

Генератор СВЧ динамического хаоса на основе нормально намагниченной ферромагнитной пленке.

Представлены результаты разработки и исследования управляемого генератора СВЧ динамического хаоса на основе нормально намагниченной пленки железоиттриевого граната. Показана возможность реализации режимов генерации монохроматического, периодического и хаотического сигналов. Численная оценка параметров СВЧ динамического хаоса показала возможность управления параметрами хаотического СВЧ сигнала с помощью коэффициента усиления кольца.

Ключевые слова: динамический хаос, нелинейные волновые явления, генератор СВЧ сигналов

В последние годы исследование нелинейных явлений, таких как солитоны, фракталы, а также динамический хаос и его свойства привлекает повышенный интерес исследователей. Это объясняется перспективой использования сложных сигналов в телекоммуникационных и радарных системах нового поколения [1]. Одно из многообещающих явлений - динамический хаос. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными сигналами: повышенной информационной емкостью, более высоким уровнем скрытности и др.

В недавних работах была подробно исследована автогенерация сложных периодических и непериодических СВЧ сигналов в кольцах на основе ферромагнитных пленок. В частности, в работе [2] наблюдалась генерация стационарных последовательностей темных и светлых солитонов огибающей спиновой волны в системах с различными параметрами. Помимо стационарных режимов автогенерации в активных кольцах было продемонстрировано возбуждение СВЧ динамического хаоса [3-6], а также переход в режим автогенерации хаотической последовательности солитонов [7]. Однако большинство статей посвящено исследованию нелинейной динамики в кольцах на основе касательно намагниченных пленок.

Целью настоящей работы было исследование возможности создания генератора СВЧ динамического хаоса на основе нормально намагниченной ферромагнитной пленки, а также исследование возможности регулировки параметров генерируемого СВЧ хаотического сигнала.

На рисунке 1 показана блок-схема экспериментальной установки. Активное кольцо состояло из нелинейного фазовращателя (1), широкополосного полупроводникового СВЧ

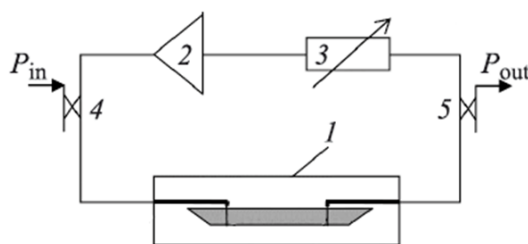


Рисунок 1. Блок-схема экспериментальной установки.

усилителя (2), переменного аттенюатора (3), и двух направленных ответвителей (4,5). Фазовращатель играл роль нелинейного частотоподающего элемента цепи. Усилитель служил для компенсации потерь, возникающих в фазовращателе и цепи обратной связи. Управление коэффициентом усиления кольца осуществлялось с помощью переменного аттенюатора. Направленный ответвитель (4) использовался для подветвления части мощности в кольцо для исследования характеристик в резонансном режиме. Часть мощности, циркулирующей в кольце, ответвлялась с помощью направленного ответвителя (5) и подавалась на вход анализатора спектра и через детекторный диод на вход широкополосного осциллографа.

Нелинейный фазовращатель был изготовлен на основе монокристаллической пленки железоиттриевого граната (ЖИГ). Толщина пленки ЖИГ составляла 8,8 мкм, а её намагниченность насыщения равнялась 1750 Гс. Пленка помещалась на микрополосковые антенны спиновых волн, выполненные в форме отрезков микрополосковых линий передачи. Антенны имели ширину 50 мкм, длину 2 мм и были короткозамкнуты на конце. Пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем напряженностью $H_0 = 3332$ Э. Поле было направлено по нормали к плоскости пленки. Такая ориентация поля позволяет возбуждать в пленке ЖИГ так называемые прямые объемные спиновые волны.

