

09;12

## Генерация широкополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитостатических волнах

© С.В. Гришин,<sup>1</sup> В.С. Гришин,<sup>2</sup> А.Е. Храмов,<sup>1</sup> Ю.П. Шараевский<sup>1</sup><sup>1</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия<sup>2</sup> НПЦ „Алмаз-Фазотрон“, 410033 Саратов, Россия

e-mail: grishfam@sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru; sharaevskyy@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 15 июня 2007 г.)

Проведено экспериментальное исследование широкополосной хаотической генерации в диапазоне сверхвысоких частот в кольцевой автоколебательной системе, включающей твердотельный усилитель мощности и широкополосную нелинейную линию передачи на основе ферромагнитной пленки при возбуждении в ней различных типов магнитостатических волн. Установлено, что „зашумление“ собственных мод кольцевой автоколебательной системы, возбуждаемых в полосе пропускания линии передачи на магнитостатических волнах, происходит за счет параметрического возбуждения спиновых волн магнитостатической волной и нелинейности усилителя мощности. Показано, что возникновение непрерывного спектра у генерируемого широкополосного хаотического сигнала обусловлено наличием падающего участка на динамической характеристике нелинейной линии передачи при возбуждении поверхностной магнитостатической волны.

PACS: 05.45.Gg, 75.30.Ds, 85.70.Ge

### Введение

В последние годы интенсивно проводятся исследования, направленные на создание кольцевых автоколебательных систем с положительной обратной связью, демонстрирующих хаотическое поведение в диапазоне сверхвысоких частот [1–3]. В качестве активных нелинейных элементов в таких автоколебательных системах могут использоваться как вакуумные усилители мощности, например, на основе лампы бегущей волны [3–7] или пролетного клистрона [8,9], так и твердотельные — в частности, на биполярных транзисторах [1,2,10].

В автоколебательных системах с вакуумными усилителями мощности режимы хаотической генерации обеспечиваются в основном за счет наличия падающего участка на динамической характеристике нелинейного активного элемента [4,6,9], а в системах с твердотельными усилителями мощности<sup>1</sup> — за счет инерционности биполярного транзистора при напряжениях его питания, отличных от номинального значения [10].

Вызывают также интерес автоколебательные системы, в которых генерация сигнала со сплошным спектром возникает в случае использования в цепи обратной связи пассивных нелинейных элементов на основе объемных или тонкопленочных ферромагнетиков [11–15]. Нелинейные свойства таких элементов обусловлены тем, что при достаточно высоких уровнях мощности сигнала в ферромагнетиках происходит параметрическое возбуждение коротковолновых обменных спиновых волн, приводящее к стохастической автомодуляции генерируемого

сигнала [11–15]. Однако данный механизм стохастизации сигнала, как следует из результатов указанных выше работ, наблюдается в достаточно узком интервале частот ( $\sim 10$  MHz). В работе [16] была экспериментально обнаружена широкополосная хаотическая генерация СВЧ-сигнала, имеющего практически непрерывный спектр, в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на поверхностной магнитостатической волне (ПМСВ), ширина полосы пропускания которой составляла  $\sim 1$  GHz. Данный эффект наблюдался в диапазоне частот ниже 3 GHz, где параметрические процессы первого и второго порядков для ПМСВ разрешены. Одновременное присутствие этих двух параметрических механизмов приводило, по мнению авторов, к широкополосной хаотической генерации СВЧ-сигнала, имеющего практически непрерывный спектр.

В настоящей работе на основе результатов экспериментального исследования кольцевой автоколебательной системы с нелинейной линией передачи при возбуждении в ней магнитостатических волн (МСВ) рассматривается один из возможных механизмов, приводящий к генерации широкополосного хаотического сигнала с практически непрерывным спектром и обусловленный особенностями динамической характеристики указанной линии передачи. Эта особенность связана с наличием падающего участка на динамической характеристике нелинейной линии передачи на МСВ в длинноволновой части СВЧ-диапазона, где параметрические процессы первого порядка разрешены. При этом указанная особенность наблюдается при возбуждении в линии передачи только ПМСВ. Для сравнения приводятся результаты, полученные при использовании в цепи обратной связи

<sup>1</sup> Отметим, что у твердотельных усилителей мощности отсутствует падающий участок на динамической характеристике [10].

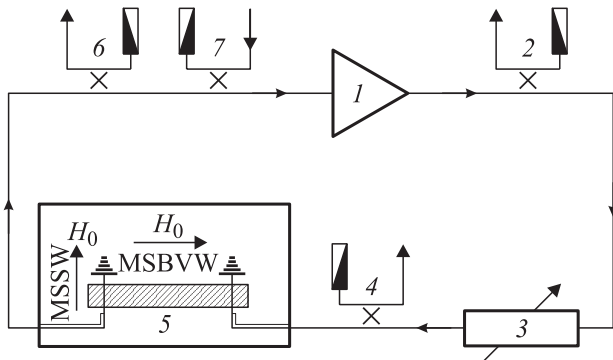
линии передачи на обратных объемных МСВ (ООМСВ), на динамической характеристике которой отсутствует падающий участок в том же диапазоне частот.

## 1. Схема экспериментальной установки

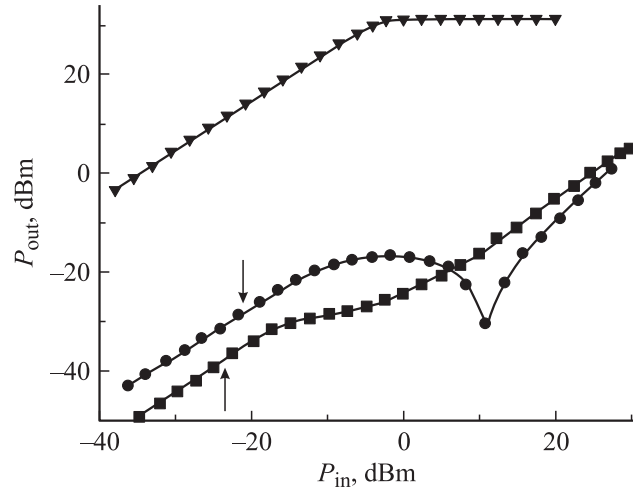
Экспериментальный макет (рис. 1) исследуемой автоколебательной системы представлял собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ-усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах с барьером Шоттки, переменный аттенуатор и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию передачи на МСВ. Транзисторный усилитель мощности имел в полосе частот 2–4 GHz коэффициент усиления в линейном режиме  $K \sim 34$  dB и выходную мощность в режиме насыщения  $P_{out} \sim 31$ –32 dBm.

