

05;09;12

## **Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн**

© А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
E-mail: kondrashov\_av@inbox.ru

Поступило в Редакцию 7 октября 2009 г.

Экспериментально исследована управляемая генерация хаотического сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала в активных кольцах на основе касательно намагниченных ферромагнитных пленок в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн. Продемонстрирована возможность эффективного управления параметрами хаотического СВЧ-сигнала.

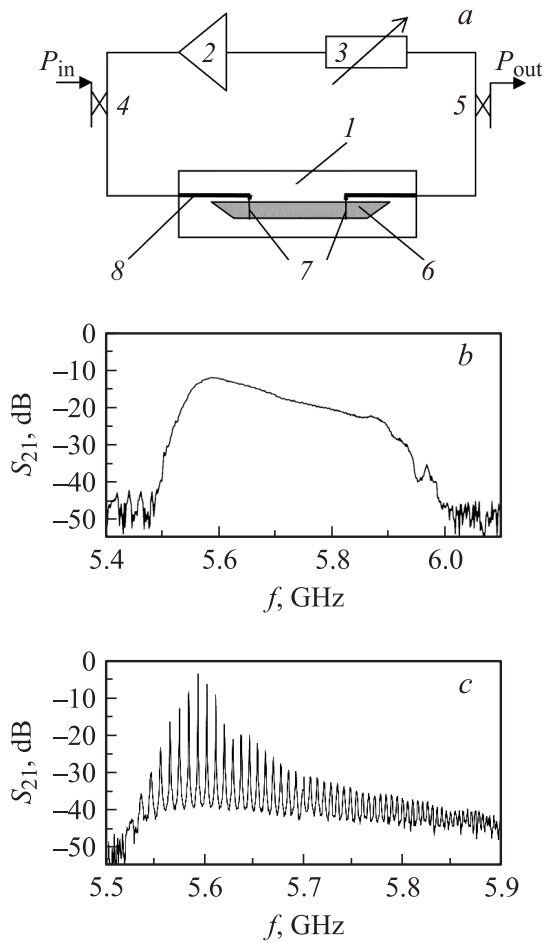
В последние годы все большее внимание уделяется исследованиям динамического хаоса, возникающего в различных нелинейных средах и системах. Динамический хаос обладает рядом преимуществ при его использовании в качестве „носителя информации“, среди которых можно выделить большую информационную емкость, высокий уровень скрытности при передаче сообщений, а также возможность самосинхронизации источника и приемника [1]. Одним из перспективных материалов для создания генераторов динамического хаоса в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне являются монокристаллические ферромагнитные пленки. Разнообразие дисперсионных и нелинейных свойств спиновых волн, распространяющихся в них, позволяет реализовать генерацию СВЧ-сигнала в форме динамического хаоса, а также управлять его свойствами. Вместе с тем возможности управляемой хаотической генерации в спин-волновых автогенераторах до сих пор не изучались.

Генераторы спин-волнового динамического хаоса можно разделить на две группы. К первой группе относятся кольцевые генераторы, хаос в которых формируется за счет одновременного развития трехволновых и четырехволновых процессов параметрического взаимодействия спиновых волн (см., например, [2–4]). Ко второй группе относятся кольцевые генераторы, в основе принципа действия которых лежат только четырехволновые процессы, а трехволновые процессы запрещены законами сохранения энергии и импульса [5,6]. Вторая группа генераторов представляет особый интерес, поскольку базируется на том же самом процессе, что и автогенератор солитонов [7].

Целью настоящей работы было исследование управляемой генерации хаотического сигнала в активных кольцах, изготовленных на основе пленок железо-иттриевого граната, в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн (ПСВ). Экспериментальный макет активного кольца (рис. 1, *a*) был сконструирован из следующих элементов: спин-волновой линии задержки 1, широкополосного полупроводникового СВЧ-усилителя 2, переменного аттенюатора 3 и направленных ответвителей 4 и 5 с коэффициентом связи  $-10$  dB. Эти элементы были последовательно соединены коаксиальными СВЧ-кабелями, образуя активное резонансное кольцо.

Линия задержки (ЛЗ) была изготовлена на монокристаллической пленке железо-иттриевого граната 6, эпитаксиально выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Толщина пленки составляла  $9.8 \mu\text{m}$ , а намагниченность насыщения равнялась  $1750$  G. Экспериментальный образец пленки шириной  $2$  mm помещался на антенны спиновых волн 7, выполненные в виде отрезков узких микрополосковых линий передачи. Антенны имели ширину  $50 \mu\text{m}$ , длину  $2$  mm и были короткозамкнутыми на концах. Расстояние между ними составляло  $4.5$  mm. Для подвода СВЧ-сигнала к входной антенне, возбуждавшей спиновые волны в пленке, и отвода сигнала от выходной антенны, принимавшей спиновые волны, использовались микрополосковые линии 8 с волновым сопротивлением  $50 \Omega$ .

