

Генератор сверхширокополосных хаотических колебаний СВЧ диапазона в интегральном исполнении

Е.В.Ефремова^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*

² *Московский физико-технический институт (государственный университет)*
efremova@cplire.ru

В работе предложена, разработана и исследована интегральная микросхема генератора сверхширокополосных хаотических колебаний диапазона 3-7 ГГц на основе кремний-германиевой технологии. Проанализировано соответствие результатов экспериментального исследования расчетным характеристикам. Проведено сравнение характеристик генератора в интегральном исполнении с характеристиками аналогичных генераторов, выполненных на основе дискретных компонентов.

In this paper integrated circuit of ultra-wideband chaotic oscillator of 3-7 GHz range based on silicon-germanium technology is proposed, developed and investigated. The correspondence between the simulation and experimental results is analyzed. A comparison of the characteristics of the integral circuit and discrete component based oscillator is made.

Введение

Хаотические колебания микроволнового диапазона – перспективный тип носителя информации для сверхширокополосных (СШП) систем связи [1-4]. Возможность широкого использования такого типа носителя напрямую зависит от решения ключевой задачи – создания малогабаритных, энергетически эффективных генераторов хаотических колебаний, являющихся ядром приемопередающих устройств, предназначенных для применения в СШП системах.

Развитие коммуникационных систем на основе хаоса связано с переходом на технологию интегральных монокристаллических микросхем. Возможность создания источников хаоса СВЧ диапазона в виде интегральных микросхем открывает широкие перспективы применения таких источников и устройств на их основе в бытовых и промышленных электронных системах.

Поскольку системы с хаосом довольно чувствительны к значениям параметров, разработка твердотельных источников хаоса микроволнового диапазона в виде монокристаллических интегральных микросхем в условиях строгих физических и технологических ограничений представляет собой многоэтапную задачу, решение которой требует учета большого количества факторов.

Данная работа посвящена разработке генератора сверхширокополосных хаотических колебаний СВЧ диапазона в интегральном исполнении на основе кремний-германиевой технологии 0,25 мкм.

Проектирование генератора хаоса

Проектирование генератора хаоса включает ряд таких шагов, как выбор электрической схемы (или прототипа) генератора хаоса; построение модели генератора хаоса; поиск областей параметров модели, обеспечивающих хаотическое поведение модели генератора; построение «полной» модели генератора, учитывающей конкретные особенности реализации активных и пассивных компонентов генератора на конкретной полупроводниковой технологии, свойства подложки, контактных площадок и проч.; расчеты этой «полной» модели и уточнение значений параметров, позволяющих получить хаотические колебания с требуемыми характеристиками.

В качестве прототипа генератора хаоса для микросхемы взят генератор на сосредоточенных элементах. Данный генератор описывается математически в виде автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы [5]. В численном эксперименте продемонстрирована возможность формирования хаотических колебаний при помощи этого твердотельного источника в заданной полосе частот СВЧ диапазона. Также генератор этого типа реализован в виде электронной схемы на сосредоточенных элементах, и показана возможность генерации хаоса в полосе частот 3–10 ГГц [4].

Исходная принципиальная схема генератора хаоса представлена на рис. 1а.

