

## Генерация микроволновых хаотических колебаний в КМОП структуре

**А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, А. Ю. Никишов, А. И. Панас**

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

125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

chaos@cplire.ru

*Получено 11 марта 2010 г.*

Предложена, изготовлена и исследована хаотическая автоколебательная система на основе КМОП структуры. Кристалл монолитной интегральной микросхемы, реализующий систему, был выполнен на технологии 0,18 мкм. Показано, что переход к хаосу в системе происходит через разрушение двумерного тора. В экспериментах с микросхемой получена устойчивая генерация хаотических колебаний с максимумом спектральной плотности в диапазоне частот 2,8–3,8 ГГц.

Ключевые слова: генерация хаотических колебаний, хаотические системы, КМОП структуры, бифуркации

**A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, A. Yu. Nikishov, A. I. Panas**

### **Generation of microwave chaotic oscillations in CMOS structure**

Chaotic oscillator based on CMOS structure is proposed, fabricated and investigated. Monolithic IC chip of the oscillator is fabricated in 0.18 μm process technology. As is shown, the transition to chaos in this system occurs through destruction of 2D torus. In experiments with the IC, stable generation of chaotic oscillations is observed, with spectral density maximum in the range 2.8–3.8 GHz.

Keywords: chaotic oscillations generation, chaotic systems, CMOS structures, bifurcations

Mathematical Subject Classification 2000: 37G35, 70K55, 94A05

## Введение

Генерация динамического хаоса на сверхвысоких частотах представляет большой интерес для сверхширокополосных беспроводных систем связи [1, 2, 3, 4]. В последние годы с использованием качественной теории динамических систем [5] были разработаны схемы и методы расчета хаотических автоколебательных систем микроволнового диапазона с сосредоточенными параметрами, использующих транзисторы в качестве активных элементов [6, 7]. На основе этих результатов созданы и экспериментально исследованы генераторы сверхширокополосного динамического хаоса радио- и микроволнового диапазонов, реализованные на дискретных элементах [8, 9].

Однако, как отмечалось в [10], 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.

В данной работе предложена и исследована хаотическая автоколебательная система микроволнового диапазона, реализованная на КМОП структуре.

## 1. Модель автоколебательной системы

В отличие от кремний-германиевой технологии, где типичными активными элементами являются биполярные транзисторы, использовавшиеся в [10], 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 мкм граничная частота составляет 75 ГГц, то для КМОП технологии 0,18 мкм — только 35 ГГц. 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, замкнутыми в кольцо обратной связи [11].

Блок-схема хаотической автоколебательной системы, реализованной на КМОП структуре (рис. 1), включает в себя три одинаковых двухкаскадных усилителя, частотно-избирательную систему (ЧИС) и ответвитель, через который осуществляется вывод сигнала из петли генерации хаотического сигнала. 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

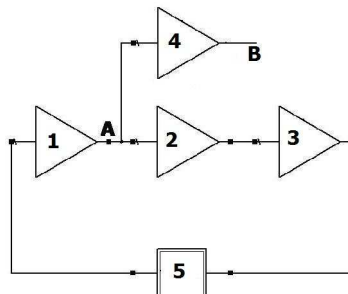


Рис. 1. Блок-схема автоколебательной системы. 1, 2, 3, 4 — усилители; 5 — частотно-избирательная система; А — точка вывода сигнала из кольца обратной связи; В — выход.

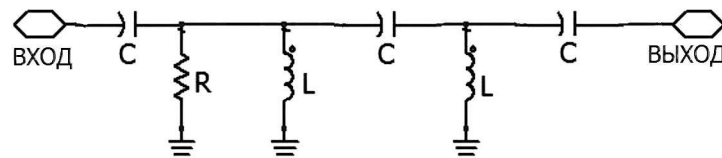


Рис. 2. Частотно-избирательная система в кольце обратной связи автоколебательной системы.

