

09

Генерация микроволнового динамического хаоса в кольцевой автоколебательной системе на комплементарной металл—окисел—полупроводниковой структуре

© 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 15 декабря 2009 г.

Предложена, реализована и исследована хаотическая автоколебательная система в виде монолитной интегральной микросхемы на кремниевой подложке. В эксперименте получена устойчивая генерация хаотических колебаний с максимумом спектральной плотности мощности в диапазоне частот 2.8–3.8 GHz.

Генерация динамического хаоса на сверхвысоких частотах представляет большой интерес для сверхширокополосных беспроводных систем связи [1–4]. В последние годы были разработаны схемы и методы расчета хаотических автоколебательных систем микроволнового диапазона с сосредоточенными параметрами, использующих транзисторы в качестве активных элементов [5,6]. На основе этих результатов созданы и экспериментально исследованы генераторы сверхширокополосного динамического хаоса радио- и микроволнового диапазонов, реализованные на дискретных элементах [7,8].

Однако, как отмечалось в [9], для массового применения таких устройств необходимо реализовать их в виде элементов современной функциональной электроники — монолитных интегральных микросхем. Там же была показана возможность создания таких устройств на примере генератора микроволнового хаоса на основе кремний-германиевой технологии.

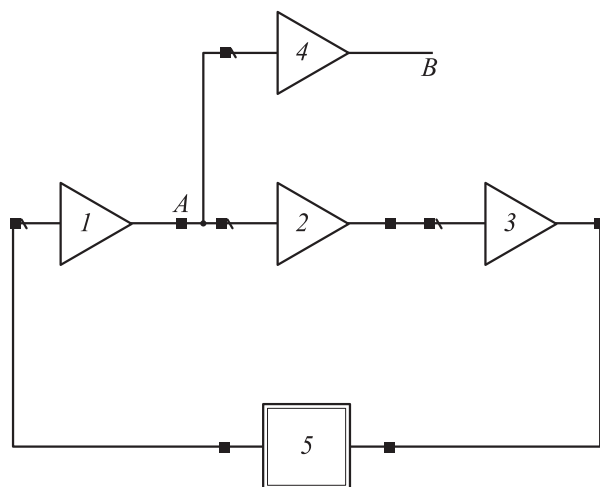


Рис. 1. Блок-схема автоколебательной системы: 1, 2, 3 — усилители; 4 — буферный усилитель; 5 — частотно-избирательная система; A — точка вывода сигнала из кольца обратной связи; B — выход.

В данной работе предложена и исследована хаотическая автоколебательная система микроволнового диапазона, реализованная на комплементарной металл–окисел–полупроводниковой (КМОП) структуре.

В отличие от кремний-германиевой технологии, где типичными активными элементами являются биполярные транзисторы, использовавшиеся в [9], в КМОП технологии в основном используются полевые транзисторы. Кроме этого, граничные частоты активных элементов (а значит, и коэффициенты усиления в применяемом микроволновом диапазоне) для этих двух технологий существенно различаются. Если для кремний-германиевой технологии $0.25 \mu\text{m}$ граничная частота составляет 75 GHz, то для КМОП-технологии $0.18 \mu\text{m}$ — только 35 GHz. Эти два обстоятельства затрудняют реализацию принципиальной схемы генератора хаоса с одним активным элементом на КМОП-структуре. Поэтому в качестве исходной хаотической автоколебательной системы в работе была использована схема с тремя усилителями [10].

Блок-схема хаотической автоколебательной системы, реализованной на КМОП-структуре (рис. 1), включает в себя три одинаковых

двухкаскадных усилителя и частотно-избирательную систему (ЧИС), замкнутые в кольцо обратной связи. Первый каскад усилителя выполнен по схеме с общим истоком и с отрицательной обратной связью, второй каскад — по схеме с общим стоком. При этом первый каскад усиливает входной сигнал, а второй имеет коэффициент усиления порядка единицы, меньший уровень насыщения по сравнению с первым каскадом и играет роль ограничителя. ЧИС, состоящая из одного RC - и двух LC -звеньев, вместе с частотными характеристиками усилителей ограничивает спектр сигнала требуемой полосой частот. Необходимые фазовые условия по возбуждению автоколебаний реализуются за счет фазового запаздывания в усилителях и ЧИС. Вывод сигнала из петли генерации хаотических колебаний осуществляется через буферный усилитель.

Исследование автоколебательной системы включало в себя: установление факта генерации хаотических колебаний в определенных зонах значений параметров, изучение бифуркационных явлений, а также нахождение условий генерации хаотических колебаний с требуемыми спектральными свойствами.

Для изучения динамики системы была разработана схемотехническая модель, соответствующая блок-схеме, представленной на рис. 1. Моделирование производилось в специализированном пакете Advanced Design System (ADS).

