

13

Исследование динамического хаоса в кольцевых СВЧ-генераторах на основе нормально намагниченной ферромагнитной пленки

© А.В. Кондрашов^{1,2}, А.Б. Устинов¹, Б.А. Калиникос¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (СПбГЭТУ „ЛЭТИ“)

² Международная лаборатория „MultiferrLab“, университет ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: kondrashov_av@inbox.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования перехода к генерации сверхвысокочастотного (СВЧ) динамического хаоса в кольцевых генераторах, изготовленных на основе нормально намагниченных пленок железо-иттриевого граната. Показано, что увеличение коэффициента усиления кольца приводит к последовательному возникновению генерации монохроматического, периодического, квазипериодического и хаотического СВЧ-сигнала. Для квазипериодического режима генерации характерно появление вторичной модуляции амплитуды сигнала. В режиме генерации хаоса контроль его параметров осуществляется коэффициентом усиления кольца.

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям динамического хаоса, возникающего в различных нелинейных системах и средах. Интерес к таким исследованиям объясняется возможностью использования хаотических сигналов в телекоммуникационных [1] и радарных [2] системах нового поколения, а также для генерации случайных чисел [3]. К настоящему времени разработаны и изучены различные генераторы динамического хаоса, например, изготовленные на основе дискретных электронных компонентов [4,5], оптоэлектронных компонентов [6] или СВЧ-резонаторов [7].

Одним из перспективных материалов для создания генераторов динамического хаоса в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне являются монокристаллические пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ)

и мультиферроидные структуры на их основе [8–10]. Разнообразие дисперсионных и нелинейных свойств спиновых волн, распространяющихся в них, позволяет реализовать генерацию СВЧ-сигнала в форме динамического хаоса, а также управлять его свойствами. До сих пор основное внимание уделялось исследованию генераторов на основе касательно намагниченных пленок ЖИГ [8,9,11,12].

Целью данной работы является исследование свойств динамического хаоса, а также особенностей перехода от стационарной к хаотической динамике при генерации СВЧ-сигнала в кольцевых СВЧ-генераторах, изготовленных на основе нормально намагниченной ферромагнитной пленки.

Экспериментальный макет спин-волнового генератора был сконструирован по кольцевой схеме [11]. Его основными элементами являлись спин-волновая линия задержки, широкополосный полупроводниковый СВЧ-усилитель, переменный аттенюатор и направленный ответвитель. Линия задержки играла роль нелинейного частото задающего элемента. Усилитель, включенный последовательно с переменным аттенюатором, компенсировал потери, возникающие в пассивных элементах схемы. Увеличение коэффициента усиления кольца осуществлялось за счет уменьшения ослабления СВЧ-сигнала переменным аттенюатором. Небольшая часть мощности генерируемого сигнала (-10 dB) выводилась из кольца с помощью направленного ответвителя. Нелинейная линия задержки была сконструирована на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ. Ее толщина составляла $8.8 \mu\text{m}$, а намагниченность насыщения равнялась 1750 Gs. Пленка помещалась на антенны спиновых волн, выполненные в форме отрезков микрополосковых линий передачи. Антенны имели ширину $50 \mu\text{m}$, длину 2 mm и были короткозамкнуты на концах. Расстояние между антеннами составляло 7 mm. Пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем напряженностью 3332 Oe. Поле было направлено по нормали к плоскости пленки. Такая ориентация поля позволяла возбуждать в пленке ЖИГ прямые объемные спиновые волны.

Исследование режимов генерации кольца проводилось следующим образом. Плавное увеличение коэффициента усиления кольца приводило к возникновению в нем генерации СВЧ-сигнала. Соответствующее пороговое значение коэффициента усиления G было условно принято за 0 dB. Генерация возникала на частоте собственной резонансной моды кольца, имевшей наименьшие потери. Постепенное увеличение G выше

порога возникновения автогенерации приводило к последовательной смене режимов генерации за счет развития нелинейных четырехволновых процессов параметрического взаимодействия спиновых волн. Исследования проводились в диапазоне значений G от 0 до 4 дВ. Для каждого значения G измерялись огибающая генерируемого СВЧ-сигнала и спектр мощности. Следует отметить, что в ходе экспериментального исследования нелинейность генератора определялась только нелинейностью спин-системы пленки ЖИГ, а все остальные элементы активного кольца работали в линейном режиме.

Перейдем к описанию полученных результатов. Как было сказано ранее, при $G = 0$ дВ возникала монохроматическая автогенерация СВЧ-сигнала. Частота генерируемой гармоники была равна $f_0 = 4.518$ GHz. Далее ее будем называть основной гармоникой кольца. Огибающая СВЧ-сигнала представляла собой непрерывный уровень постоянной амплитуды.