На рис. 2 приведена динамическая характеристика усилителя, измеренная на частоте  $f = 2080$  MHz, имеющая аналогичный характер и на других частотах во всей его рабочей полосе частот. Из представленных на рис. 2 результатов следует, что на динамической характеристике усилителя можно выделить линейный участок и участок насыщения, начинающийся при входной мощности  $P_{in} \sim -2$  dBm.

Линия передачи на МСВ состояла из двух закороченных с одного конца и разнесенных между собой на расстояние  $l = 3$  mm полосковых проводников, под которыми располагалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), находившаяся в непосредственном контакте с ними и имевшая следующие параметры: геометрические размеры  $6 \times 14 \times 0.04$  mm, намагниченность насыщения  $4\pi M_0 = 1680$  Gs, параметр потерь  $2\Delta H = 0.69$  Oe.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — транзисторный усилитель мощности, 2 — направленный ответвитель для подключения анализатора спектра или нагрузки, 3 — переменный аттенуатор, 4, 6 — направленные ответвители для подключения измерителя мощности, 5 — нелинейная линия передачи на МСВ, 7 — направленный ответвитель для ввода в кольцо внешнего сигнала. Стрелками на блоке 5 схемы показано направление внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ , при котором в ферромагнитной пленке возбуждаются либо ПМСВ, либо ООМСВ.



**Рис. 2.** Динамические характеристики транзисторного усилителя мощности (треугольники) и нелинейной линии передачи в случае возбуждения ПМСВ (кружки) и ООМСВ (квадратики). Стрелками показаны уровни мощности на входе нелинейной линии передачи ПМСВ и ООМСВ, при которых в кольцевой системе возникает генерация монохроматического СВЧ-сигнала.

При наложении внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$  касательно к поверхности пленки и направленного вдоль полоскового проводника в пленке возбуждалась ПМСВ, а при направлении поля перпендикулярно полосковому проводнику — ООМСВ (рис. 2). Величина магнитного поля подбиралась таким образом, чтобы возбуждение ПМСВ и ООМСВ в пленке ЖИГ наблюдалось в рабочей полосе частот транзисторного усилителя мощности, и параметрические процессы первого порядка для ПМСВ и ООМСВ на этих частотах были разрешены [17]. В описанной выше конфигурации используемая линия передачи на МСВ обладает свойствами полосно-пропускающего фильтра [18,19] (ширина полосы пропускания по уровню  $-20$  dB составляет  $\sim 1$  GHz в случае возбуждения ПМСВ и  $\sim 300$  MHz — в случае возбуждения ООМСВ) и линии задержки [20,21]. Отметим, что величина задержки сигнала, проходящего через линию передачи на МСВ, определяется расстоянием между полосковыми проводниками, и при проведении эксперимента она уменьшалась для того, чтобы минимизировать влияние эффектов, связанных с запаздыванием сигнала в пленке, на формирование широкополосного хаотического сигнала, генерируемого кольцевой автоколебательной системой.

Переменный аттенуатор, включенный в кольцевую схему, обеспечивал плавную регулировку уровня мощности сигнала, поступающего на вход нелинейной линии передачи на МСВ, с точностью 0.05 dB и имел при этом уровень начальных потерь  $\sim 3$  dB. Для реализации положительной обратной связи основная часть мощности сигнала с выхода усилителя мощности возвращалась в кольцо, а меньшая часть поступала в нагрузку (анализатор спектра) через широкополосный направленный

ответвитель с переходным ослаблением  $\sim 9$  dB в полосе частот 1–12 GHz.

Для регистрации и анализа генерируемого системой сигнала использовался высокочувствительный анализатор спектра серии ESA-E, модель E4402B, компании Agilent Technologies, работающий в диапазоне частот 9 kHz–3 GHz. Данный анализатор использовался также для контроля уровня мощности СВЧ-сигнала на входе нелинейной линии передачи на МСВ, который осуществлялся через направленный ответвитель 4 (рис. 1). С помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи P4-38 и двух направленных ответвителей 6 и 7 (рис. 1) были проведены исследования в режиме малого сигнала амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) кольцевой системы, находящейся вблизи порога генерации. Эти измерения позволили определить частоты собственных мод кольцевой резонансной системы, расстояние между которыми составляло  $\Delta f_0 = 15\text{--}40$  MHz, что соответствовало времени задержки сигнала в кольце  $\tau \sim 25\text{--}70$  ns. Слабая неэквидистантность спектра генерируемых кольцевой автоколебательной системой собственных мод была обусловлена зависимостью времени задержки сигнала от частоты, которая наблюдается во всей полосе частот возбуждения МСВ в пленке ЖИГ.

## 2. Хаотическая генерация при возбуждении поверхностной магнитостатической волны

Рассмотрим результаты экспериментального исследования генерации сигнала в кольцевой автоколебательной системе при использовании в ней нелинейной линии передачи на поверхностной МСВ. Динамическая характеристика нелинейной линии передачи на ПМСВ, измеренная на частоте  $f = 2081$  MHz при  $H_0 = 195$  Oe, приведена на рис. 2. Из представленных результатов следует, что в диапазоне входных мощностей  $P_{in} = -1.5\text{--}11$  dBm на динамической характеристике линии передачи на ПМСВ наблюдается падающий участок, наличие которого обусловлено параметрическим возбуждением поверхностной МСВ как длинноволновых, находящихся в спектре частот ООМСВ, так и коротковолновых спиновых волн в пленке ЖИГ на частотах, вдвое меньших частоты ПМСВ [22]. Положительный наклон динамической характеристики при  $P_{in} > 10$  dBm связан с насыщением амплитуд параметрически возбуждаемых спиновых волн [17], а также с возникновением в пленке ЖИГ параметрических эффектов второго порядка [17], что приводит к установлению постоянного уровня потерь для ПМСВ в пленке при мощности  $P_{in} \sim 30$  dBm. Следует отметить, что падающий участок на динамической характеристике линии передачи на ПМСВ наблюдается во всей полосе частот возбуждения ПМСВ, а сами зависимости на различных частотах имеют аналогичный характер. Небольшое количественное расхождение между ними обусловлено изменением с частотой пороговых уровней входной мощности.

На рис. 3 приведены спектрограммы сигнала, генерируемого на частоте  $f_{01} = 2081$  MHz одной из собственных мод кольцевой системы, на которой в предгенерационном режиме наблюдалось максимальное значение коэффициента передачи. Представленные на рис. 3 спектрограммы получены при различных значениях коэффициента усиления кольцевой системы  $G = K - A$  ( $K$  — коэффициент усиления усилителя,  $A$  — значение ослабления в кольце)<sup>2</sup>, величина которого регулировалась переменным аттенуатором, расположенным на входе линии передачи на ПМСВ. При  $G = 0$  (рис. 3, а) в кольцевой системе наблюдалась одночастотная генерация, а линия передачи на ПМСВ, согласно результатам, приведенным на рис. 2, работала на линейном участке своей амплитудной характеристики ( $P_{in} = -20.7$  dBm).