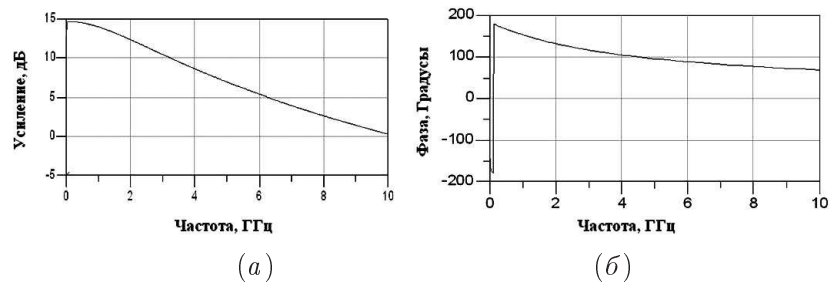


Рис. 3. Амплитудно-частотная (а) и фазово-частотная (б) характеристики усилителей в цепи обратной связи автоколебательной системы.

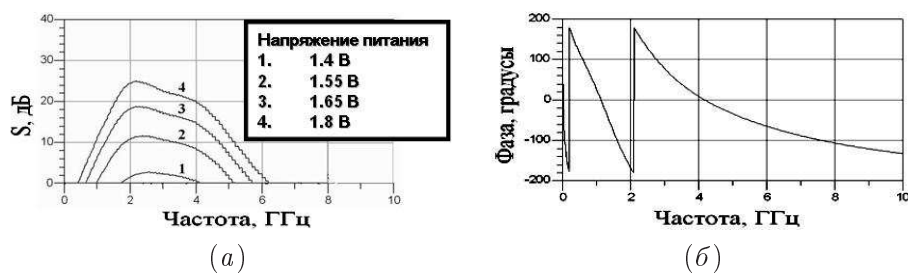


Рис. 4. Амплитудно-частотная (а) и фазово-частотная (б) характеристики разомкнутого кольца обратной связи автоколебательной системы.

усиления порядка единицы, меньший уровень насыщения по сравнению с первым каскадом и играет роль ограничителя. Частотно-избирательная система, состоящая из одного RC и одного или нескольких LC звеньев (рис. 2), вместе с частотными характеристиками усилителей ограничивает спектр сигнала в требуемой полосе частот.

Необходимые фазовые условия по возбуждению автоколебаний реализуются за счет фазового запаздывания в усилителях и ЧИС. Действительно, в каждом из усилителей происходит набег фазы порядка  $\Delta\varphi > \pi/2$  на частотах до 6 ГГц (рис. 3б). В частотно-избирательной системе RC звено дает набег около  $\pi/2$  и каждое из LC звеньев около  $\pi$ . Результирующий набег фазы при двух LC звеньях может достигать  $4\pi$  (рис. 4б), что обеспечивает фазовые условия для возбуждения автоколебаний на двух частотах: около 1 ГГц и около 4 ГГц. Вид амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для разных напряжений питания усилителей (рис. 4а) показывает, что при напряжении 1,40 В коэффициент усиления в кольце обратной связи становится больше единицы в окрестности частоты 4 ГГц и в системе реализуются необходимые условия для возбуждения автоколебаний на этой частоте. При повышении напряжения питания до 1,50 В коэффициент усиления в кольце обратной связи становится больше единицы и для частоты 1 ГГц.

