



ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЧ-ИМПУЛЬСОВ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЁНКОЙ

Д.В. Романенко

В работе приведены результаты экспериментального исследования кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной структуры 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, трехмагنونные процессы.

Введение

В последние годы интенсивно проводятся исследования, направленные на создание кольцевых автоколебательных систем с положительной обратной связью, демонстрирующих хаотическое поведение в диапазоне сверхвысоких частот [1–2]. Особый интерес вызывают автоколебательные системы, в которых генерация сигнала со сплошным спектром возникает в случае использования в цепи обратной связи пассивных нелинейных элементов на основе объемных или тонкопленочных ферромагнетиков [3–6]. Нелинейные свойства таких элементов обусловлены тем, что при достаточно высоких уровнях мощности сигнала в ферромагнетиках происходит параметрическое возбуждение коротковолновых обменных спиновых волн, приводящее к нелинейным потерям и к стохастической автомодуляции генерируемого сигнала [3–6].

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

Модель для описания трехволнового взаимодействия в средах различной природы была впервые рассмотрена в [7]. В частности, было показано, что в подобной системе возможно наблюдение стохастических релаксационных колебаний. Позднее на основе данной модели была построена модель параметрической кольцевой системы на ферромагнитной пленке [6]. Однако в этой модели не учитываются некоторые особенности исследуемой системы, в частности, нелинейность усилителя, время задержки в кольце. Это приводит к тому, что некоторые режимы генерации, характерные для эксперимента, не наблюдаются. Также следует отметить, что переход от периодической к хаотической модуляции наблюдался в [6] при достаточно больших расстройках $\delta \sim 8$ МГц между половинной частотой возбуждающейся в пленке магнитоэлектрической волны (МСВ) и частотами спиновых волн. Подобные значения отстройки слишком велики и не наблюдаются в эксперименте [8].

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

1. Результаты экспериментального исследования кольцевой автоколебательной системы с ферромагнитной пленкой

Экспериментальный макет (рис. 1) исследуемой автоколебательной системы представляет собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ-усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах, переменный аттенуатор и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию задержки на поверхностных магнитоэлектрических волнах (ПМСВ). Параметры кольцевой системы подобраны 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 [9].

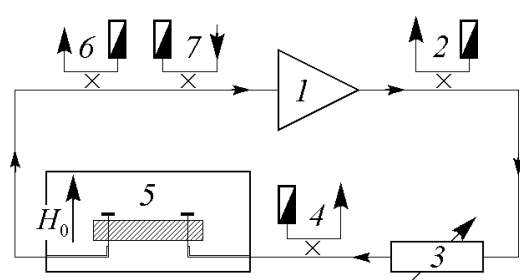


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – транзисторный усилитель мощности; 2 – направленный ответвитель для подключения анализатора спектра или нагрузки; 3 – переменный аттенуатор; 4, 6 – направленные ответвители для подключения измерителя мощности; 5 – нелинейная линия задержки на ПМСВ; 7 – направленный ответвитель для ввода в кольцо внешнего сигнала

На рис. 2 приведены спектры мощности и временные реализации мгновенных значений СВЧ-сигнала, генерируемого на частоте $f_0 = 2060.3$ МГц, на которой в предгенерационном режиме в системе наблюдалось максимальное значение коэффициента передачи. Представленные результаты получены при различных значениях коэффициента усиления кольцевой системы $G = K - A$ (K – коэффициент усиления усилителя 1, A – величина ослабления в кольце), величина которого регулировалась переменным аттенуатором 3, расположенным на входе линии передачи на ПМСВ.