При некотором значении ослабления переменного аттенюатора потери в описанной кольцевой структуре будут полностью скомпенсированы СВЧ усилителем, при этом кольцо перейдет в режим автогенерации. Значение коэффициента усиления кольца, при котором происходит переход к автогенерации был принят $G = 0$ дБ. Таким образом, при $G < 0$ дБ кольцо находится в пассивном режиме и представляет собой кольцевой резонатор. При $G > 0$ дБ кольцо представляет собой генератор СВЧ колебаний.

Первый этап экспериментальных исследований был посвящен резонансному режиму. Активное кольцо, находясь в пассивном режиме, представляет собой кольцевой резонатор. Значения частот резонансных мод могут быть найдены из условия фазового синхронизма. Спиновые волны являются относительно медленными волнами, т.е. при сильном изменении волнового числа k частота меняется слабо. Благодаря этому активное кольцо обладает многочастотной резонансной характеристикой (см. рисунок 2). В области низких частот расстояние между собственными модами было порядка 7,5 МГц.

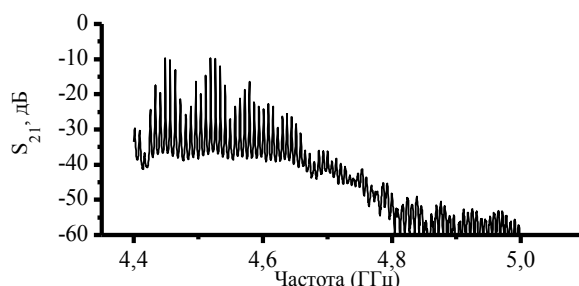


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика активного кольца в резонансном режиме.

На втором этапе экспериментальных исследований активное кольцо переводилось в режим автогенерации СВЧ сигнала. В ходе эксперимента измерялись спектральные характеристики и временные профили сигналов при различных значениях коэффициента усиления кольца. При полной компенсации потерь ($G = 0$ дБ) возникла автогенерация моды,

имевшей наименьшее ослабление. Спектр автогенерируемого представлял собой одну гармонику, с частотой 4,518 ГГц. Огибающая автогенерируемого сигнала представляла собой непрерывный сигнал постоянной амплитуды. Увеличение коэффициента усиления G приводило к возрастанию мощности СВЧ–сигнала, циркулировавшего в активном кольце, и в нем начинали развиваться нелинейные процессы взаимодействия спиновых волн. Так при $G = 0,025$ дБ за счет модуляционной неустойчивости несущих спиновых волн в кольце наблюдалась многочастотная автогенерация, что привело к амплитудной модуляции сигнала. При $G = 0,05$ дБ (рисунок 3(а)) спектр генерируемых частот обогащался за счет

