Энергетическая эффективность генераторов хаотических колебаний микроволнового диапазона, реализованных на КМОП структурах

Никишов Артём Юрьевич [1,2]

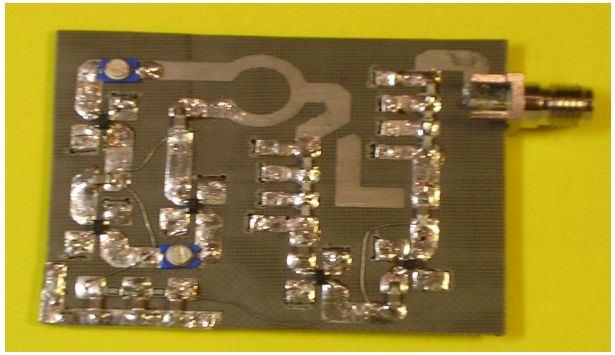
[1]Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет)

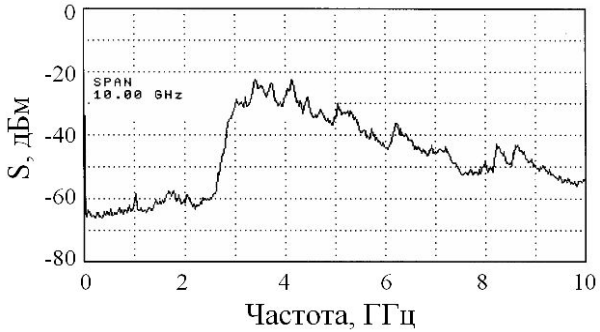
chaos@mail.mipt.ru

[2]Институт Радиотехники и Электроники им. В. А. Котельникова РАН

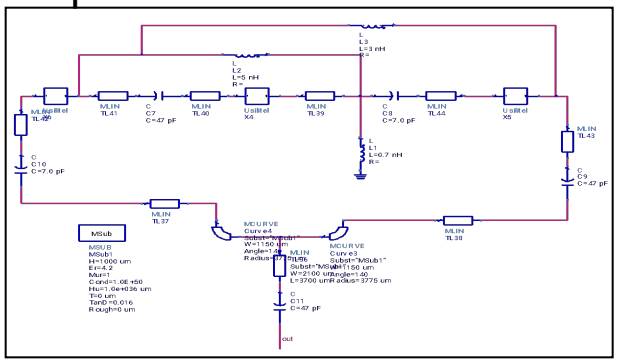
nikishov@cplire.ru

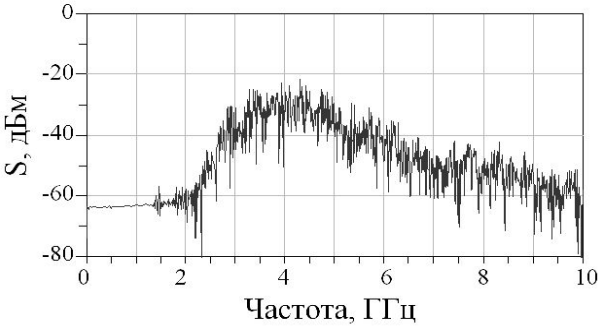
Микрополосковый кольцевой генератор хаотических колебаний*)





Микрополосковый генератор хаотических колебаний и его спектр мощности





Модель микрополоскового генератор хаотических колебаний и его спектр мощности

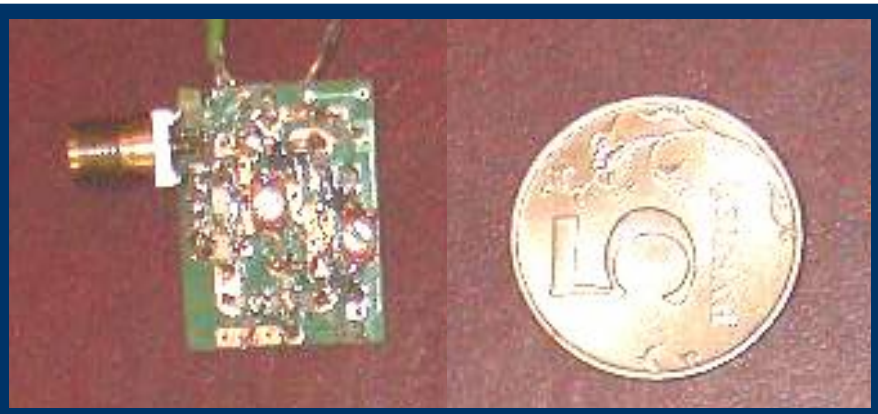
*) Panas A.I., Kyarginsky B.E., Efremova E.V. "Ultra-wideband microwave chaotic oscillator", *Proc. 12th Mediterranean microwave symposium MICROCOLL-2007*, 14-16 May 2007, Budapest, Hungary, pp. 145–148

Схема кольцевой автоколебательной системы, реализованной на КМОП-структурах (I)

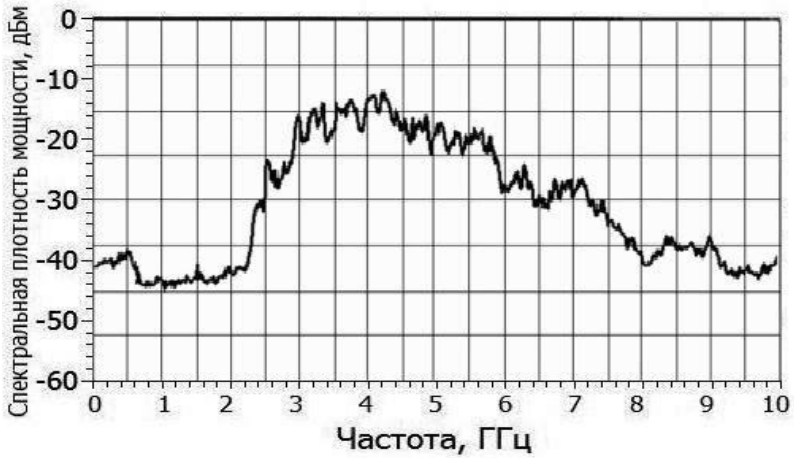
Прототип: кольцевой генератор на сосредоточенных элементах

Основные достоинства:

- Отсутствуют микрополосковые линии
- Ответвитель выполнен на сосредоточенных элементах



1 – Генератор 2 – Пять рублей

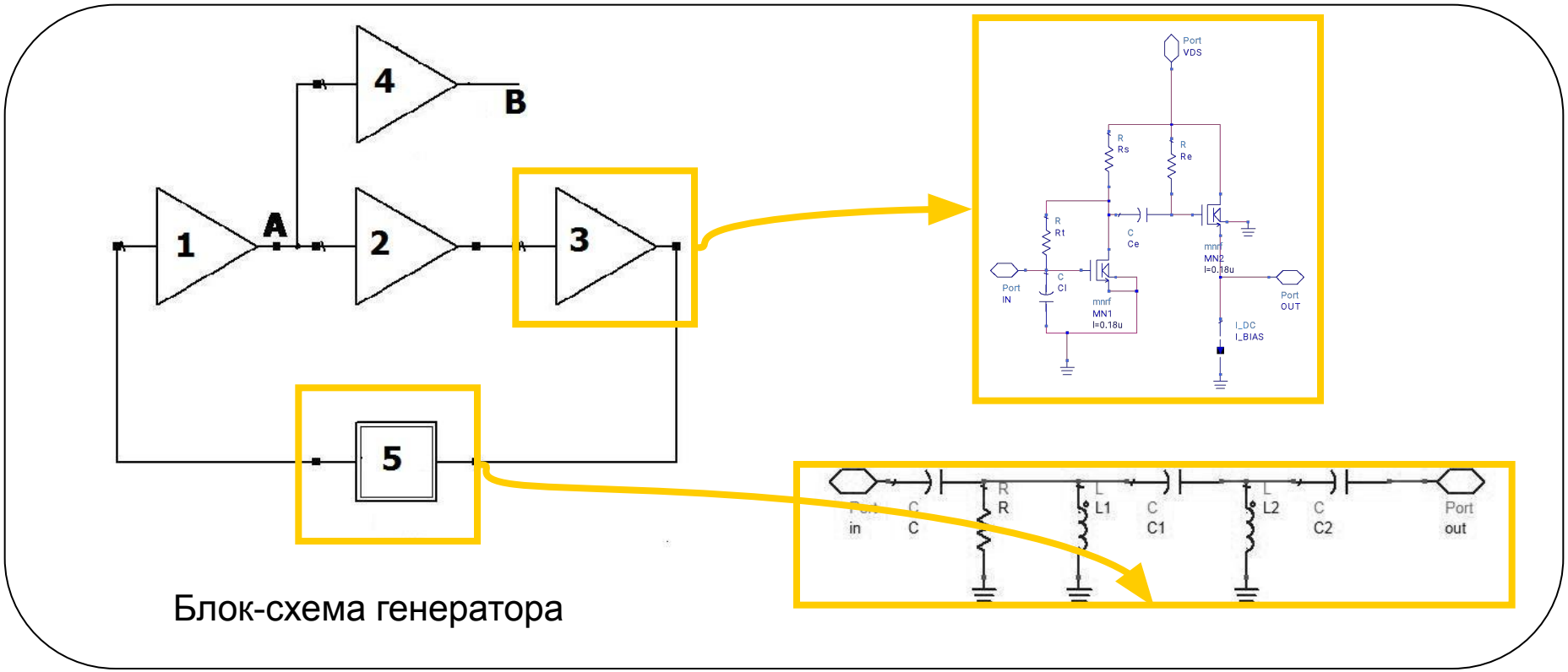


Спектральная плотность мощности (эксперимент)

