



ТРАНЗИСТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОСА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

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

Исследуются энергетические характеристики генераторов СВЧ-хаоса малой мощности. С этой целью рассматриваются свойства нескольких вариантов транзисторных генераторов. Анализируется потребление тока и мощности при генерации хаоса с требуемыми характеристиками и выявляются закономерности, показывающие соотношения между напряжением питания, потребляемым током и выходной мощностью на примере одного из генераторов. Проводится проектирование генератора в виде монолитной интегральной микросхемы на основе кремниво-германиевой технологии и приводятся оценки энергетических характеристик генератора.

Введение

Разработка и использование транзисторных генераторов хаоса СВЧ-диапазонов в СССР и России ведется с начала 1980-х годов [1–4]. Уже к середине 1980-х годов были созданы и успешно применялись транзисторные генераторы хаоса на микрополосковой технологии с выходными мощностями от десятков милливольт до ватта.

В конце 1990-х годов в связи с возникновением интереса к использованию хаотических колебаний в беспроводных коммуникационных системах потребовалось создать генераторы хаоса с выходной мощностью менее 10 мВт и малым потреблением. Такие характеристики определялись тем, что вновь создаваемые генераторы предназначались для использования, прежде всего, в нелицензируемых беспроводных сверхширокополосных системах связи, где накладываются достаточно жесткие ограничения на спектральную плотность мощности излучаемого сигнала, что естественно ведет и к ограничению в средней излучаемой мощности. Так, например, в спектральной маске, принятой в США [5], допускается использование сигналов со спектральной плотностью мощности не более -41.3 дБм/МГц в полосе от 3.1 ГГц до 10.6 ГГц. Таким образом, общая средняя излучаемая мощность не должна превышать -2.3 дБм, то есть менее 600 мкВт. Аналогичные ограничения на излучаемую спектральную плотность приняты в ЕС [6]. В решении Комитета по коммуникациям ЕС диапазон нелицензируемого применения сверхширокополосных сигналов существенно уже американского, а именно, 6.0–8.5 ГГц, поэтому максимальная средняя мощность излучения сверхширокополосных передатчиков не должна превышать -9.3 дБм, или около 100 мкВт.

Хаотические сигналы являются одним из типов сигналов, которые могут применяться в качестве носителя информации в сверхширокополосных средствах связи. Они рекомендованы стандартом IEEE 802.15.4a, вышедшим летом 2007 года [7], для применения в сверхширокополосных беспроводных персональных сетях связи (Ultra Wide Band Wireless Personal Area Networks, UWB WPAN). Поэтому разработка генераторов хаоса малой мощности является актуальной задачей.

Помимо обладания малой мощностью излучения, генераторы должны быть достаточно эффективными с точки зрения энергопотребления. Они должны формировать хаотический сигнал в заданной полосе частот и иметь незначительное внеполосное излучение. Кроме того, решения должны быть такими, чтобы в перспективе их можно было реализовать в виде интегральных микросхем на основе кремниевой или кремниево-германиевой технологий.

Следует отметить, что упоминавшиеся выше генераторы хаоса, созданные в 1980-е годы, были сконструированы в результате кропотливых экспериментальных исследований с применением компьютерных технологий в основном для качественного анализа бифуркационных явлений в генераторах на упрощенных моделях. Генераторы нового поколения так создавать было нельзя. Во-первых, это потребовало бы очень больших объемов экспериментальных исследований. Во-вторых, требовалось создать не один генератор с конкретными характеристиками, а генераторы, характеристики которых можно было бы по мере необходимости менять в достаточно широких пределах, в частности, это касается полосы частот генерации сигналов. В-третьих, прямой перенос результатов экспериментальной разработки на генератор в виде монолитной интегральной микросхемы невозможен по технологическим причинам. Наконец, в-четвертых, новое поколение генераторов нужно было реализовать не на микрополосковой технологии, а в виде устройств, использующих только сосредоточенные элементы.

В связи с перечисленными обстоятельствами, прежде всего, нужно было решить задачу перехода от экспериментальных методов разработки к компьютерной разработке генераторов с экспериментальной поддержкой. Затем разработать принципы создания транзисторных генераторов СВЧ-хаотических сигналов на основе элементов с сосредоточенными параметрами. После этого создать схемы генераторов, обеспечивающих генерацию хаоса с требуемыми спектральными характеристиками, реализовать эти схемы экспериментально, добиться соответствия между расчетными и экспериментальными результатами и после этого перейти к вопросам оптимизации генераторов по излучаемой мощности и потреблению.

Настоящая статья в основном посвящена решению последней задачи. Решение вопросов компьютерной разработки, принципов создания транзисторных генераторов СВЧ-хаоса, создания схем генераторов, обеспечивающих генерацию хаоса с требуемыми спектральными характеристиками, экспериментальной отработки создаваемых генераторов изложено в работах [8–17].

В разделах 1–4 рассматриваются несколько вариантов генераторов хаоса с учетом эволюции в процессе разработки и фиксируются их энергетические характеристики. В разделе 5 подробно исследуются энергетические характеристики одной из наиболее эффективных конструкций генератора хаоса, и производится ее оптимизация по энергетическим характеристикам.

Наконец, в последнем разделе 6 рассматривается возможность реализации ге-

нератора в виде монолитной микросхемы на основе биполярной кремниво-германиевой технологии. Кроме демонстрации возможности реализации генератора в виде интегральной микросхемы, этот раздел позволяет также спрогнозировать энергетические характеристики такого устройства и сравнить с характеристиками генератора на основе дискретных элементов, имеющих в продаже.

