

Генератор хаотического СВЧ сигнала на основе ферромагнитной пленки в условиях трехмагنونных процессов распада

В работе приведены результаты экспериментального исследования кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной пленки в случае, когда разрешены трехмагنونные процессы распада. Для данной системы построена модель, на основе которой рассчитаны характерные режимы генерации, включая генерацию хаотической последовательности СВЧ импульсов. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ферромагнитная структура, автоколебательная система, хаос, трёхмагنونные процессы

В последние годы интенсивно проводятся исследования, направленные на создание кольцевых автоколебательных систем с положительной обратной связью, демонстрирующих хаотическое поведение в диапазоне сверхвысоких частот [1]. Особый интерес вызывают автоколебательные системы, основанные на пассивных нелинейных элементах на основе объемных или тонкопленочных ферромагнетиков [2-6]. Нелинейные свойства таких элементов обусловлены тем, что при достаточно высоких уровнях мощности сигнала в ферромагнетиках происходит параметрическое возбуждение коротковолновых обменных спиновых волн (СВ), приводящее к нелинейным потерям и к стохастической автомодуляции генерируемого сигнала [2-6].

Несмотря на то, что экспериментальные результаты для кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной структуры в условиях, когда разрешены процессы трехмагنونного распада, достаточно хорошо известны, приемлемая теоретическая модель, демонстрирующая характерные для эксперимента бифуркационные режимы в такой системе, до настоящего времени отсутствует.

Модель для описания трехволнового взаимодействия в средах различной природы была впервые рассмотрена в [7]. В [6] на основе этой модели был описан механизм стохастизации СВ в условиях трехмагنونных процессов распада в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки. Однако модель в [6] не учитывает некоторые особенности исследуемой системы, такие как нелинейность усилителя, время задержки в кольце, что не позволяет описать все режимы генерации, наблюдаемые в эксперименте. Также следует отметить, что переход от периодической к хаотической модуляции наблюдался в [6] при достаточно больших расстройках δ между частотами СВ и половинной частотой магнитостатической волны (МСВ) ($\delta \sim 8$ МГц). Подобные значения отстройки слишком велики и не наблюдаются в эксперименте [8].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование различных режимов генерации кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной пленки в диапазоне сверхвысоких частот в широком диапазоне изменения параметра усиления системы и построение модели, демонстрирующей все характерные для рассматриваемой системы бифуркационные режимы, в условиях, когда разрешены трехмагنونные параметрические процессы в плёнке.

Экспериментальный макет (см. рис. 1) исследуемой автоколебательной системы представлял собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ усилитель мощности 1 на GaAs полевых транзисторах, переменный аттенюатор 3 и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию задержки на поверхностных магнитоэлектрических волнах (ПМСВ) 4. Сигнал, генерируемый системой, снимался через направленный ответвитель 2. Параметры кольцевой системы подбирались таким образом, чтобы генерация сигнала на одной из собственных мод кольца осуществлялась в области частот меньших, чем 3 ГГц, где параметрические процессы распада для ПМСВ разрешены [8].

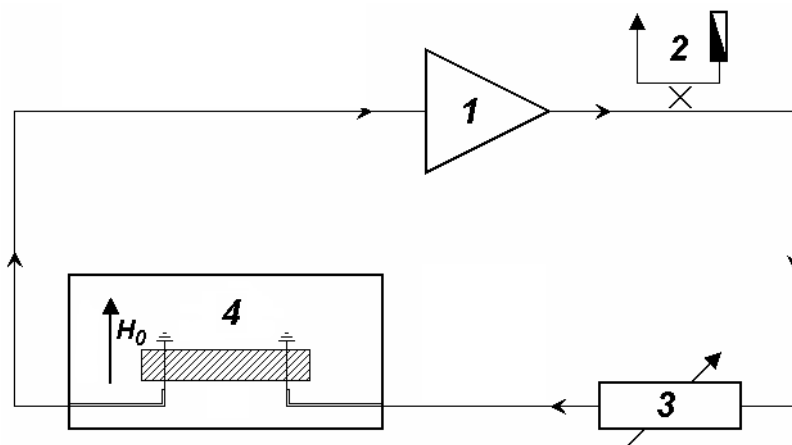


Рис. 1.