В качестве наблюдаемой переменной использовалось напряжение $U(t)$ сигнала на выходе системы (точка B на рис. 1).

Исследование показало, что для выбранных значений параметров, при напряжении питания усилителей $U_a = 1.4 \text{ V}$ в системе возбуждаются колебания на частоте около 4 GHz . При напряжении питания $U_a \sim 1.5 \text{ V}$ происходит возбуждение второй частоты в области 1 GHz . С дальнейшим увеличением напряжения в спектре мощности возникают комбинационные частоты, а затем при $U_a = 1.8 \text{ V}$ происходит переход к колебательному режиму с непрерывным спектром мощности, соответствующему динамическому хаосу. Развитие колебаний в модели суммировано на диаграмме режимов (рис. 2). На ней вдоль оси U откладываются максимумы сигнала $U(t)$ при адиабатически медленном изменении параметра U_a . Из диаграммы, в частности, видно, что зона хаотических колебаний как минимум охватывает диапазон изменения напряжения от 1.8 до 2.0 V , что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости режима хаотических колебаний к изменению этого параметра.

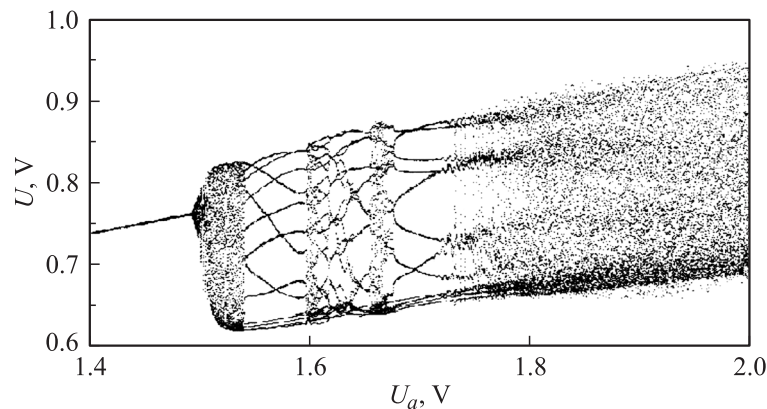


Рис. 2. Диаграмма колебательных режимов. U_a — напряжение питания усилителей, U — максимумы сигнала $U(t)$.

Разработка автоколебательной структуры на кристалле кремния по КМОП-технологии $0.18\mu\text{m}$ осуществлялась в программном пакете Cadence IC, специально предназначенном для разработки микросхем. Возможность его использования для анализа систем с хаотической динамикой была установлена в работе [9].

Процесс разработки системы на кристалле был проведен в несколько этапов. Сначала моделировалась динамика автоколебательной системы, реализованной на идеальных элементах (емкости, резисторы, индуктивности, транзисторы) при тех же условиях, как и в пакете ADS. Результаты моделирования в пакете ADS в основном подтвердились, что позволило зафиксировать исходные параметры системы и перейти к этапу исследования динамики системы с применением моделей неидеальных элементов, которые учитывают влияние температуры, скин-эффекта, токов утечки подложки и др. Например, КМОП-транзистор в этом случае описывается не статическими зависимостями, а высоко-размерной динамической SPICE-моделью.

После замены идеальных элементов на элементы из библиотеки производились моделирование системы и расчет спектральных характеристик генерируемых колебаний. Затем в случае необходимости производились уточнение параметров автоколебательной системы, ее

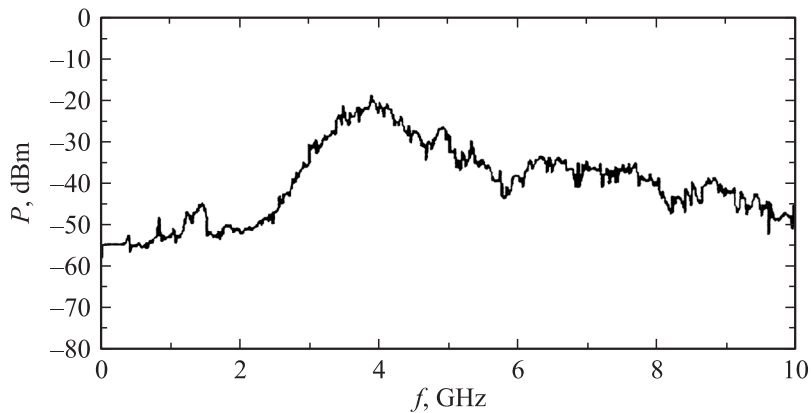


Рис. 3. Спектр мощности сигнала для модели автоколебательной структуры.

моделирование и расчет спектра мощности генерируемых хаотических колебаний.

В результате была синтезирована автоколебательная хаотическая система с неидеальными активными и пассивными элементами, генерирующая хаотические колебания с основной мощностью, сосредоточенной в частотном диапазоне 3.6 до 4.6 GHz.