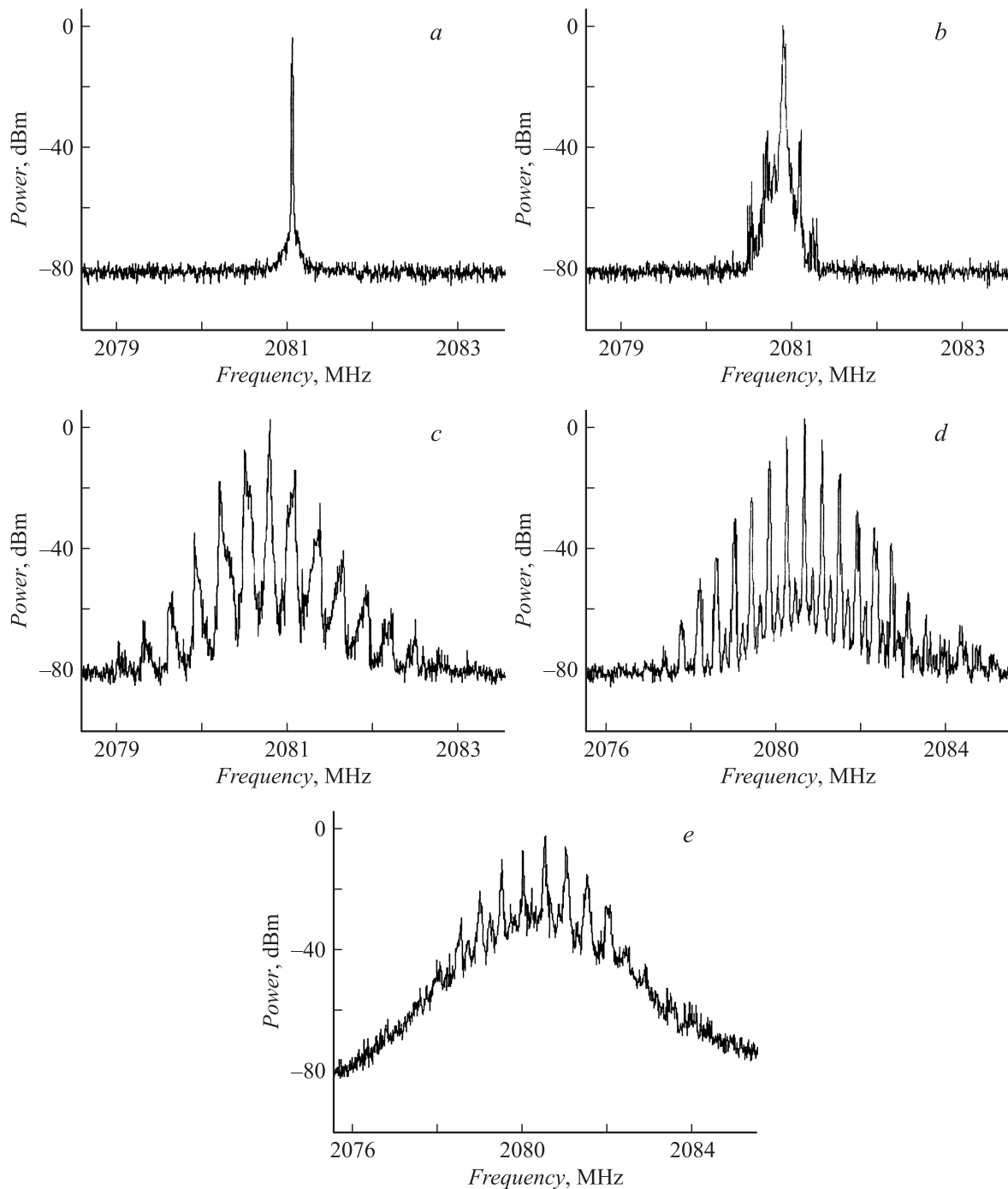
С увеличением  $G$  ( $G = 0.5$  dB, рис. 3, б) в спектре сигнала по обе стороны от него появляются частотные составляющие (частоты автомодуляции  $f_{am}$ ), ближайшие из которых отстроены от частоты  $f_{01}$  на значение  $\Delta f = 180\text{--}210$  kHz. В этом случае интегральная мощность сигнала на входе линии передачи на ПМСВ составляла  $P_{in} = -12$  dBm и соответствовала началу нелинейного участка на амплитудной характеристике линии (см. рис. 2). Наличие автомодуляционных составляющих на частотах  $f_{am}$ , находящихся вблизи частоты  $f_{01}$ , обусловлено параметрическим возбуждением в пленке ЖИГ обменных спиновых волн, которые и приводят к автомодуляции частоты генерируемого сигнала [22,23].

При увеличении  $G$  до 0.8 dB (рис. 3, в) наблюдается обогащение спектра сигнала комбинационными составляющими, расстояние между которыми увеличивается до 300 kHz, что связано с увеличением значения частот модуляции с ростом входной мощности. В этом случае интегральная мощность сигнала на входе линии передачи на ПМСВ<sup>3</sup> составляла  $P_{in} = -11.8$  dBm. Одной из причин, приводящей к такому изменению спектра сигнала, является нелинейность транзисторного усилителя мощности, которая становится заметной в кольцевой автоколебательной системе при прохождении через нее близко расположенных по частоте основного сигнала и автомодуляционных составляющих (см. рис. 3, б). Нелинейное преобразование на усилителе мощности модулированного сигнала приводит к возникновению комбинационных составляющих, частоты которых определяются соотношением  $f_{mn} = mf_{01} \pm nf_{am}$ , где  $f_{mn}$  — частота комбинации,  $m, n = 1, 2, 3 \dots$ <sup>4</sup>. „Шумовая размытость“ спектральных составляющих (рис. 3, в) обу-

<sup>2</sup> По аналогии с работой [16] будем считать, что уровень  $G = 0$  соответствует условию возникновения в кольце монохроматической генерации СВЧ-сигнала. Отметим, что измерения АЧХ кольцевой системы проводились при  $G = -1$  dB.

<sup>3</sup> Мощность сигнала на входе усилителя составляла  $-21.7$  dBm и соответствовала линейному участку его динамической характеристики.

<sup>4</sup> Обогащение спектра сигнала комбинационными составляющими подтверждено экспериментально в кольцевой автоколебательной системе без линии передачи на ПМСВ при введении в нее дополнительного внешнего сигнала малой амплитуды, отстроенного от частоты основного сигнала на  $\sim 300$  kHz.

