

07;13

Сверхширокополосный спин-волновой генератор хаоса средней мощности на полевых транзисторах

© С.В. Гришин¹, В.С. Гришин², Д.В. Романенко¹,
Ю.П. Шараевский¹

¹ Саратовский государственный университет, Саратов

² НПЦ „Алмаз-Фазотрон“, Саратов

E-mail: grishfam@sgu.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.

Разработан макет сверхширокополосного (СШП) генератора хаоса микроволнового диапазона на основе нелинейной спин-волновой линии передачи, многокаскадного транзисторного усилителя с выходным усилителем на полевых транзисторах GaAs и микрополоскового полосно-пропускающего фильтра. Продемонстрирована возможность автономной генерации СШП хаотического СВЧ-сигнала с центральной частотой 3 GHz и интегральной мощностью около 4 W в полосе частот, превышающей 30%. Предлагаемый генератор хаоса характеризуется достаточно высоким значением КПД порядка 20%.

Известно, что мощные генераторы широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) хаотических сигналов микроволнового диапазона длин волн являются перспективными источниками шумоподобных сигналов, которые не только представляют интерес для средств радиоэлектронной борьбы, но и могут использоваться в качестве источников зондирующего сигнала в активной шумовой радиолокации [1]. В середине 60-х годов прошлого столетия были начаты работы по созданию мощных генераторов СШП-сигналов, так называемых „шумотронов“, на основе вакуумных усилителей в виде последовательно соединенных в кольцо двух ламп бегущей волны (одна лампа работала в линейном режиме, другая — в нелинейном) [2]. Разработанные вакуумные генераторы хаоса характеризовались шириной полосы частот более октавы и уровнем интегральной мощности от десятков до сотен ватт.

В настоящее время появились работы, в которых сообщается о разработке и создании генераторов ШП хаотических СВЧ сигналов на

мощных биполярных транзисторах [3–5]. Так, в работе [4] ШП-генератор хаоса микроволнового диапазона, созданный на основе регенеративного усилительного каскада на мощном отечественном транзисторе 2Т 982 А-2, характеризовался 3,4%-й полосой с центральной частотой 5,35 GHz, интегральной мощностью 230 mW, неравномерностью огибающей спектра мощности не более 3 dB и КПД 10%. Сравнительно небольшое значение КПД разработанного генератора обусловлено уменьшением значений напряжения питания транзистора относительно номинала для получения устойчивого режима генерации хаотических колебаний. В [5] приводятся данные о создании ШП-генераторов хаоса на том же типе транзистора, но содержащих в цепи обратной связи варакторный диод, который играет роль дополнительного нелинейного элемента. Осуществляя гармоническое воздействие на нелинейный контур с диодом, авторы работы получали расширение полосы частот хаотического СВЧ-сигнала до 10% и увеличение КПД генератора до 20–25%. При этом интегральная мощность хаотического СВЧ-сигнала достигала уровня 600 mW. Следует отметить, что описанные выше подходы для создания мощных ШП-генераторов хаоса на биполярных транзисторах были разработаны еще в конце 70-х–начале 80-х годов прошлого столетия.

Альтернативным подходом для создания ШП- и СШП-генераторов хаоса является использование спин-волновой линии передачи в качестве нелинейного элемента в кольцевой автоколебательной системе [6–9]. При таком подходе хаотическая динамика автоколебательной системы определяется либо параметрической [6,7,9], либо модуляционной [8] неустойчивостью магнитостатических волн (МСВ), а усилитель служит в основном для компенсации потерь в кольце. В этом случае в качестве активных элементов могут выступать как вакуумные, так и твердотельные усилители, которые, работая при номинальных значениях напряжений и токов, обеспечивают максимально возможные значения КПД генератора хаоса. Помимо этого, в отличие от варакторного диода использование спин-волновой линии передачи приводит к СШП хаотической генерации без внешнего воздействия [6,7]. Однако к настоящему времени в литературе отсутствуют сведения о создании СШП спин-волнового генератора хаоса средней мощности. В данном сообщении впервые демонстрируется спин-волновой генератор СШП хаотического СВЧ сигнала, обладающий ваттным уровнем мощности и высоким значением КПД.