При выполнении экспериментов пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем, которое было направлено по касательной к ее плоскости перпендикулярно направлению распространения спиновых волн. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке ПСВ. Результаты, представленные в настоящей статье, были получены для  $H = 1249$  Oe.



**Рис. 1.** Блок-схема активного кольца (а) и амплитудно-частотные характеристики спин-волновой линии задержки (b) и активного кольца (c).

Активное кольцо может работать в двух режимах, определяемых величиной коэффициента усиления СВЧ-сигнала в кольце. Если  $G$  обозначить коэффициент усиления СВЧ-усилителя за вычетом ослабления сигнала в переменном аттенуаторе, а  $L$  обозначить суммарные потери СВЧ-сигнала в ЛЗ и в остальных пассивных элементах кольца, то при

$G < L$  кольцо работает в режиме фильтрации [8], а при  $G \geq L$  — в режиме генерации. При проведении описываемых исследований наблюдались оба эти режима. Следуя предшествующим работам [5,7], значение  $G$ , при котором кольцо переходило из режима фильтрации в режим автогенерации, условно было принято равным нулю. Подчеркнем, что нелинейные свойства активного кольца определялись исключительно нелинейностью спин-системы ферромагнитной пленки.

Исследования проводились в несколько этапов. Сначала было осуществлено тестирование ЛЗ, заключающееся в измерении ее амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ). Минимальные вносимые потери наблюдались на частоте 5.592 МГц и составляли  $-12.2$  дВ (рис. 1, *b*). По результатам измерений ФЧХ была построена экспериментальная дисперсионная характеристика спиновых волн, которая хорошо совпала с дисперсионной зависимостью поверхностных спиновых волн, рассчитанной по теории [9].

На следующем этапе экспериментов ЛЗ была включена в активное кольцо и были проведены тестовые измерения АЧХ кольца в пассивном режиме его работы, т. е. для  $G < 0$ . Для этого СВЧ-сигнал мощностью  $P = -10$  дВт вводился в кольцо через направленный ответвитель 4 и выводился из кольца направленным ответвителем 5, как показано на рис. 1, *a*. При максимальном ослаблении СВЧ-сигнала в переменном аттенуаторе АЧХ кольца практически полностью повторяла АЧХ ЛЗ. Увеличение коэффициента усиления  $G$  приводило к появлению пиков пропускания на АЧХ. При приближении  $G$  к нулевому значению пики становились ярко выраженными, причем перепад между значениями потерь, вносимых активным кольцом в полосах пропускания и заграждения, составлял более 30 дВ. Пики наблюдались на резонансных частотах кольца [8].

На рис. 1, *c* приведена АЧХ кольца, измеренная для  $G = -0.5$  дВ. Из рисунка видно, что резонансный пик кольца с наименьшим значением вносимых потерь наблюдался на частоте 5.594 МГц, что хорошо согласуется с данными измерений АЧХ линии задержки, показанной на рис. 1, *b*. При достижении  $G$  значения, равного нулю, активное кольцо начинало генерировать непрерывной СВЧ-сигнал на резонансной частоте этого пика.

На последнем и основном этапе исследований проводилось изучение работы кольца в режиме автогенерации, т. е. при  $G \geq 0$ . При проведении измерений ко входу направленного ответвителя 4 была подключена