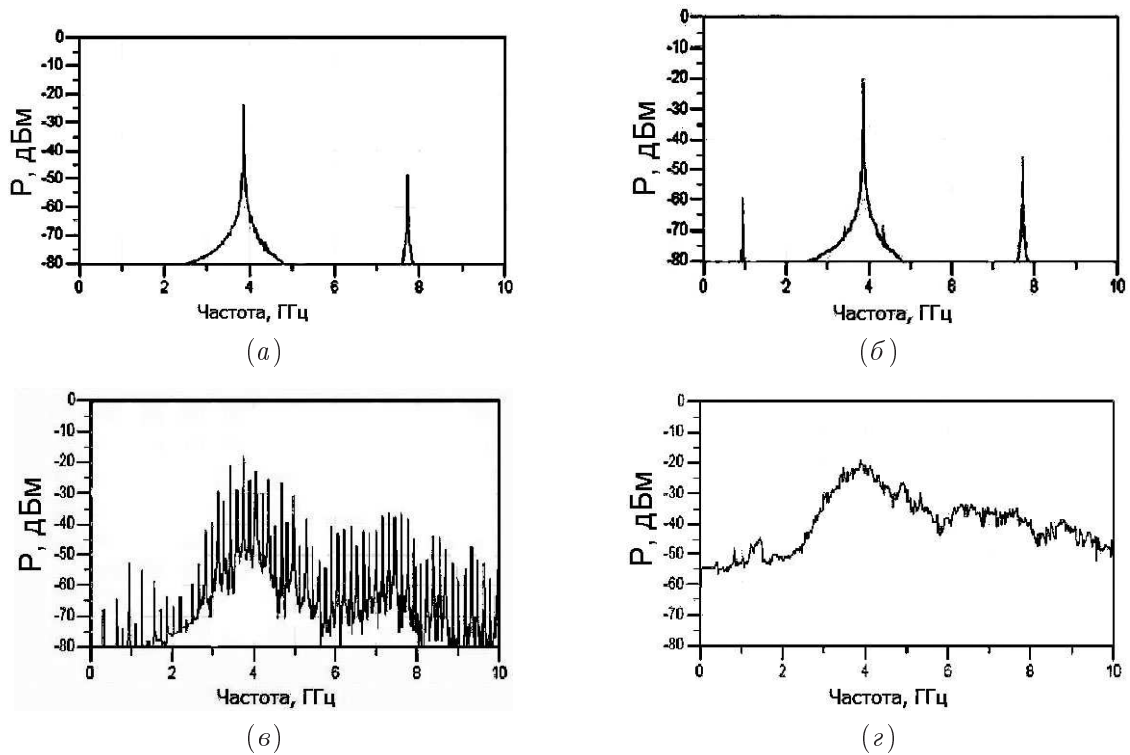


Рис. 5. Спектры мощности колебаний в модели автоколебательной структуры при напряжениях питания: 1,40 В (а); 1,55 В (б); 1,65 В (в) и 1,80 В (г).



Рис. 6. Диаграмма колебательных режимов в зависимости от напряжения питания.

## 2. Динамика модели

Исследование динамики 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 схмотехническая модель, соответствующая блок схеме (рис. 1). Моделирование производилось в специализированном пакете ADS.

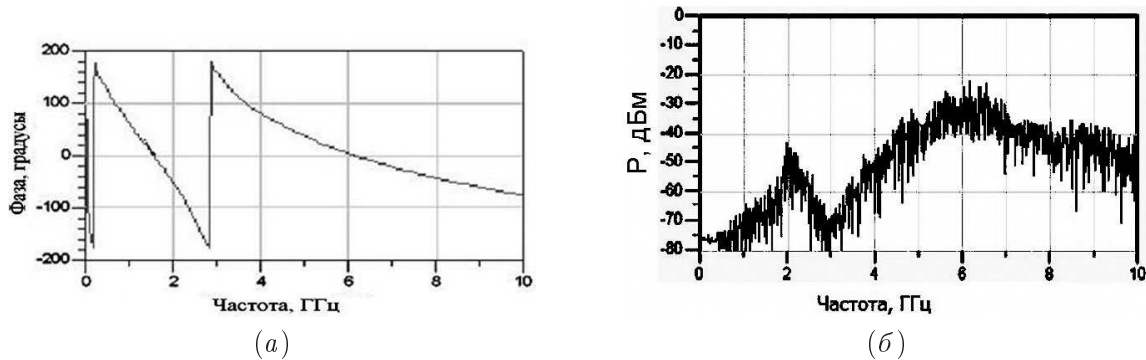


Рис. 7. Смещение спектра мощности генерируемых колебаний в сторону высоких частот при уменьшении номиналов индуктивностей и увеличении номиналов емкостей, используемых в ЧИС: фазово-частотная характеристика разомкнутого кольца обратной связи автоколебательной системы (а); спектр мощности хаотических колебаний (б).

Исследование динамики системы показало, что для выбранных значений параметров, при напряжении питания  $U = 1,4\text{ В}$  (оно одинаково для всех усилителей) в системе, как и ожидалось по результатам линейного анализа, происходит возбуждение колебаний на частоте около 4 ГГц (рис. 5а). При  $U = 1,55\text{ В}$  в системе возбуждается вторая частота в области 1 ГГц (рис. 5б). Этот факт, вообще говоря, не следует из линейного анализа устойчивости положений равновесия системы. С дальнейшим увеличением напряжения в спектре мощности возникают комбинационные частоты (рис. 5в), а затем при  $U = 1,80\text{ В}$  происходит переход к колебательному режиму с непрерывным спектром мощности, соответствующим динамическому хаосу (рис. 5г). Развитие колебаний в модели суммировано на диаграмме режимов (рис. 6). Из нее, в частности, видно, что зона хаотических колебаний охватывает диапазон изменения напряжений от 1,8 до 2 В, что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости режима хаотических колебаний к изменению этого параметра. Основная мощность генерируемых хаотических колебаний находится в диапазоне от 3,6 до 4,6 ГГц (рис. 5г).