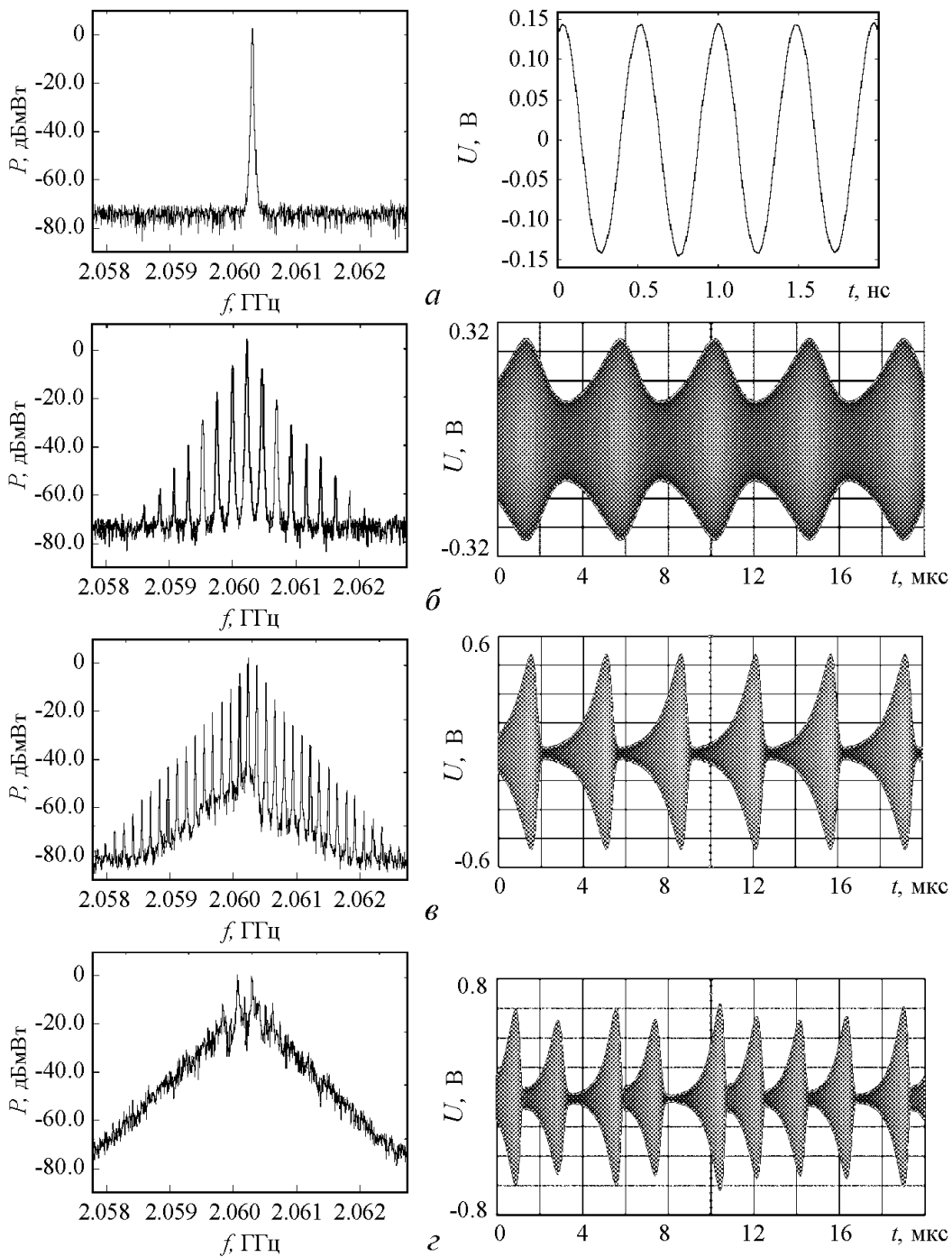


Рис. 2. Спектры мощности (левая колонка), временные реализации (правая колонка) СВЧ-сигнала, генерируемого на одной кольцевой моде при различных значениях G : 0 (а); 0.2 дБ (б); 0.5 дБ (в); 0.7 дБ (г)

В случае, когда коэффициент усиления кольцевой системы $G = 0$ (рис. 2, а), в системе генерируется гармонический СВЧ-сигнал. При $G = 0.2$ дБ (рис. 2, б) 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 [6]. 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 частоты параметрически возбужденной спиновой волны от половинного значения частоты сигнала накачки δ и составляет величину, равную примерно 235 кГц [8].

При $G = 0.5$ дБ (рис. 2, в) 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. 2, г) 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.

2. Модель

Для теоретического описания приведенных выше экспериментальных результатов рассмотрим распространение магнитостатической волны в плоском слое ферромагнетика, как показано на рис. 3. Структура бесконечна в направлении z . Постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 приложено касательно к пленке вдоль оси z , при этом

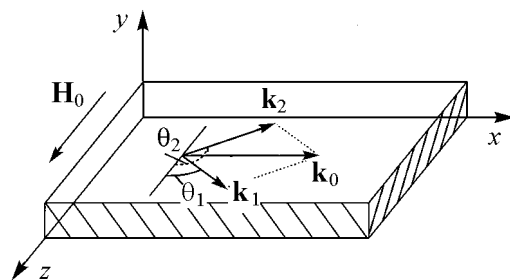


Рис. 3. Схематическое изображение слоя ферромагнетика. Векторы \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 показывают направления распространения ПМСВ и обменных спиновых волн, соответственно

в пленке распространяется поверхностная магнитостатическая волна. Направление распространения ПМСВ показано волновым вектором \mathbf{k}_0 . При распространении МСВ в ферромагнитной среде могут возбуждаться тепловые спиновые волны на частотах ω_1 и ω_2 , с волновыми векторами \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , если выполняются следующие условия для параметрических процессов 1-го порядка [9]:

