

09;12

Генерация динамического хаоса микроволнового диапазона в автоколебательной структуре на основе SiGe

© А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, А.Ю. Никишов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2009 г.

Предложена, реализована и исследована хаотическая автоколебательная структура на основе кремний-германиевой технологии. Кристалл монолитной интегральной микросхемы, реализующий структуру, был выполнен на технологии $0.25\ \mu\text{m}$. В экспериментах с микросхемой получена устойчивая генерация хаотических колебаний в диапазоне частот 3–8 GHz.

PACS: 84.40.Lj, 82.40.Vj

Динамический хаос микроволнового диапазона представляет собой перспективный тип носителя информации для сверхширокополосных беспроводных средств связи [1–4]. В частности, в 2007 г. сверхширокополосные хаотические импульсы (радиоимпульсы) были рекомендованы для применения в сверхширокополосных беспроводных сетях связи (UWB WPAN — Ultra Wide Band Wireless Personal Area Networks) [5].

Стандарт [5] регламентирует нелицензируемое использование сверхширокополосных сигналов в диапазоне 3.1–10.6 GHz для передачи информации со скоростями до 1 Mbit/s в сетях связи, состоящих из большого числа приемопередатчиков.

Перспективы широкого использования микроволнового хаоса в системах беспроводной связи в решающей степени определяются возможностью создания малогабаритных, надежных, энергетически эффективных источников хаоса. На этом пути уже решены, как минимум, три принципиальные задачи.

Во-первых, экспериментально показана и подтверждена практикой возможность создания источников хаоса, устойчиво работающих в

условиях, характерных для электронной аппаратуры [6]. Это важное обстоятельство, поскольку до сих пор существует представление, что высокая чувствительность хаотических систем к изменениям параметров ставит под вопрос саму возможность создания таких устройств.

Во-вторых, заложены основы теории синтеза автоколебательных систем с малым числом степеней свободы, генерирующих динамический хаос с требуемыми спектральными характеристиками, в том числе с транзисторами в качестве активных элементов [7,8].

В-третьих, разработаны методы компьютерного моделирования источников микроволнового хаоса с учетом реальных характеристик входящих в них элементов [9,10]. С использованием этих методов созданы генераторы хаоса на сосредоточенных элементах в различных участках электромагнитного спектра.

Таким образом, в принципиальном плане проблем создания термальных источников микроволнового хаоса на сосредоточенных элементах решена. Это открывает широкие перспективы для практического применения устройств с использованием динамического хаоса.

Однако для массового применения таких устройств необходимо реализовать их в виде элементов современной функциональной электроники — монолитных интегральных микросхем.

Ниже показываются возможности создания таких устройств на примере генератора микроволнового хаоса на основе кремний-германиевой технологии.

Разработка автоколебательной структуры на кристалле кремний-германий осуществлялась в программном пакете Cadence IC, специально предназначенном для разработки интегральных микросхем. Пакет Cadence IC является универсальным стандартным средством, с которым работают фабрики-производители и для которого они предоставляют библиотеки компонентов и блоков, соответствующих используемой технологии производства микрочипов. Cadence IC предназначен для работы как в частотной, так и во временной областях. В нашем случае, в силу нерегулярности моделируемых процессов, расчеты проводились во временной области. На начальном этапе проверялась пригодность пакета Cadence IC для моделирования электронных систем со сложной динамикой. После того как расчеты подтвердили применимость используемых в пакете внутренних алгоритмов для моделирования поведения систем со сложной динамикой, пакет был применен для разработки микросхемы генератора хаоса.

