

11

Модель хаотической автоколебательной системы диапазона 10–30 GHz на основе SiGe-технологии 130 nm

© Е.В. Ефремова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия
Московский физико-технический институт (Государственный
университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия
E-mail: efremova@cplire.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2017 г.

Рассматривается задача формирования сверхширокополосных хаотических колебаний в диапазоне частот 10–30 GHz, актуальная для систем связи пятого поколения. Предложена и исследована модель генератора на основе кремний-германиевой технологии 130 nm.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.09.46062.16990

Рост числа устройств промышленной и потребительской электроники, снабженных функцией беспроводной передачи данных, приводит к дефициту доступных ресурсов электромагнитного спектра. Это стимулирует освоение новых частотных диапазонов и создание соответствующей элементной базы. В связи с развитием сетей 5G и технологии Интернета вещей большое внимание привлекает диапазон частот от 6 до 100 GHz [1,2].

Одной из перспективных беспроводных коммуникационных технологий является сверхширокополосная технология передачи данных на основе хаотических сигналов [3,4]. Область потенциального применения данной технологии — передача информации, радиолокация [5], навигация [6], сенсорные сети и натальные сети [7], робототехнические системы [8].

Возможность реализации коммуникационных систем на основе хаотических сигналов определяется возможностью создания генераторов хаотических колебаний [9,10] с требуемыми спектральными и энергетическими характеристиками, демонстрирующими устойчивые

хаотические режимы в достаточно широком диапазоне параметров и хорошую повторяемость режимов от образца к образцу. При этом для возможности интеграции с устройствами потребительской электроники генераторы хаоса должны быть выполнены на основе современных микроэлектронных технологий.

В настоящее время разработаны принципы построения твердотельных источников хаотических колебаний микроволнового диапазона на основе автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами, изготовлен ряд устройств на дискретных элементах, обеспечивающих генерацию хаотических колебаний в различных участках диапазона 3–10 GHz [9,11], созданы экспериментальные образцы источников хаоса на базе кремний-германиевой технологии 250 nm, генерирующие полосовой хаотический сигнал в диапазоне 3–7 GHz [12].

Стандартом разработки интегральных микросхем считается проектирование их с помощью специализированных программных пакетов с использованием технологических библиотек фабрик-производителей микросхем. Необходимым в разработке таких устройств является создание схмотехнической и топологической моделей на основе соответствующей интегральной технологии. Полученная при этом топология устройства непосредственно используется для производства микросхемы на фабрике.

В работе [12] была предложена структура генератора хаоса на основе автоколебательной системы с сосредоточенными параметрами и биполярным транзистором в качестве активного элемента, разработана и исследована модель генератора диапазона 3–7 GHz на основе кремний-германиевой технологии 250 nm. На основе этой модели изготовлен экспериментальный образец интегральной микросхемы генератора хаоса. Системы с хаотической динамикой обладают высокой чувствительностью к значениям параметров. Поэтому важным результатом работы явилось хорошее согласие характеристик модели системы на основе элементов технологической библиотеки и экспериментального образца интегральной микросхемы, а также хорошая воспроизводимость характеристик микросхемы от образца к образцу. Это позволяет использовать предложенную структуру генератора и подход к моделированию для разработки генераторов в других диапазонах частот и в других интегральных технологиях, а также применять полученные модели для создания топологии и изготовления микросхем генераторов хаоса на фабриках.

В настоящей работе исследуется возможность разработки генератора сверхширокополосных хаотических колебаний микроволнового диапазона 10–30 GHz в интегральном исполнении на основе кремний-германиевой технологии 130 nm.

Для разработки генератора использованы программный пакет Cadence IC и технологические библиотеки кремний-германиевых технологий IHP SGB25V (250 nm) и SG13S (130 nm).

Предварительный анализ показал, что для разработки генератора в диапазоне частот выше 10 GHz целесообразно перейти от технологии SiGe 250 nm к технологии SiGe 130 nm. Этот переход обусловлен следующими причинами.

Во-первых, граничная частота транзисторов, реализованных на основе технологии 130 nm, выше, чем в случае технологии 250 nm (свыше 200 GHz против 75 GHz).

Во-вторых, библиотека элементов технологии 250 nm предоставляет ограниченный набор номиналов индуктивностей с фиксированными значениями параметров, в то время как библиотека технологии 130 nm позволяет формировать топологию индуктивных элементов в соответствии с требуемыми значениями индуктивности и активного сопротивления катушки (в определенных пределах). В условиях высокой чувствительности режимов систем с хаосом к значениям параметров возможность гибкого изменения параметров расширяет возможности формирования режимов с требуемыми характеристиками.