Положение полосы частот генерируемых колебаний зависит от фазово-частотной характеристики (ФЧХ) кольца обратной связи системы. Например, при уменьшении номинала индуктивностей и увеличении номинала емкостей ЧИС, частоты, для которых выполняются фазовые условия возбуждения колебаний, сдвигаются вверх по спектру и сам спектр мощности генерируемых колебаний также смещается в сторону более высоких частот. В частности, на рис. 7а представлена ФЧХ, для которой фазовые условия возбуждения автоколебаний реализуются на частотах 1,5 и 6 ГГц. При этих условиях максимум огибающей спектра мощности хаотических колебаний находится именно вблизи частоты 6 ГГц, т. е. там, где возбуждается одна из базовых частот двухчастотного автоколебательного режима, в результате разрушения которого возникает хаос (рис. 7б).

Отметим, что смещение спектра мощности генерируемых колебаний вверх по частоте возможно лишь до некоторого предела, за которым автоколебательный режим отсутствует. Это связано с нарушением условий, при которых в системе может возникнуть режим двухчастотных автоколебаний, а именно, в силу недостаточного усиления в кольце обратной связи на высоких частотах. Причина недостаточного усиления обусловлена технологическим шагом транзисторов, используемых в схеме. Чем шаг меньше, то есть чем меньше ширина затвора транзистора, определяемая технологическими допусками, тем более высо-

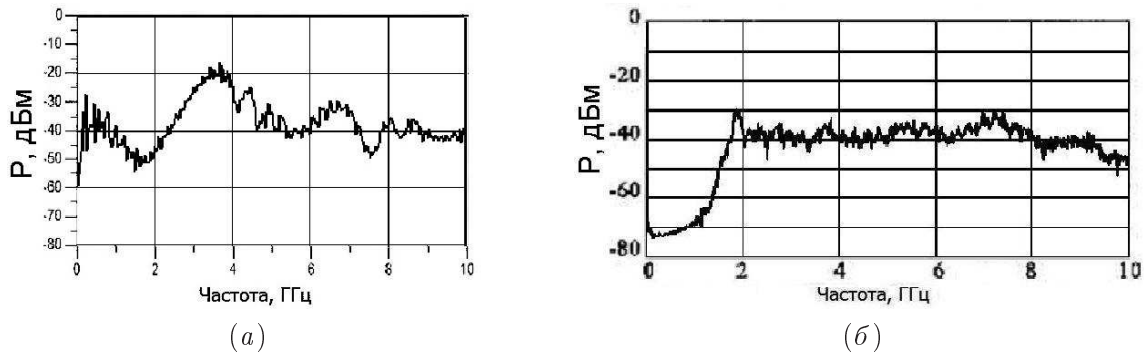


Рис. 8. Спектр мощности хаотических колебаний при использовании: одного LC-звена (а); трех LC-звеньев (б).

кочастотным является транзистор. Поэтому для используемой в работе КМОП технологии 0,18 мкм возможность генерации хаотических колебаний ограничена частотой 8 ГГц. Для технологий 0,13 и 0,09 мкм граничные частоты составляют 10 и 12 ГГц соответственно.

### 3. Влияние числа LC-звеньев в частотно-избирательной системе на спектральные характеристики хаоса

Выше исследовалась динамика автоколебательной системы, в кольце обратной связи которой использовались два LC-звена. Однако расчеты и моделирование показывают, что хаотические колебания в рассматриваемой кольцевой структуре могут возбуждаться и при использовании одного и трех LC-звеньев в структуре ЧИС. Подробно вопросы, связанные с механизмами возникновения и развития хаоса в этих системах, будут рассмотрены в другом месте. Здесь отметим только, что при использовании одного LC-звена (параметры звена те же, что и в системе с двумя звеньями), спектр мощности хаотических колебаний сужается до 400 МГц и сдвигается в сторону более низких частот (рис. 8а), а при использовании трех LC-звеньев, наоборот, значительно расширяется и занимает полосу от 2 до 8 ГГц (рис. 8б).