ССЫЛКИ:

- "Сверхширокополосный СВЧ генератор хаоса кольцевой структуры на усилительных микросборках", *Успехи современной радиоэлектроники*, 2008, №1, с. 54–62.
- Panas A., Efremova E., Kyarginsky B., Nikishov A. «UWB microwave chaotic oscillators based on microchip», Proceeding of the 15th IEEE ICECS 2008,Pages: 942-945.

Кольцевой генератор хаотических колебаний, выполненный на элементах КМОП технологии



Блок-схема генератора

1,2,3 – СВЧ СШП КМОП усилители (усиление 12-2 dB в диапазоне 0 – 10 GHz)

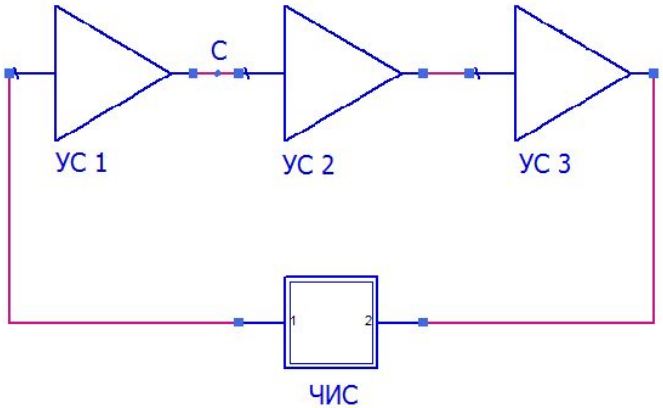
5 – частотно-избирательная схема, состоящая из одного RC- и двух LC-звеньев

4 – буферный усилитель

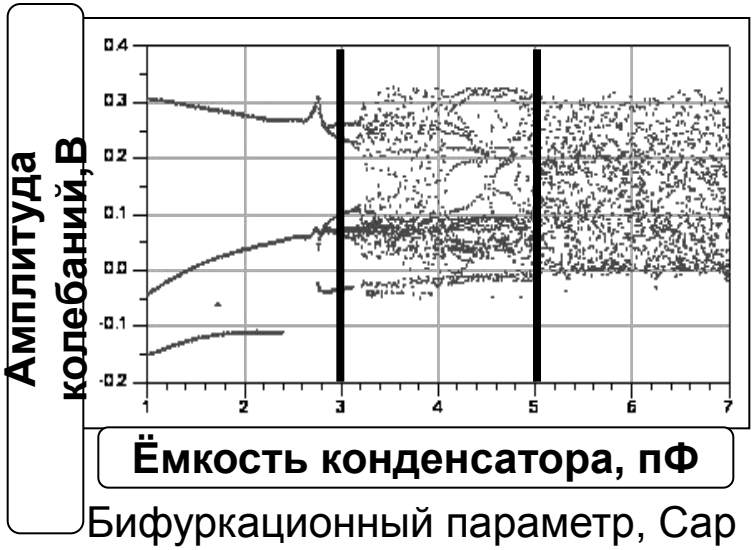
Схема кольцевой автоколебательной системы, реализованной на КМОП-структурах (III): Выбор параметров системы

1. Выбор начальных параметров системы:

Начальные параметры системы выбираются так, чтобы продублировать характеристики усилителей и ответвителя кольцевого генератора хаотических колебаний



2. Оптимизация параметров с помощью бифуркационных диаграмм:



Например:

Cap<3 пФ – только периодические колебания

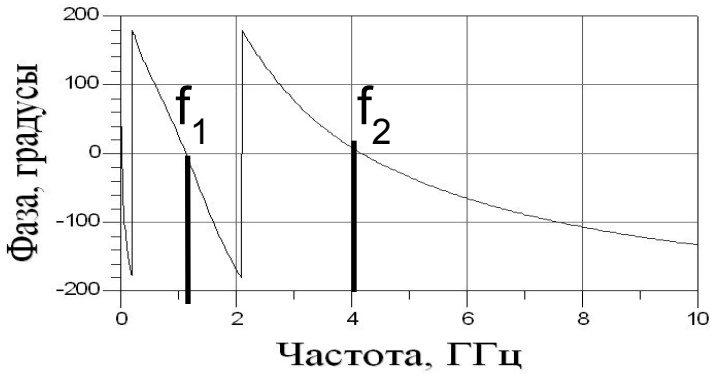
Cap>5 пФ – возможны хаотические колебания

Моделирование

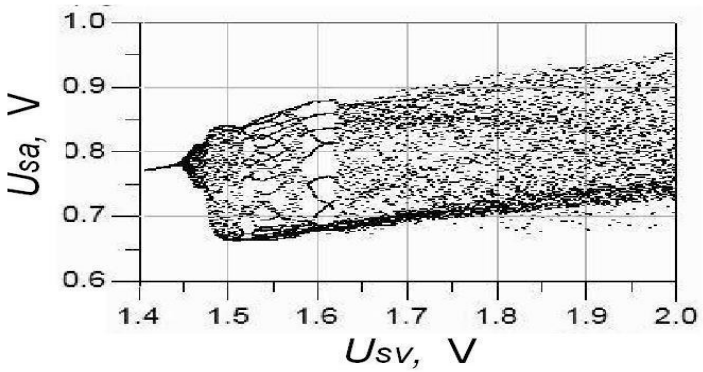
Условия Найквиста – Михайлова возбуждения колебаний:

- К>=1 – баланс амплитуд (где К – усиление в кольце обратной связи);
- Ф=360 *n – баланс фаз (Ф – набег фазы в кольце обратной связи, n целое число)

АЧХ в кольце обратной связи



ФЧХ в кольце обратной связи

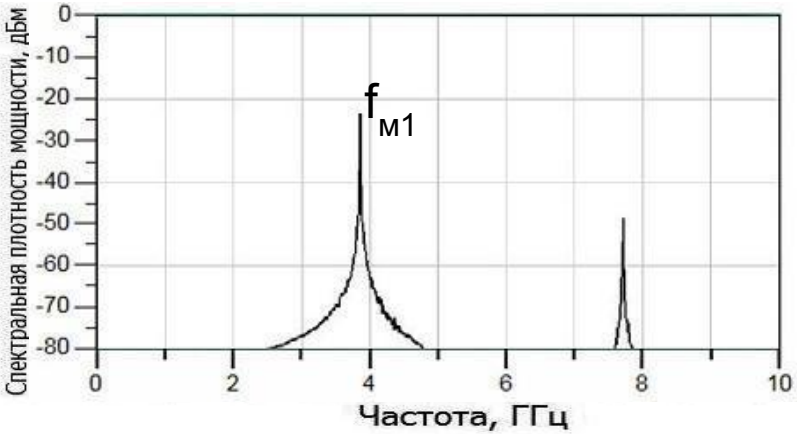


Типичная бифуркационная диаграмма

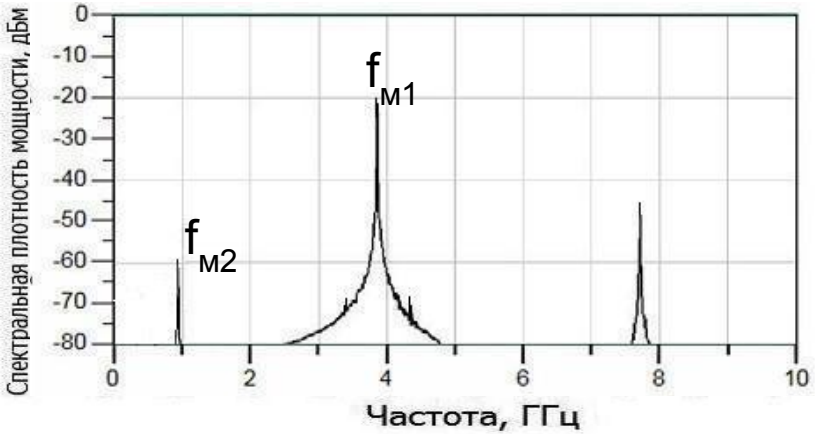
При 1.4 В – возможен одночастотный автоколебательный режим (f_1=4 ГГц)