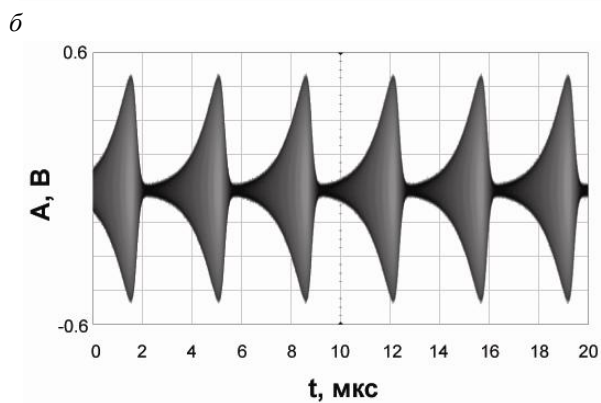
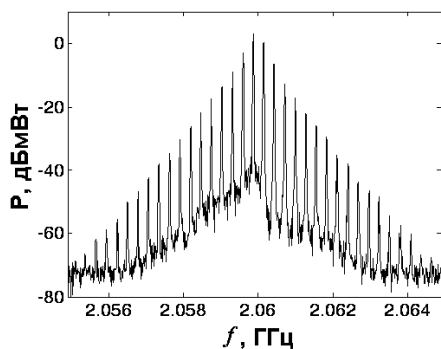
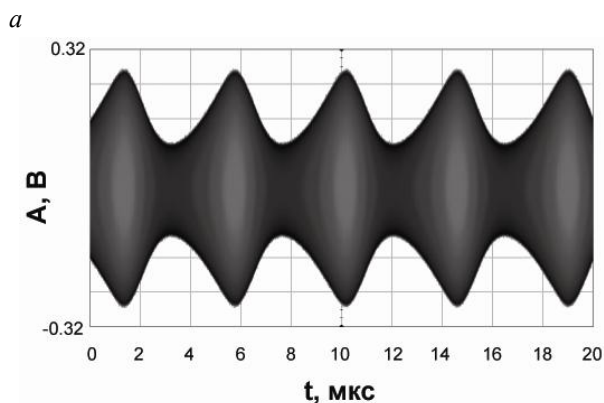
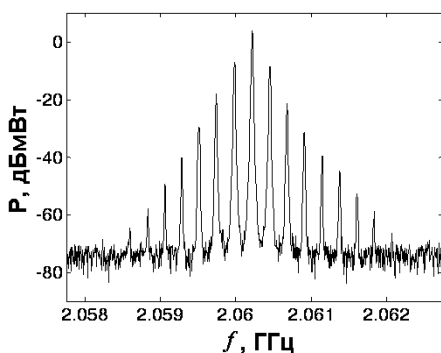
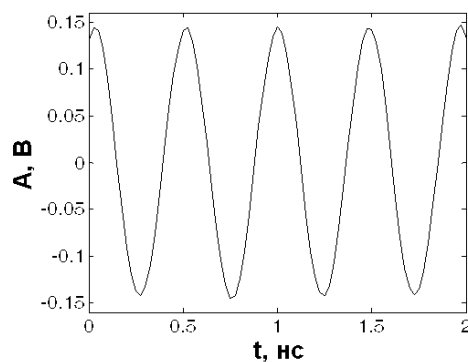
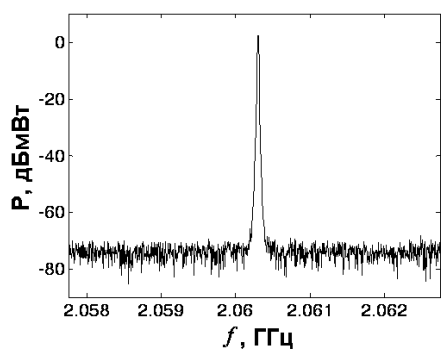
На рис. 2 приведены спектры мощности и временные реализации мгновенных значений СВЧ сигнала, генерируемого на частоте основной моды $f_0 = 2060.3$ МГц. Представленные результаты получены при различных значениях коэффициента усиления кольцевой системы $G = K - D$ (K - коэффициент усиления усилителя 1, D - величина ослабления в кольце), величина которого регулировалась переменным аттенюатором 3.