Когда G достигал значения 0.025 дВ, в пленке ЖИГ начинали развиваться нелинейные четырехволновые процессы. Они приводили к появлению в спектре генерации эквидистантно расположенных фазоконгерентных гармоник. Во временной области появление дополнительных гармоник сопровождалось возникновением модуляции амплитуды генерируемого сигнала. Период модуляции соответствовал разности частот между гармониками. Увеличение G вело к росту амплитуды модуляции и к формированию последовательности нелинейных СВЧ-импульсов, в частности солитонов огибающей спиновых волн.

Прямые объемные спиновые волны характеризуются нелинейностью типа „притяжение“, что обуславливает формирование светлых солитонов огибающей [13]. Автогенерация периодической последовательности светлых солитонов наблюдалась при $G = 0.1$ дВ (рис. 1). Период следования солитонов составлял 143 ns, а их длительность была равна 49 ns. Солитонная природа импульсов подтверждалась постоянством фазы внутри импульса.

При $G = 0.175$ дВ каждая дополнительная гармоника становилась модуляционно неустойчивой и происходил параметрический распад каждой из них. В результате такого распада возникала периодическая модуляция амплитуды последовательности светлых солитонов. Экспериментальные результаты, полученные в этом режиме генерации, показаны на рис. 2. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления до значения 0.2 дВ приводило к возникновению в спектре сигнала

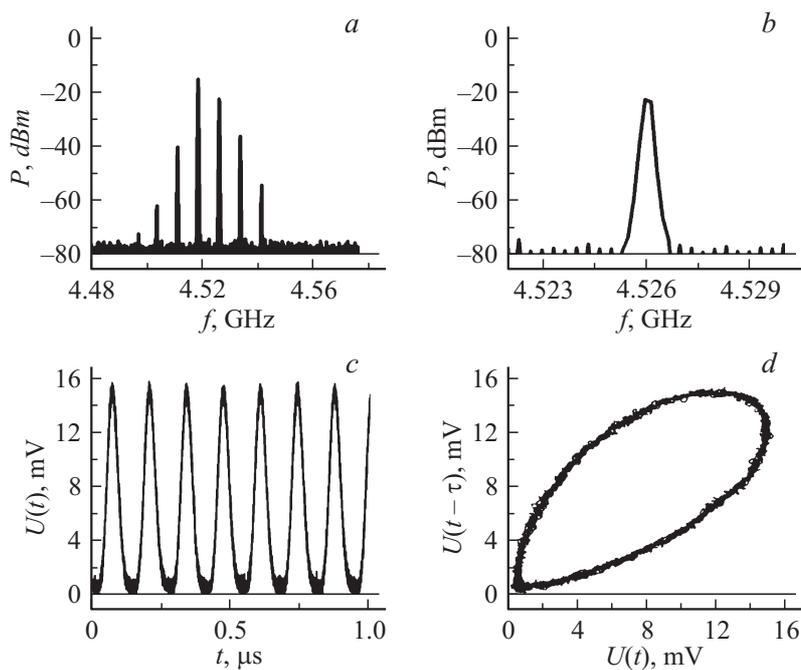


Рис. 1. Спектры (*a*, *b*), временная реализация (*c*) и фазовый портрет (*d*), полученные в режиме генерации периодической последовательности светлых солитонов.

сплошного частотного пьедестала и переходу кольца в режим генерации хаотического СВЧ-сигнала. Ширина спектра хаотического сигнала была около 250 MHz (рис. 3, *a*).

Анализ перехода от генерации монохроматического СВЧ-сигнала к динамическому хаосу проводился на основе фазовых портретов динамических режимов. Фазовые портреты были построены методом задержки по измеренным временным реализациям [14]. Фазовые портреты позволили численно оценить параметры возникающих в фазовом пространстве аттракторов. Анализ топологии аттракторов, а также исследование их особенностей были проведены путем расчета значений их фрактальных размерностей D_{fr} и значений старших показателей