При 1.55 В – возможен двухчастотный автоколебательный режим (f_1=4 ГГц и f_2=1 ГГц)

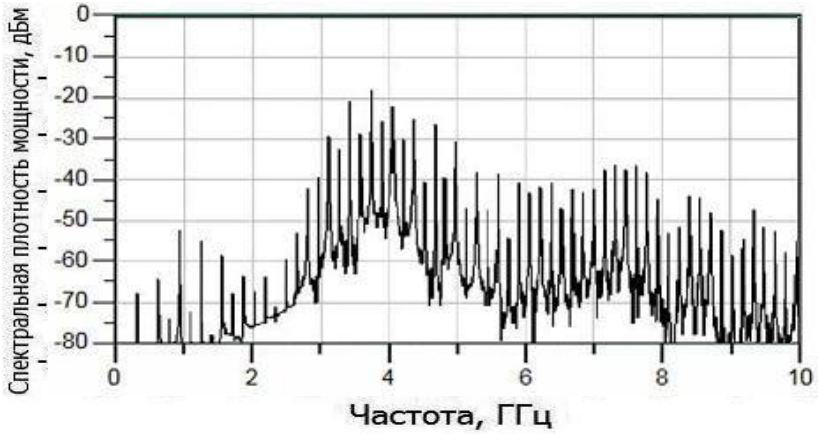
Спектральные характеристики, автоколебательной системы (моделирование)



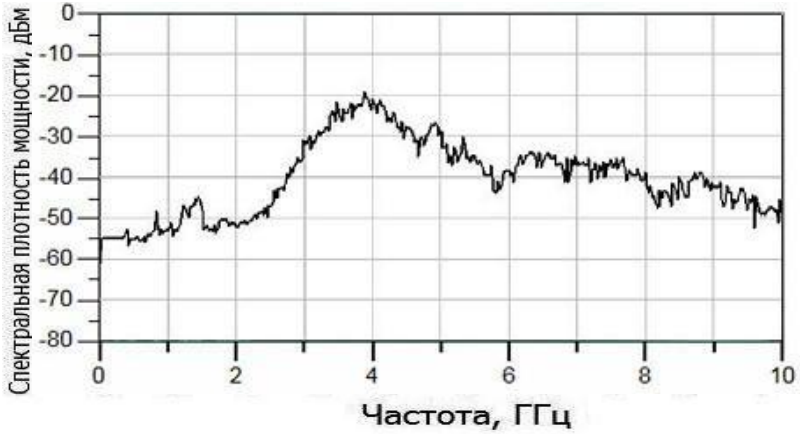
1.4 В ($f_{м1}$=4 ГГц)



1.55 В ($f_{м1}$=4 ГГц, $f_{м2}$=1 ГГц)



1.65 В

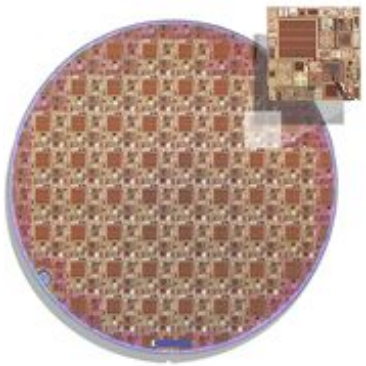


1.8 В (хаотические колебания)

Спектральная плотность мощности (СПМ) колебаний при различном напряжении питания

Маршрут проектирования СВЧ устройств на кристалле

Особенности проектирования устройств в интегральном исполнении



Погрешность номиналов пассивных элементов при производстве достигает 15 %

Отличие в скорости диффузии в транзисторе от заданной при проектировании достигает 15 %

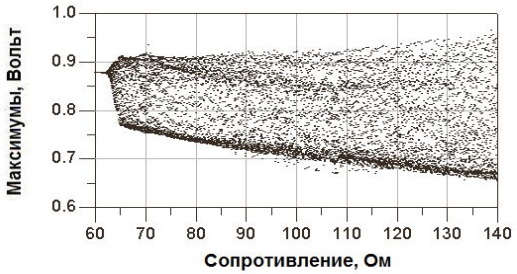
Разброс в напряжении питания источника может достигать 10 %

Появление отличных от исходных параметров автоколебательной системы

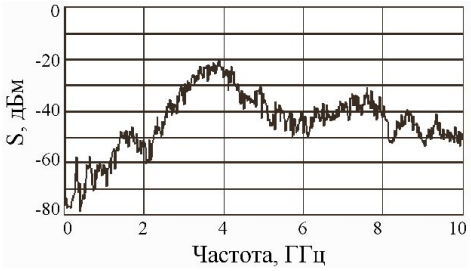
Возможное отсутствие хаотических колебаний в генераторе при его конечном производстве

Анализ режимов работы генератора при допустимых отклонениях в номиналах элементов

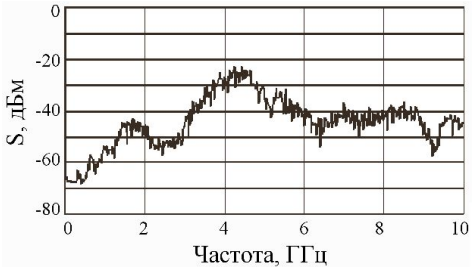
R – элемент:



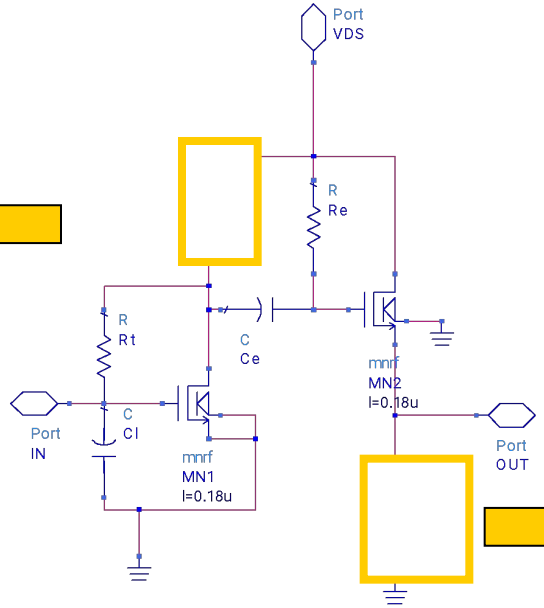
Бифуркационная диаграмма



Спектр мощности, R=140 Ом



Спектр мощности, R=100 Ом



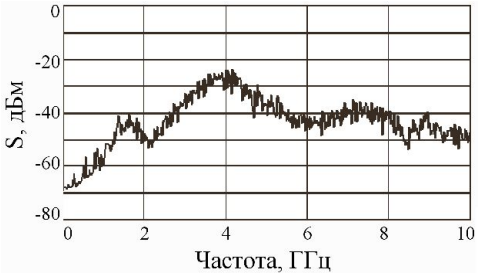
Принципиальная схема усилителя

Выходная мощность (дБм):

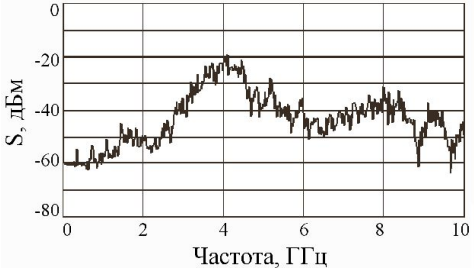
R=100 Ом:	I=2.7 мА
-5	-4.5
R=140 Ом:	I=3.3 мА
-3	-3

Источник тока:

Бифуркационная диаграмма

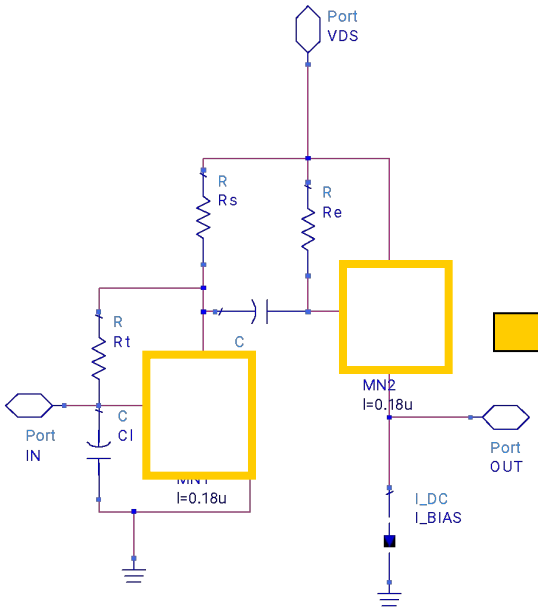


Спектр мощности, I=2.7 мА

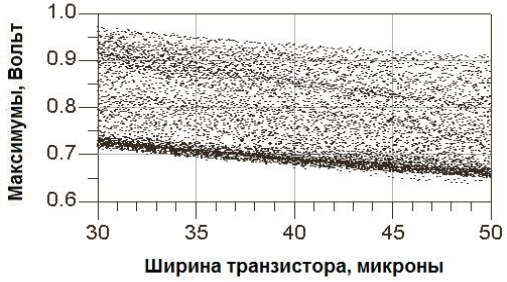


Спектр мощности, I=3.3 мА

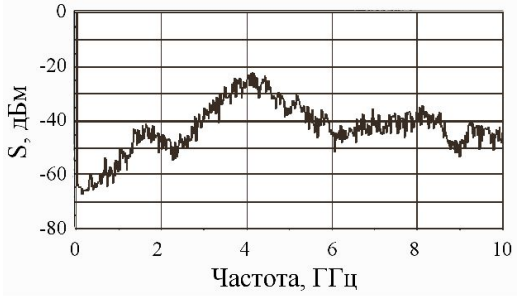
Анализ режимов работы генератора при различных допустимых скоростях диффузии в транзисторах



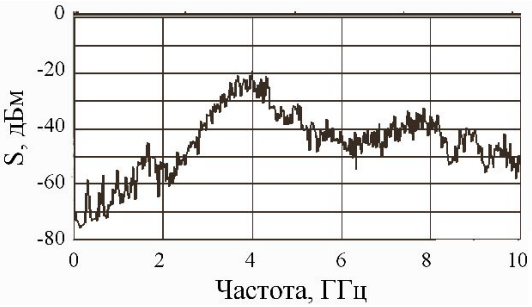
Принципиальная схема усилителя



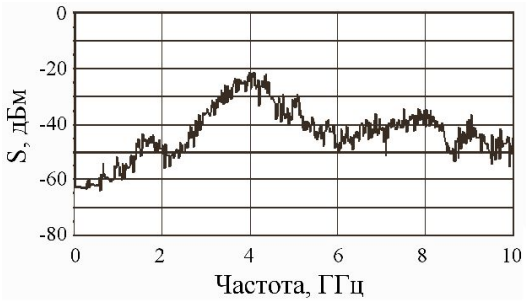
Бифуркационная диаграмма



Спектр мощности, худший случай



Спектр мощности, лучший случай



Спектр мощности, типичный случай

(Напряжение питания составляет 1.8 Вольт)

Выходная мощность (дБм):

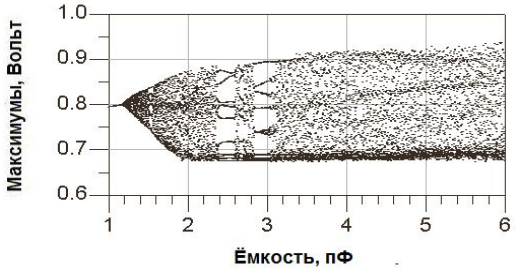
1) Лучший случай: -2 дБм

2) Типичный случай: -3 дБм

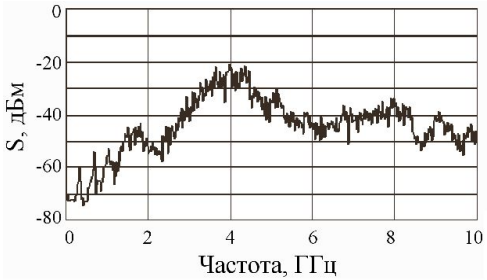
3) Худший случай: -4 дБм

Анализ режимов работы генератора при допустимых отклонениях в номиналах элементов

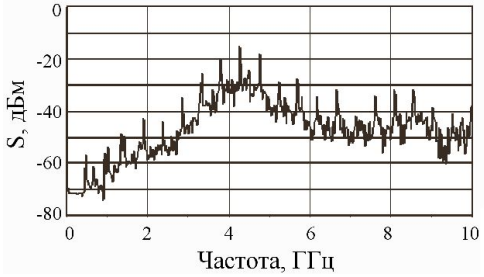
C0 – элемент:



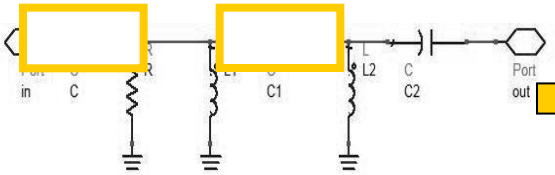
Бифуркационная диаграмма



Спектр мощности, C=6 пФ

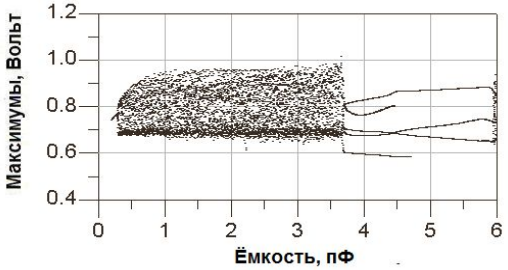


Спектр мощности, C=3 пФ

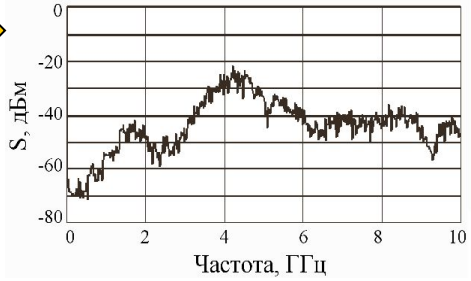


Частотно-избирательная схема

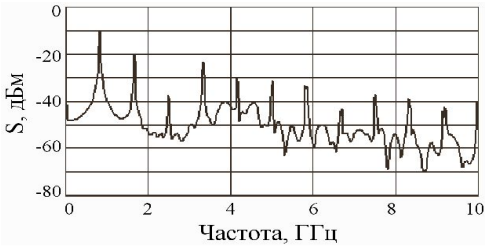
C1 – элемент:



Бифуркационная диаграмма



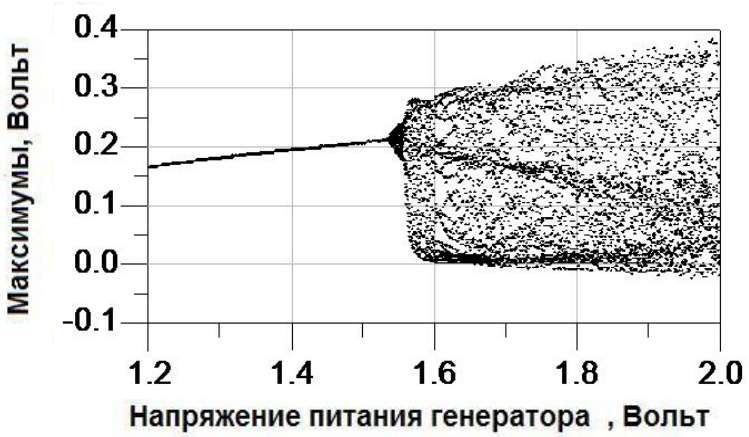
Спектр мощности, C=0.8 пФ



Спектр мощности, C=5 пФ

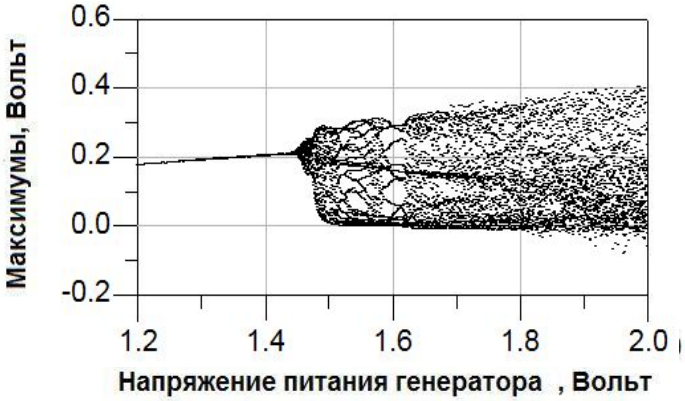
Анализ режимов работы генератора при различном напряжении питания