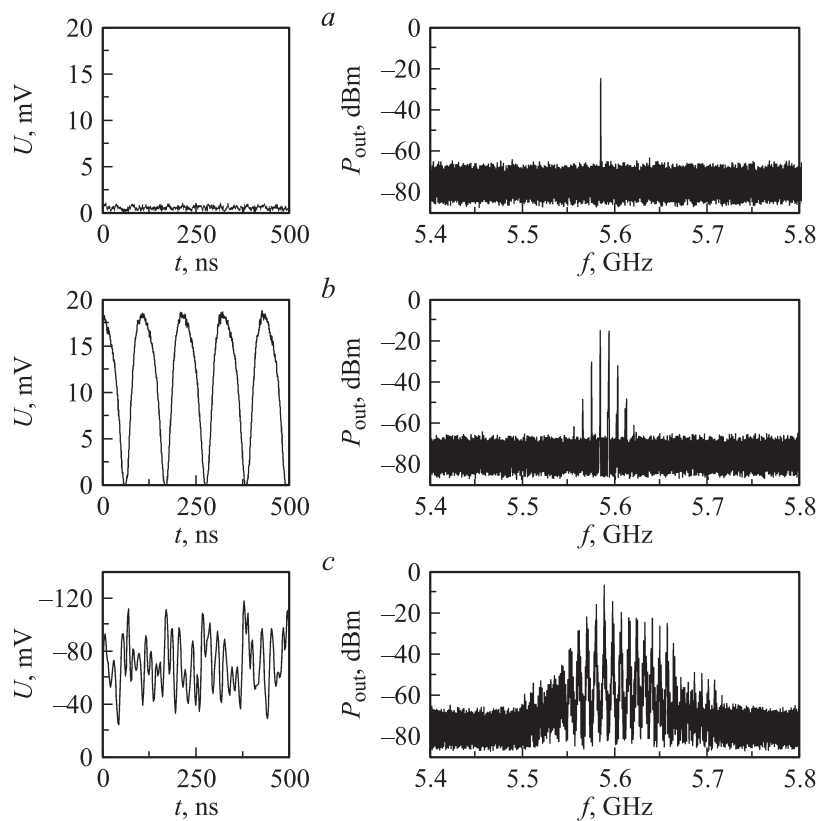
согласованная нагрузка. Генерируемый сигнал выводился из кольца направленным ответвителем (5). Часть этого сигнала после детектирования подавалась на осциллограф, а другая часть — на анализатор спектра.

Экспериментальные измерения проводились при постепенном увеличении коэффициента усиления  $G$  от 0 до 7 дВ. Систематическое изменение  $G$  позволило изучить как сценарий перехода к хаосу в кольцевом генераторе на ПСВ, так и зависимость параметров хаотического сигнала от значений  $G$ .

На рис. 2 показаны временные реализации и частотные спектры генерируемых кольцом сигналов. Как уже было сказано выше, при  $G = 0$  дВ кольцо переходило в режим автогенерации СВЧ-сигнала постоянной мощности, частота которого равнялась 5.594 МГц (рис. 2, *a*). Увеличение коэффициента усиления  $G$  приводило к возрастанию мощности СВЧ-сигнала, циркулировавшего в активном кольце, и в нем начинали развиваться нелинейные процессы взаимодействия спиновых волн. При этом, как и в работах [5,7], в кольце возникала многочастотная автогенерация. Иными словами, кольцо переходило в режим генерации сетки частот. Подчеркнем, что возникавшая сетка частот была эквидистантной, что свидетельствует о механизме четырехволнового параметрического процесса, вызывавшего многочастотную автогенерацию.

Для исследованного активного кольца многочастотная автогенерация начинала наблюдаться при  $G = 0.01$  дВ. При этом сигнал, генерируемый кольцом, во временной области становился модулированным по амплитуде. С увеличением  $G$  глубина модуляции возрастала. Когда  $G$  был равен 0.05 дВ, в кольце наблюдалась автогенерация периодической последовательности черных солитоноподобных импульсов, имевших форму провалов на огибающей СВЧ-сигнал до нулевого уровня мощности (рис. 2, *b*). Длительность этих импульсов на уровне половинной мощности составляла 38 ns, а период следования равнялся 106 ns. Ранее подобное явление было подробно описано в [7], поэтому мы не будем здесь на нем детально останавливаться.

При дальнейшем увеличении  $G$  выше 0.36 дВ автогенерация солитоноподобных импульсов видоизменялась и кольцо переходило в режим генерации амплитудно-модулированной периодической импульсной последовательности. Подчеркнем, что этот режим требует специального изучения, поскольку он, по-видимому, соответствует генерации солитонов с пульсирующими параметрами.



**Рис. 2.** Временные профили (слева) и спектры (справа) СВЧ-сигналов, автогенерируемых активным кольцом в режимах: *a* — генерации монохроматического сигнала, *b* — генерации черных солитонов огибающей, *c* — генерации динамического хаоса.

Еще большее увеличение коэффициента усиления до  $G = 0.46$  dB приводило к возникновению в спектре сигнала новых интенсивных спектральных гармоник и переходу кольца в режим генерации квазипериодического сигнала. Далее, при значениях  $G$  свыше  $0.76$  dB кольцо начинало генерировать хаотический СВЧ-сигнал. При этом спектр генерации в пределах полос пропускания кольца постепенно становился