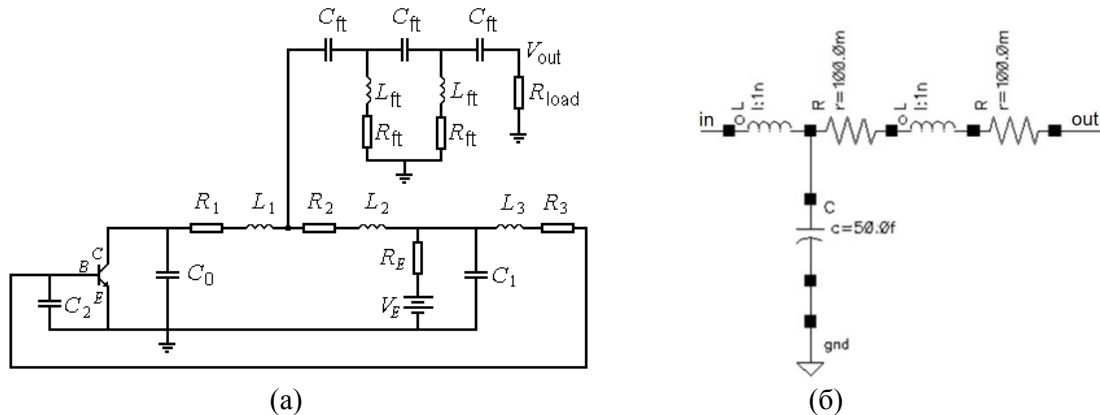


Рис. 1. (а) Принципиальная схема генератора. (б) Эквивалентная электрическая схема вывода корпуса типа QFN16.

Разработка структуры и электрической схемы генератора для микросхемного исполнения проводилась в три этапа.

На первом этапе, для создания хаотической автоколебательной системы с требуемыми спектральными характеристиками параметры цепи обратной связи автоколебательной системы выбраны таким образом, чтобы частотно-избирательные свойства этой цепи соответствовали синтезируемому спектру мощности хаотических колебаний. После этого проводилось моделирование системы и рассчитывался спектр мощности генерируемых в ней хаотических колебаний. Полученные результаты представляли собой первое приближение синтезируемой системы. В случае необходимости на основе анализа реально получаемого спектра проводилась коррекция параметров элементов автоколебательной системы, определяющих спектр мощности хаотических колебаний, снова проводилось моделирование и рассчитывался спектр мощности хаотических колебаний. В результате нескольких таких итераций для системы с идеальными элементами были получены колебания в требуемом частотном диапазоне.

Второй и третий этапы разработки генератора требуемого частотного диапазона осуществлялась в программном пакете Cadence IC, специально предназначенном для создания интегральных микросхем. Этот пакет является универсальным стандартным средством, с которым работают фабрики-производители, они же предоставляют для него библиотеки компонентов и блоков, соответствующих используемой технологии производства микрочипов.

На втором этапе разработки источника хаоса осуществлялся переход от структурной схемы устройства с идеальными элементами к системе, в которой идеальные элементы заменяются моделями активных и пассивных элементов из технологической библиотеки, соответствующей интегральной технологии, по которой предполагается изготавливать микросхему.

Реальные индуктивные элементы имеют ненулевое активное сопротивление, а переходы база-эмиттер, эмиттер-коллектор имеют емкости. Модели элементов из

технологической библиотеки учитывают эти факторы. Это позволяет упростить схему системы, используя в качестве емкостей C_0 и C_2 из эквивалентной схемы генератора емкости переходов база-эмиттер, эмиттер-коллектор, а вместо сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_ϕ – активные сопротивления соответствующих индуктивностей.

Однако на разных частотах номиналы элементов оказываются различными, кроме того приходится учитывать их частотные и температурные зависимости, что существенно затрудняет разработку системы с требуемыми характеристиками.

Для тестирования характеристик генератора предполагается поместить экспериментальный образец микросхемы генератора в корпус типа QFN16. Поскольку выводы корпуса могут оказывать влияние на динамику генератора, целесообразно учесть их воздействие уже на этапе проектирования генератора, чтобы скомпенсировать их возможный негативный эффект. С этой целью в модели использована эквивалентная схема вывода корпуса типа QFN16, приведенная на рис. 16.

Модель на основе компонентов библиотеки кремний-германиевой технологии с нормой 0,25 мкм рассчитывалась в пакете Cadence IC, выходной сигнал записывался, и затем по нему рассчитывалась мощность хаотических колебаний, их спектр, к.п.д. генератора и другие характеристики.

На основе анализа спектров мощности выходного сигнала параметры генератора были оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить генерацию хаотических колебаний с нужными спектральными характеристиками.