Бифуркационные диаграммы



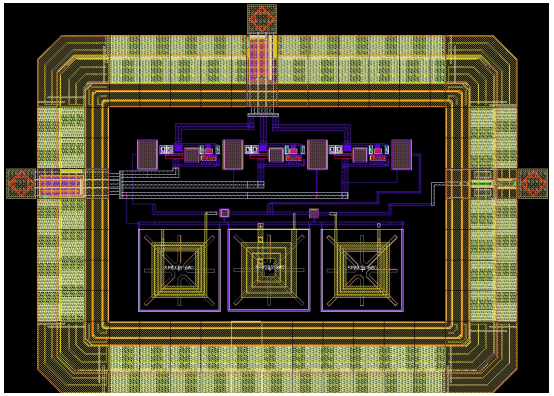
Худший случай

Лучший случай



Типичный случай

Экспериментальная реализация системы на КМОП-технологии 180 нм



Топология системы

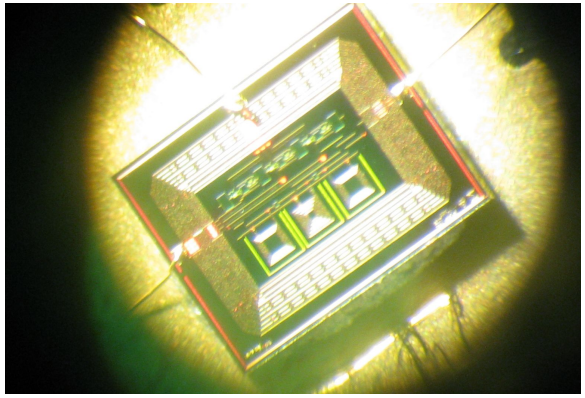


Фото интегральной схемы (размер 0.7x0.8 мм^2)

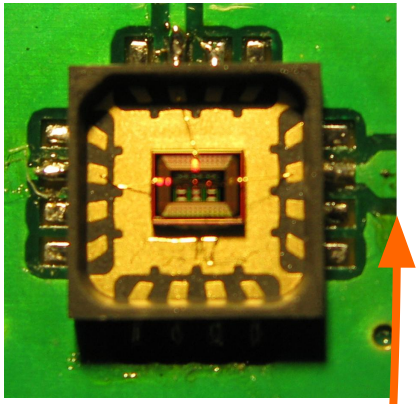
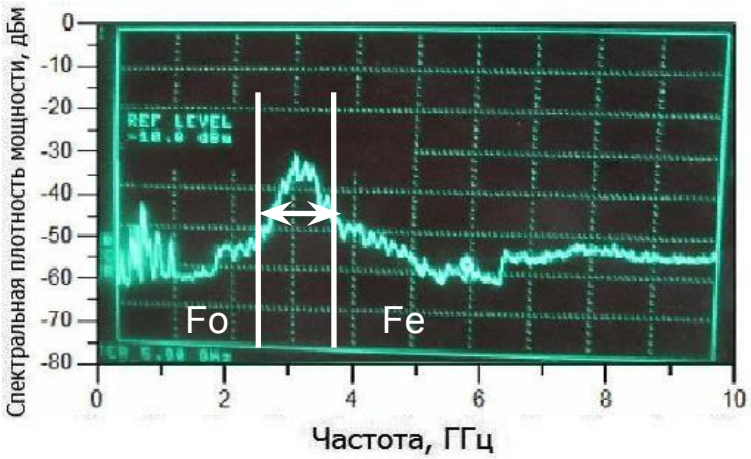
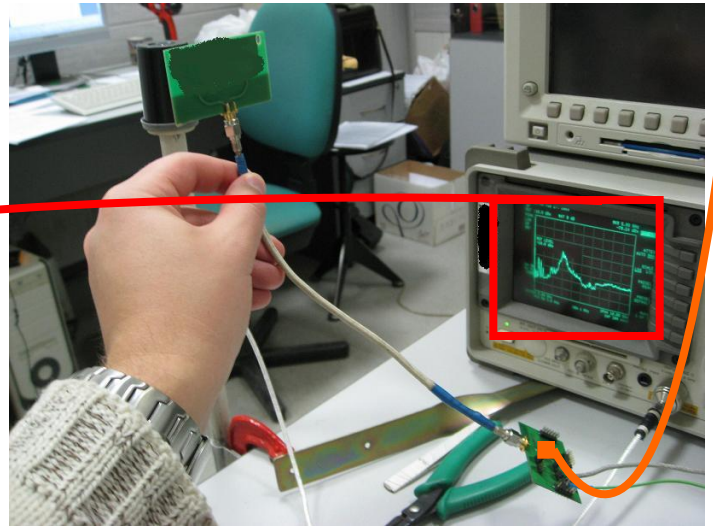


Фото в корпусе QFN

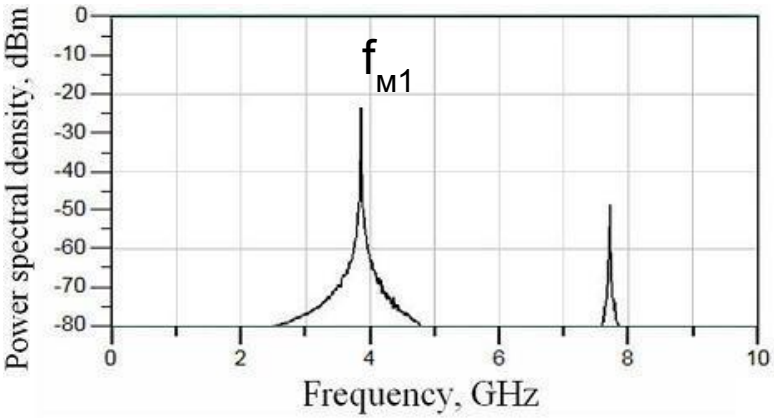


Спектральная плотность мощности выходного сигнала

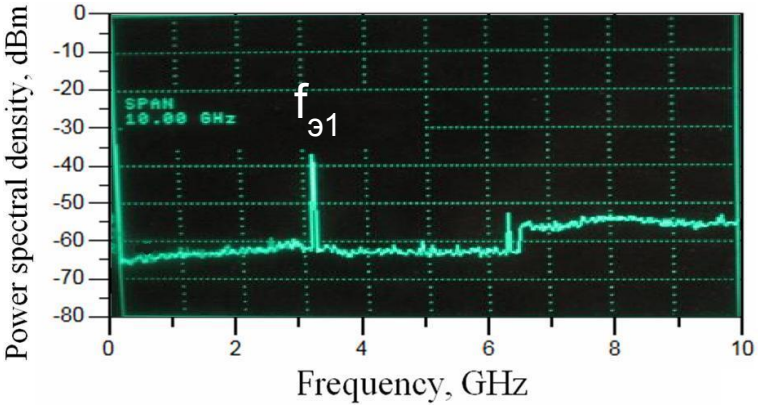


Сравнение спектральных характеристик модели автоколебательной системы и её экспериментальной реализации (для 180 нм)

Одночастотный автоколебательный режим:

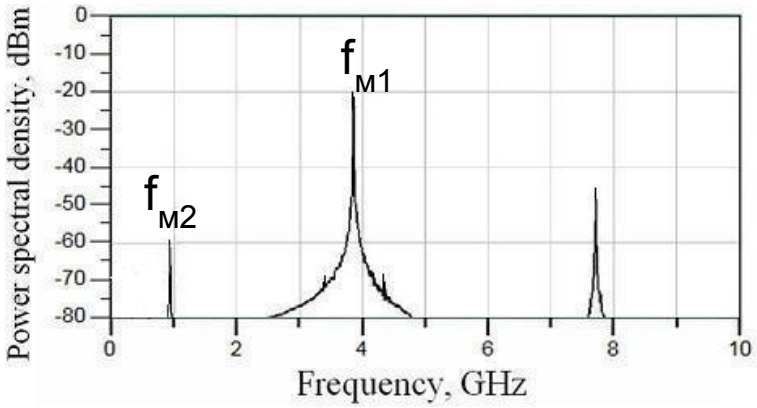


модель: $f_{м1}$=4 ГГц, V_{sup}=1.4 Вольт

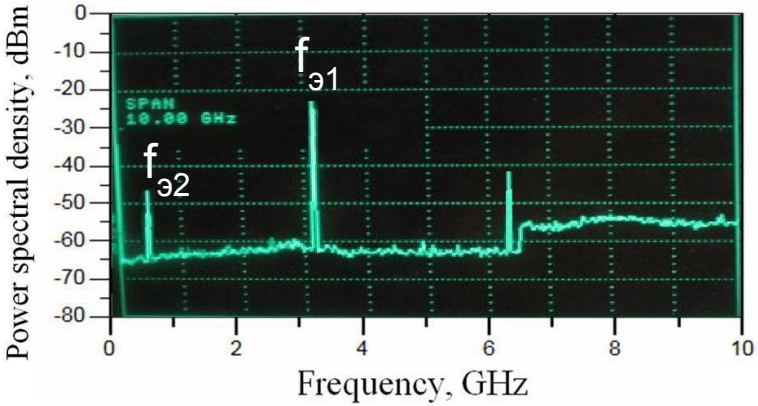


эксперимент: $f_{э1}$=3.2 ГГц, V_{sup}=1.5 Вольт

Двухчастотный автоколебательный режим:



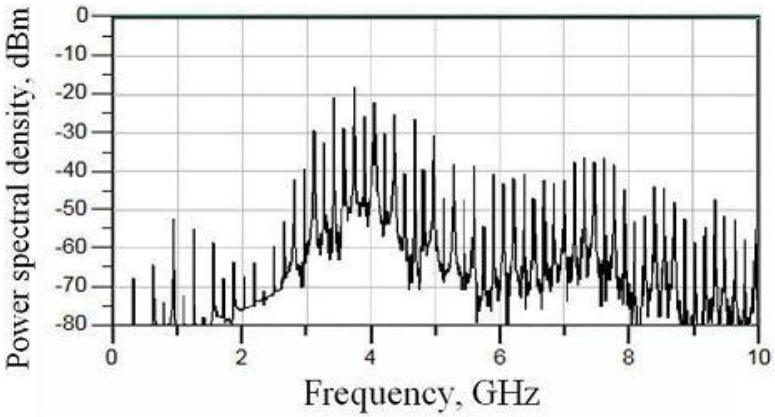
модель: $f_{м1}$=4 ГГц, $f_{м2}$=1 ГГц, V_{sup}=1.55 Вольт



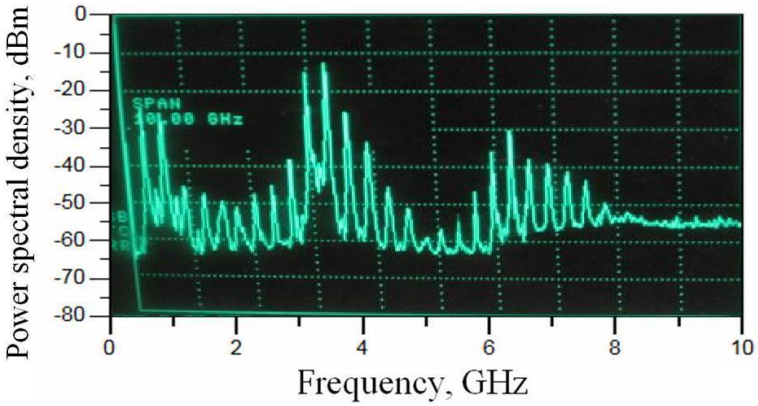
эксперимент: $f_{э1}$=3.2 ГГц, $f_{э2}$=0.6 ГГц, V_{sup}=1.7 Вольт

Сравнение спектральных характеристик модели автоколебательной системы и её экспериментальной реализации (для 180 нм)

Двухчастотный автоколебательный режим:

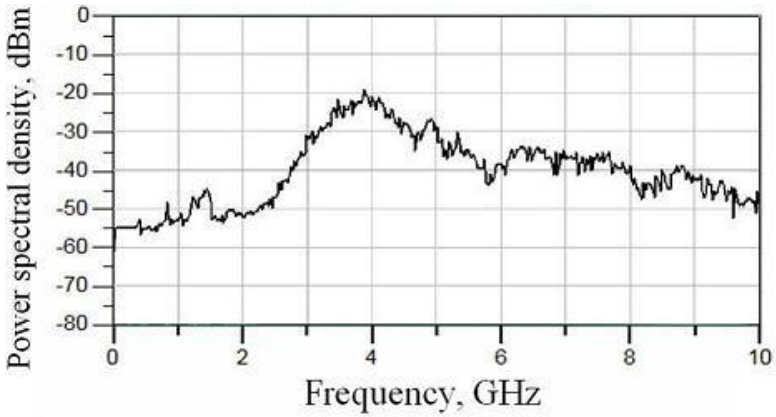


модель: V_{sup}=1.65 Вольт

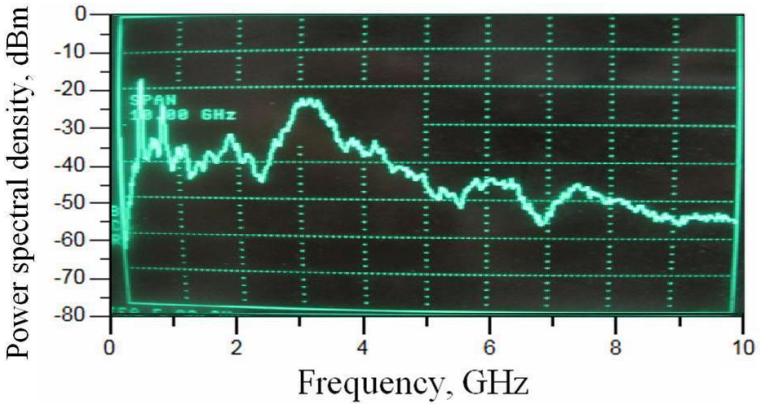


эксперимент: V_{sup}=2.3 Вольт

Хаотический автоколебательный режим:



модель: V_{sup}=1.8 Вольт

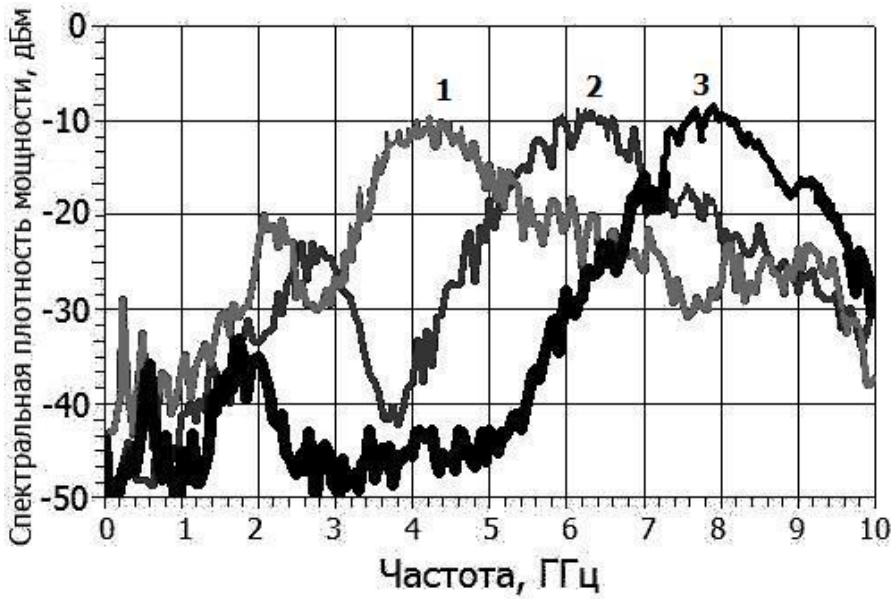


эксперимент: V_{sup}=2.5 Вольт

Сравнение основных характеристик модели автоколебательной системы и её экспериментальной реализации (180нм)

Параметры (хаотический режим)	Модель	Эксперимент
Напряжение питания, Вольт	1.8	2.5
Ток питания, мА	25	27
Выходная мощность, дБм	0.4	0.12
Центральная частота, ГГц	4	3.2
Диапазон генерации, ГГц	1.2	0.8
КПД	0.9%	0.2%

Изменение энергетических характеристик генератора при уменьшении технологической нормы КМОП-структур



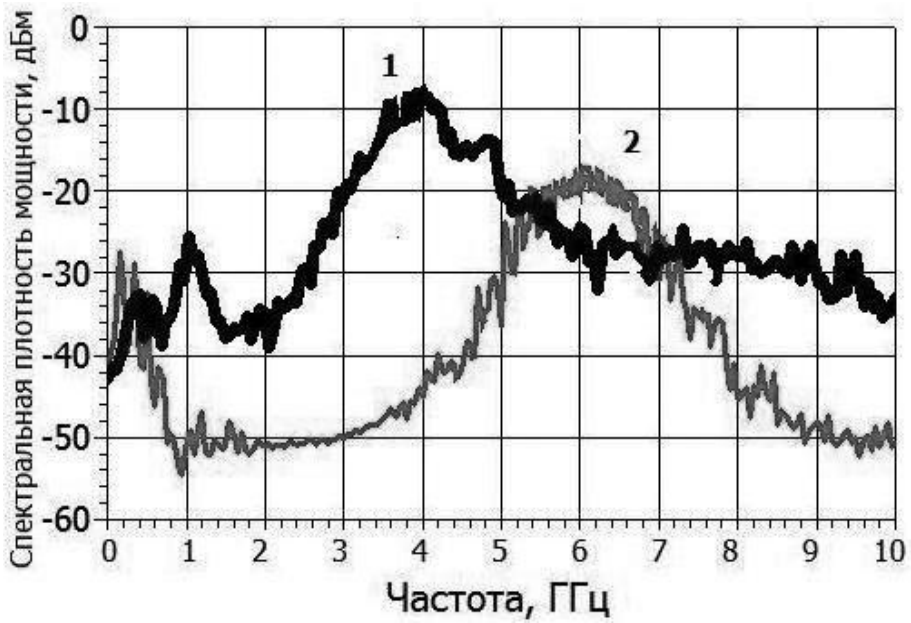
Спектры мощности хаотических колебаний генераторов, реализованных на КМОП-структурах с нормами:
180 нм (линия – 1, диапазон частот 3-5 ГГц),
130 нм (линия – 2, диапазон частот 5-7 ГГц),
90 нм (линия – 3, диапазон частот 7-9 ГГц)