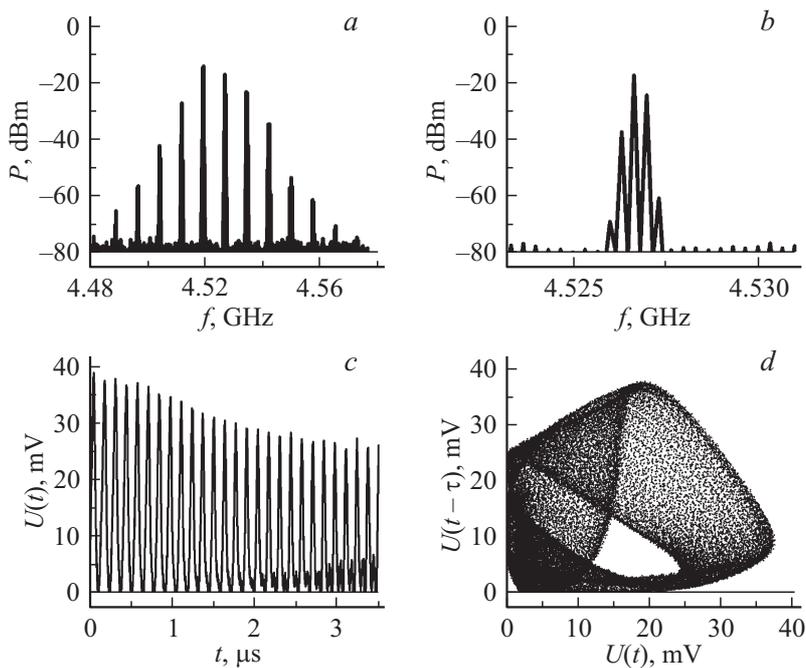


Рис. 2. Спектры (*a*, *b*), временная реализация (*c*) и фазовый портрет (*d*) для квазипериодического режима генерации.

Ляпунова Л. Расчет значений фрактальной размерности проводился с помощью метода Грассбергера–Прокаччия [15]. Для расчета значений старших показателей Ляпунова был использован алгоритм, описанный в работе [16].

На рис. 1, *d*, 2, *d* и 3, *b* показаны проекции фазовых портретов, соответствующих основным динамическим режимам, наблюдавшимся в экспериментах. Отметим, что масштаб фазового пространства увеличивался с увеличением коэффициента усиления кольца. При переходе в активный режим возникал регулярный аттрактор в форме устойчивой точки, притягивающей к себе все траектории фазового пространства. Увеличение коэффициента усиления кольца приводило к бифуркации Хопфа. Устойчивая точка становилась неустойчивой, и в фазовом

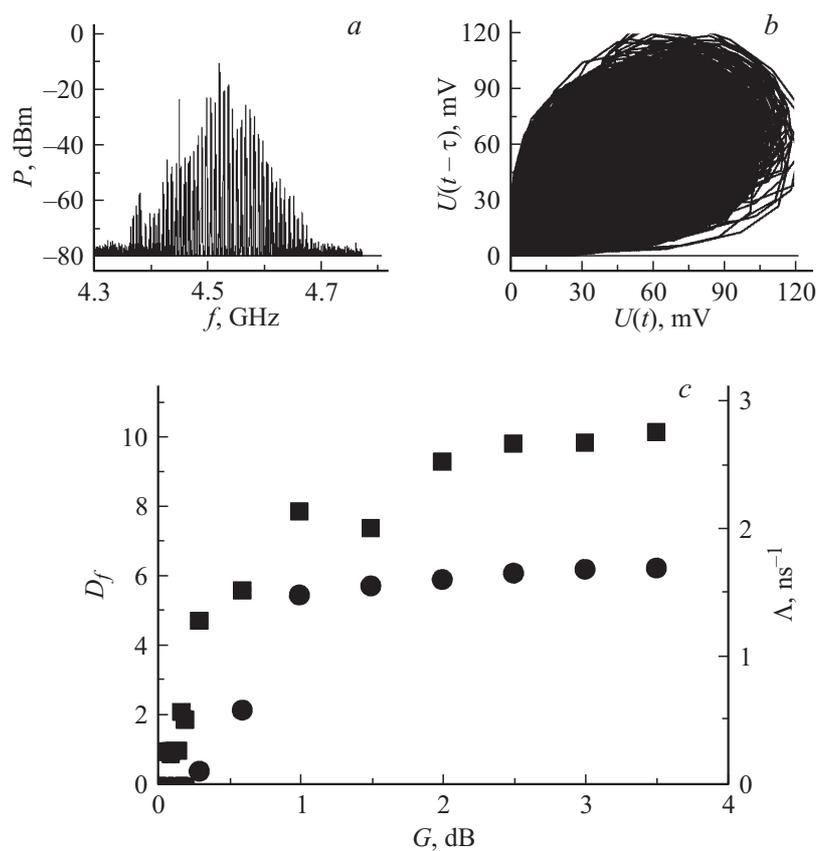


Рис. 3. Спектр (a) и фазовый портрет (b) в хаотическом режиме генерации и зависимости фрактальной размерности D_f (квадраты) и старшего ляпуновского показателя Λ (кружки) от коэффициента усиления G кольца (c).

