

09

## Автогенерация хаотического СВЧ-сигнала в активных кольцах на основе ферромагнитных пленок

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

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“  
Darmstadt University of Technology, D-64289 Darmstadt, Germany  
E-mail: spinlab@eltech.ru

Поступило в Редакцию 30 октября 2007 г.

Впервые экспериментально исследована автогенерация хаотического сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала в активных кольцах на основе ферромагнитных пленок, работающих в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия спиновых волн. Показано, что, управляя коэффициентом усиления кольца, можно генерировать СВЧ-сигналы различных видов, в частности монохроматический, в форме стационарной периодической последовательности солитоноподобных импульсов и в форме динамического хаоса. Определены параметры, характеризующие генерируемый кольцом хаотический сигнал.

PACS: 07.57.Hm

Непрерывно растущая в последние годы интенсивность использования информационных и телекоммуникационных устройств сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона обуславливает повышенный интерес к исследованию новых носителей информации. Одним из перспективных направлений в этой области является применение динамического хаоса в коммуникационных системах в качестве несущего сигнала. Среди преимуществ, присущих динамическому хаосу как несущему сигналу, можно выделить большую информационную емкость и конфиденциальность при передаче сообщений [1].

В ряде работ [2–6] были исследованы генераторы динамического хаоса на основе спин-волновых линий задержки. В качестве линейной волноведущей среды этих линий задержки были использованы ферромагнитные пленки из железо-иттриевого граната (ЖИГ). Так, в работах [2–5] были подробно исследованы узкополосные генераторы, в основе принципа действия которых лежали параметрические процессы

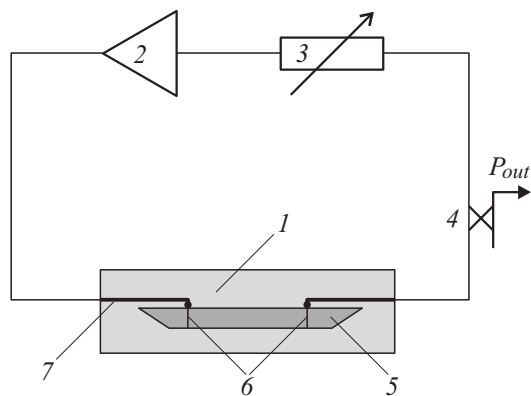


Рис. 1. Блок-схема активного кольца.

трех- и четырехволнового взаимодействия спиновых волн. В работе [6] был исследован сравнительно широкополосный генератор хаотических импульсов. В этой работе была получена генерация динамического хаоса с полосой частот около 1 GHz.

Говоря о генераторах динамического хаоса, использующих параметрические процессы в ферромагнитных пленках ЖИГ, можно отметить, что частотный диапазон, в котором возможны трехволновые процессы, ограничен по частоте сверху. В частности, для монокристаллических пленок ЖИГ с намагниченностью насыщения 1750 Gs, которые обычно используются в спин-волновых приборах, этот диапазон ограничен частотой около 4.9 GHz. На более высоких частотах нелинейная динамика волн намагниченности определяется четырехволновыми процессами. Цель настоящей работы состоит в исследовании управляемого генератора СВЧ хаотического сигнала на основе активного резонансного кольца, нелинейным элементом которого является спин-волновая линия задержки, работающая в условиях четырехволнового взаимодействия спиновых волн.

