

Генератор СВЧ широкополосного динамического хаоса на основе металлизированной пленки железо-иттриевого граната

Представлены результаты исследования широкополосной сверхвысокочастотной (СВЧ) автогенерации в "активном кольце", нелинейным элементом которого является металлизированная ферромагнитная пленка. Использование металлизированной пленки позволило получить автогенерацию СВЧ сигналов с полосой более 1 ГГц. При переходе от стационарного к хаотическому режиму наблюдалась автогенерация коротких солитонных импульсов с длительностями порядка единиц наносекунд. Управление режимами автогенерации осуществлялось с помощью изменения коэффициента усиления кольца. Было исследовано влияние напряженности магнитного поля смещения на динамические режимы кольца.

Ключевые слова: динамический хаос, солитоны, ферромагнитные пленки

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: повышенную информационную емкость, более высокий уровень 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 динамического хаоса [3,4,5,6], а также переход в режим автогенерации хаотической последовательности солитонов [7]. Существует много работ, в которых нелинейная динамика спин-системы обусловлена одновременным развитием как трех-, так и четырехволновых параметрических процессов взаимодействия спиновых волн, что позволяет достигать ширины спектра генерируемого сигнала до 1 ГГц. Однако такой нелинейный режим ограничен по частоте сверху. На сравнительно высоких частотах нелинейная динамика определяется только четырехволновым параметрическим взаимодействием спиновых волн. При таких условиях ширина спектра хаотических сигналов была ограничена несколькими сотнями мегагерц. В настоящей работе исследовалось "активное кольцо" на основе металлизированной ферромагнитной пленки. Это позволило наблюдать автогенерацию СВЧ хаотического сигнала с шириной спектра 1.5 ГГц в условиях, когда в пленке разрешены только четырехволновые процессы взаимодействия спиновых волн.

На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной установки. Активное кольцо состояло из широкополосного полупроводникового СВЧ усилителя, переменного аттенюатора, направленного ответвителя и нелинейного фазовращателя. Фазовращатель

играл роль нелинейного частотозадающего элемента цепи. Усилитель служил для компенсации потерь возникающих в фазовращателе и цепи обратной связи. Управление коэффициентом усиления кольца осуществлялось с помощью переменного аттенюатора. Часть мощности, циркулирующей в кольце отводилась с помощью направленного ответвителя и подавалась на вход анализатора спектра и через детекторный диод на вход широкополосного осциллографа.