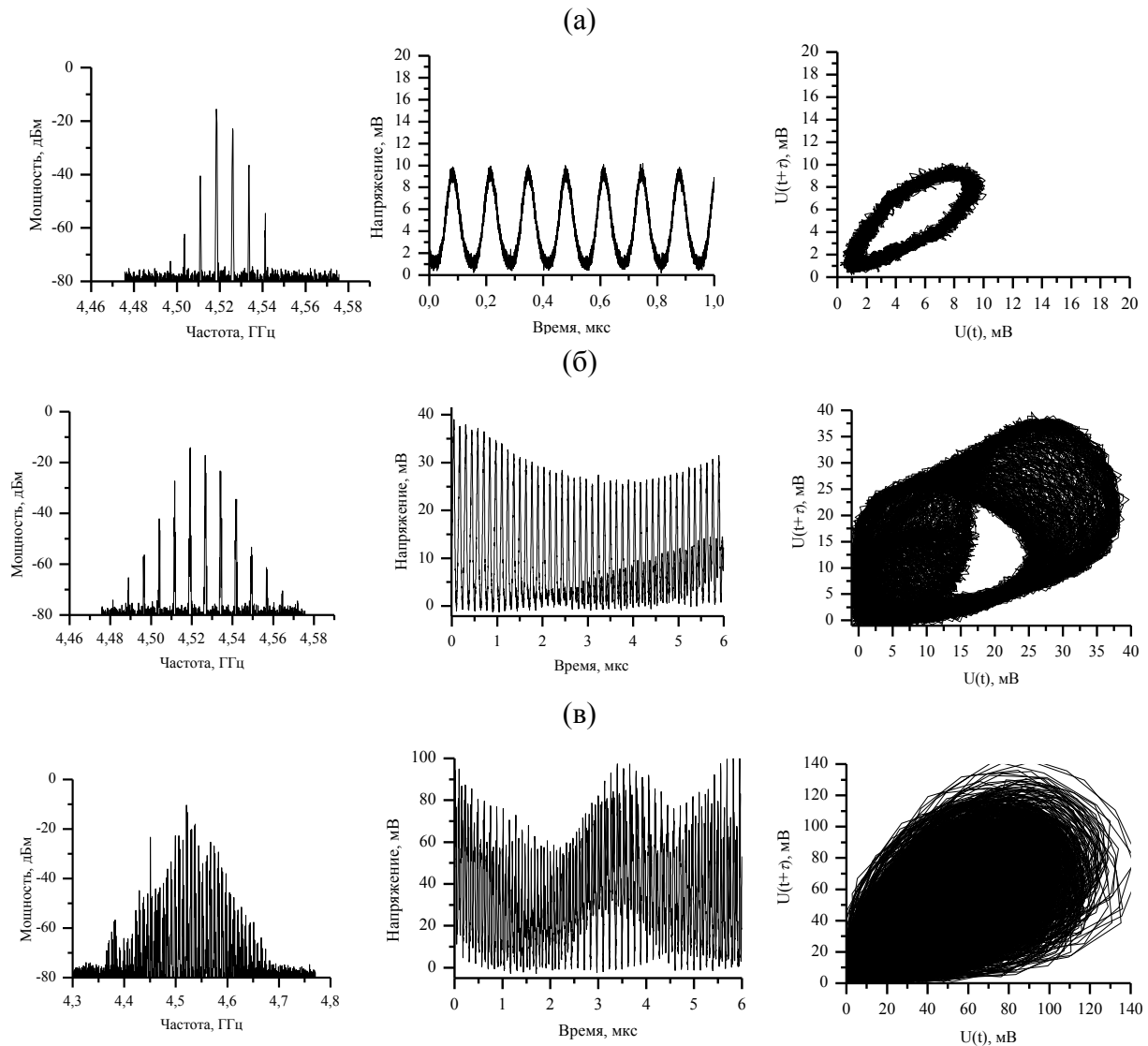


Рисунок 3. Спектральные характеристики (слева), временные реализации (в центре) сигналов автогенерируемых активным кольцом при а) $G = 0,05$ дБ, б) $G = 0,175$ дБ, в) $G = 0,6$ дБ.

четырёхволновых процессов взаимодействия спиновых волн. При этом во временной области наблюдалась генерация стационарной последовательности нелинейных импульсов – солитонов огибающей. Период следования солитонов равнялся 143 нс, а длительность

импульсов – 49 нс. При $G = 0,175$ дБ генерация солитонов разрушалась и наблюдалась генерация последовательности нелинейных импульсов несолитонной формы (рисунок 3(б)). Дальнейшее увеличение коэффициента усиления ($G = 0,2$ дБ) приводило к возникновению в спектре сигнала сплошного частотного пьедестала и переходу кольца в режим генерации хаотического СВЧ-сигнала (рисунок 3(в)). При переходе от регулярной динамики к хаотической, наблюдались характерные особенности, сценария Рюэля–Такенса. В результате в фазовом пространстве возникал странный аттрактор, который характеризуется неустойчивостью принадлежащей ему фазовой траектории.

Для подробного описания динамики системы, а также для численного определения параметров автогенерируемого сигнала, используя экспериментально полученные временных реализаций, были построены фазовые портреты для всех режимов генерации кольца (см. рисунок 3 правую колонку). Для реконструкции фазовых портретов был использован метод задержки [8]. В случае монохроматической генерации, фазовый портрет представляет собой регулярный аттрактор – устойчивую точку. В результате первой бифуркации устойчивая точка сменяется предельным циклом при $G = 0,05$ дБ (рисунок 3(а)). Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к еще одной бифуркации при $G = 0,175$ дБ (рисунок 3(б)). Фазовый портрет, показанный на рисунке 3(в) ($G = 0,6$ дБ), соответствует режиму генерации хаотического. Он охватывает весь диапазон колебаний намагниченности и имеет стохастический вид.