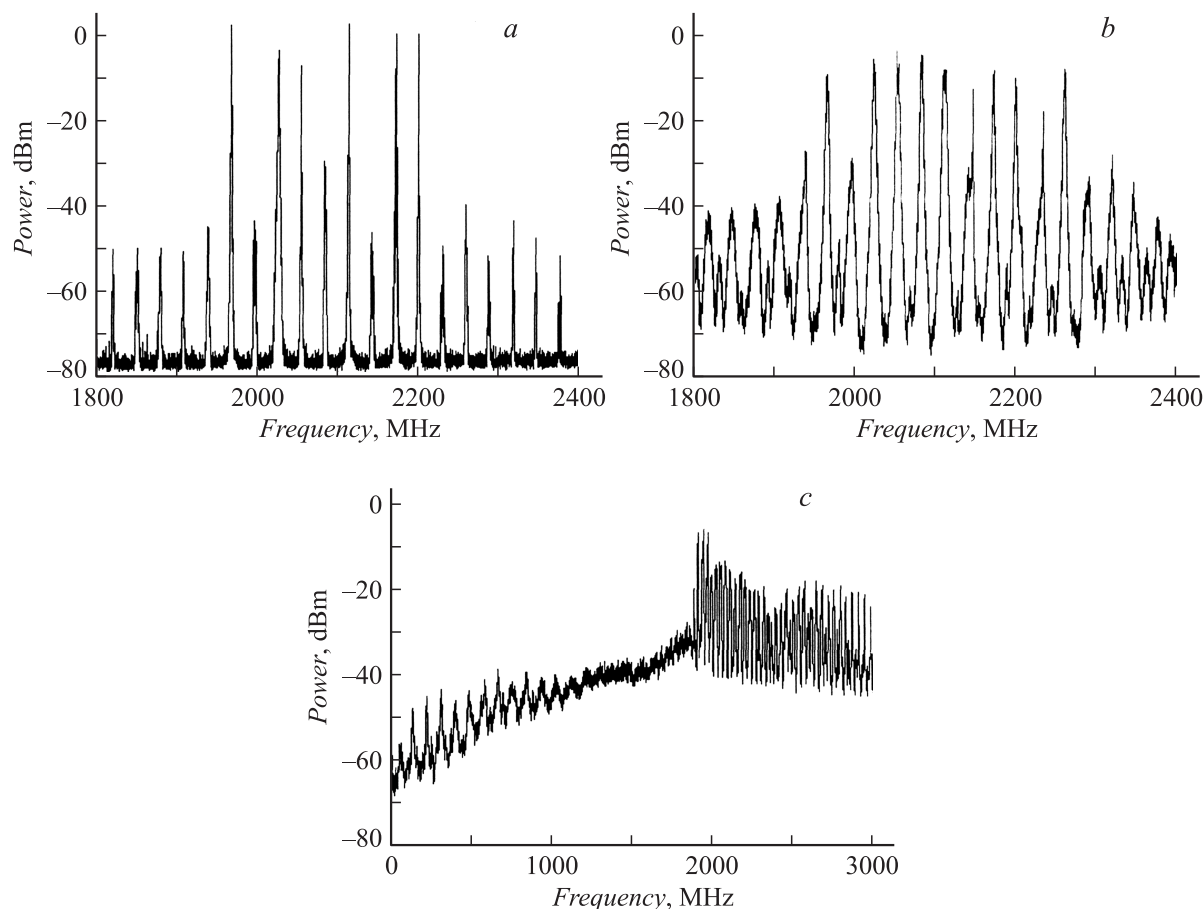


**Рис. 3.** Спектрограммы сигнала, генерируемого кольцевой автоколебательной системой в случае возбуждения ПМСВ на частоте  $f_{01} = 2081$  MHz при различных значениях  $G$ : (a)  $G = 0$ ; (b) 0.5; (c) 0.8; (d) 1.3; (e) 2 dB. Развертка по частоте на (a-c) — 5, на (d, e) — 10 MHz.

словлена стохастической природой модулирующих СВЧ-сигнал обменных спиновых волн [12]. При этом области частот спектральных составляющих перекрывались, образуя шумовой пьедестал. Аналогичный механизм перехода к шумовой генерации наблюдался ранее в кольцевой автоколебательной системе с нелинейным ферритовым резонатором и запаздыванием [11], где он был сопоставлен с механизмом так называемой „диф-

фузии Арнольда“, присущим динамической системе с несколькими взаимодействующими резонансами.

При дальнейшем увеличении  $G$  ( $G = 1.3$  dB, рис. 3, d) в спектре сигнала появлялись частотные составляющие, расположенные на расстоянии  $\sim \Delta f/2$  между комбинационными частотами. В этом случае интегральная мощность сигнала на входе линии передачи на ПМСВ составляла  $P_{in} = -10.7$  dBm. Аналогичный эффект на-