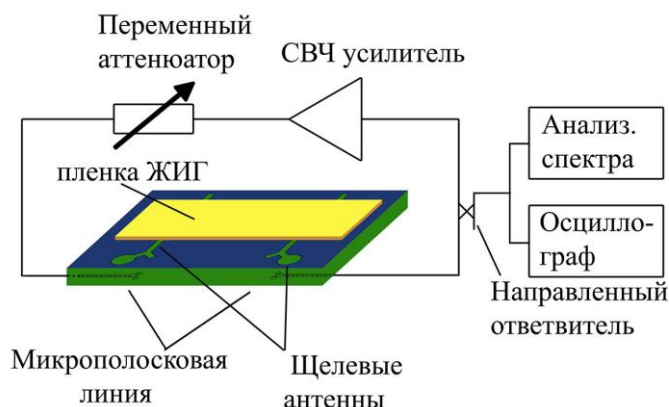


Рисунок 1 - Блок-схема экспериментальной установки

Нелинейный фазовращатель был сконструирован на основе пленки ЖИГ толщиной 65 мкм, выращенной на подложке галлий гадолиниевого граната толщиной 500 мкм. Длина пленки была 40 мм, ширина - 2 мм. Намагниченность насыщения $M_s = 1750$ Гс. Для возбуждения и приема спиновых волн использовались щелевые антенны шириной $50\mu\text{m}$ и длиной 8 мм. Расстояние между антеннами d составляло 10 мм. Подвод СВЧ-мощности к антеннам, а также ее отвод осуществлялись микрополосковыми линиями с волновым сопротивлением 50 Ом. Для получения хорошей электродинамической связи между микрополосковой линией и щелевой антенной была разработана оригинальная конструкция микрополосково-щелевого перехода. Щелевые антенны были сформированы на верхней стороне поликоровой подложки, а подводящие микрополосковые линии — на нижней. Пленка ЖИГ накладывалась непосредственно на щелевые антенны. При этом ее поверхность оказывалась соприкасающейся с металлом. Макет линии задержки помещался между полюсами электромагнита в однородное магнитное поле H , направленное в плоскости пленки параллельно антеннам и перпендикулярно направлению распространения СВ таким образом, чтобы выполнялись условия для распространения поверхностных спиновых волн. Экспериментальные исследования проводились для нескольких значений поля подмагничивания.

Экспериментальное исследование было выполнено в два этапа. На первом этапе были измерены передаточные характеристики фазовращателя и резонансные характеристики активного кольца для различных значений поля подмагничивания. Результаты первого этапа продемонстрировали, что в исследуемых системах возбуждение спиновых волн происходит в диапазоне 1.5-1.8 ГГц. Подобный эффект обуславливается более высокой групповой

скоростью спиновых волн распространяющихся в металлизированной ферромагнитной пленке по сравнению со свободной пленкой. Подробное исследование характеристик используемых фазовращателей было проведено в работе [8] В резонансном режиме потери в спин-волновом фазоврателе и цепи обратной связи превышают усиление СВЧ усилителя. Положение собственных мод кольца определялось из условий фазового синхронизма:

$$\varphi_{св} + \varphi_{об} = 2\pi n,$$

где $\varphi_{св}$ - фазовый набег вносимый спин-волновым фазовращателем $\varphi_{об}$ - фазовый набег в цепи обратной связи, n - целое число.

На втором этапе экспериментально исследовалось активное кольцо в режиме автогенерации. Постепенное увеличение коэффициента усиления кольца G приводило к тому, что при некотором его значении происходила полная компенсация потерь СВЧ сигнала, и в кольце возникала автогенерация монохроматического СВЧ сигнала. Следуя работе [4] такое значение коэффициента усиления было принято равным нулю. Частота автогенерируемого сигнала соответствовала частоте моды кольца с наименьшим ослаблением. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводило к возникновению нелинейного параметрического взаимодействия спиновых волн в пленке, и переходу кольца сначала в режим автогенерации периодического солитонного СВЧ сигнала, а далее хаотического СВЧ сигнала. В периодическом режиме была получена автогенерация стационарной периодической последовательности нелинейных импульсов - солитонов огибающей. В отличие от предыдущих работ посвященных активным кольцам на поверхностных спиновых волнах мы наблюдали не только формирование темных, но и светлых солитонов. Дальнейший переход к динамическому хаосу происходил в соответствии со сценарием Рюэля-Такенса. На рис.2 показаны спектры сигналов в форме динамического хаоса, соответствующие трем значениям поля подмагничивания. Из рисунка можно видеть, что спектры хаотического сигнала представляют из набора уширенных гармоник. Общая полоса автогенерируемого хаотического сигнала составляла 1 - 1.5 ГГц, ширина сплошных частей была равна примерно 5 МГц.

Для численного описания динамики системы и определения возможности управления параметрами автогенерируемых кольцом СВЧ сигналов по временным реализациям были восстановлены фазовые портреты различных динамических режимов. Для реконструкции