В случае, когда коэффициент усиления кольцевой системы $G = 0$ (см. рис. 2а), в системе генерируется гармонический СВЧ сигнал. При $G = 0.2$ дБ (рис. 2б) режим одночастотной генерации сменяется режимом амплитудной автомодуляции сигнала, возникновение которого обусловлено параметрическим возбуждением поверхностной МСВ коротковолновых спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты ПМСВ, и обратным влиянием спиновых волн на ПМСВ [5]. При этом расстояние между частотными составляющими в спектре мощности сигнала и период следования максимумов на огибающей СВЧ сигнала во временной области определяется частотой автомодуляции, которая равна отстройке δ частоты параметрически возбужденной спиновой волны от половинного значения частоты сигнала накачки и составляет величину ~ 235 кГц [7].

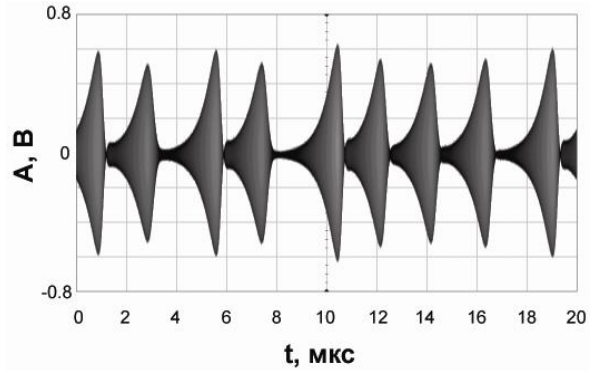
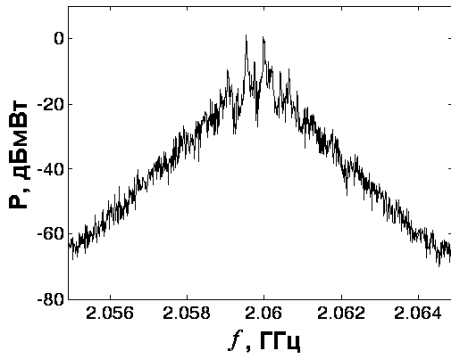
При $G = 0.5$ дБ (рис. 2в) на осциллограмме СВЧ сигнала формируются последовательности цугов с медленно нарастающей и быстро спадающей амплитудой (релаксационные колебания). Возникновение релаксационных колебаний связано с тем, что рост амплитуды сигнала является экспоненциальным за счет наличия активного элемента в кольце. Ограничение экспоненциального роста связано с тем, что

нелинейные потери ПМСВ начинают превышать усиление в кольце и происходит резкий спад амплитуды сигнала.

При $G = 0.7$ дБ (рис. 2г) спектр сигнала вблизи частоты f_0 практически полностью «зашумляется», образуя сплошной спектр с выделенными частотами, соответствующими сетке частот, рожденной в результате автомодуляции спиновыми волнами ПМСВ. В этом случае наблюдается разрушение фазовой синхронизации между спектральными компонентами, что приводит к случайному изменению величины периода на временной реализации амплитуды сигнала.



б



2
Рис. 2.