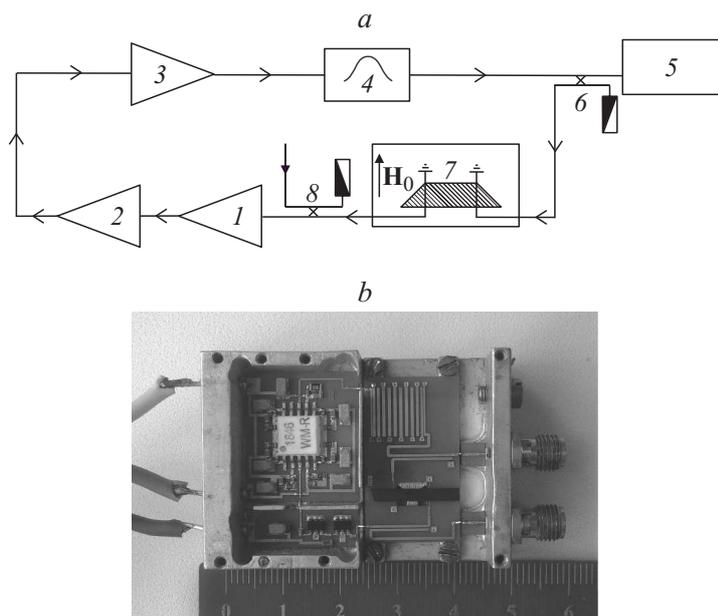


Рис. 1. Спин-волновой генератор хаоса: *a* — функциональная схема, *b* — фотография макета. 1, 2 — усилители НМС313; 3 — усилитель АМ184635WM-ВМ-R; 4 — ППФ; 5 — нагрузка; 6, 8 — направленные ответвители; 7 — спин-волновая линия передачи на ПМСВ.

Спин-волновой генератор хаоса изготовлен по технологии гибридно-интегральных схем и имеет планарное исполнение. В состав генератора (рис. 1) входят последовательно соединенные в кольцо многокаскадный транзисторный усилитель, микрополосковый полосно-пропускающий фильтр (ППФ) и спин-волновая линия передачи на поверхностной МСВ (ПМСВ). Многокаскадный транзисторный усилитель состоит из 2 каскадов предварительного усиления, выполненных на СВЧ монолитных интегральных схемах (МИС) НМС313 на биполярных GaAs/InGaP транзисторах с гетеропереходом, и одного выходного каскада усиления, выполненного на СВЧ МИС АМ184635WM-ВМ-R на полевых транзисторах GaAs. Усилители НМС313 работают в диапазоне частот DC-6 GHz, имеют коэффициент усиления в линейном режиме

$K_1 = 17$ dB и уровень мощности в режиме насыщения $P_{sat1} = +15$ dBm. Номинальные значения напряжения и тока на коллекторе данных транзисторов $+5$ V и 50 mA. Усилитель AM184635WM-BM-R работает в диапазоне частот 2.2 – 4.2 GHz, обладает коэффициентом усиления в линейном режиме $K_2 = 30$ dB и мощностью в режиме насыщения $P_{sat2} = +37$ dBm. Номинальные значения напряжения на стоке $+7$ V, напряжения на затворе -0.75 V, тока стока 1.8 A.

Микрополосковый встречно-штыревой ППФ характеризуется центральной частотой $f_0 = 3$ GHz, минимальным уровнем вносимых потерь $A_0 = -4$ dB, шириной полосы частот по уровню 3 dB $\Delta f_{3dB} = 1.03$ GHz, по уровню 20 dB $\Delta f_{20dB} = 1.3$ GHz и по уровню 40 dB $\Delta f_{40dB} = 1.91$ GHz. Основная часть мощности хаотического сигнала с выхода ППФ поступает в нагрузку, а меньшая ее часть возвращается обратно в кольцо через микрополосковый направленный ответвитель с переходным ослаблением 15 dB. Другой направленный ответвитель, расположенный на входе усилительного каскада, может использоваться для управления хаотической динамикой системы с помощью внешнего СВЧ воздействия [10].