1. Генератор хаоса на основе схемы Колпитца

Первым генератором, который будет проанализирован с точки зрения энергетических характеристик, является генератор СВЧ-хаоса на основе емкостной трехточечной схемы (рис. 1). Это – схема, на которой впервые изучалась возможность компьютерной разработки транзисторного генератора СВЧ-хаоса на сосредоточенных

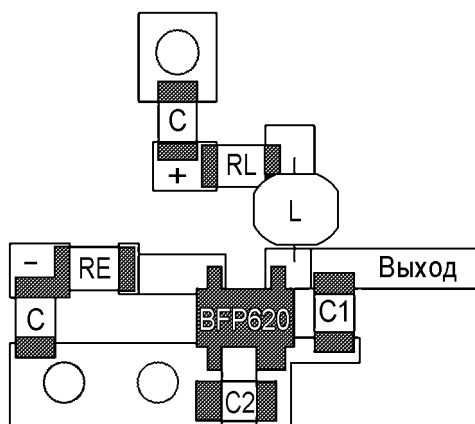


Рис. 1. Эскиз топологии генератора: $R_L = 30 \text{ Ом}$, $R_E = 400 \text{ Ом}$, $L = 3 \text{ нГн}$, $C_1 = 0.3 \text{ пФ}$, $C_2 = 0.53 \text{ пФ}$, транзистор BFP620

элементах [9]. Для этого на основе простой низкочастотной математической модели генератора и ее эквивалентной схемы в специализированном схемотехническом пакете ADS была разработана модель генератора, учитывающая реальные свойства как транзистора, так и пассивных элементов схемы. Результаты проведенных с помощью модели исследований показали, что, масштабируя соответствующим образом параметры структурных элементов генератора и выбирая подходящий активный элемент (кремниво-германиевый транзистор), можно получать в схемах на сосредоточенных элементах хаотические колебания с частотами вплоть до нескольких гигагерц.

Впоследствии в генераторе было учтено влияние подложки из материала FR-4. Он был реализован в виде экспериментального макета [14], и была изучена его работоспособность в диапазоне до 5 ГГц. В качестве активного элемента использовался транзистор BFP620.

Экспериментальное исследование режимов генератора показало, что в системе при напряжениях коллектор–база $V_C = 0\text{--}2 \text{ В}$ и напряжении эмиттер–база $V_E \approx 6 \text{ В}$ возникают многочастотные колебания, а также хаотические колебания. Однако последние неустойчивы и существуют в узких зонах изменения питающих напряжений транзистора. Спектр мощности одного из таких режимов приведен на рис. 2, а. Он занимает широкую полосу частот, но весьма неравномерен по диапазону. Второй режим работы генератора наблюдался при напряжении коллектор–база $V_C = 12 \text{ В}$ и небольших напряжениях эмиттер–база $V_E = 0.75\text{--}1.5 \text{ В}$ (рис. 2, б). В этом случае хаос в системе возникал практически сразу при открывании перехода эмиттер–база и устойчиво существовал при изменении напряжения на переходе в указанных пределах.

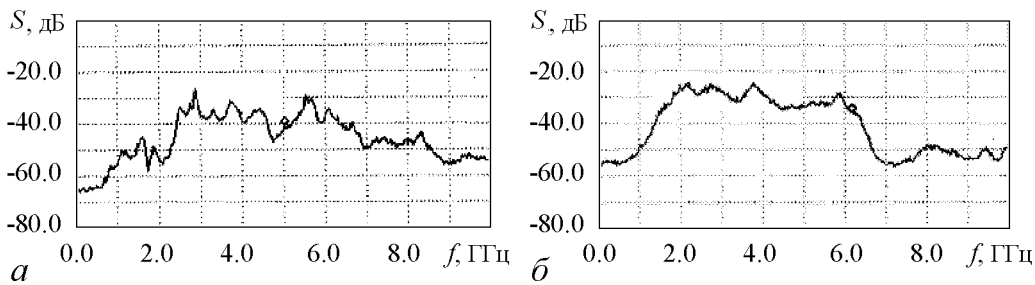


Рис. 2. Спектры хаотических колебаний генератора на трехточке: *a* – $V_C = 1$ В, $V_E = 6$ В; *б* – $V_C = 12$ В, $V_E = 1.5$ В, по уровню примерно 15 дБ ширина спектра примерно 5 ГГц (1.5–6.5 ГГц)

Генератор, работающий в первом режиме, давал на выходе (коллекторная цепь) до 1 мВт выходной мощности. КПД генератора при этом находилось в пределах 1%. При втором режиме работы генератора выходная мощность, выделяемая на нагрузке 50 Ом, достигала 4.5 мВт, а КПД генератора составлял примерно 2%.

Поскольку СВЧ-хаотические колебания, получаемые в генераторе на трехточке, довольно неустойчивы, и возможности управления их характеристиками весьма ограничены, были предприняты усилия по улучшению характеристик системы за счет повышения ее размерности.

2. Генератор хаоса с 2.5 степенями свободы

В работах [12, 13] была предложена и изучена модель нелинейной динамической системы с 2.5 степенями свободы, где в качестве активного элемента использовался биполярный транзистор. Электрическая схема системы, соответствующая модели, приведена на рис. 3.

Проведенное математическое моделирование показало, что в системе можно получить хаотические колебания, близкие по форме к полосовым колебаниям, что существенно для генераторов хаотических колебаний, применяемых в коммуникационных приложениях.

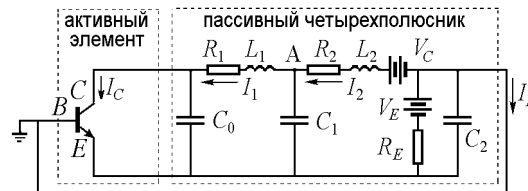


Рис. 3. Схема генератора с 2.5 степенями свободы

В работе [17] приведены результаты исследования динамики системы в пакете ADS, а также результаты экспериментального исследования динамики генератора, созданного на основе этой схемы в радиодиапазоне.