По полученным фазовым портретам была проведена оценка значения фрактальной размерности. Для этого был использован алгоритм Грассбергера-Пракача [9]. Значение фрактальной размерности определяет форму аттрактора и, как следствие, характеризует сложность автогенерируемого сигнала. Фрактальная размерность регулярных сигналов, таких как монохроматический, периодический и др. имеет целочисленное значение. Хаотический сигнал характеризуется дробным значением фрактальной размерности. Фрактальная размерность белого шума стремится к бесконечности.

В настоящей работе фрактальная размерность была рассчитана для всех наблюдавшихся режимов генерации. На рисунке 4 показан график изменения значения фрактальной

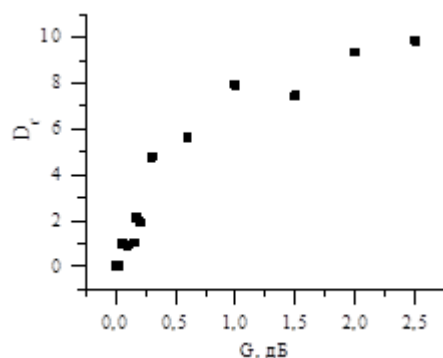


Рисунок 4. Зависимость фрактальной размерности от коэффициента усиления кольца

размерности с увеличением коэффициента усиления кольца. Фрактальная размерность, соответствующая режиму генерации монохроматического сигнала, равнялась 0. При

генерации солитонов фрактальная размерность была равна 1. При генерации последовательности нелинейных импульсов несолитонной формы фрактальная размерность равнялась 2, что говорит о возникновении в результате бифуркации в фазовом пространстве аттрактора в форме двумерного тора и подтверждает предположение о сценарии перехода к хаосу. В режиме генерации спин-волнового СВЧ динамического хаоса, фрактальная размерность возрастала от 2,1 при $G = 0,2$ дБ, до 9,9 при $G = 2,5$ дБ. Следует отметить, что значение фрактальной размерности выходило на постоянный уровень, что говорит о насыщении нелинейности спиновых волн.

Таким образом, в данной работе был разработан и экспериментально исследован управляемый СВЧ генератор, позволяющий переключаться между различными режимами автогенерации, а также реализует возможность контроля параметров хаотического СВЧ сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 14-02-31638 мол_а.

Библиографический список

1. А.С. Дмитриев, А.И. Панас, Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / М.:Издательство Физико-математической литературы, 2002.-252с.
2. A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, V.E. Demidov, S.O. Demokritov "Generation of dense spin-wave soliton trains in active ring resonators," Phys. Rev. B, vol. 80, pp. 052405, 2009
3. A. Hagerstrom, M. Wu, R. Eykholt, B. Kalinikos " Tuning of chaotic surface spin waves in a magnetic-film feedback ring via the ring gain," Phys. Rev. B, vol. 83, pp. 104402, 2011
4. А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос “Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн,” Письма в журнал технической физики. – 2010. - Т.36, №5. - С. 62-70
5. Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский “Влияние амплитудной и фазовой нелинейности спин-волновой линии задержки на генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала” [текст] / // Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 7, С65-74
6. Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский, “Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками,” Письма в ЖТФ, 2008, том 88, вып. 10, С 734-747
7. Z. Wang, A. Hagerstrom, J. Anderson, et. al, “Chaotic Spin-Wave Solitons in Magnetic Film Feedback Rings,” Phys. Rev. Lett., 2011, vol. 107, P. 114102, 2011.
8. F. Takens, Lecture Notes in Mathematics 898, 366 (1981).
9. P. Grassberger and I. Procaccia, Phys. Rev. Lett. 50, 346 (1983).