### 4. Экспериментальная реализация автоколебательной системы

Разработка автоколебательной структуры на кристалле кремния по КМОП технологии 0,18 мкм осуществлялась в программном пакете Cadence IC, специально предназначенном для разработки микросхем. Возможность его использования для анализа систем с хаотической динамикой была установлена при разработке хаотической автоколебательной структуры на кристалле SiGe [10].

Разработка была проведена 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 следующему этапу исследования динамики системы с применением моделей неидеальных элементов, которые учитывают влияние температу-

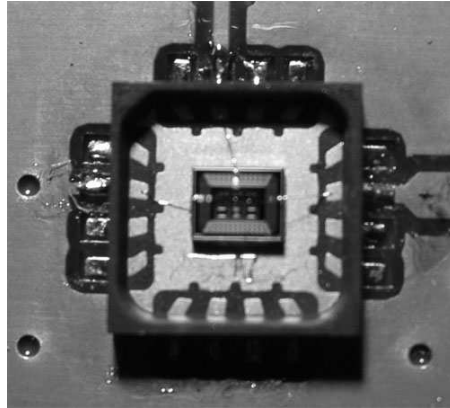


Рис. 9. Интегральная микросхема генератора хаоса микроволнового диапазона на КМОП технологии 0,18 мкм.

ры, скин-эффекта, токов утечки подложки и др. Например, КМОП транзистор в этом случае описывается не статическими зависимостями, а высокоразмерной 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 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 от 3,6 до 4,6 ГГц.

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  $1 \text{ мм}^2$ . Синтезированная модель автоколебательной структуры генерирует хаотические колебания, основная мощность которых сосредоточена в частотном диапазоне 3,6–4,6 ГГц. Мощность генерируемого сигнала составляет около 400 мкВт при напряжении питания 1,80 В и потребляемом токе 25 мА.

В соответствии с разработанной моделью были изготовлены образцы автоколебательных структур на КМОП технологии. Для проведения экспериментов кристалл помещался в пластмассовый корпус, и выводы схемы соединялись с контактными площадками корпуса кусочками тонкой проволоки (рис. 9).

В экспериментальном образце автоколебательной структуры с ростом напряжения питания происходит возбуждение колебаний на частоте 3,2 ГГц (рис. 10а), затем в спектре мощности появляется вторая частотная компонента около 600 МГц (рис. 10б). При дальнейшем увеличении напряжения питания возникают комбинационные частоты (рис. 10в). Далее происходит разрушение двухчастотного автоколебательного режима и переход к хаосу с основной мощностью колебаний, сосредоточенной в диапазоне частот 2,8–3,8 ГГц (рис. 10г). Интегральная мощность хаотических колебаний составляет  $-9 \text{ дБм}$ .