Спин-волновая линия передачи имеет стандартную конфигурацию линии задержки и состоит из ферромагнитного волновода, выполненного на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), и 2 микрополосковых преобразователей (входного и выходного) шириной $w = 30$ μ m и длиной 4 mm, расположенных на расстоянии 6 mm относительно друг друга. При проведении эксперимента использовались пленки ЖИГ с разными толщинами: $d_1 = 25$ μ m и $d_2 = 65$ μ m. Обе пленки имеют одинаковую ширину 2 mm, длину 14 mm и намагниченность насыщения 1750 Gs. При внешнем постоянном магнитном поле $H_0 = 400$ Oe в пленке ЖИГ возбуждается ПМСВ на частотах, где трех- и четырехволновые взаимодействия спиновых волн разрешены [11].

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) спин-волновой линии передачи, измеренные с пленками ЖИГ разной толщины. Из сравнения АЧХ следует, что использование толстой пленки ЖИГ приводит к расширению полосы возбуждения ПМСВ по сравнению со случаем тонкой пленки. Так, в случае тонкой пленки ЖИГ (рис. 2, *a*), когда $w/d_1 = 1.2$, полоса возбуждения ПМСВ имеет величину ~ 950 MHz, а в случае толстой пленки ЖИГ (рис. 2, *b*), когда $w/d_2 = 0.46$, ~ 1150 MHz. Помимо этого, минимальный уровень вносимых потерь на АЧХ спин-волновой линии передачи с толстой пленкой

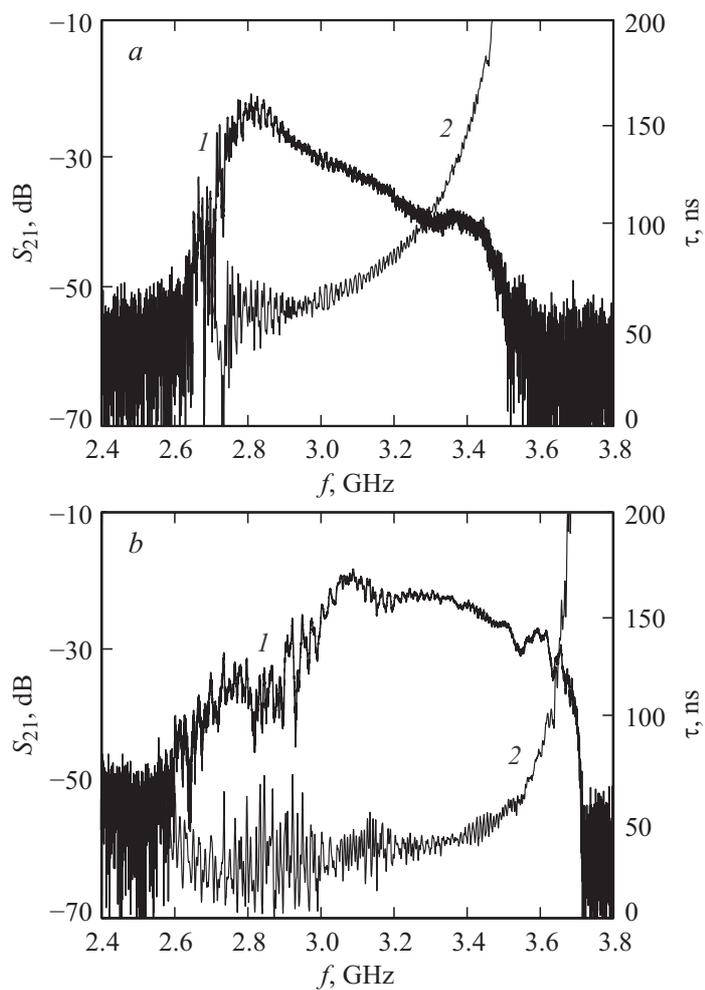


Рис. 2. АЧХ (кривая 1) и ГВЗ (кривая 2) спин-волновой линии передачи на ПМСВ, измеренные с пленками ЖИГ разной толщины: a — $d_1 = 25 \mu\text{m}$, b — $d_2 = 65 \mu\text{m}$. Мощность входного сигнала -30 dBm .

ЖИГ оказывается сдвинутым в более высокочастотную область по сравнению со случаем тонкой пленки. Полученные результаты хорошо согласуются с поведением сопротивления излучения микрополосковой линии передачи, нагруженной на пленку ЖИГ, при изменении толщины пленки [11]. Отметим, что частотная зависимость сопротивления излучения фактически определяет полосу возбуждения ПМСВ. Так, при больших значениях w/d излучение (возбуждение ПМСВ) наблюдается в узкой полосе частот, а максимум сопротивления излучения находится вблизи нижней границы ПМСВ. Уменьшение величины w/d приводит к расширению полосы частот излучения и к сдвигу максимального значения сопротивления излучения в более высокочастотную область. В эксперименте в случае тонкой пленки минимальный уровень вносимых потерь составляет величину ~ 20 dB, а в случае толстой пленки ~ 18 dB.