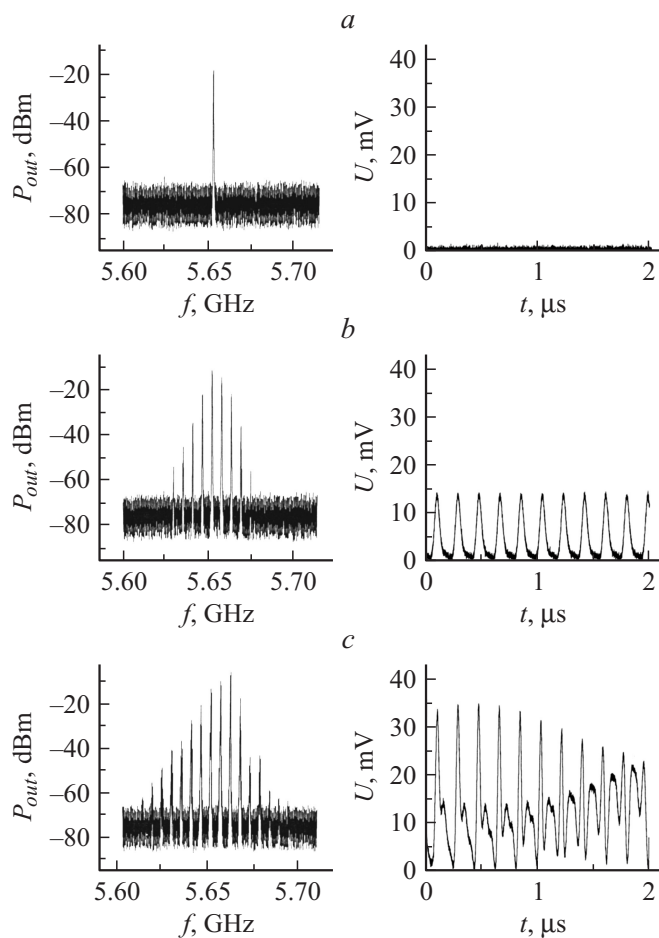
Блок-схема активного резонансного кольца приведена на рис. 1. Макет представлял собой последовательно соединенные спин-волновую линию задержки (ЛЗ) (1), полупроводниковый СВЧ-усилитель (2), переменный аттенюатор (3) и направленный ответвитель (4). Линия задержки выполняла роль нелинейного частото задающего элемента

кольца. Усилитель служил для компенсации потерь СВЧ-сигнала в ЛЗ и аттенюаторе. При помощи аттенюатора изменялся коэффициент усиления СВЧ-сигнала, циркулирующего в кольце. Генерируемый сигнал выводился из кольца при помощи направленного ответвителя.

Линия задержки изготовлена на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (5), эпитаксиально выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Пленка помещалась на антенны спиновых волн (6), выполненные в виде отрезков микрополосковых линий передачи. Антенны имели ширину  $50\ \mu\text{m}$ , длину  $2\ \text{mm}$  и были короткозамкнутыми на конце. Для подвода СВЧ-мощности к возбуждающей антенне и ее отвода от приемной антенны использовались микрополосковые линии (7) с волновым сопротивлением  $50\ \Omega$ . Толщина пленки ЖИГ составляла  $5.2\ \mu\text{m}$ ; ее намагниченность насыщения равнялась  $1750\ \text{Gs}$ . Пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем, которое было направлено по касательной к плоскости пленки параллельно направлению распространения спиновых волн. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке так называемых обратных объемных спиновых волн. Величина поля намагничивания была выбрана такой, чтобы нелинейность спиновых волн определялась только процессами четырехволнового взаимодействия. Она равнялась  $1300\ \text{Oe}$ .

Как уже говорилось, нелинейные свойства активного кольца определялись нелинейностью спин-системы ферромагнитной пленки. Важной особенностью пленочной спин-волновой линии задержки являлась сравнительно низкая мощность перехода в нелинейный режим (десятки милливатт). Подчеркнем, что усилитель всегда работал в линейном режиме при всех использовавшихся уровнях СВЧ-сигнала.

Для исследования параметров сигнала, генерируемого активным кольцом, снимались его частотные спектры и амплитудные профили в функции времени для различных значений коэффициента усиления. Постепенное увеличение коэффициента усиления  $G$  приводило к тому, что при некотором его значении происходила полная компенсация потерь СВЧ-сигнала и в кольце возникала автогенерация монохроматического СВЧ-сигнала. Следуя работам [6,7], такое значение коэффициента усиления было принято равным нулю. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводило к смене режимов генерации. В частотной области эти режимы можно условно разделить на три вида: генерация монохроматического сигнала, генерация сетки частот, генерация дина-

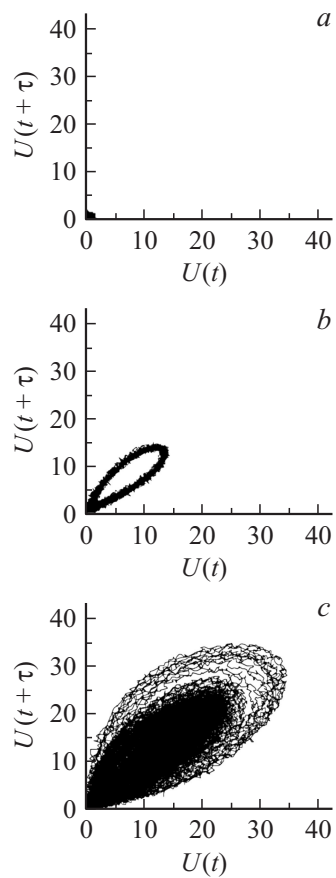


**Рис. 2.** Спектры сигнала (слева) и профили амплитуды огибающей СВЧ-сигнала (справа) для различных режимов автогенерации активного кольца: *a* — генерация монохроматического сигнала, *b* — генерация солитонов огибающей, *c* — генерация динамического хаоса.

