системы и получить хаотические колебания на частотах, на которых в одноконтурной системе наблюдались только регулярные режимы.

На втором этапе моделирования была разработана топология микросхемы генератора. При этом элементы схемы генератора размещены так, чтобы минимизировать длину соединительных линий между элементами и таким образом уменьшить влияние возникающих паразитных эффектов. Затем была синтезирована эквивалентная электрическая схема, учитывающая наличие паразитных  $RLC$ -элементов, соответствующих полученной топологии (проведена экстракция паразитных элементов). Следует отметить, что на таких частотах параметры элементов исходной автоколебательной системы



**Рис. 3.** Фрагмент временной реализации (а), фазовый портрет (b), автокорреляционная функция (с) и зависимость спектральной плотности мощности сигнала от частоты (d) при  $V_E = 1.1$  V.

становятся сопоставимы с величинами паразитных емкостей, индуктивностей и сопротивлений. Поэтому при моделировании топологии с учетом паразитных элементов характерные частоты колебаний сдвигаются вниз. Однако можно попытаться скомпенсировать этот эффект, внося поправку в значения параметров исходной схемы. Путем коррекции параметров схемы и топологии соединительных линий для компенсации влияния паразитных элементов была получена топология интегральной микросхемы генератора, обеспечивающего формирование хаотических колебаний в диапазоне частот 30–50 GHz. Размер топологии микросхемы составил  $0.45 \times 0.65$  mm.

Бифуркационная диаграмма смены динамических режимов в топологической модели генератора с учетом паразитных RLC-элементов для выбранных значений параметров приведена на рис. 2. В качестве бифуркационного параметра использовано напряжение питания генератора.

При  $V_E \approx 0.8$  V в системе возникают периодические колебания на основной частоте с сильно выраженными гармониками основной частоты. При увеличении напряжения возникает вторая частота и формируется резонансный тор ( $V_E \approx 0.972$  V). При  $V_E \approx 1.018$  V резонансный тор разрушается с переходом к хаосу, но этот режим быстро срывается, и система возвращается в режим периодических колебаний. При  $V_E \approx 1.051$  V происходит бифуркация удвоения периода, затем при  $V_E \approx 1.057$  V еще одна, с последующим переходом к хаотическому режиму ( $V_E \approx 1.067$  V). В дальнейшем наблюдается широкая зона хаотических колебаний (вплоть до  $V_E \approx 1.375$  V) с явно выраженным окном периодичности при  $V_E \approx 1.32–1.33$  V. При напряжении питания выше 1.375 V хаотический режим сменяется режимом периодических колебаний.

В качестве рабочего выбран режим из зоны хаотических колебаний ( $V_E = 1.1$  V). В этом режиме колебания

характеризуются нерегулярной временной реализацией (рис. 3, *a*), характерным для хаотических колебаний фазовым портретом (рис. 3, *b*), быстроспадающей автокорреляционной функцией (рис. 3, *c*) и сплошной огибающей зависимости спектральной плотности мощности от частоты (рис. 3, *d*).

Генератор обеспечивает формирование сверхширокополосных хаотических колебаний в полосе частот 30–50 GHz. Мощность, поглощаемая генератором от источника питания, равна 31 mW, мощность генерируемого хаотического сигнала равна 0.33 mW, коэффициент полезного действия системы  $\sim 1\%$ . Такого уровня мощности сигнала достаточно для использования генератора в беспроводных системах связи малого радиуса действия.

Предложена и исследована модель генератора сверхширокополосных хаотических колебаний, которая может быть использована для изготовления кристаллов микросхем генераторов хаоса в диапазоне частот 30–50 GHz на основе технологии SiGe 130 nm.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Agiwal M., Roy A., Saxena N. // IEEE Commun. Surveys Tutorials. 2016. V. 18. N 3. P. 1617–1655.
- [2] Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz. Report ITU-R M.2376-0 (07/2015). 132 p.
- [3] Dmitriev A.S., Kyurginsky B.Ye., Panas A.I., Starkov S.O. // Int. J. Bifurc. Chaos. 2003. V. 13. N 6. P. 1495–1507.
- [4] Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Khilinsky A.D., Kuzmin L.V. // Int. J. Bifurc. Chaos. 2005. V. 15. N 11. P. 3639–3651.
- [5] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. // Радиотехника. 2005. № 8. С. 67–72.
- [6] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Панас А.И., Максимов Н.А. Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. 424 с.
- [7] Efremova E.V., Dmitriev A.S. // Springer Proc. Phys. 2017. V. 191. P. 71–80.
- [8] Ефремова Е.В. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 9. С. 26–33.
- [9] Maximov N.A., Panas A.I. Microwave chaotic oscillators with controlled bandwidth // Proc. ICCSC'2004. Moscow, Russia, 2004.