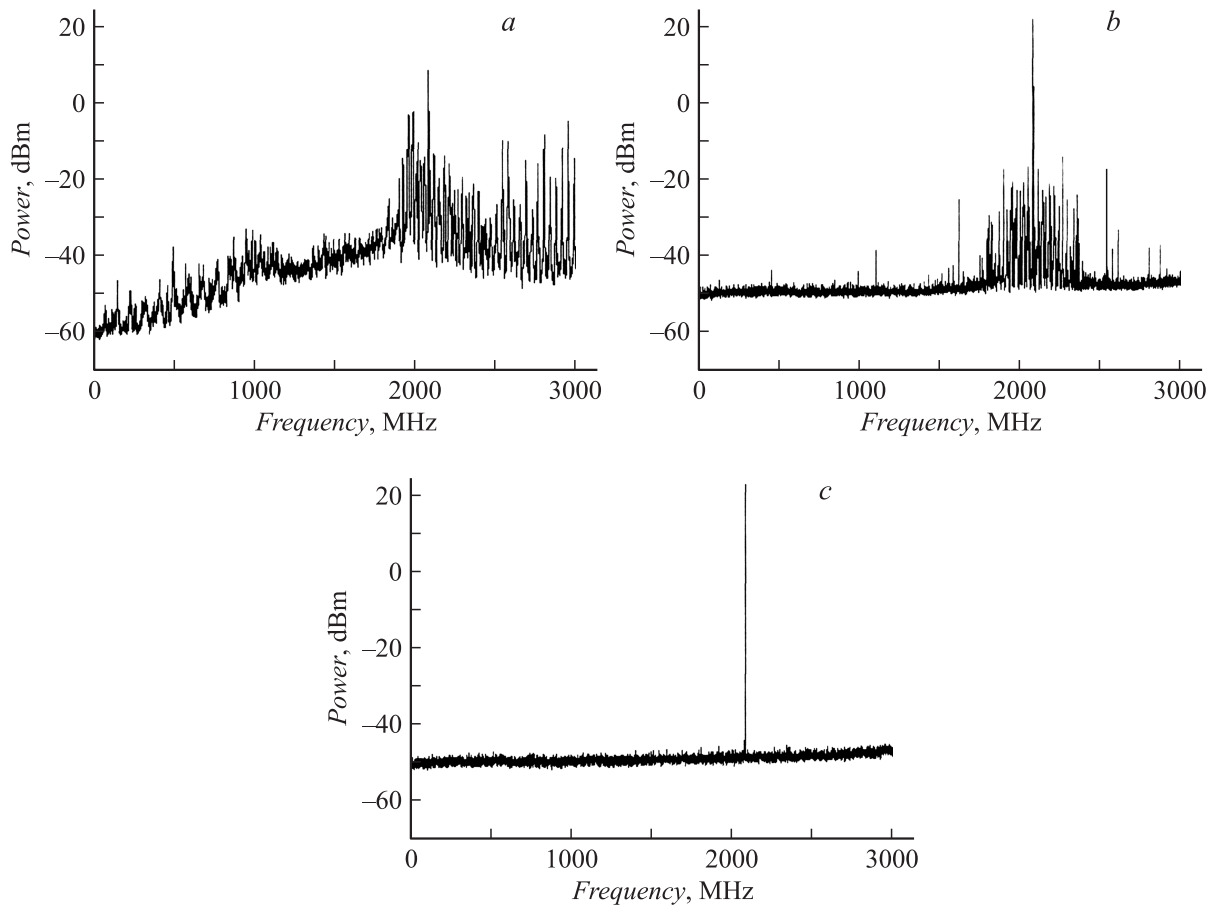
**Рис. 4.** Спектрограммы многочастотного сигнала, генерируемого на собственных модах кольцевой системы в случае возбуждения ПМСВ при различных значениях  $G$ : (a)  $G = 2.9$ ; (b) 5; (c) 21 dB.

блюдаясь в работе [12] и приводил к возникновению сценария перехода к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. При  $G = 2$  dB (рис. 3, e) спектр сигнала вблизи частоты  $f_{01}$  практически полностью „зашумлялся“, образуя сплошной спектр с выделенными частотами, соответствующими комбинационным. Таким образом, представленное на рис. 3 узкополосное преобразование спектра сигнала на одной из собственных мод кольцевой системы обусловлено как наличием механизма стохастической автомодуляции обменными спиновыми волнами поверхностной МСВ [12–16], так и нелинейным механизмом преобразования модулированного сигнала на усилителе мощности при отстройках между частотами модуляции и частотой сигнала генерации, находящихся в доплеровском диапазоне частот.

Описанный выше механизм стохастизации одной из собственных мод кольцевой системы наблюдался в случае, когда генерация сигнала на других собственных модах системы отсутствовала. С дальнейшим увеличением  $G$  генерация сигнала появлялась и на других модах системы, при этом спектр сигнала на этих модах сразу был „зашумленным“. Преобразование спектра сигнала в исследуемой автоколебательной системе в широкой полосе частот при увеличении значения  $G$

представлено на рис. 4. При  $G = 2.9$  dB (рис. 4, a) в системе практически во всей полосе пропускания линии передачи на ПМСВ (развертка по частоте на рис. 4, a составляет 600 MHz) устойчиво генерировался многочастотный сигнал, частотные составляющие которого соответствовали собственным модам кольцевой системы. В этом случае собственные моды системы были уже „зашумленными“ благодаря вышеописанному механизму. Наблюдаемый значительный перепад уровня частотных составляющих многочастотного сигнала, достигающий  $\sim 30$ –50 dB, обусловлен сильной неравномерностью АЧХ линии передачи на ПМСВ. Интегральная мощность такого многочастотного сигнала на входе линии передачи на ПМСВ составляла  $P_{in} = -0.9$  dBm, что соответствовало началу подающего участка на ее динамической характеристике (рис. 2).

На рис. 4, b приведена спектрограмма многочастотного сигнала при уровне его интегральной мощности на входе нелинейной линии  $P_{in} = 5$  dBm, который соответствует уже падающему участку динамической характеристики линии (рис. 2). В этом случае между частотами собственных мод системы появлялись частотные составляющие, отстоящие от частот собственных мод на величину, приблизительно равную половине межмодового расстояния, т. е.  $\Delta f_0/2 \sim 12$ –17 MHz, причем



**Рис. 5.** Спектрограммы хаотического сигнала в случае возбуждения ПМСВ при различной мощности внешнего сигнала  $P_{\text{ext}}$  на входе усилителя: (а)  $P_{\text{ext}} = -12$ ; (б)  $-10$ ; (с)  $13$  dBm.

спектр сигнала на этих частотах был „зашумленным“. Появление этих частотных составляющих связано с наличием падающего участка на динамической характеристике линии передачи на ПМСВ, что согласуется с известными результатами, полученными для кольцевых автоколебательных систем с нелинейными активными элементами [4,6,9,24]. Следует отметить, что при  $P_{\text{in}} = 5$  dBm, так же как и на рис. 3, с, происходило расширение шумового спектра каждой моды системы.

Дальнейшее увеличение интегральной мощности на входе линии передачи  $P_{\text{in}}$  приводит к возникновению режима широкополосной хаотической генерации, что связано с перекрытием сплошных спектров собственных мод кольцевой системы со сплошными спектрами дополнительных частотных составляющих, находящихся между модами системы. С ростом  $G$  спектры частотных составляющих генерируемого многочастотного сигнала перекрывались сильнее, образуя практически непрерывный широкополосный шумовой сигнал с выделенными частотами, соответствующими собственным модам системы (рис. 4, с). Из рис. 4, с также следует, что при больших значениях  $G$  в низкочастотной области спектра (на частотах ниже 1 GHz) регистрируются новые спектральные составляющие, которые возникают в результате преобразования частот мод системы и

модуляционных составляющих на нелинейном активном элементе и являются разностными комбинационными частотами. Спектры этих составляющих также перекрывались, что приводило к формированию шумового пьедестала у генерируемого системой широкополосного сигнала, начало которого приходилось на мегагерцовую область частот. Отметим, что интегральная мощность генерируемого в кольце шумового сигнала при  $G = 21$  dB составляла  $\sim 29$  dBm, что на 24 dB больше мощности генерируемого в этом же кольце монохроматического сигнала (рис. 3, а). При этом основная часть интегральной мощности такого практически непрерывного шумового сигнала сосредоточена в полосе частот возбуждения ПМСВ (1.7–2.9 GHz). Можно также предположить, что спектр генерируемого сигнала не ограничивается верхней частотой 3 GHz<sup>5</sup> и простирается в более высокочастотную область, где может перекрываться с шумовыми спектрами высших гармоник сигнала автогенератора.