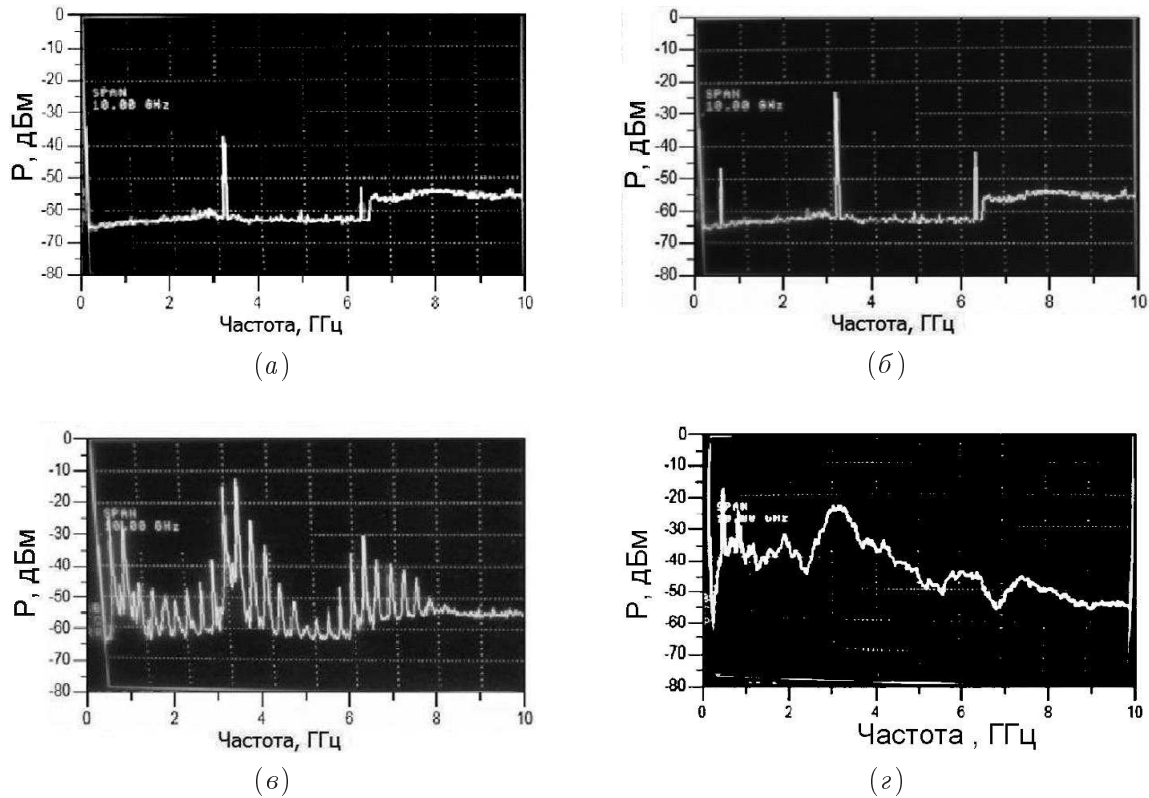


Рис. 10. Эволюция спектра мощности сигнала на выходе микросхемы генератора хаоса с ростом напряжения питания: 1,5 В (а); 1,7 В (б); 2,3 В (в); 2,5 В (г). Одно деление по горизонтальной оси соответствует 1 ГГц, по вертикальной оси — 10 дБм.

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 (27 мА) и напряжение (2,20 В) выше значений, полученных при моделировании (25 мА и 1,90 В соответственно). И, наконец, выходная мощность сигнала в эксперименте на 5 дБм 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.

## Заключение

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 ГГц). Экспериментальные спектральные характе-



ристики 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, гранты № 09-02-00983-а, № 08-07-00298, 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., Панас А. И., Старков С. О. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах // Радиотехника, 2000, № 3, с. 9–20.
- [2] Special issue on applications of nonlinear dynamics to electronic and information engineering // Proc. IEEE, 2002, vol. 90, no. 5.
- [3] Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
- [4] Мишагин К. Г., Матросов В. В., Шалфеев В. Д., Шохнин В. В. Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двух каскадно-связанных фазовых систем // Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып. 24, с. 31–38.
- [5] Шильников Л. П., Шильников А. Л., Тураев Д. В., Чуа Л. Методы качественной теории в нелинейной динамике: Ч. 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 546 с.
- [6] Dmitriev A. S., Panas A. I., Starkov S. O. Ring oscillating systems and their application to the synthesis of chaos generators // Internat. J. Bifur. Chaos Appl. Sci. Engrg., 1996, vol. 6, no. 5, pp. 851–865.
- [7] Дмитриев А. С., Ефремова Е. В. Транзисторные генераторы хаоса с заданной формой спектра мощности колебаний // Радиотехника, 2005, № 8, с. 67–72.
- [8] Ефремова Е. В., Атанов Н. В., Дмитриев Ю. А. Генератор хаотических колебаний радиодиапазона на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы // Изв. вузов. Прикл. нелинейн. динамика, 2007, т. 15, № 1, с. 23–41.
- [9] Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Максимов Н. А., Григорьев Е. В. Генератор хаотических колебаний сверхвысокочастотного диапазона на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, № 10, с. 1232–1240.
- [10] Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Никишов А. Ю. Генерация динамического хаоса микроволнового диапазона в автоколебательной структуре на основе SiGe // Письма в ЖТФ, 2009, т. 35, вып. 23, с. 40–46.
- [11] Никишов А. Ю., Панас А. И. Сверхширокополосный СВЧ-генератор хаоса кольцевой структуры на усилительных микросборках // Успехи совр. радиоэлектроники, 2008, № 1, с. 54–62.