Для теоретического описания приведённых выше экспериментальных результатов рассмотрим распространение магнитостатической волны в плоском слое ферромагнетика. Постоянное магнитное поле \vec{H}_0 приложено касательно к пленке перпендикулярно распространению волны, при этом в пленке распространяется поверхностная магнитостатическая волна. При распространении МСВ с частотой ω_0 в ферромагнитной среде могут возбуждаться тепловые спиновые волны на частотах ω_1 и ω_2 , с волновыми векторами \vec{k}_1 и \vec{k}_2 , если выполняются следующие условия для параметрических процессов 1-го порядка [9]:

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2, \quad \vec{k}_0 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 \quad (1)$$

На основе уравнений для движения вектора намагниченности можно получить с учётом соотношений (1) систему уравнений для медленно меняющихся амплитуд спиновых волн $b_1(t), b_2(t)$ и ПМСВ $m(t)$, описывающей взаимодействие ПМСВ с параметрически возбужденными СВ [6,10], и которую для рассматриваемой кольцевой автоколебательной системы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= -c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \alpha m(t) + \sigma [1 - f(m(t-\tau))] m(t-\tau) \\ \frac{db_1(t)}{dt} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t) \\ \frac{db_2(t)}{dt} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

где δ - отстройка частоты обменных СВ от половинной частоты МСВ ($\delta = \frac{\omega}{2} - \omega_1$); ν - коэффициент затухания спиновых волн; σ - линейный коэффициент усиления; τ - задержка в цепи обратной связи; f - функция, характеризующая нелинейность усилителя; α - коэффициент линейного затухания магнитостатической волны.

В отличие от [6] слагаемое $\sigma [1 - f(m(t-\tau))] m(t-\tau)$ в первом уравнении системы (2) учитывает усиление сигнала в цепи обратной связи и суммарное время запаздывания в кольце τ . Причем σ определяет линейное усиление, а функция $f(m(t-\tau))$ нелинейное усиление. Нелинейная зависимость усиления численно выбиралась таким образом, чтобы обеспечить соответствие между

экспериментальными значениями частот автомодуляции и частотами, полученными при численном моделировании.

Ниже приведены результаты численного решения системы (2). Коэффициенты рассчитывались согласно приведенным формулам и принимались равными $\delta = 0.2$ МГц, $\nu = 7$ МГц, $\alpha = 7$ МГц, $\tau = 95$ нс, $c_0 = 1232$ МГц, $c_1 = c_2 = 846$ МГц. На рис. 3 приведены временные зависимости модуля комплексной амплитуды сигнала $|m|$ при различных значениях коэффициента усиления G_m в кольце, который задавался как $G_m = (\sigma - \alpha) / \varepsilon$, где ε - нормировочный коэффициент, равный 1 МГц. При значении коэффициента усиления $G_m = 0$ в системе устанавливается стационарный режим (Рис.3а), соответствующий $|m| = const$, что аналогично одночастотному режиму, наблюдаемому экспериментально (см. Рис. 2а). При этом амплитуда ПМСВ ниже порогового значения для параметрических процессов первого порядка. При увеличении коэффициента усиления до некоторого значения $G_m = 0.55$ в системе наблюдается квазигармоническая автомодуляция (Рис. 3б). При дальнейшем увеличении G_m ($G_m = 0.85$) период автомодуляции уменьшается, а форма сигнала начинает напоминать релаксационные колебания (Рис. 3в). При больших значениях коэффициента усиления (см. Рис. 3г) в системе наблюдается стохастическая автомодуляция, которая аналогична хаотической последовательности импульсов, наблюдаемых в эксперименте (см. Рис. 2 г).