На рис. 2 приведены также измеренные зависимости группового времени задержки (ГВЗ) от частоты. Полученные зависимости указывают на то, что в обоих случаях время задержки τ является минимальным вблизи низкочастотного края полосы ПМСВ (область малых волновых чисел k) и максимальным вблизи ее высокочастотного края (область больших k). Однако для тонкой пленки в области малых k $\tau_1 \approx 60$ ns, что гораздо больше времени задержки для толстой пленки ($\tau_2 \approx 30$ ns). Данный факт обусловлен тем, что групповая скорость ПМСВ имеет наибольшую величину в случае тонких пленок [11].

На рис. 3 приведены спектры мощности хаотического СВЧ сигнала, измеренные на выходе спин-волнового генератора хаоса. Экспериментально установлено, что данный сигнал формируется в кольце при превышении порога трехволнового параметрического распада ПМСВ на 39 dB для $d_1 = 25 \mu\text{m}$ и на 28 dB для $d_2 = 65 \mu\text{m}$. Кроме трехволновых процессов на процесс хаотизации сигнала могут оказывать влияние и четырехволновые процессы, развитие которых возможно в пленке при указанных выше значениях надкритичности. Представленные на рис. 3 спектры характеризуются шумоподобным пьедесталом, на вершине которого присутствует неэквидистантная сетка выделенных частот. Местоположение данных частот определяется кольцевыми модами исследуемого генератора, расстояние между которыми есть величина, обратная времени задержки сигнала в кольце. Так, в случае тонкой пленки ЖИГ (рис. 3, *a*) расстояние между частотами 10–35 MHz, что эквивалентно значениям времени задержки $\tau_1 = 29$ –100 ns (рис. 2, *a*); в случае толстой пленки ЖИГ (рис. 3, *b*) — 10–75 MHz, что эквивалентно

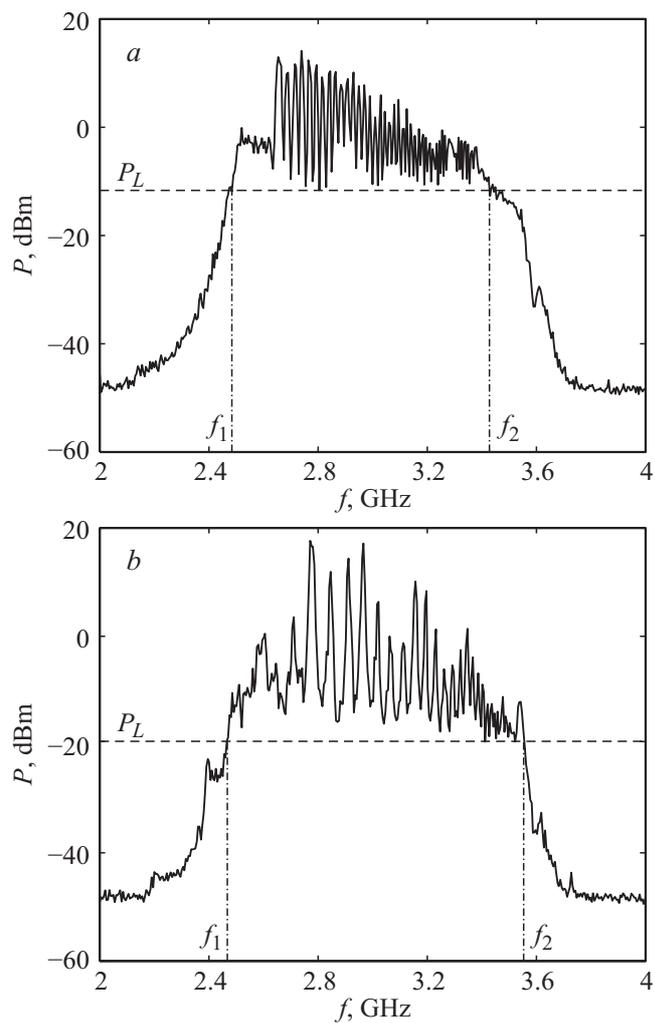


Рис. 3. Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в кольце при разных толщинах пленки ЖИГ: a — $d_1 = 25 \mu\text{m}$, b — $d_2 = 65 \mu\text{m}$. Ширина полосы приемника анализатора спектра E4408B $\delta f = 100$ kHz.