В-третьих, анализ частотных зависимостей индуктивности и сопротивления катушек индуктивности, приведенных в документации, показал, что с увеличением частоты происходит резкий рост значения эффективной индуктивности и сопротивления катушки. Это ограничивает возможности генерации колебаний на высоких частотах. Однако при сопоставимых номинальных значениях индуктивности катушки в технологии 130 nm этот скачок наблюдается на более высоких частотах, чем в технологии 250 nm. Так, для индуктивности номиналом ~ 0.95 nH пик на зависимости эффективной индуктивности и сопротивления от частоты наблюдается при ~ 20 GHz для технологии 250 nm и при ~ 40 GHz для технологии 130 nm.

Принципиальная схема модели генератора хаоса на основе технологии SiGe 130 nm представлена на рис. 1.

Генератор представляет собой автоколебательную систему с биполярным транзистором в качестве активного элемента и пассивным

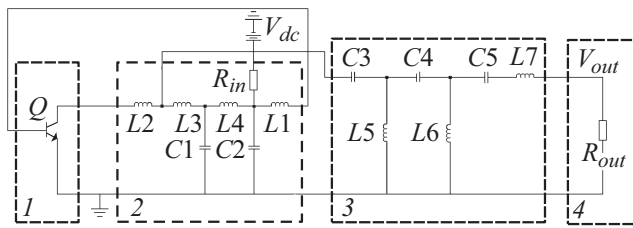


Рис. 1. Электрическая схема генератора хаоса диапазона 10–30 GHz. 1 — активный элемент, 2 — пассивный четырехполюсник, 3 — фильтр высоких частот, 4 — нагрузка.

четырёхполюсником, замкнутыми в кольцо обратной связи. Часть сигнала, циркулирующего в кольце обратной связи, отводится через фильтр высоких частот, который ограничивает полосу частот сигнала снизу и в то же время непосредственно участвует в формировании динамики системы.

Номиналы элементов выбраны таким образом, чтобы основная мощность генерируемых хаотических колебаний лежала в диапазоне частот 10–30 GHz.

Разработан блок расчета бифуркационной диаграммы, позволяющий применить этот традиционный инструмент анализа нелинейных динамических систем для исследования динамических режимов модели генератора на основе интегральной технологии микроэлектроники.

Бифуркационная диаграмма режимов модели генератора приведена на рис. 2. В качестве бифуркационного параметра использовано напряжение питания генератора.

Зависимость спектральной плотности мощности от частоты для нескольких режимов генератора представлена на рис. 3.

Увеличение напряжения питания в системе приводит к возбуждению периодических колебаний на частоте $f \approx 7.2$ GHz с сильно выраженными гармониками основной частоты (рис. 3, a). При дальнейшем росте напряжения питания в системе возникают зоны периодических колебаний, ряд бифуркаций удвоения периода, зоны хаотических колебаний (рис. 3, b, d), прерываемые окнами периодичности.

Как видно из бифуркационной диаграммы, в системе наблюдаются три достаточно широкие зоны хаотических режимов. На рис. 3, b, d

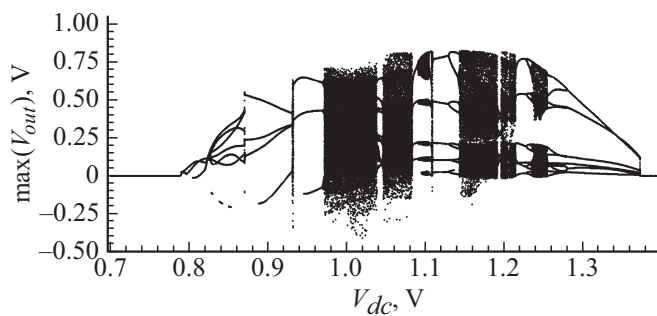


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма режимов модели генератора в зависимости от значения напряжения V_{dc} .

представлены спектры мощности хаотических режимов для двух из этих зон. Огибающая спектра мощности из второй зоны (рис. 3, *d*) выглядит более гладкой, чем огибающая спектра мощности из первой зоны (рис. 3, *b*). Это обусловлено тем, что при увеличении напряжения питания основная частота понижается и сетка частот, образованная гармониками основной частоты, становится более плотной. Так, режим периодических колебаний, показанный на рис. 3, *a*, имеет базовую частоту $f \approx 7.2 \text{ GHz}$ и несколько выраженных гармоник (до пятой гармоники). Возникший после ряда бифуркации удвоения периода хаотический режим (рис. 3, *b*) имеет достаточно выраженные пики на частотах, соответствующих второй, третьей и четвертой гармоникам. На рис. 3, *c* показан режим, соответствующий окну периодичности между первой и второй зонами хаоса. Базовая частота колебаний $f \approx 6.5 \text{ GHz}$. Анализ спектра показывает, что в этом режиме реализуется трехтактный цикл с бифуркацией удвоения периода на нем. В свою очередь спектр мощности хаотического режима, образующийся на основе этого режима, имеет более гладкую огибающую (рис. 3, *d*). Хаотические режимы, соответствующие третьей зоне, образуются на основе периодических колебаний с базовой частотой $f \approx 6.5 \text{ GHz}$, при этом на интервале до 32 GHz укладывается семь гармоник основной частоты. Для получения более гладкой огибающей спектра мощности имеет смысл выбирать режимы из второй или третьей зон хаоса.