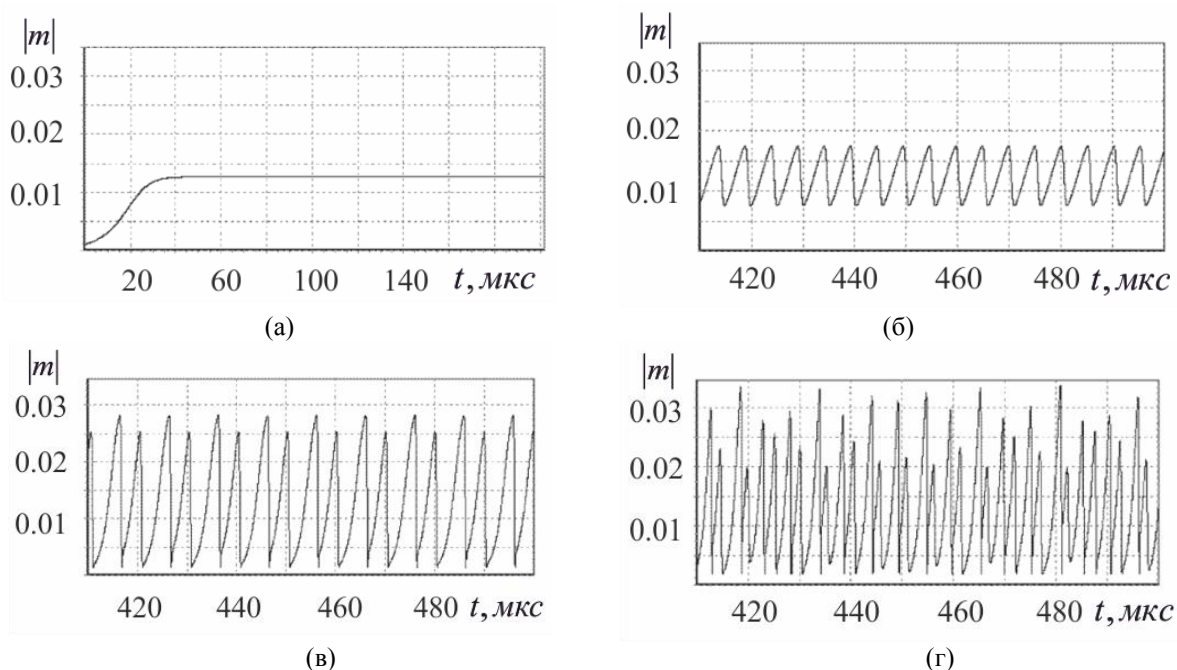


Рис. 3.

Заключение

В работе приведены результаты экспериментального исследования различных режимов генерации сигнала в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки в случае, когда разрешены трехмагنونные процессы распада. Построена теоретическая модель, позволяющая описать все режимы, характерные для исследуемой кольцевой системы при типичных значениях управляющих параметров.

Результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.г.» (ГК № 14.740.11.1078).

Библиографический список

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит. – 2002.
2. Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А., Benner H/ Автогенерация хаотического СВЧ сигнала в активных колцах на основе ферромагнитных пленок// Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 11. С. 81-87.
3. Mingzhong W., Kalinikos B.A., Patton C.E. Self-generation of chaotic solitary spin wave pulses in magnetic film active feedback rings// Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95, 237202.
4. Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П. Генерация широкополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитостатических волнах// ЖТФ. 2008. Т. 78. № 5. С.89-98.
5. Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А. Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн// Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 5. С. 62-70.
6. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн. ЖТФ. 1999. Т. 69, № 8. С. 100.
7. Вышкинд С.Я., Рабинович М.И. Механизм стохастизации фаз и структура волновой турбулентности в диссипативных средах. ЖЭТФ. 1976- Т. 71, № 2(8). С. 557.
8. Гришин С.В., Шараевский Ю.П. Излучение шумоподобных спин-волновых пакетов при трехмагнанных процессах распада и кинетической неустойчивости волн в ферромагнитной пленке. Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89, № 2. С. 59.
9. Темиряев А.Г., Тихомирова М.П. Трехмагнанный распад обменной спиновой волны. Письма в ЖЭТФ. 1995. Т.61, Вып. 11. С. 910.
10. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит - 1994.