значениям $\tau_2 = 13\text{--}100\text{ ns}$ (рис. 2, *b*). Наличие у генератора кольцевых мод и сильной частотной зависимости ослабления спин-волновой линии передачи приводит к большой неравномерности спектра хаотического сигнала, которая при $d_1 = 25\text{ }\mu\text{m}$ равна $\sim 26\text{ dB}$, а при $d_2 = 65\text{ }\mu\text{m}$ — $\sim 37\text{ dB}$. Для тонкой пленки интегральная мощность генерируемого хаотического сигнала $P_1 = 3.7\text{ W}$, а для толстой пленки — $P_2 = 3.8\text{ W}$. Потребляемая мощность генератора при $d_1 = 25\text{ }\mu\text{m}$ — $P_{c1} = 19.05\text{ W}$, а при $d_2 = 65\text{ }\mu\text{m}$ — $P_{c2} = 18.76\text{ W}$. Таким образом, в случае тонкой пленки КПД генератора хаоса $\eta_1 = (P_1/P_c) \cdot 100 = 19.4\%$, а в случае толстой пленки — $\eta_2 = 20.2\%$.

Для некоторых применений, связанных с защитой информации, интерес представляет не общая выходная интегральная мощность генерируемого хаотического сигнала, а его интегральная мощность, сосредоточенная в полосе частот, где спектральная плотность мощности (СПМ) не опускается ниже заданного уровня P_L . Чем ближе значение этой интегральной мощности к значению общей выходной интегральной мощности хаотического сигнала, тем выше эффективность работы генератора хаоса. На основе обработки измеренных спектрограмм установлено, что в случае использования тонкой пленки интегральная мощность хаотического сигнала $P_{int1} = P_{s1}\Delta f_1 = 637\text{ mW}$ (где $P_{s1} = 676\text{ }\mu\text{ W/MHz}$ — СПМ хаотического сигнала для тонкой пленки), сосредоточенная в 31%-й полосе частот $\Delta f_1 = f_2 - f_1 = 943\text{ MHz}$, составляет 17.2% от P_1 . В случае толстой пленки интегральная мощность $P_{int2} = P_{s2}\Delta f_2 = 122\text{ mW}$ (где $P_{s2} = 112\text{ }\mu\text{ W/MHz}$ — СПМ сигнала для толстой пленки), сосредоточенная в 36%-й полосе частот $\Delta f_2 = 1089\text{ MHz}$, составляет 3.2% от P_2 .

В заключение отметим, что неравномерность спектра генерируемого сверхширокополосного хаотического сигнала и эффективность работы генератора хаоса могут быть улучшены за счет увеличения времени задержки сигнала в кольце, что наблюдалось в [12] при использовании в кольце усилителя на основе лампы бегущей волны с большой электрической длиной. Для создания сверхширокополосных спин-волновых генераторов хаоса с высоким значением КПД необходимо использовать транзисторы GaN, обладающие большим КПД по сравнению с транзисторами GaAs.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-31142) и президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-828.2014.2).

Список литературы

- [1] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. С. 129.
- [2] *Анисимов Ю.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Кислов В.Я., Мясин Е.А.* // Радиотехника. 2000. № 2. С. 19–25.
- [3] *Савельев С.В.* // РиЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850–858.
- [4] *Савельев С.В.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 11. С. 20–25.
- [5] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. С. 359.
- [6] *Wu M., Kalinikos B.A., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237 202.
- [7] *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 89–98.
- [8] *Wu M., Hagerstrom A.M., Eukholt R., Kondrashov A., Kalinikos B.A.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 237 203.
- [9] *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калинин Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 5. С. 62–70.
- [10] *Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Romanenko D.V.* // IEEE Trans. on Magnetism. 2013. V. 49. N 3. P. 1047–1054.
- [11] *Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. С. 156.
- [12] *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д.* и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. № 5. С. 137–155.