Генератор с 2.5 степенями свободы в СВЧ-диапазоне был предложен в работе [18]. В экспериментах с ним было установлено, что в динамике генератора можно выделить две области изменения управляющих напряжений, в которых система демонстрирует достаточно устойчивое хаотическое поведение. Первая область – это большие отрицательные смещения на переходе эмиттер–база транзистора ($V_E = 4–6$ В) и малые положительные на переходе коллектор–база ($V_C = 0–2$ В); вторая область наоборот – малые отрицательные напряжения на переходе эмиттер–база ($V_E = 1–2$ В) и высокие положительные напряжения на переходе база–коллектор ($V_C = 10–13$ В).

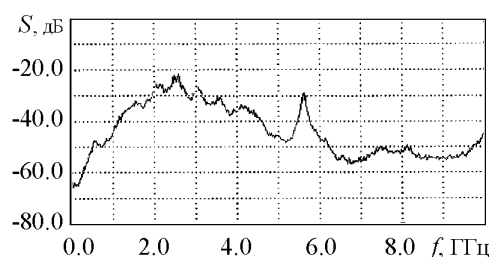


Рис. 4. Спектр мощности хаотического сигнала на выходе СВЧ-генератора хаоса при $V_C = 1.5$ В, $V_E = 5$ В

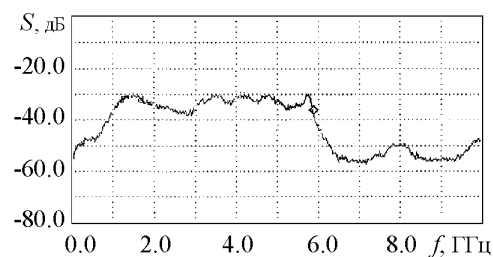


Рис. 5. Спектр мощности хаотического сигнала на выходе СВЧ-генератора хаоса при $V_C = 12.5$ В, $V_E = 1$ В

В режиме, спектр мощности которого показан на рис. 4, потребляемый ток составляет $J = 20$ мА, мощность выходного сигнала – $P = 4$ мВт. В таком режиме генератор имеет КПД примерно 3%. Спектр мощности колебаний состоит из двух частей. Основная мощность хаотических колебаний сосредоточена в диапазоне 1.5–3.5 ГГц. В районе частоты приблизительно 5.5 ГГц выделяется относительно узкий пик спектральной плотности сигнала, сформировавшийся в окрестности второй гармоники базовой частоты 2.7 ГГц. Мощность выходного сигнала можно увеличить до 5 мВт при $V_C = 2$ В и $V_E = 6$ В. При одновременном изменении коллекторного и эмиттерного напряжения и сохранении между ними отношения V_E/V_C , примерно 3 В, можно оставаться в области хаоса, сохраняя при этом частотный диапазон спектра мощности. Так, при изменении V_E в пределах 3.5–7 В, а напряжения V_C в пределах 1–2.5 В, сохраняя в целом форму спектра мощности генерируемого хаотического сигнала, можно варьировать мощность сигнала в диапазоне 2–8 мВт.

При движении вниз по параметру V_E в динамике системы наблюдался гистерезис; генерация существовала вплоть до значений $V_E = 0.5$ В, проходя стадии от хаоса к многочастотному режиму и через обратные бифуркации удвоения к генерации одночастотных колебаний на частоте примерно 2.7 ГГц.

Спектр мощности сигнала, характерный для второго режима хаотических колебаний, приведен на рис. 5. В этом случае потребляемый ток $J \approx 20$ мА. Выходная мощность сигнала составляет 3 мВт и КПД $\approx 1.2\%$. Спектр сигнала при этом занимает полосу частот от 1 ГГц до 6 ГГц по уровню 10 дБ. Как видно из рис. 5, для такого режима работы транзистора системе свойственны сверхширокополосные хаотические колебания, неравномерность которых можно регулировать подстройкой напряжений питания.

В обоих рассмотренных режимах работы транзистора генерация хаотических колебаний была устойчивой в достаточно широком диапазоне изменения управляющих напряжений.

3. Генератор с одним напряжением питания

Выше был рассмотрен генератор хаотических колебаний на основе модели с 2.5 степенями свободы. На примере этого генератора была показана возможность получения в транзисторном генераторе СВЧ-хаотических сигналов в полосе частот от 1 до 6 ГГц. Однако хаотические колебания в этой системе реализуются при достаточно высоких напряжениях питания.

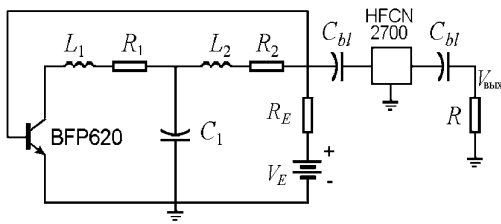


Рис. 6. Схема генератора с одним источником питания, $R = 50 \text{ Ом}$

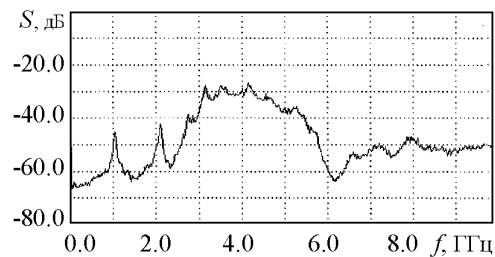


Рис. 7. Спектр мощности хаотического сигнала на выходе генератора при $V_E = 2 \text{ В}$

Для практического использования желательно иметь генераторы с уровнем напряжения питания до 2.0–2.5 В; в частности, только такие напряжения предпочтительны в случае реализации хаотических генераторов в виде монолитных интегральных схем. Так же желательно, чтобы генератор работал от единственного источника напряжения положительной полярности, так как использование дополнительного источника усложняет систему.

Для того, чтобы решить эти задачи, был предложен генератор, схема которого приведена на рис. 6. Эта схема отличается от схемы генератора с 2.5 степенями свободы тем, что из схемы удален источник питания в цепи коллектора. Соединение с «землей» перенесено с базы на эмиттер, а единственный источник питания подключен так, чтобы создавать положительную разность потенциалов между базой и эмиттером транзистора.