Для установления природы генерируемого кольцевой автоколебательной системой сигнала было исследовано влияние внешнего монохроматического сигнала разной амплитуды с частотой  $f_{\text{ext}} = f_{01}$  на режимы генерации

<sup>5</sup> В нашем случае это ограничение обусловлено техническими характеристиками используемого анализатора спектра.

в такой системе. При  $G = 21$  dB и уровне мощности внешнего сигнала на входе транзисторного усилителя  $P_{\text{ext}} \leq -12$  dBm (рис. 5, *a*) внешний сигнал не оказывал заметного влияния на широкополосный шумовой спектр. При увеличении мощности внешнего входного сигнала (рис. 5, *b*) режим широкополосной генерации сменялся многочастотным режимом с шумовыми спектральными составляющими. При мощности внешнего сигнала на входе усилителя  $P_{\text{ext}} = 13$  dBm (рис. 5, *c*) генерация в кольцевой автоколебательной системе полностью подавлялась, и в исследуемой полосе частот присутствовала только частота внешнего сигнала  $f_{\text{ext}}$ . Данные результаты свидетельствуют о том, что в исследуемой системе генерируется детерминированный хаотический сигнал [25,26], а также о возможности управления сложной динамикой автоколебательной системы с помощью внешнего воздействия.

### 3. Хаотическая генерация при возбуждении обратных объемных магнитоэлектрических волн

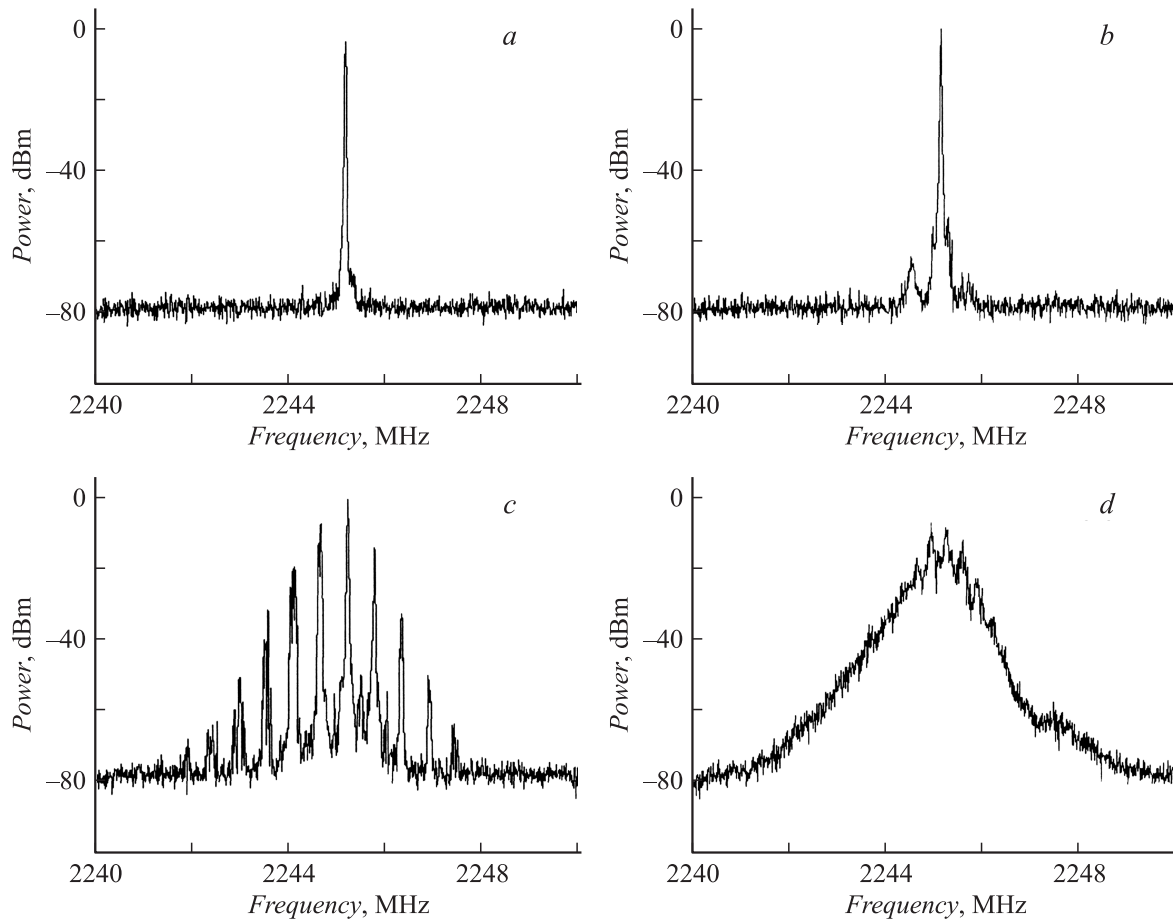
Рассмотрим генерацию сигнала в исследуемой системе, когда в качестве нелинейного элемента используется линия передачи на ООМСВ. На рис. 2 приведена динамическая характеристика нелинейной линии передачи на ООМСВ, измеренная на частоте  $f = 2245$  MHz при  $H_0 = 360$  Ое. Как следует из рис. 2, в диапазоне входных мощностей  $P_{\text{in}} = -17 - -5$  dBm на динамической характеристике линии передачи на ООМСВ наблюдается участок ограничения выходной мощности, наличие которого обусловлено параметрическим возбуждением обратными объемными МСВ коротковолновых спиновых волн в пленке ЖИГ на частотах, вдвое меньших частоты ООМСВ [17]. При этом участок ограничения на динамической характеристике не имеет отрицательного наклона, что, возможно, связано с отсутствием параметрического возбуждения обратными объемными МСВ длинноволновых спиновых волн, как в случае с ПМСВ. Отметим, что динамическая характеристика линии передачи на ООМСВ сохраняет свой качественный вид во всей полосе частот возбуждения ООМСВ.