Далее разрабатывалась топология схемы на кристалле, включая размещение элементов схемы на подложке и соединение этих элементов контактными линиями. Из-за наличия в топологии контактных линий и взаимодействия элементов через подложку в системе возникают паразитные сопротивления и емкости, которые могут существенно влиять на динамику системы. Для компенсации этих эффектов производилась оптимизация размещения элементов на кристалле и коррекция параметров элементов схемы.

В итоге была получена топология схемы, размещенная на кремниевом кристалле размером менее 1 mm^2 . Синтезированная модель автоколебательной структуры генерирует хаотические колебания, основная мощность которых, как и в исходной схемотехнической модели, сосредоточена в частотном диапазоне 3.6–4.6 GHz (рис. 3). Мощность генерируемого сигнала составляет около $400 \mu\text{W}$ при напряжении питания 1.9 V и потребляемом токе 25 mA.

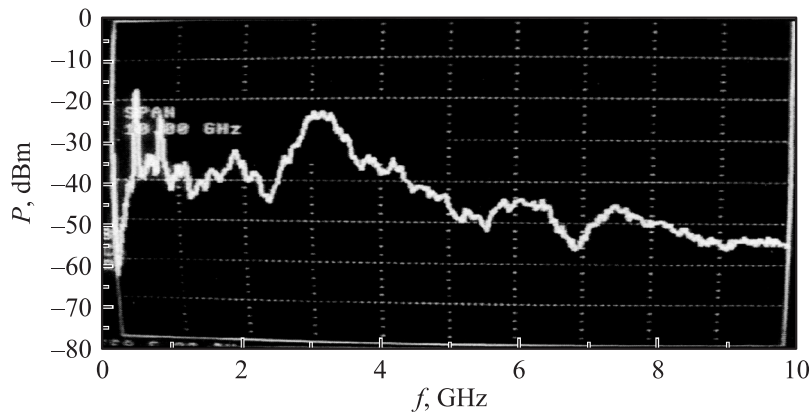


Рис. 4. Спектр мощности сигнала на выходе микросхемы генератора хаоса. Одно деление по горизонтальной оси соответствует 1 GHz, по вертикальной оси — 10 dBm.

В соответствии с разработанной моделью были изготовлены образцы кристаллов автоколебательных структуры на КМОП-структуре. Для проведения экспериментов 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, происходит возбуждение колебаний на частоте 3.2 GHz, затем в спектре мощности появляется вторая частотная компонента около 600 MHz. При дальнейшем увеличении напряжения питания возникают комбинационные частоты. Далее происходит разрушение двухчастотного автоколебательного режима и переход к хаосу с основной мощностью колебаний, сосредоточенной в диапазоне частот 2.8–3.8 GHz (рис. 4). Интегральная мощность колебаний составляет -9 dBm.

Таким образом, в эксперименте, как и в моделях, переход к хаосу происходит через возбуждение двухчастотных колебаний, образование в фазовом пространстве двумерного тора и последующего его разрушения.

Количественные характеристики полученных в эксперименте хаотических колебаний несколько отличаются от расчетных. Во-первых,

в эксперименте диапазон генерации хаотических колебаний смещен примерно на 800 МГц в область более низких частот. Во-вторых, ток (30 мА) и напряжение (2.5 В), при которых наблюдается хаотический режим, выше значений, полученных при моделировании (25 мА и 1.9 В соответственно). И наконец, выходная мощность сигнала в эксперименте на 5 dBm меньше, чем при моделировании.

Смещение диапазона частот колебаний, видимо, связано с неучтенным при моделировании увеличением значения емкости перехода затвор–исток в транзисторах, связанным с технологией изготовления кристалла микросхемы. Расхождения по напряжению питания, току и выходной мощности частично объясняются потерями в проводниках, соединяющих кристалл с контактными площадками корпуса микросхемы.

Таким образом, в процессе проведенных исследований впервые разработана и реализована автоколебательная структура на КМОП-структуре, в которой получена генерация хаотических колебаний микроволнового диапазона (2.8–3.8 GHz). Экспериментальные спектральные характеристики полученных хаотических колебаний согласуются с расчетными характеристиками в достаточной степени для изготовления таких структур в рамках стандартных процессов на фабриках-производителях интегральных микросхем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-02-00983-а и гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-4131.2009.9.

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] *Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 24. С. 31–38.
- [5] *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1996. V. 6. N 5. P. 851–865.
- [6] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* // Радиотехника. 2005. № 8. С. 67–72.

- [7] *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А.* // Изв. вузов. ПНД. 2007. Т. 15. № 1. С. 23–41.
- [8] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1232–1240.
- [9] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Никишов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 23. С. 40–46.
- [10] *Никишов А.Ю., Панас А.И.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 54–62.