Как показало моделирование генератора в пакете ADS, на высоких частотах значительный вклад в динамику системы, вносят паразитные элементы корпуса транзистора, в частности, они определяют частоту генерации. Поэтому емкости C_0 и C_2 были удалены из схемы. Их роль выполняют паразитные емкости корпуса транзистора между базой и эмиттером, коллектором и эмиттером.

Наконец, для того, чтобы ограничить полосу частот генерируемого сигнала, в схему был введен фильтр высоких частот с частотой среза 2.7 ГГц. Следует отметить, что в схеме отсутствует развязка между генератором и фильтром на выходе генератора, поэтому фильтр играет двоякую роль: с одной стороны, он ограничивает полосу частот сигнала на выходе системы, а с другой, – является элементом цепи обратной связи генератора и вносит свой вклад в динамику генератора. В частности, в некоторых случаях добавление к системе фильтра приводит к возникновению хаотических режимов, хотя в отсутствие фильтра подобные режимы не наблюдались.

Плата макета, как и платы предыдущих макетов, выполнена на материале FR-4. В экспериментальном устройстве использовались компоненты со следующими номиналами: $L_1 = L_2 = 3.6 \text{ нГн}$, $C_1 = 0.1 \text{ пФ}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_E = 15 \text{ Ом}$, $C_{bl} = 200 \text{ пФ}$. Напряжение питания генератора $V_E = 2 \text{ В}$.

Спектр мощности генератора с полосой генерации хаотического сигнала 3–5 ГГц представлен на рис. 7. Потребляемая мощность в этом режиме около 80 мВт, излучаемая мощность около 0.8 мВт, КПД порядка 1%.

4. Генератор с печатными индуктивностями

При работе с генератором, описанным в разделе 3, было выяснено, что верхняя граница частот генерируемого хаотического сигнала определяется номиналами индуктивностей в цепи обратной связи устройства. При этом использование индуктивностей минимального номинала из имеющихся на рынке (1 нГн) позволяет достичь частоты 5 ГГц в качестве верхней границы частот генерации. Для генерации хаоса на более высоких частотах необходимо было использовать какое-то альтернативное техническое решение. В качестве такого решения было предложено заменить чип индуктивности в генераторе на индуктивности в виде фрагментов металлизированных проводящих линий на поверхности платы. Величина индуктивностей таких фрагментов могла быть значительно меньше минимального номинала чипа индуктивностей. Использование печатной технологии позволяло обеспечить хорошую воспроизводимость номиналов и уменьшало количество навесных элементов в схеме. Меняя форму и размеры фрагментов, можно было обеспечить изменения номиналов индуктивностей в нужных пределах.

Моделирование в ADS генератора с единственным источником питания и печатными индуктивностями показало, что в генераторе с печатными индуктивностями не только реализуются сверхширокополосные хаотические колебания в диапазоне частот 3–5 ГГц и выше, но и увеличивается КПД по сравнению с генератором, в котором использовались чипы индуктивности.

На основании полученных результатов была синтезирована топология платы генератора и изготовлен макет генератора.

Разработанный генератор позволяет получать СВЧ-хаотические колебания в широком диапазоне изменения как центральной частоты, так и ширины полосы ге-

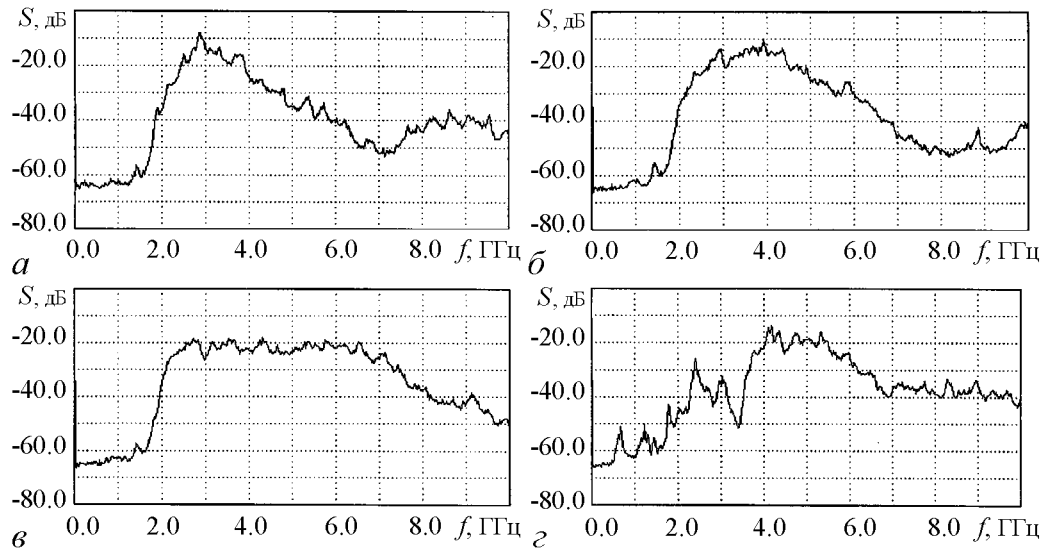


Рис. 8. Спектры мощности хаотического сигнала на выходе генератора при различных параметрах системы (l – длина проводящей линии, $l_{исх}$ – длина проводящей линии в исходном варианте): a – $C_1 = 0.5$ пФ, $V_E = 2$ В, $I = 40$ мА, $P_{вых} = 2$ мВт, КПД=2.5%; $б$ – $l = 0.75 \cdot l_{исх}$, $C_1 = 0.3$ пФ, $V_E = 2.4$ В, $I = 50$ мА, $P_{вых} = 2.5$ мВт, КПД=2.1%; $в$ – $l = 0.5 \cdot l_{исх}$, C_1 отсутствует, $V_E = 2.5$ В, $I = 60$ мА, $P_{вых} = 1.26$ мВт, КПД=0.8%; $г$ – фильтр HFCN-3500, C_1 отсутствует, $V_E = 2.8$ В, $I = 90$ мА, $P_{вых} = 1$ мВт, КПД=0.4%

нерируемого сигнала. Полоса генерируемого сигнала определяется номиналами используемых компонентов и длиной проводящей линии, играющей роль индуктивности. На рис. 8 приведены спектры мощности сигнала для ряда режимов, полученных при работе с данным генератором.