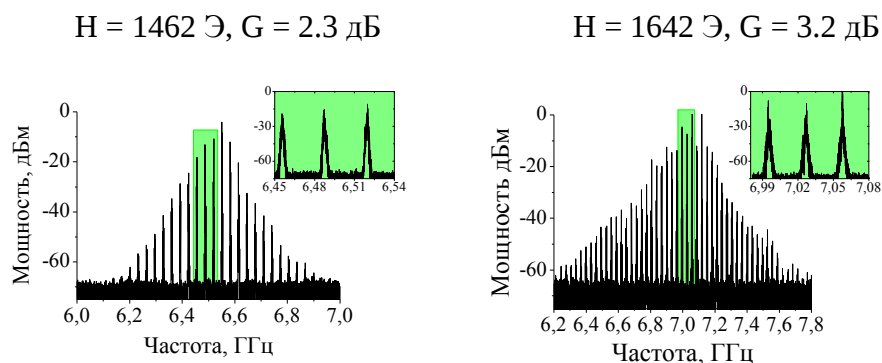


Рисунок 2 - Спектральные характеристики спин-волнового динамического хаоса

аттракторов, определяющих динамику системы, был использован метод задержки. В результате было показано, что режиму автогенерации монохроматического сигнала соответствовал аттрактор в форме устойчивой точки. При переходе к автогенерации периодического сигнала в фазовом пространстве разрушалась устойчивая точка, и возникал предельный цикл. Режиму автогенерации динамического хаоса соответствовал так называемый странный аттрактор. По полученным аттракторам были рассчитаны параметры хаотического сигнала - фрактальная размерность и минимальная размерность вложения. Для расчета был использован алгоритм Грассбергера-Прокачиа [9]. На рис. 3 показаны зависимости фрактальной размерности от коэффициента усиления кольца для различных значений напряженности магнитного поля смещения. Как известно, значение фрактальной размерности характеризует сложность аттрактора. Из зависимости можно видеть, что с увеличением коэффициента усиления происходит рост фрактальной размерности. Сначала фрактальная размерность для всех значений полей последовательно принимала значения 0, 1, 2, что соответствовало возникновению устойчивой точки, предельного цикла и двумерного тора. В режиме автогенерации динамического хаоса при увеличении коэффициента усиления фрактальная размерность возрастала до насыщения. Значения уровня насыщения зависело от напряженности поля подмагничивания. Максимум фрактальной размерности наблюдался при $H = 1462$ Э. Таким образом изменяя магнитное поле можно управлять параметрами автогенерируемого сигнала.

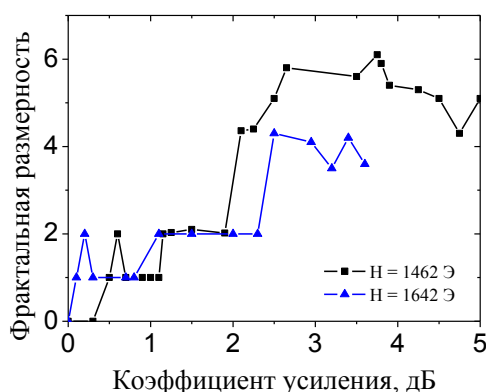


Рисунок 3 - Зависимость фрактальной размерности от коэффициента усиления кольца

Библиографический список

1. Дмитриев, А.С. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас - 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. Eyrholt, 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. Кондрашов, А.В. Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн [текст] / А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос // Письма в журнал технической физики. – 2010. - Т.36, №5. - С. 62-70
5. Бегинин, Е.Н. Влияние амплитудной и фазовой нелинейности спин-волновой линии задержки на генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала [текст] / Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский // Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 7, С65-74

6. Бегинин, Е.Н. Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками [текст] / Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский // Письма в ЖТФ, 2008, том 88, вып. 10, С 734-747
7. Wang, Z. Chaotic Spin-Wave Solitons in Magnetic Film Feedback Rings [текст] / Z. Wang, A. Hagerstrom, J. Anderson, W. Tong, M. Wu, L. Carr, R. Eykholt, and B. Kalinikos // Phys. Rev. Lett., 2011, vol. 107, P. 114102, 2011
8. Етко, Ю.Л. Широкополосные спин-волновые линии задержки со щелевыми антеннами [текст] / Ю.Л.Етко, А.Б.Устинов // Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып. 21, С. 55-62.
9. Grassberger P., Characterization of Strange Attractors[текст] / P. Grassberger I. Procaccia // Phys. Rev. Lett. - 1983. - Vol. 50. - P. 346-349