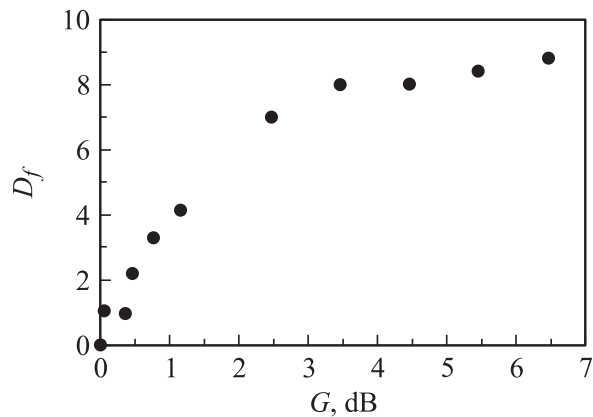
сплошным. Ширина спектра хаотического сигнала была около 100 МГц. На рис. 2, *c* показаны осциллограмма и спектр хаотического сигнала для  $G = 2.46$  dB. Таким образом, при переходе от регулярной динамики к хаотической наблюдались характерные особенности, соответствующие сценарию Рюэля–Такенса [10].

Для анализа полученных результатов по временным зависимостям были построены фазовые портреты. Реконструкция фазовых траекторий проводилась методом задержки. Режимам генерации монохроматического, периодического и квазипериодического сигналов соответствовали регулярные аттракторы — соответственно устойчивая точка, предельный цикл и двумерный тор. При переходе активного кольца в режим генерации хаотического сигнала фазовый портрет стохастизировался.

По фазовым портретам была проведена оценка ряда параметров хаотического сигнала. Для оценки значений фрактальной размерности и размерности вложения нами был использован алгоритм Грассбергера–Прокаччи (см., например, [10]). При этом вначале была рассчитана зависимость корреляционного интеграла  $C$  от характеристического размера  $l$ . По наклону зависимости  $C(l)$  было найдено значение корреляционной размерности. Значения корреляционной размерности были рассчитаны для различных размерностей фазового пространства. С увеличением размерности фазового пространства корреляционная размерность приходила в насыщение. Наличие явного участка насыщения позволило найти фрактальную размерность  $D_f$ .

На рис. 3 представлена зависимость величины фрактальной размерности  $D_f$  от коэффициента усиления кольца. Из рисунка видно, что начиная со значения  $G = 0.76$  dB значение фрактальной размерности начинает превышать 2, что говорит о возникновении в фазовом пространстве странного аттрактора. Таким образом, можно говорить о переходе кольца в режим генерации динамического хаоса. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к монотонному возрастанию фрактальной размерности, а соответственно и к увеличению сложности взаимодействия участвующих в процессе формирования динамики системы степеней свободы. Максимальное значение фрактальной размерности равно 8.8 при  $G = 6.46$  dB.

Обращает на себя внимание то, что для режима генерации, наблюдавшегося при  $0.46 \leq G < 0.75$  dB, фрактальная размерность имеет значение, приблизительно равное 2. Эксперименты показали, что в этом режиме в соответствии с теоретическими представлениями в кольце еще существовала регулярная динамика.



**Рис. 3.** Зависимость фрактальной размерности СВЧ-сигнала от коэффициента усиления кольца.

Из проведенного исследования следует, что в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн нелинейная система с ферромагнитной пленкой демонстрирует переход к хаосу через последовательность рождения составляющих с несоизмеримыми частотами, т.е. в соответствии со сценарием Рюэля–Такенса. Режим автогенерации динамического хаоса реализуется выше некоторого значения коэффициента усиления кольца  $G$ , лежащего за порогом автогенерации спин-волновых солитонов. В таком режиме можно эффективно управлять фрактальной размерностью аттрактора хаотического сигнала путем регулировки значения  $G$ . Таким образом, активные кольца на основе ферромагнитных пленок можно использовать для генерации хаотических СВЧ-сигналов с контролируемыми параметрами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 08-02-00959), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам президента Российской Федерации (проекты НШ-2124.2008.2 и МК-2804.2008.8.), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП/2.1.1.371), Немецкого научного общества (проект DFG 436 RUS 113/644/0-3), а также Комитета по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга.



## Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд-во физматлит, 2002. 252 с.
- [2] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 16. С. 54–59.
- [3] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // Письма ЖЭТФ. 2009. Т. 89. № 2. С. 59–63.
- [4] *Hagerstrom A.M., Tong W., Wu M., Kalinikos B.A., Eykholt R.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. 207 202.
- [5] *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А., Venner H.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 11. С. 81–87.
- [6] *Wu M., Hagerstrom A.M., Eykholt R., Kondrashov A., Kalinikos B.A.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. 237 203.
- [7] *Kalinikos B.A., Scott M.M., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 20. P. 4697–4700.
- [8] *Порохнюк А.А., Устинов А.Б., Ковшиков Н.Г., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 18. С. 17–27.
- [9] *Damon R.W., Eschbach J.R.* // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. N 3/4. P. 308.
- [10] *Шустер Г.* Детерминированный хаос: Введение. М.: Мир, 1988. 240 с.