Технология	90 нм	130 нм	180 нм
Диапазон частот (ГГц)	7-9	5-7	3-5
Напряжение питания (Вольт)	1.0	1.2	1.8
Ток питания в кольце обратной связи (мА)	19.5	26	36
Ток питания буферного усилителя (мА)	9.6	11.6	15
Общий ток питания (мА)	29.1	37.6	51
Мощность (мВт)	29.1	45.3	92
Излучаемая мощность (мВт)	1	0.85	0.73
КПД	3.5%	1.8%	0.8%

Если l_1 и l_2 технологические нормы КМОП-структур, а $КПД_{l1}$ и $КПД_{l2}$ – КПД двух генераторов, реализованных по данным технологическим нормам, то:

$$\frac{КПД_{l2}}{КПД_{l1}} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2$$

Изменение энергетических характеристик генератора при уменьшении технологической нормы КМОП-структур

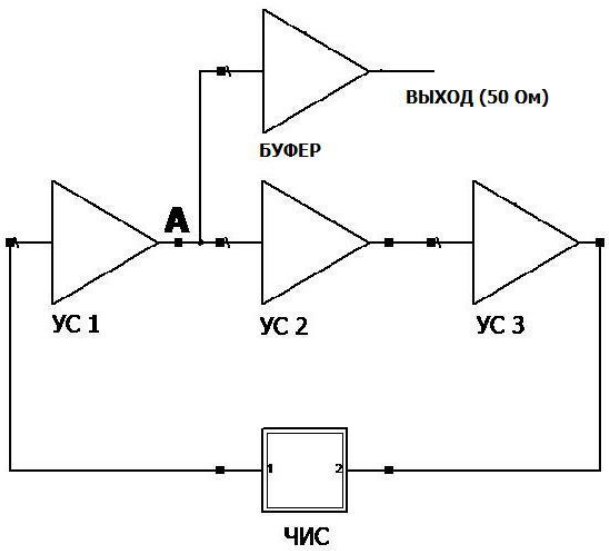


Спектры мощности хаотических колебаний генераторов, реализованных на КМОП-структурах с нормами:
90 нм (линия – 1, диапазон частот 3-5 ГГц),
180нм (линия – 2, диапазон частот 5-7 ГГц)

Технология	90 нм	180 нм		130 нм	180 нм
Диапазон частот (ГГц)	3-5	3-5		5-7	5-7
Напряжение питания (Вольт)	1.0	1.8		1.2	1.8
Ток питания в кольце обратной связи (мА)	27	36		26	27
Ток питания буферного усилителя (мА)	9.6	15		11.6	15
Общий ток питания (мА)	36.6	51		37.6	42
Мощность (мВт)	36.6	92		45.3	75.6
Излучаемая мощность (мВт)	1.4	0.73		0.85	0.56
КПД	3.9%	0.8%		1.8%	0.73%

$$\frac{КПД_{l2}}{КПД_{l1}} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2$$

Увеличение энергетической эффективности генератора при увеличении внутреннего сопротивления в кольце обратной связи



Блок-схема устройства

Для технологии 180 нм:

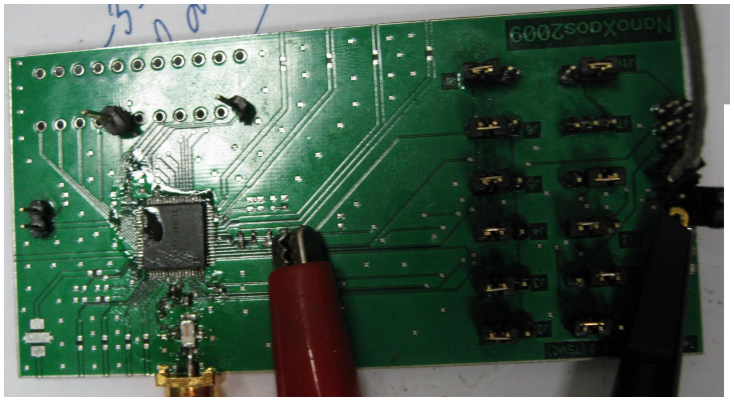
$P_{n=1}=(I_b+I_g)*V_g=92$мВт

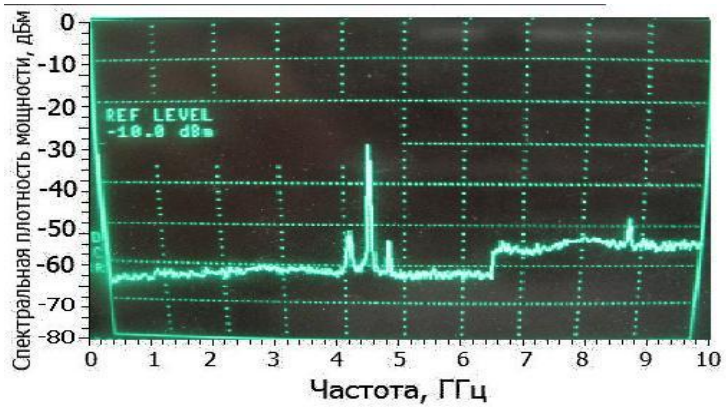
$P_{n=5}=(I_b+I_g/n)*V_g=40$мВт

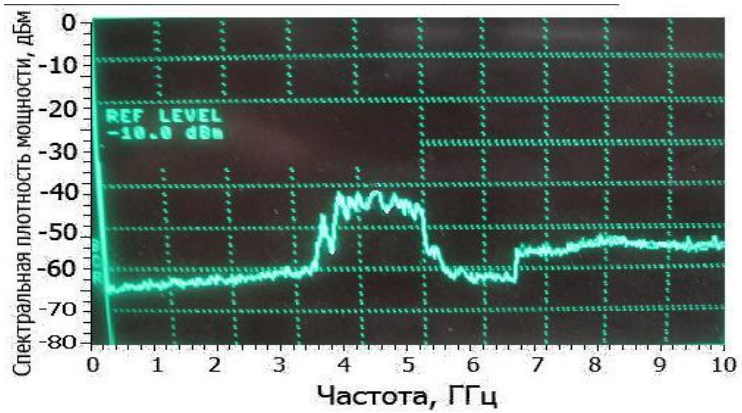
Технология	90 нм	130 нм	180 нм
Диапазон частот (ГГц)	7-9	5-7	3-5
Напряжение питания (Вольт)	1.0	1.2	1.8
Ток питания в кольце обратной связи (мА)	4	5.2	7.2
Ток питания буферного усилителя (мА)	9.6	11.7	15
Общий ток питания (мА)	13.6	16.9	22.2
Мощность (мВт)	13.6	20	40
Излучаемая мощность (мВт)	1.3	1.1	1
КПД	9.6%	5.5%	2.5%

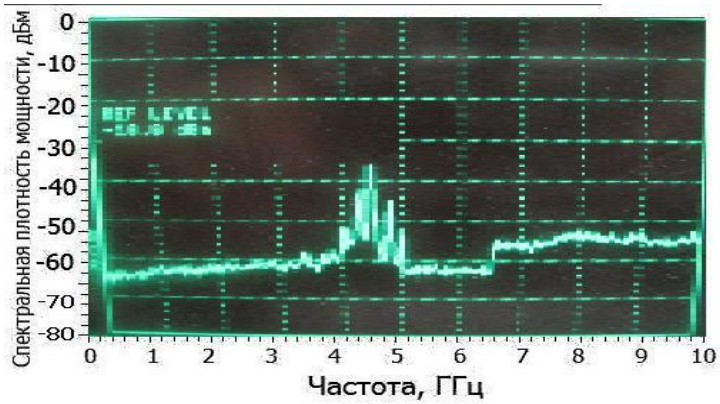
$$\frac{КПД_{l2}}{КПД_{l1}}=\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2$$