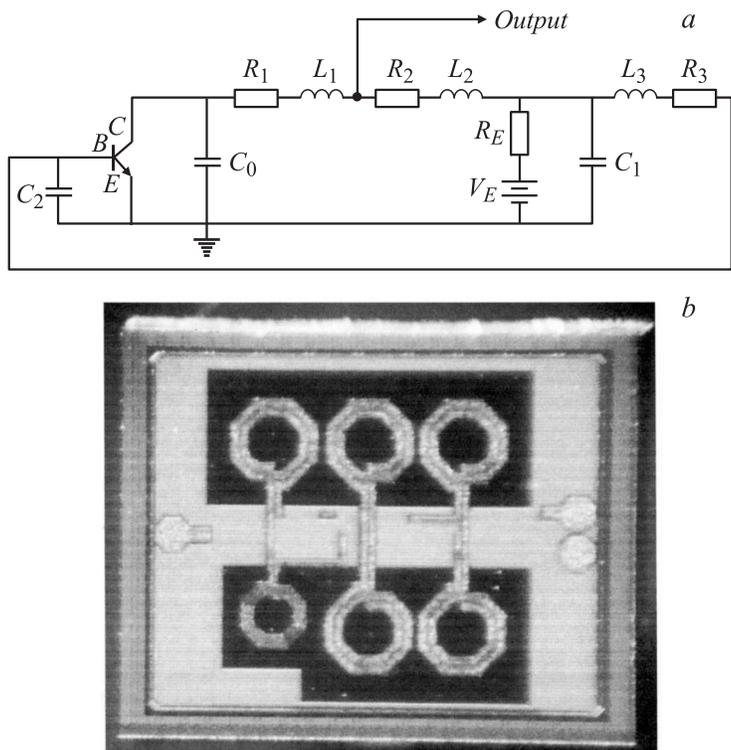


Рис. 1. *a* — эквивалентная схема генератора хаоса. C_0 , C_2 — емкости p - n -переходов транзистора; R_1 , R_2 , R_3 — активные сопротивления индуктивных элементов. *b* — интегральная микросхема генератора хаоса микроволнового диапазона на технологии SiGe $0.25\ \mu\text{m}$.

Компьютерная часть разработки автоколебательной структуры проводилась в три этапа.

Сначала решалась задача синтеза хаотической автоколебательной системы с заданными спектральными характеристиками при условии использования идеальных элементов (емкости, резисторы, индуктивности, транзисторы) (рис. 1, *a*). Было установлено, что выбранная структура автоколебательной системы обеспечивает устойчивую генерацию

хаотических колебаний в широких областях значения параметров, а полоса спектра мощности этих колебаний в основном определяется частотно-избирательными свойствами цепи обратной связи системы и цепи отвода генерируемого сигнала.

Для получения хаотической автоколебательной системы с требуемыми спектральными характеристиками параметры цепи обратной связи автоколебательной системы выбраны таким образом, чтобы обеспечить частотно-избирательные свойства, отвечающие синтезируемому спектру мощности хаотических колебаний. После этого производились моделирование системы и расчет спектра мощности генерируемых в ней хаотических колебаний. Полученные результаты представляли собой первое приближение синтезируемой системы. Затем, в случае необходимости, на основе анализа отличий реально получаемого спектра производилась коррекция параметров элементов автоколебательной системы, определяющих их спектр мощности хаотических колебаний, и снова производились моделирование и расчет спектра мощности хаотических колебаний. В результате нескольких таких итераций для системы с идеальными элементами были получены колебания в требуемом частотном диапазоне. На следующем этапе синтеза модели идеальных элементов были заменены моделями биполярного транзистора и пассивных элементов из библиотеки кремний-германиевой технологии.

Пассивные элементы из технологической библиотеки описываются эквивалентными схемами, которые учитывают эффекты, связанные с влиянием на элемент токов утечки подложки, скин-эффекта и вихревых токов.

Активный элемент — биполярный транзистор моделируется высококоразмерной SPICE-моделью, учитывающей в том числе частотные и нелинейные эффекты.

После замены идеальных элементов на элементы из библиотеки снова производились моделирование системы и расчет спектральных характеристик генерируемых колебаний. Затем, как и на первом этапе, производились уточнение параметров автоколебательной системы, ее моделирование и расчет спектра мощности генерируемых хаотических колебаний.

В результате была синтезирована автоколебательная хаотическая система с неидеальными (библиотечными) активными и пассивными элементами, генерирующая хаотические колебания в частотном диапазоне 3–8 GHz.

На третьем этапе компьютерной разработки автоколебательной структуры на основе синтезированной автоколебательной системы с неидеальными элементами была разработана топология кристалла интегральной микросхемы, которая включала в себя размещение элементов системы на кремний-германиевой 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 третьем этапе производятся также оптимизация размещения элементов на кристалле с целью уменьшения влияния этих факторов на характеристики создаваемой автоколебательной структуры и коррекция параметров элементов схемы для компенсации оставшихся после оптимизации топологии эффектов.

Синтезированная в процессе компьютерной разработки модель автоколебательной структуры генерирует хаотические колебания, основная мощность которых сосредоточена в требуемом частотном диапазоне 3–8 GHz (рис. 2, *a*). Мощность генерируемого сигнала составляет около 200 μ W при напряжении питания 1.9 V и потребляемом токе 21 mA.

В соответствии с разработанной моделью были изготовлены экспериментальные образцы автоколебательных структур на кремний-германиевой технологии 0.25 μ m (рис. 1, *b*). Площадь кристалла, на котором реализована структура, определяется размерами индуктивных элементов (кольца на рис. 1, *b*) и составляет 1 mm².