На рис. 6 приведены спектрограммы сигнала, генерируемого на частоте  $f_{02} = 2245$  MHz одной из собственных мод кольцевой автоколебательной системы с нелинейной линией передачи на ООМСВ. При  $G = 0$  (рис. 6, *a*) в кольцевой системе наблюдалась одночастотная генерация, а линия передачи на ООМСВ (см. рис. 2) работала на линейном участке своей амплитудной характеристики ( $P_{\text{in}} = -23.6$  dBm). С увеличением  $G$  ( $G = 1.2$  dB, рис. 6, *b*) в спектре сигнала по обе стороны от него появляются автомодуляционные частотные составляющие. В этом случае интегральная мощность сигнала на входе линии передачи на ООМСВ составляла  $P_{\text{in}} = -14.1$  dBm и соответствовала нелинейному участку на амплитудной характеристике линии (рис. 2). Наличие автомодуляционных составляющих обусловлено

параметрическим возбуждением обратными объемными МСВ в пленке ЖИГ обменных спиновых волн [17]. При дальнейшем увеличении  $G$  ( $G = 1.5$  dB, рис. 6, *c*), как и в случае возбуждения ПМСВ (см. рис. 3, *c*), наблюдается обогащение спектра сигнала комбинационными составляющими, расстояние между которыми при возбуждении ООМСВ составляет  $\sim 540 - 570$  kHz. При  $G = 1.8$  dB (рис. 6, *d*) спектр сигнала вблизи частоты  $f_{02}$  полностью „зашумляется“, образуя сплошной спектр. Таким образом, представленное на рис. 6 узкополосное преобразование спектра сигнала на одной из собственных мод кольцевой автоколебательной системы обусловлено теми же механизмами, что и в случае возбуждения ПМСВ (рис. 3).

Последующее увеличение  $G$  приводило к генерации сигнала на других модах системы, которые появлялись при  $G = 4.6$  dB. В этом случае интегральная мощность сигнала на входе нелинейной линии передачи на ООМСВ составляла  $P_{\text{in}} = -5.1$  dBm и соответствовала уровню входной мощности, при котором на динамической характеристике линии заканчивается участок ограничения выходного сигнала. С ростом  $G$  число мод, на которых наблюдалась генерация сигнала, увеличивалось, а сами моды появлялись уже „зашумленными“. При  $G = 9.7$  dB в системе устойчиво генерировался многочастотный сигнал во всей полосе пропускания линии передачи на ООМСВ с практически эквидистантным спектром, расстояние между частотными составляющими которого было  $\sim 30 - 35$  MHz. При этом интегральная мощность такого многочастотного сигнала на входе линии передачи на ООМСВ составляла  $P_{\text{in}} = 11.2$  dBm и соответствовала входной мощности, при которой на динамической характеристике наблюдается практически постоянный уровень потерь (рис. 2). Дальнейшее увеличение  $G$  приводило к частичному перекрытию шумовых спектров мод, но при этом не наблюдалось появления новых частотных составляющих, частоты которых отличались бы от частот собственных мод системы. При  $G = 18.7$  dB (рис. 7, *a*) кольцевая автоколебательная система генерировала широкополосный шумовой сигнал, интегральная мощность которого составляла  $\sim 29$  dBm и была сосредоточена в основном в полосе возбуждения ООМСВ. Однако спектр этого сигнала не был непрерывным, как в рассмотренном выше случае с линией передачи на ПМСВ. Из рис. 7, *a* также следует, что в низкочастотной области спектра (на частотах ниже 0.5 GHz) регистрируются новые спектральные составляющие, которые возникают в результате преобразования частот мод системы на нелинейном активном элементе и являются разностными комбинационными частотами.

Для установления природы генерируемого в такой автоколебательной системе шумового сигнала были также проведены исследования, связанные с изучением влияния внешнего монохроматического сигнала разной амплитуды с частотой  $f_{\text{ext}} = f_{02} = 2450$  MHz на режимы генерации. Результаты этих исследований приведены на рис. 7, *b-d*. При  $G = 18.7$  dB и уровне мощности



**Рис. 6.** Спектрограммы сигнала, генерируемого кольцевой автоколебательной системой в случае возбуждения ООМСВ на частоте  $f_{01} = 2245$  MHz при различных значениях  $G$ : (a)  $G = 0$ ; (b) 1.2; (c) 1.5; (d) 1.8 dB.

внешнего сигнала на входе транзисторного усилителя  $P_{\text{ext}} < -23.5$  dBm внешний сигнал не оказывал заметного влияния на широкополосный шумовой спектр. При увеличении мощности внешнего входного сигнала до  $P_{\text{ext}} = 1.7$  dBm (рис. 7, b) наблюдался интересный эффект, связанный с ростом шумового пьедестала многочастотного сигнала под воздействием внешнего гармонического сигнала большой амплитуды. При этом спектр генерируемого системой шумового сигнала стремился к непрерывному. Аналогичные эффекты хаотизации колебаний при воздействии внешнего гармонического сигнала наблюдались, например, в гиролампе [27–29] или в эталонных моделях теории колебаний (генератор Ресслера) [30].

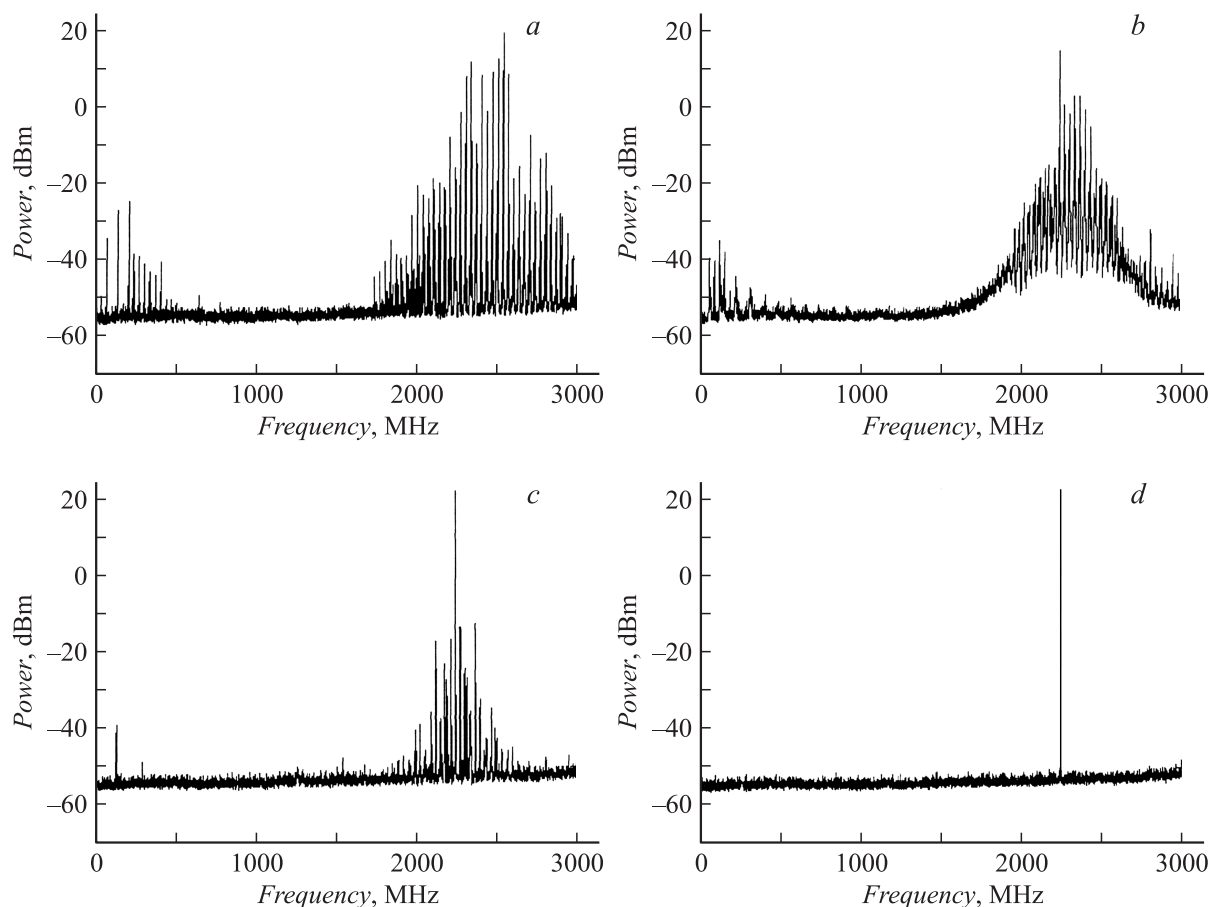
Дальнейшее увеличение мощности внешнего сигнала приводило к снижению шумового пьедестала до уровня собственных шумов анализатора спектра. При этом режим широкополосной генерации сменялся многочастотным режимом с четко выраженными шумовыми спектральными составляющими (рис. 7, c). При мощности внешнего сигнала на входе усилителя  $P_{\text{ext}} = 11.6$  dBm (рис. 7, d) генерация в кольцевой автоколебательной системе полностью подавлялась, и в исследуемой полосе частот присутствовала только частота внешнего