пространстве возникал предельный цикл. В результате этой бифуркации фазовые траектории начинали вращаться по замкнутой линии вокруг области неустойчивого равновесия. Форма предельного цикла изменялась с увеличением G , вытягиваясь в сторону начала координат. Режиму генерации последовательности солитонов соответствовал предельный

цикл, проходящий вблизи начала координат (рис. 1, *d*). Дальнейшее увеличение коэффициента усиления кольца приводило к возникновению в фазовом пространстве аттракторов, имеющих более сложную топологию. Примеры таких аттракторов показаны на рис. 2, *d* и 3, *b*.

Топология аттракторов численно оценивалась значением фрактальной размерности. На рис. 3, *c* квадратами показаны значения фрактальной размерности аттракторов, полученные для различных коэффициентов усиления кольца. Из рисунка можно видеть, что значения фрактальной размерности устойчивой точки и предельного цикла соответствовали теоретически предсказываемым и равнялись соответственно 0 и 1. В результате последующей бифуркации фрактальная размерность аттрактора увеличивалась до 2. Такое значение подтверждало то, что в результате возникновения вторичной модуляционной неустойчивости в фазовом пространстве возник аттрактор, топологически эквивалентный двумерному тору. При $G > 0.2$ dB в фазовом пространстве возник странный аттрактор. Фрактальная размерность скачком принимала значение 2.1 и начала расти с увеличением G , выходя в насыщение при $G > 1.5$ dB. Таким образом, переход к динамическому хаосу в генераторе на основе нормально намагниченной пленки ЖИГ происходил в соответствии со сценарием Рюэля–Такенса.

На рис. 3, *c* кружками показана зависимость старшего ляпуновского показателя Λ от коэффициента усиления G кольца. Из рисунка можно видеть, что в интервале $0 < G < 0.05$ dB старший ляпуновский показатель был равен 0. Это указывало на отсутствие разбегания траекторий фазового пространства и свидетельствовало об устойчивости наблюдавшихся режимов генерации. При $G > 0.2$ dB старший ляпуновский показатель становился положительным, что характеризовало возникновение перемешиваемости траекторий фазового пространства и свидетельствовало о возникновении динамического хаоса.

Из проведенного исследования следует, что в кольцевых генераторах, изготовленных на основе нормально намагниченных пленок ЖИГ, переход к хаосу происходит в соответствии со сценарием Рюэля–Такенса. В процессе перехода к хаосу существуют стационарные состояния, соответствующие генерации периодической последовательности светлых солитонов огибающей спиновых волн, а также амплитудно-модулированной последовательности спин-волновых солитонов. Параметры аттракторов в режиме генерации хаоса контролируются коэффициентом усиления активного кольца.

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 14-12-01296), теоретическая часть работы выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты „Госзадание“ и 074-U01).

Список литературы

- [1] Chaotic Signals in Digital Communications / Ed. by Marcio Eisenkraft, Romis Attux, Ricardo Suyama. Boca Raton: CRC Press, 2013. 504 p.
- [2] Chaotic Signal Processing / Ed. by H. Leung. Philadelphia: SIAM, 2013. P. 189.
- [3] *Li W., Reidler I., Aviad Y.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 044 102.
- [4] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Румянцев Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 2. С. 1–9.
- [5] *Кузнецов А.П., Попова Е.С., Селезнев Е.П., Станкевич Н.В.* // Изв. вузов. ПНД. 2013. Т. 21. № 5. С. 31–39.
- [6] *Callan K.E., Illing L., Gao Z., Gauthier D.J., Schöll E.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 113 901.
- [7] *Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 116 603.
- [8] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. С. 869.
- [9] *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 89–98.
- [10] *Устинов А.Б., Кондрашов А.В., Никитин А.А., Черкасский М.А., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. В. 12. С. 941–945.
- [11] *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 5. С. 62–70.
- [12] *Wu M., Kalinikos B.A., Carr L.D., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 187 202.
- [13] *Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. В. 7. С. 343–347.
- [14] *Takens F.* // Lect. Notes Math. Warwick: Springer-Verlag, 1980. V. 598. P. 366.
- [15] *Grassberger P., Procaccia I.* // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 346.
- [16] *Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L.* et al. // Physica D. 1985. V. 16. N 3. P. 285–317.