мического хаоса. Заметим, что во временной области режим генерации сетки частот показывает генерацию стационарной последовательности нелинейных импульсов — солитонов огибающей [8].

На рис. 2 представлены частотные спектры мощности и временные профили амплитуды огибающей СВЧ-сигнала, генерируемого в кольце, измеренные для трех значений коэффициента усиления  $G$ . При  $G = 0$  dB в кольце возникала автогенерация непрерывного сигнала постоянной амплитуды на частоте 5.653 GHz (рис. 2, *a*). С увеличением коэффициента усиления кольцо переходило в нелинейный режим работы. При этом, как и в работах [6,7], за счет модуляционной неустойчивости несущих спиновых волн в кольце возникала и развивалась многочастотная автогенерация, что приводило к амплитудной модуляции сигнала. При  $G = 0.2$  dB в кольце наблюдалась стационарная генерация светлых солитонов огибающей (рис. 2, *b*). Несущая частота солитонной последовательности была равна 5.652 GHz, период — 186 ns, а длительность импульсов — 54 ns. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления кольца приводило к генерации еще большего числа гармоник. При  $G > 0.35$  dB генерация солитонов разрушалась и наблюдалась генерация периодической стационарной последовательности нелинейных импульсов несолитонной формы. При еще большем увеличении коэффициента усиления до величины  $G = 0.9$  dB в кольце возникла стохастизация генерируемого сигнала. Типичные экспериментальные данные, измеренные для  $G = 1.2$  dB, приведены на рис. 2, *c*. Полоса частот стохастически модулированного СВЧ-сигнала была около 100 MHz.

Для описания динамики системы, а также для определения параметров автогенерируемого сигнала на основе полученных экспериментальных данных были построены фазовые траектории для всех режимов генерации активного кольца (рис. 3). Восстановление аттракторов проводилось методом задержки [9]. Из рис. 3 видно, что стационарным режимам автогенерации соответствуют регулярные аттракторы. Так, режиму генерации монохроматического сигнала соответствует точка (рис. 3, *a*), а режиму генерации солитонов — предельный цикл (рис. 3, *b*). Аттрактор, показанный на рис. 3, *c*, соответствует режиму генерации непериодического сигнала. Он охватывает весь диапазон колебаний намагниченности и имеет стохастический вид. По восстановленным аттракторам была проведена оценка параметров хаотического сигнала. Оказалось, что минимальная размерность вложения аттрактора равна 5, а соответствующая ей истинная фрактальная размерность равна 3.2. Такие значения свидетельствуют о существовании в кольце динамического хаоса.



**Рис. 3.** Проекция аттракторов для режимов: *a* — генерации монохроматического сигнала, *b* — генерации солитонов огибающей, *c* — генерации динамического хаоса.

Из проведенного исследования следует, что активные кольца на основе ферромагнитных пленок могут генерировать как стационарный, так и хаотический сигнал. Изменяя величины поля подмагничивания и коэффициента усиления, возможно выбирать частоту и полосу генерируемого сигнала. Кроме того, управляя коэффициентом усиления кольца, можно изменять вид генерации. Таким образом, активные

кольца на основе ферромагнитных пленок могут найти практическое применение как электрически управляемые генераторы СВЧ-сигналов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 05-02-17714), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-8860.2006.2), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП/2.1.1.1382) и DFG (проект 436 RUS 113/644/0-2).

## Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2002. 252 с.
- [2] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. В. 4. С. 243–246.
- [3] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 66–72.
- [4] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 16. С. 54–59.
- [5] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 8. С. 100–103.
- [6] *Wu M., Kalinikos B.A., Patton C.E.* / Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237202-1-4.
- [7] *Ковшиков Н.Г., Калиникос Б.А., Костылев М.П., Беннер Х.* // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76. В. 5. С. 310–315.
- [8] *Scott M.M., Kalinikos B.A., Patton C.E.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 7. P. 970–972.
- [9] *Takens F.* Lect. Notes in Math. Warwick: Springer-Verlag 598, 1980. P. 366.