сигнала  $f_{02}$ . Данные результаты, как и рассмотренные в разд. 2, свидетельствуют о детерминированной природе генерируемого кольцевой автоколебательной системой широкополосного хаотического сигнала.

## Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование кольцевой автоколебательной системы с твердотельным усилителем мощности на GaAs полевых транзисторах с барьером Шоттки, которая демонстрирует режим широкополосной хаотической генерации только при наличии в цепи обратной связи нелинейного пассивного элемента в виде линии передачи на МСВ с широкой полосой пропускания. В случае возбуждения ПМСВ на динамической характеристике нелинейного пассивного элемента наблюдается падающий участок, присутствие которого обусловлено параметрическим возбуждением поверхностной МСВ как длинноволновых, так и коротковолновых спиновых волн на частотах, приблизительно равных половине частоты ПМСВ. Наличие такого участка на динамической характеристике нелинейной линии передачи на ПМСВ приводит к образованию практически непрерывного спектра у хаотического сигнала,





**Рис. 7.** Спектрограммы хаотического сигнала в случае возбуждения ООМСВ в отсутствие внешнего сигнала (*a*) и при различной мощности внешнего сигнала  $P_{\text{ext}}$  на входе усилителя: (*b*)  $P_{\text{ext}} = 1.7$ ; (*c*) 6.6; (*d*) 11.6 dBm.

генерируемого кольцевой автоколебательной системой. В случае возбуждения ООМСВ на динамической характеристике нелинейного пассивного элемента также наблюдается участок ограничения мощности, который, однако, не имеет отрицательного наклона. Отсутствие падающего участка на динамической характеристике нелинейной линии передачи на ООМСВ приводит к тому, что спектр сигнала, генерируемого кольцевой автоколебательной системой, не является в этом случае непрерывным.

При воздействии на исследуемую автоколебательную систему внешним гармоническим сигналом различной амплитуды наблюдалось полное подавление режима хаотической генерации при мощности внешнего сигнала в кольце, соответствующей мощности насыщения транзисторного усилителя. При этом в случае возбуждения ООМСВ был обнаружен эффект, связанный с возможностью получения хаотического сигнала, спектр которого становится близким к непрерывному, при увеличении амплитуды внешнего воздействия в кольце до величины, соответствующей началу режима насыщения усилителя мощности.

Важным прикладным результатом данной работы является возможность получения в исследуемой автоколебательной системе широкополосного хаотического

сигнала, интегральная мощность которого в кольце практически равна мощности насыщения усилителя.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, проф. Д.И. Трубецкову за полезные обсуждения результатов данной работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-02-16451, грантов президента РФ (МК-1320.2007.9 и МД-1884.2007.2), фонда некоммерческих программ „Династия“, в рамках Президентской программы поддержки Ведущих научных школ РФ, проект № НШ-355.2008.2, а также программы Федерального агентства по образованию РФ и АФГИР „Фундаментальные исследования и высшее образование“, грант № У4-Р-06-02.

## Список литературы

- [1] Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.

- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [4] Анисимова Ю.В., Дмитриев А.С., Залогин Н.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. № 8. С. 387–389.
- [5] Кац В.А., Трубецков Д.И. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 3. С. 116–119.
- [6] Кислов В.Я., Мясин Е.А., Богданов Е.В. Ас. № 1125735. 1984.
- [7] Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S. et al. // Phys. of Plasma. 2006. Vol. 13. P. 013 104.
- [8] Кузнецов С.П., Перельман А.Н., Трубецков Д.И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 1. С. 163–166.
- [9] Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M. // IEEE Trans. on Elect. Dev. 2005. Vol. 52. N 5. P. 790–797.
- [10] Савельев С.В. // РиЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850–858.
- [11] Калинин В.И., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 21. С. 1311–1314.
- [12] Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 4. С. 243–246.
- [13] Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 7. С. 66–72.
- [14] Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 16. С. 54–59.
- [15] Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 100–103.
- [16] Mingzhong W., Kalinikos V.A., Patton C.E. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 237 202.
- [17] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994.
- [18] Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 1. С. 318–332.
- [19] Adam J.D., Sritzer S.N. // IEEE Trans. on Magn. 2004. Vol. 40. N 4. P. 2844–2846.
- [20] Устинов А.Б., Калиникос Б.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 10. С. 20–25.
- [21] Устинов А.Б., Калиникос Б.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 14. С. 66–73.
- [22] Мелков Г.А., Шолом С.В. // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. № 2 (8). С. 712–719.
- [23] Медников А.М. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 1. С. 242–245.
- [24] Кузнецов С.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. XXV. № 12. С. 1410–1427.
- [25] Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
- [26] Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980.
- [27] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2002. Т. 66. № 12. С. 1761–1767.
- [28] Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII. № 5–6. С. 305–331.
- [29] Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. XLV. № 9. С. 773–792.
- [30] Hratov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I. // Europhys. Lett. 2005. Vol. 72. N 6. P. 901–907.