Как видно из рисунков, варьируя параметры системы, можно получать хаотические колебания с шириной полосы, по крайней мере, от 1.5 до 5.5 ГГц и с граничной верхней частотой приблизительно 8 ГГц.

Суммируя результаты, представленные в разделах 1–4, можно сделать вывод, что в процессе проведенных исследований были синтезированы простые структуры генераторов СВЧ-хаоса, разработаны способы управления спектральными характеристиками хаотических сигналов в них, созданы методики моделирования и проектирования таких устройств, на отечественной технологической базе реализован и экспериментально отработан ряд генераторов СВЧ-хаоса.

В следующем разделе будут проанализированы энергетические характеристики разработанных устройств.

5. Энергетические характеристики генераторов хаоса

Во всех описанных выше генераторах хаоса использовался один и тот же тип биполярного кремниво-германиевого транзистора BFP620. При этом в разных типах генераторов использовались разные номиналы напряжения питания, и достаточно сильно менялась потребляемая мощность. В данном разделе рассмотрим энергетические характеристики генераторов СВЧ-хаоса на примере генератора с печатными индуктивностями и проанализируем связь этих характеристик с бифуркационными диаграммами колебательных режимов.

На рис. 9 приведена двухпараметрическая диаграмма, отражающая зависимость режима работы генератора от приложенного напряжения питания и величины сопротивления в цепи питания для системы с фильтром HFCN-2700, $C_1 = 0.3$ пФ, $C_{bl} = 200$ пФ.

На диаграмме с помощью цвета обозначены различные динамические режимы системы. Область белого цвета соответствует отсутствию колебаний, области колебаний периода 1, 2 и 3 представлены различными оттенками серого и цифрой, соответствующей периоду колебаний, возникающих в данной области пространства параметров. Зоны хаоса обозначены на рисунке черным цветом. Узкие зоны серого цвета без цифр соответствуют многочастотным колебаниям.

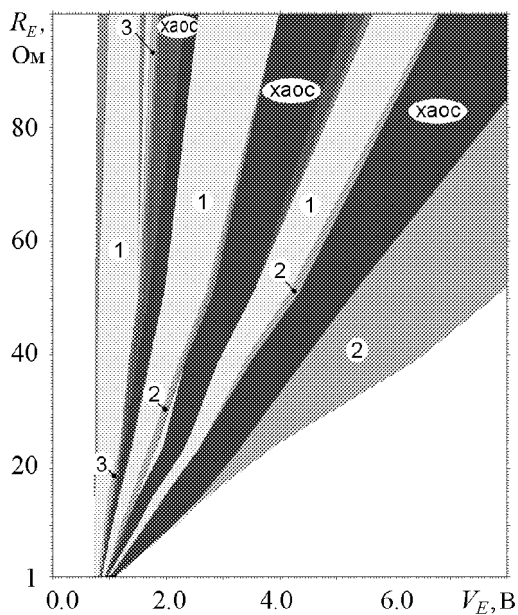


Рис. 9. Диаграмма зависимости динамического режима генератора от напряжения питания V_E и сопротивления в цепи питания R_E

В таблице приведены данные по энергетическим характеристикам системы для ряда хаотических режимов, представленных на диаграмме. В таблице используются следующие обозначения: R_E – сопротивление в цепи питания генератора, V_E – напряжение на источнике питания, I – потребляемый ток, $P_{вх}$ – потребляемая мощность, $P_{вых}$ – мощность сигнала на нагрузке, КПД – коэффициент полезного действия генератора.

Таблица

Энергетические характеристики генератора при различных параметрах цепи питания

R_E , Ом	V_E , В	I , мА	$P_{вх}$, мВт	$P_{вых}$, мВт	КПД, %
1.0	0.95	40.0	38.0	2.5	6.6
1.0	1.05	80.0	84.0	2.8	3.3
10.0	1.0	15.0	15.0	1.0	6.6
10.0	1.04	20.0	20.8	1.0	4.8
10.0	1.35	40.0	54.0	2.5	4.6
10.0	1.4	40.0	54.0	2.8	5.2
10.0	1.7	70.0	119.0	3.55	3.0
24.0	1.32	20.0	26.4	0.8	3.0
24.0	2.1	45.0	94.5	2.0	2.1
24.0	2.7	70.0	190.0	2.5	1.3
39.0	1.6	15.0	24.0	1.0	4.2
39.0	2.5	40.0	100.0	2.2	2.2
39.0	2.84	45.0	128.0	2.5	2.0
39.0	3.7	70.0	259.0	3.2	1.2
51.0	1.8	15.0	27.0	1.0	3.7
51.0	3.0	40.0	120.0	2.0	1.7
51.0	4.5	65.0	293.0	3.2	1.1
51.0	5.0	70.0	350.0	2.8	0.8
100.0	3.4	20.0	68.0	1.4	2.0
100.0	5.2	40.0	208.0	2.2	1.1
100.0	5.6	40.0	224.0	2.5	1.1
100.0	8.0	70.0	560.0	3.6	0.6
100.0	8.5	70.0	595.0	3.2	0.5
100.0	9.0	75.0	675.0	2.8	0.4

Из анализа таблицы и диаграммы видно, что в системе при данных параметрах существует три основные зоны хаотических колебаний. При этом каждая зона расширяется с ростом сопротивления в цепи питания генератора. Каждой зоне хаоса соответствует свое, слабо меняющееся внутри зоны, значение потребляемого тока. Так, слева направо первой зоне соответствует ток 15–20 мА, второй зоне 40–50 мА, третьей 70–80 мА. Аналогично, мощность сигнала на выходе генератора так же примерно одинакова для каждой зоны. В первой зоне мощность выходного сигнала 1 мВт, во второй зоне приблизительно 2–2.5 мВт, в третьей 3–3.5 мВт. При этом для каждой из зон при постоянном токе потребляемая мощность растет с ростом сопротивления R_E и соответствующем росте напряжения V_E . Таким образом, режимы с наименьшим потреблением мощности и наиболее высоким КПД наблюдаются при малых значениях сопротивления в цепи питания. Однако этим режимам соответствуют и наиболее узкие зоны хаоса.