Экспериментальная реализация системы на КМОП-технологии 130 нм

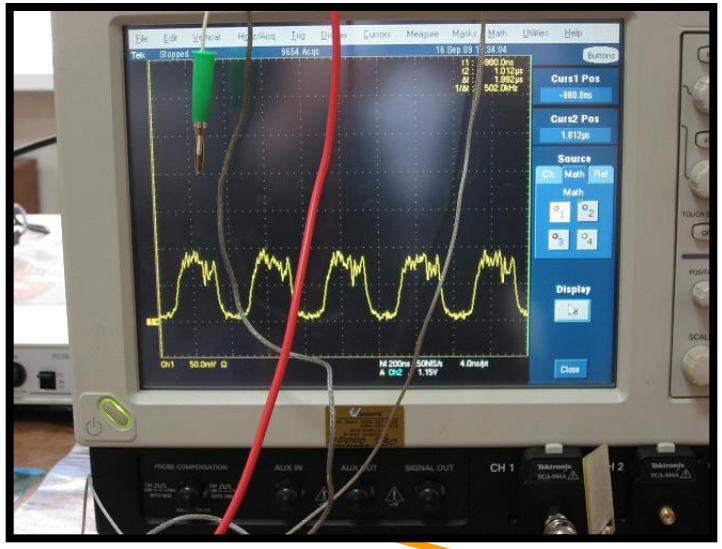




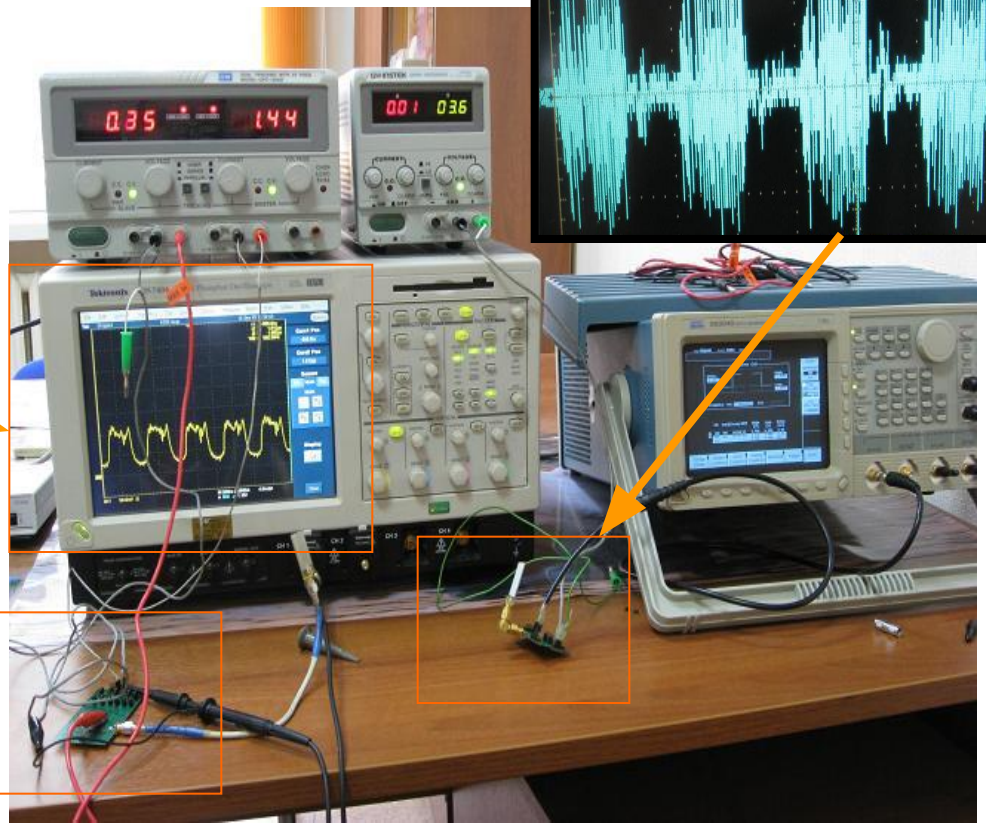




Эксперимент по передаче хаотического сигнала с использованием заказных микросхем



передатчик CMOS 180 нм Silterra

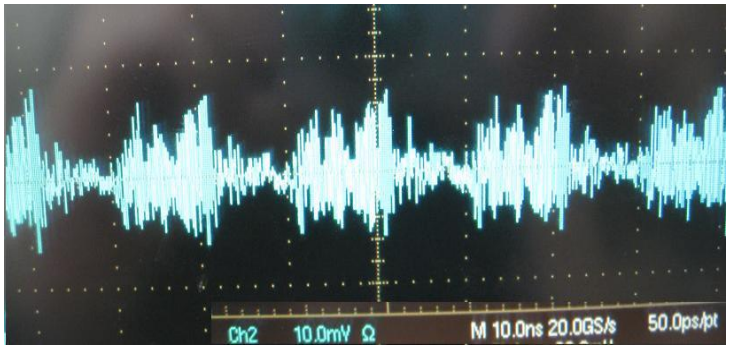


Источник:
хаотические радиоимпульсы, 100 нс длит., 100 нс защ. интервал., мощность -10 дБм.

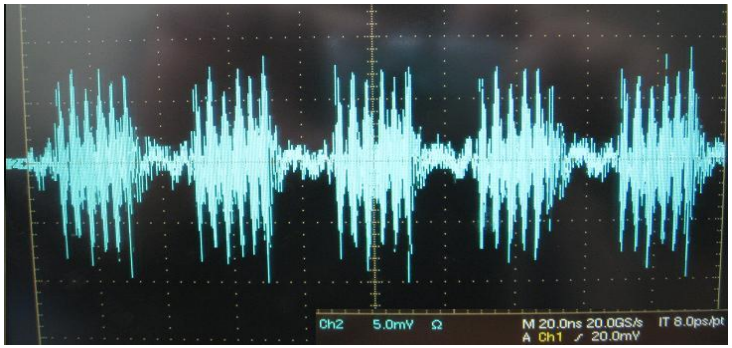
Расстояние: 0.15 м.

приёмник CMOS 130 нм TSMC

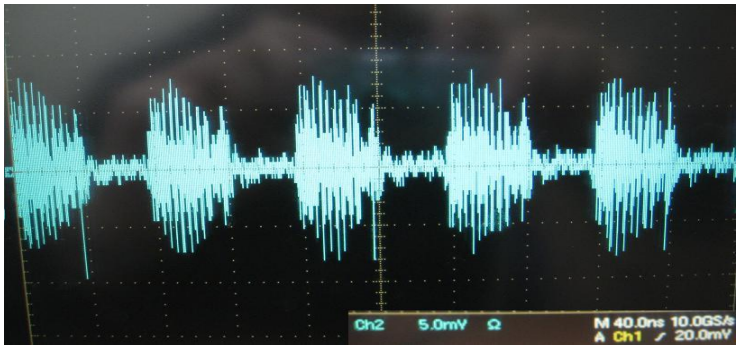
Характеристика работы модулятора ICL010 (TSMC130nm)



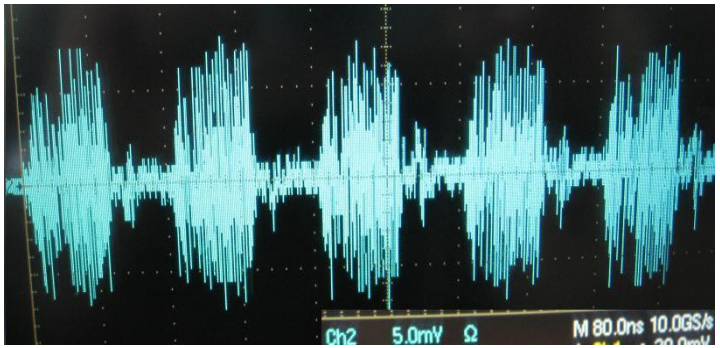
Длительность 10 нс, скважность 10 нс



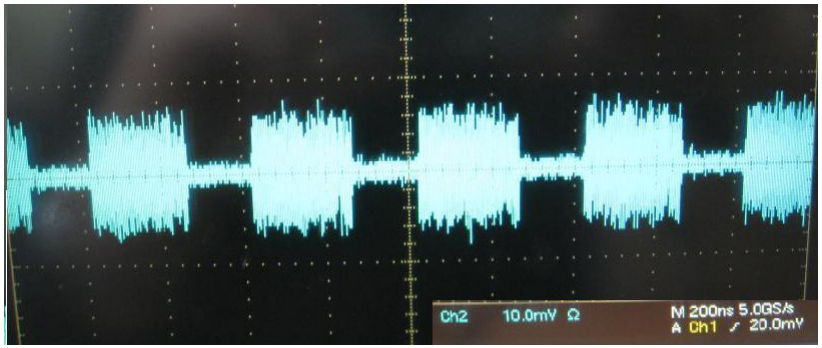
Длительность 20 нс, скважность 20 нс



Длительность 40 нс, скважность 40 нс



Длительность 80 нс, скважность 80 нс



Длительность 200 нс, скважность 200 нс