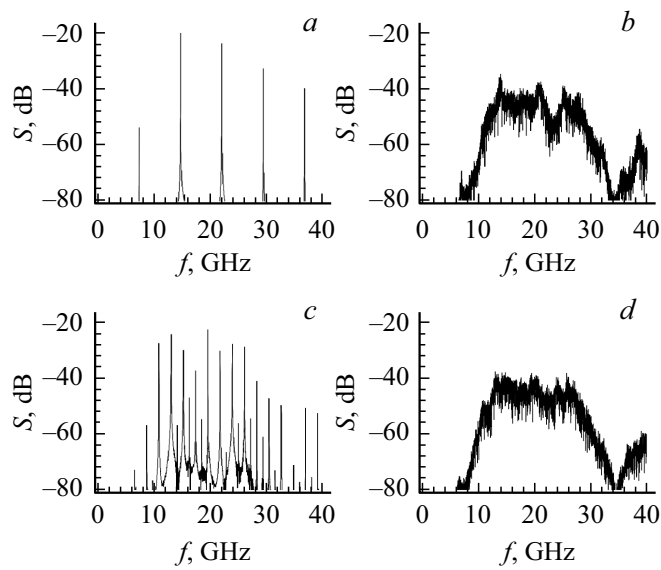


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты при различных значениях напряжения. V_{dc} , V: a — 0.96, b — 0.972, c — 1.0, d — 1.04.

В качестве рабочего был выбран режим из второй зоны, показанный на рис. 3, d , поскольку в этом случае ниже напряжение питания и соответственно ниже мощность, потребляемая от источника.

В рассматриваемом режиме мощность, потребляемая генератором от источника питания, равна 17.7 mW, мощность генерируемого хаотического сигнала 1.68 mW, коэффициент полезного действия системы 9%. Этот режим демонстрирует возможность эффективной генерации сверхширокополосных колебаний диапазона 10–30 GHz в динамической системе с биполярным транзистором на основе кремний-германиевой технологии 130 nm.

Использование для моделирования интегральных микросхем стандартных пакетов разработки и технологических библиотек, предоставляемых фабриками-изготовителями микросхем, позволяет максимально приблизить модель устройства к физическому образцу. Основным фактором риска при реализации генератора хаотических колебаний в

виде интегральной микросхемы — возможное несоответствие динамических режимов, полученных в модели, режимам, наблюдаемым в экспериментальном макете, созданном на основе модели, вследствие высокой чувствительности режимов генераторов хаоса к значениям параметров системы. Однако успешная реализация экспериментального макета генератора хаотических колебаний на основе кремний-германиевой технологии 250 nm [12] и хорошее согласие характеристик, полученных при моделировании, экспериментальным результатам свидетельствуют об адекватности подобных моделей, в том числе для систем со сложной динамикой. Это позволяет говорить о возможности создания экспериментального макета генератора хаотических колебаний диапазона 10–30 GHz на базе кремний-германиевой технологии 130 nm в интегральном исполнении на основе предложенной в данной работе модели.

Анализ частотных характеристик элементов библиотеки технологии 130 nm и предварительные расчеты показывают, что возможно дальнейшее увеличение частоты генерируемых хаотических колебаний в подобных схемах по крайней мере до 60 GHz.

В работе предложена модель генератора хаоса на основе кремний-германиевой технологии 130 nm, обеспечивающая возможность формирования сверхширокополосных хаотических колебаний в диапазоне частот 10–30 GHz в системе. На базе предложенной модели может быть разработан экспериментальный макет микросхемы генератора хаотических колебаний в диапазоне 10–30 GHz для применения в беспроводных сверхширокополосных коммуникационных системах на основе хаотических сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

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

- [4] *Kaddoum G.* // IEEE Access. 2016. V. 4. P. 2621–2648.
- [5] *Xu H., Wang B., Han H., Liu L., Li J., Wang Y., Wang A.* // Int. J. Bifurc. Chaos. 2015. V. 25. N 11. P. 1530029 (1–10).
- [6] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 1073–1083.
- [7] IEEE P802.15.6/D01 // 2010
- [8] *Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Попов М.Г.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 8. С. 1–8.
- [9] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Панас А.И., Максимов Н.А.* Генерация хаоса М: Техносфера, 2012. 424 с.
- [10] *Li J.X., Wang Y.C., Ma F.C.* // Nonlinear Dyn. 2013. V. 72. P. 575–580.
- [11] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Румянцев Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 2. С. 1–9.
- [12] *Efremova E.V., Dmitriev A.S.* // Springer Proc. Phys. 2017. V. 191. P. 71–80.