На рис. 10 приведены спектры мощности сигнала на выходе системы при значениях параметров, соответствующих трем различным точкам на диаграмме рис. 9. Так, рис. 10, *а* соответствует случаю с низким сопротивлением в цепи питания и, соответственно, низким потреблением и высоким КПД ($R_E = 1 \text{ Ом}$, $V_E = 0.95 \text{ В}$); параметры, которым соответствует рис. 10, *б* лежат в наиболее широкой зоне хаоса ($R_E = 100 \text{ Ом}$, $V_E = 8.5 \text{ В}$); наконец рис. 10, *в* демонстрирует наиболее приемлемый режим ($R_E = 24 \text{ Ом}$, $V_E = 2.1 \text{ В}$), при котором потребление не слишком высоко, но режим достаточно устойчив к колебаниям параметров цепи питания генератора.

Из проведенного анализа следует, что выбор рабочего режима – это поиск компромисса между величиной приложенного напряжения, потребляемым током, общим потреблением энергии, устойчивостью хаотического режима к колебаниям напряжения питания генератора, величиной мощности генерируемого сигнала и КПД генератора.

Для того чтобы расширить полосу генерируемого хаотического сигнала, была предложена новая топологическая схема, в которой была уменьшена длина проводящей линии, заменяющей индуктивность.

На рис. 11 приведены спектр мощности сигнала на выходе генератора в хаотическом режиме. Энергетические характеристики генератора в этом режиме следующие: напряжение питания $V_E = 1.55 \text{ В}$, потребляемый ток I примерно 20 мА , мощность сигнала на выходе генератора $P_{\text{вых}} = 0.8 \text{ мВт}$. Как видно из рисунка, основная мощность генерируемого сигнала лежит в полосе $4\text{--}11.5 \text{ ГГц}$.

Устойчивая зона хаоса с достаточно гладким спектром при потребляемом токе I примерно 20 мА существует при напряжении питания V_E от 1.5 В до 1.6 В .

В этой системе также могут существовать несколько зон хаотических режимов с различными характерными токами. Управление потреблением и выходной мощностью может осуществляться путем подбора параметров цепи питания V_E и R_E .

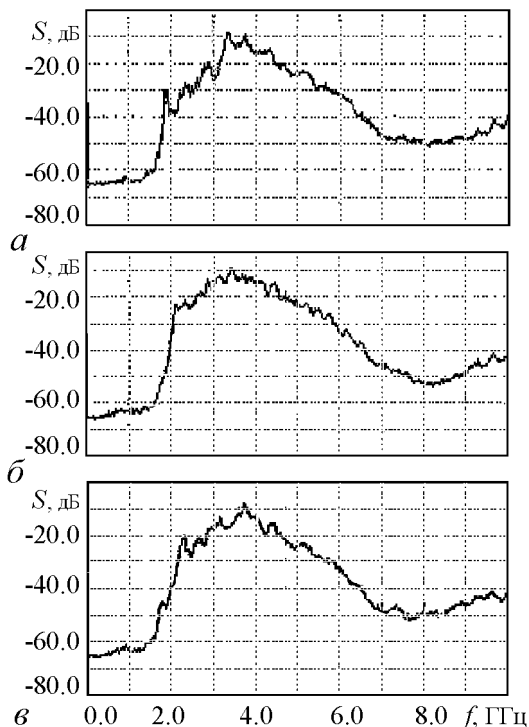


Рис. 10. Спектры мощности сигнала на выходе генератора при различных значениях параметров R_E и V_E : *а* – $R_E = 1 \text{ Ом}$, $V_E = 0.95 \text{ В}$; *б* – $R_E = 100 \text{ Ом}$, $V_E = 8.5 \text{ В}$; *в* – $R_E = 24 \text{ Ом}$, $V_E = 2.1 \text{ В}$

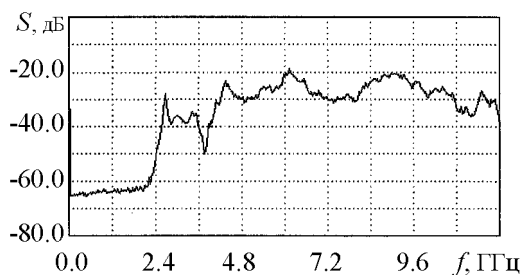


Рис. 11. Спектр мощности сигнала генератора при $V_E = 1.55 \text{ В}$, $I \approx 20 \text{ мА}$, $P = 0.8 \text{ мВт}$, КПД=2.6%

Дальнейшие возможности по улучшению характеристик генераторов хаоса, прежде всего, повышения технологичности, связаны с переходом на технологию интегральных монолитных микросхем. В следующем разделе кратко описан один из вариантов такого генератора и даны оценки его энергетических характеристик.

6. Генератор хаоса на основе Si-Ge технологии

В генераторах СВЧ-хаоса, рассматриваемых в данной статье, в качестве активного элемента используется биполярный кремниво-германиевый транзистор VFP620. Его граничная частота равна 70 ГГц, что намного превышает граничные частоты чисто кремниевых транзисторов. Эта характеристика является очень важной для возможности создания СВЧ-генераторов хаоса. Поэтому в качестве подходящей технологии при создании генераторов хаоса в виде монолитных интегральных микросхем, прежде всего, рассматривается кремниво-германиевая технология.