При напряжении питания $V = 0,8$ В в системе наблюдаются периодические колебания на частоте 7,2 ГГц. При напряжении $V = 0,9$ В в системе возникает сложный многочастотный процесс, который при $V = 1$ В снова срывается в режим генерации периодического сигнала. Этот режим сохраняется в системе до значения напряжения питания равного $V = 1,4$ В, после чего система переходит в режим генерации хаотических колебаний. Этот режим сохраняется до $V = 2,2$ В, хотя и перемежается окнами периодичности. При этом форма огибающей спектра мощности колебаний меняется от сплошного спектра с выделенным диапазоном в районе 6 ГГц, где мощность сигнала значительно выше, чем на других частотах, до достаточно равномерной огибающей в диапазоне частот 3–7 ГГц и режимов с ярко выраженными пиками на отдельных частотах. При дальнейшем повышении напряжения питания генерация снова срывается в режим периодических колебаний, чередующихся с режимами хаотических колебаний с сильно изрезанной формой огибающей спектра мощности сигнала.

После анализа динамики системы и эволюции спектра мощности с изменением напряжения питания, в качестве рабочего режима был выбран режим, наблюдаемый при напряжении питания 2 В, потребляемый ток 26 мА. Мощность генерируемого хаотического сигнала равна 1,65 мВт. Спектральная плотность мощности имеет равномерную огибающую в частотном диапазоне 3...7 ГГц (по уровню –10 дБ).

Синтезированная хаотическая автоколебательная система с неидеальными активными и пассивными элементами взята за основу при создании топологии интегральной микросхемы.

На третьем этапе разработки генератора на основе синтезированной системы с библиотечными элементами была создана топология кристалла интегральной микросхемы. В процесс создания топологии входят размещение элементов системы на подложке и соединение этих элементов контактными дорожками. Наличие контактных дорожек, а также взаимодействие элементов схемы через подложку, как показывает моделирование с учетом этих факторов, существенно влияют на динамику системы. Поэтому на этом шаге проводится также оптимизация размещения элементов на

кристалле с целью уменьшения влияния этих факторов на характеристики создаваемого генератора и коррекция параметров элементов схемы для компенсации оставшихся после оптимизации топологии эффектов.

Пакет Cadence IC позволяет создавать модели, которые учитывают различные артефакты, связанные с расположением элементов на кристалле. Наиболее существенными при этом являются эффекты, возникающие в результате влияния контактных дорожек: в частности, емкостные и резистивные эффекты.

Для разработанной топологии генератора была проведена экстракция паразитных параметров. Соответствующие паразитные емкости были введены в схему генератора для учета их влияния на динамику системы. Проведено моделирование схемотехнической модели генератора хаотических колебаний с учетом влияния подложки и выводов корпуса.

Результаты моделирования с учетом влияния паразитных емкостей приведены на рис. 2а. Синтезированная в процессе компьютерной разработки модель системы демонстрирует генерацию хаотических колебаний, основная мощность которых сосредоточена в частотном диапазоне $F \approx 3...7$ ГГц (по уровню -10 дБ) (см. рис. 2а). В этом режиме генератор работает при напряжении питания $V = 2$ В, потребляя ток $I = 24$ мА. Мощность генерируемого хаотического сигнала равна $P = 1,29$ мВт.