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, так же как и в модели, наблюдается возбуждение периодических колебаний на основной частоте около 2 GHz, затем в спектре мощности возникает сетка частот, включающая основную частоту, ее четные и нечетные гармоники, что свидетельствует о существенном повышении степени нелинейности автоколебательного процесса и его симметричности. После этого следуют ряд бифуркаций удвоения периода колебаний и переход к хаотическим колебаниям со сплошным спектром мощности.

В рабочем режиме при напряжении питания 2.1 V автоколебательная структура генерирует хаотические колебания со спектром мощности в диапазоне примерно 3–8 GHz (рис. 2, *b*), что в целом согласуется

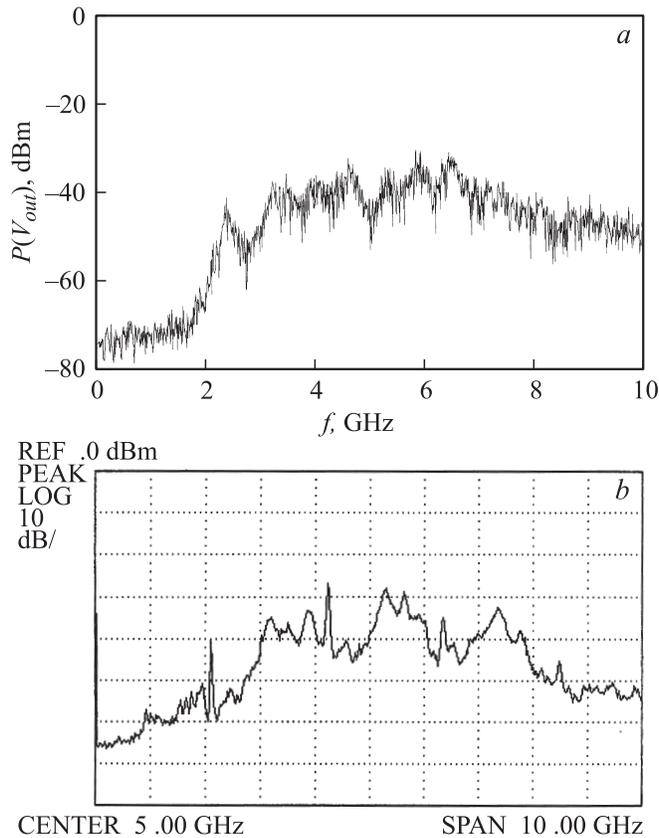


Рис. 2. *a* — спектр мощности сигнала для модели топологии микросхемы с учетом влияния емкостных и резистивных паразитных эффектов. *b* — спектр мощности сигнала экспериментальной реализации интегральной микросхемы генератора хаоса. Одно деление по горизонтальной оси соответствует 1 GHz, по вертикальной оси — 10 dBm.

с результатами моделирования. Потребление тока в этом режиме составляет 20 мА, что практически совпадает с расчетным значением 21 мА. Однако мощность генерируемых колебаний равна $50 \mu\text{W}$, что в четыре раза меньше расчетной ($200 \mu\text{W}$). Это расхождение, видимо,

связано с неучитываемым при моделировании влиянием проводников, соединяющих кристалл с контактными площадками корпуса.

Таким образом, в процессе проведенных исследований разработана и реализована автоколебательная кремний-германиевая структура, в которой получена генерация хаотических колебаний микроволнового диапазона (3–8 GHz). Экспериментальные спектральные 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 финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-02-00983-а.

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А.* и др. // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9–20.
- [2] *Spec. Is. on applications of nonlinear dynamics to electronic and information engineering* // Proc. IEEE. 2002. V. 90. N 5.
- [3] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [4] *Дмитриев А.С., Ефремов Е.В., Клецов А.В.* и др. // РЭ. 2008. Т. 53. № 10. С. 1278–1289.
- [5] *IEEE Standart for Information technolohy. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs); Amendment 1: Add Alternate PHYs*, 2007.
- [6] *Кислов В.Я.* // РЭ. 1993. Т. 38. № 10. С. 1783.
- [7] *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1996. V. 6. N 5. P. 851–865.
- [8] *Дмитриев А.С., Ефремов Е.В.* // Радиотехника. 2005. № 8. С. 67–72.
- [9] *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А.* // Изв. вузов. ПНД. 2007. Т. 15. № 1. С. 23–41.
- [10] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1232–1240.