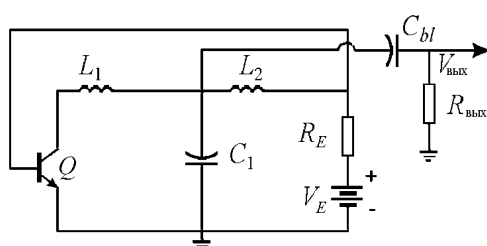


Рис. 12. Принципиальная схема генератора с биполярным транзистором на основе технологии Si-Ge 0.25 мкм

В рамках этой технологии было проведено проектирование генератора. Оно осуществлялось в пакете Cadence IC и состояло из нескольких этапов. Сначала была разработана электрическая схема устройства, затем проводилось ее моделирование, синтез топологии аналогового блока и верификация топологии. Этап верификации подразумевает контроль технических норм, проверку на соответствие топологии исходной схеме, а также экстракцию паразитных элементов.

Как правило, на этапе верификации выявляются некоторые недостатки топологии или схемотехники устройства, приводящие к сильному влиянию паразитных элементов. Поэтому цикл разработки повторяется, пока результаты моделирования не будут удовлетворительными.

В качестве базовой схемы генератора использовалась электрическая схема, представленная на рис. 12. Эта схема оказывается удобной для реализации на чипе в силу нескольких причин. Во-первых, малое количество элементов позволя-

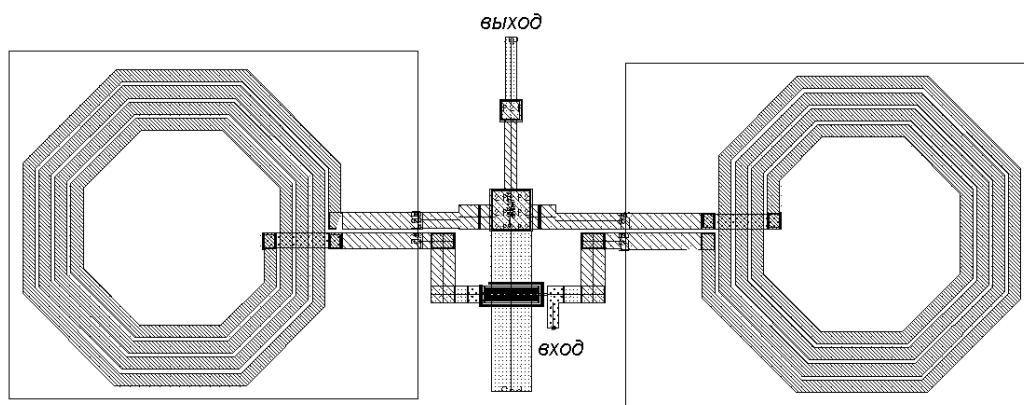


Рис. 13. Топологическая реализация генератора с биполярным транзистором на основе технологии Si-Ge 0.25 мкм

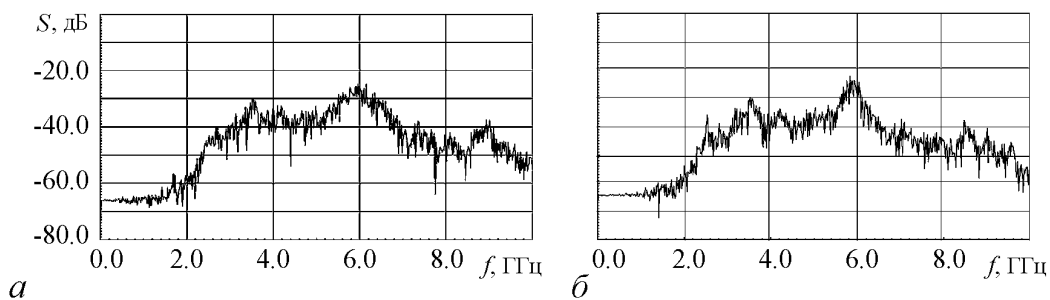


Рис. 14. Спектр мощности выходного сигнала генератора при напряжении питания 1.3 В: *a* – без учета влияния паразитных элементов топологии; *б* – с учетом влияния паразитных элементов топологии

ет избежать большого числа длинных контактных дорожек в топологии, что резко уменьшает вероятность негативного влияния паразитных сопротивлений и емкостей в микросхеме, которые подобные дорожки порождают. Во-вторых, данная схема позволяет разработать центрально симметричную топологию устройства (рис. 13), что снижает влияние негативных эффектов, возникающих при производстве и способных вывести устройство из заданного режима функционирования. И наконец, при данной конфигурации топологии генератора ее площадь оказывается менее 1 мм^2 .

Следует отметить, что все используемые в генераторе элементы не являются идеальными по своей сути, а описываются при схемотехническом моделировании некоторыми эквивалентными схемами, которые, помимо номинала самого элемента при определенной температуре, также учитывают сопротивления и емкости, вносящие потери, связанные с влиянием на элемент подложки скин-эффектов, а также вихревых токов. То есть на разных частотах номиналы элементов оказываются, вообще говоря, различными, что существенно затрудняет разработку устройства.

Поэтому подбор номиналов элементов электрической схемы генератора осуществлялся на основе анализа бифуркационных диаграмм колебательных режимов устройства. В процессе этого исследования был выбран наиболее подходящий режим генерации сверхширокополосного хаоса. Он реализуется при напряжении питания 1.3 В.