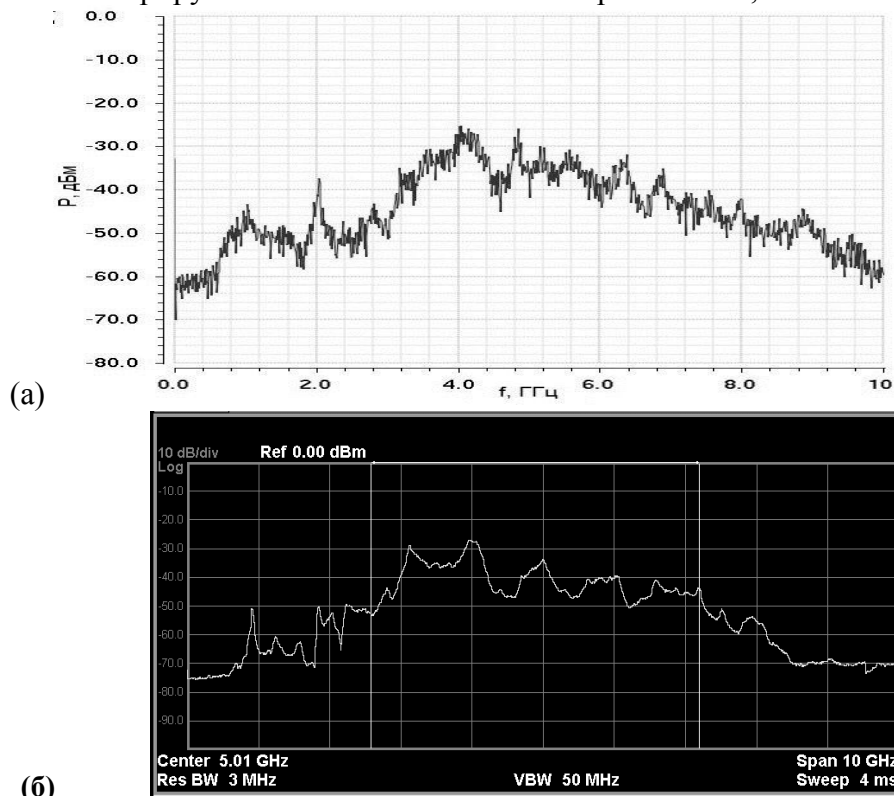


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности мощности сигнала от частоты. Моделирование с учетом топологии (а), эксперимент (б).

Эксперимент

В соответствии с разработанной моделью были изготовлены экспериментальные образцы генератора хаоса на кремний-германиевой технологии $0,25$ мкм. Площадь кристалла, на котором реализован генератор составляет $1,6$ мм².

Для проведения экспериментальных исследований кристалл помещался в пластмассовый корпус и выводы схемы соединялись с контактными площадками корпуса кусочками тонкой проволоки.

При экспериментальном исследовании автоколебательной структуры с ростом напряжения питания, также как и в модели, наблюдается возбуждение периодических колебаний на основной частоте около 2 ГГц, затем в спектре мощности возникает сетка частот, включающая основную частоту, ее четные и нечетные гармоники. После этого следует ряд бифуркаций удвоения периода колебаний и переход к хаотическим колебаниям со сплошным спектром мощности. В рабочем режиме при напряжении питания 2,15 В автоколебательная структура генерирует хаотические колебания со спектром мощности в диапазоне примерно 3-7 ГГц (рис. 2б), что, согласуется с результатами моделирования. Потребление тока в этом режиме составляет 26 мА, что практически совпадает с расчетным значением 24 мА. Однако мощность генерируемых колебаний равна 300 мкВт (-5 дБм).

В работе [6] описан генератор хаотических колебаний диапазона 3-8 ГГц выполненный на основе дискретных компонентов. Интегральная мощность сигнала этого генератора составляет -4.5 ГГц.

Таким образом, полученный образец генератора хаоса в виде интегральной микросхемы демонстрирует характеристики на уровне генераторов на дискретных элементах.

Заключение

Построена схмотехническая модель генератора хаотических колебаний в пакете Cadence IC. Параметры модели оптимизированы так, чтобы обеспечить генерацию хаотических колебаний с требуемыми спектральными характеристиками. В соответствии с моделью изготовлены экспериментальные образцы генератора хаоса на кремний-германиевой технологии 0,25 мкм. Экспериментальный образец генерирует хаотические колебания в диапазоне 3-7 ГГц, потребление тока составляет 26 мА. Мощность генерируемых колебаний равна 300 мкВт (-5 дБм). Экспериментальные характеристики полученных хаотических колебаний хорошо согласуются с расчетными, что позволяет изготавливать такие структуры в рамках стандартных процессов на фабриках-производителях интегральных микросхем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке субсидии №14.604.21.0036 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (Уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60414X0036).

Литература

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. IEEE 802.15.4a Standard for Information technology; Am. 1: Add Alternate PHYs //2007.
3. IEEE P802.15.6/D01 // 2010.
4. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В. Ю.* Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1278-1289.
5. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Григорьев Е.В.* Генератор хаотических колебаний сверхвысококачественного диапазона на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы // Радиотехника и электроника, 2007, Т. 52. № 10. С. 1232-1240.
6. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Румянцев Н.В.* Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3-8 GHz // Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 2, стр. 1-9.