На рис. 14, *a* представлен спектр мощности выходного сигнала, получающийся при моделировании генератора без учета влияния паразитных эффектов топологии, а на рис. 14, *б* – спектр мощности, получающийся при моделировании работы генератора с учетом влияния всех паразитных емкостных и резистивных структур. Как видно из сравнения графиков, паразитные структуры несколько искажают спектр мощности, однако, не выводят генератор из рабочего хаотического режима. При внешней нагрузке 50 Ом в нем обеспечивается генерация хаотического сигнала в диапазоне частот 3–7 ГГц с выходной мощностью 0.26 мВт. При этом потребляемая мощность составляет 18 мВт, а КПД $\approx 1.4\%$.

Заключение

В статье исследована энергетическая эффективность генераторов СВЧ-хаоса малой мощности. С этой целью рассмотрены характеристики нескольких вариантов транзисторных генераторов. Затем на основе двухпараметрических диаграмм

режимов работы устройств проанализированы потребления тока и мощности при генерации хаоса с требуемыми характеристиками и выявлены закономерности, показывающие соотношения между напряжением питания, потребляемым током и выходной мощностью генераторов. Наконец, проведено предварительное проектирование генератора в виде монолитной интегральной микросхемы на основе кремниво-германиевой технологии и получены оценки энергетических характеристик для транзисторных генераторов СВЧ-хаоса.

Полученные результаты подтверждают достаточно высокие характеристики существующих и разрабатываемых устройств, что подтверждается также их успешным использованием в экспериментальных и серийных сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиках.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-07-00298а) и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие потенциала высшей школы» на 2006–2008 гг. Минобрнауки.

Библиографический список

1. Кислов В.Я. Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 10. С. 1783.
2. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
3. Ефремова Е.В. Генераторы хаотических колебаний радио и СВЧ-диапазона // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 17.
4. Иванов В.П. Сверхширокополосные генераторы шума и их практическое применение // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 37.
5. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, First Report and Order. Federal Communications Commission (FCC), ET Docket 98-153, FCC 02-48; Adopted: February 14, 2002; Released: April 22, 2002.
6. Radio Spectrum Committee working document, Brussels, 23 November, 2006.
7. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. 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.
8. Максимов Н.А., Панас А.И. Однотранзисторный генератор полосовых хаотических сигналов радиодиапазона // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 11. С. 61.
9. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Хилинский А.Д. Принципы компьютерного моделирования транзисторных генераторов хаоса в пакете ADS (Advanced Design System) // Препринт №5 (633). 2003. ИРЭ РАН.
10. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А. Управление огибающей спектра

мощности в однотранзисторном генераторе хаотических колебаний // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 2. С. 222.

11. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Транзисторные генераторы хаоса с заданной формой спектра мощности колебаний // Радиотехника. 2005. № 8. С. 67.
12. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.* Генерация последовательности хаотических импульсов при воздействии периодического сигнала на динамическую систему // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 22. С. 29.
13. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., Атанов Н.В.* Генерация потока хаотических импульсов в динамической системе с внешним (периодическим) воздействием // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 5. С. 593.
14. *Максимов Н.А.* Сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ-диапазона на сосредоточенных элементах // Труды Всероссийской конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике (СРСА-2006)». 4–7 июля, 2006, Муром, Россия. С. 154.
15. *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* Формирование хаотических радиоимпульсов в генераторе с внешним периодическим воздействием // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 15. С. 1.
16. *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.* Неавтономный генератор хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 12. С. 1454.
17. *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А.* Генератор хаотических колебаний радиодиапазона на основе автоколебательной системы с 2.5 степенями свободы // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 1. С. 23.
18. *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.

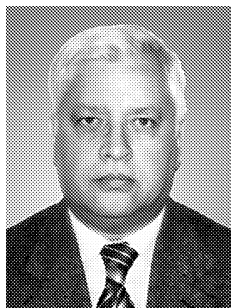
*Институт радиотехники
и электроники РАН
Московский физико-технический
институт*

Поступила в редакцию 9.04.2008

LOW-POWER CHAOTIC TRANSISTOR GENERATORS

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

Power characteristics of low-power microwave chaotic generators are investigated. Power characteristics of several variants of transistor generators are discussed. Current and power consumption necessary for generation of chaos with preassigned characteristics is analyzed, relationships between supply voltage, current draw and output signal power are shown on example of one of the generators. SiGe monolithic IC generator is designed and power characteristics of the generator are estimated.



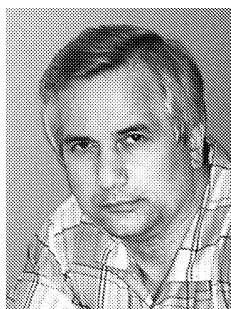
Дмитриев Александр Сергеевич – родился в 1948 году. Окончил Московский физико-технический институт (1971). Кандидат физико-математических наук (1974), доктор физико-математических наук (1988), профессор. Зав. отделом Института радиотехники и электроники РАН. Дважды Лауреат премии Совета Министров СССР (1984 и 1989). Область научных интересов – теория динамического хаоса, информационные технологии на основе хаотической динамики. Автор более 170 научных трудов, в том числе 2 монографий.



Ефремова Елена Валериевна – родилась в 1977 году. Окончила Московский физико-технический институт (2000). Кандидат физико-математических наук (2003), научный сотрудник ИРЭ РАН. Область научных интересов – нелинейная динамика, электроника СВЧ, информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса. Автор более 40 научных публикаций.



Никишов Артем Юрьевич – родился в 1983 году. Окончил Московский физико-технический институт (2007). Аспирант Московского физико-технического института. Область научных интересов: генерация хаотических сигналов, проектирование специальных интегральных микросхем. Имеет 5 научных публикаций.



Панас Андрей Иванович – родился в 1955 году. Окончил Московский энергетический институт (1978). Кандидат физико-математических наук (1988), доктор физико-математических наук (2001). Директор Фрязинского отделения Института радиотехники и электроники РАН. Лауреат премии Ленинского комсомола (1987). Область научных интересов – радиофизические системы с хаотической динамикой, электронные устройства СВЧ. Автор более 120 научных работ.