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

На основе уравнений для движения вектора намагниченности [10] можно получить с учетом соотношений (1) систему уравнений для медленно меняющихся амплитуд спиновых волн $b_1(\mathbf{r}, t)$, $b_2(\mathbf{r}, t)$ и ПМСВ $m(x, t)$, описывающей взаимодействие ПМСВ с параметрически возбужденными спиновыми волнами, которую можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial b_1}{\partial t} + \mathbf{V}_{\text{gr}_1} \text{grad}_{\mathbf{r}_\perp} b_1 - j \left[\left(\omega_1 - \frac{\omega}{2} \right) + j\alpha_1 \right] b_1 &= jV_1 b_2^*, \\ \frac{\partial b_2^*}{\partial t} + \mathbf{V}_{\text{gr}_2} \text{grad}_{\mathbf{r}_\perp} b_2^* - j \left[\left(\omega_2 - \frac{\omega}{2} \right) + j\alpha_2 \right] b_2^* &= -jV_2^* b_1, \\ \frac{\partial m}{\partial t} + V_{\text{gr}} \frac{\partial m}{\partial x} + \alpha \omega_H m &= j \frac{V_{\text{gr}}}{d} \left[\frac{1}{2} (A_+ - A_-) + \frac{\omega + \omega_H}{\omega_M} A_+ \right] \exp(-j\Delta \mathbf{k}_0 x) b_1 b_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $V_1 = (\omega_M/2) \sin \theta_1 \cos \theta_1 \exp(-j\Delta \mathbf{k} \mathbf{r}_\perp) m \exp(-j\phi_1) (\omega'_H + \omega_1) / (2\omega_1)$; $V_2^* = -(\omega_M/2) \sin \theta_2 \cos \theta_2 m \exp(j\phi_2) (\omega'_H + \omega_2) / (2\omega_2)$; $A_\pm = \sin \theta_1 \cos \theta_1 \times \times (\omega_1 \pm \omega'_H) / (2\omega_1) \exp(\pm j\phi_1)$; $\Delta \mathbf{k}$ – пространственный рассинхронизм между МСВ и обменными спиновыми волнами ($\mathbf{k}_{1\perp} - \mathbf{k}_{2\perp} = \mathbf{k}_0 - \Delta \mathbf{k}$); $\omega_{1,2}$ – частоты спиновых волн; $\omega'_H = \omega_H + \beta \omega_M (ak_0)^2$, $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, β – обменная константа, a – постоянная решетки, M_0 – намагниченность насыщения; V_{gr} , \mathbf{V}_{gr_1} , \mathbf{V}_{gr_2} – групповые скорости ПМСВ и спиновых волн, соответственно; θ_1 , θ_2 – углы между направлениями распространения обменных спиновых волн и направлением внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 ; $\phi_{1,2}$ – углы между векторами обменных спиновых волн и направлением внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 .

В случае, когда рассматривается кольцевая система с ферромагнитной пленкой, распространением сигнала вдоль пленки можно пренебречь, а рассматривать только эволюцию амплитуд МСВ и спиновых волн во времени. Данное допущение было сделано исходя из того, что характерное время распространения сигнала по кольцу намного меньше характерного времени изменения амплитуды МСВ.

Согласно вышесказанному предположению с учетом уравнений (2) можно записать систему уравнений для кольцевой схемы в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= -c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \alpha m(t) + \sigma [1 - f(m(t - \tau))] m(t - \tau), \\ \frac{db_1(t)}{dt} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t), \\ \frac{db_2(t)}{dt} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta = \omega/2 - \omega_1$ – отстройка частоты обменных спиновых волн от половинной частоты МСВ; 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;

$$c_0 = -j \frac{V_{gr}}{d} \left[\frac{1}{2}(A_+ - A_-) + \frac{\omega + \omega_H}{\omega_M} A_+ \right],$$

d – толщина пленки; $c_1 = c_2 = j A_+ \omega_M / 2$.

Слагаемое $\sigma [1 - f(m(t - \tau))] m(t - \tau)$ в первом уравнении системы (3) 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 частотами автомодуляции в численном моделировании и эксперименте и чтобы коэффициент усиления переходил в насыщение с ростом амплитуды сигнала.

3. Результаты численного моделирования

Ниже приведены результаты численного решения системы (3) методом Рунге–Кутты 4 порядка. Коэффициенты рассчитаны согласно приведенным формулам: $\delta = 0.2$ МГц, $\nu = 7$ МГц, $\alpha = 7$ МГц, $\tau = 95$ нс, $c_0 = 1232$ МГц, $c_1 = c_2 = 846$ МГц. На рис. 4 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 $\varepsilon = 1$ МГц – нормировочный коэффициент. При значении линейного коэффициента усиления $G_m = 0$ в системе устанавливается стационарный режим, соответствующий $|m| = \text{const}$, что аналогично одночастотному режиму, наблюдаемому экспериментально (см. рис. 2, а). При этом амплитуда ПМСВ ниже порогового значения для параметрических процессов первого порядка. При увеличении коэффициента усиления до некоторого значения $G_m = 0.55$ в си-

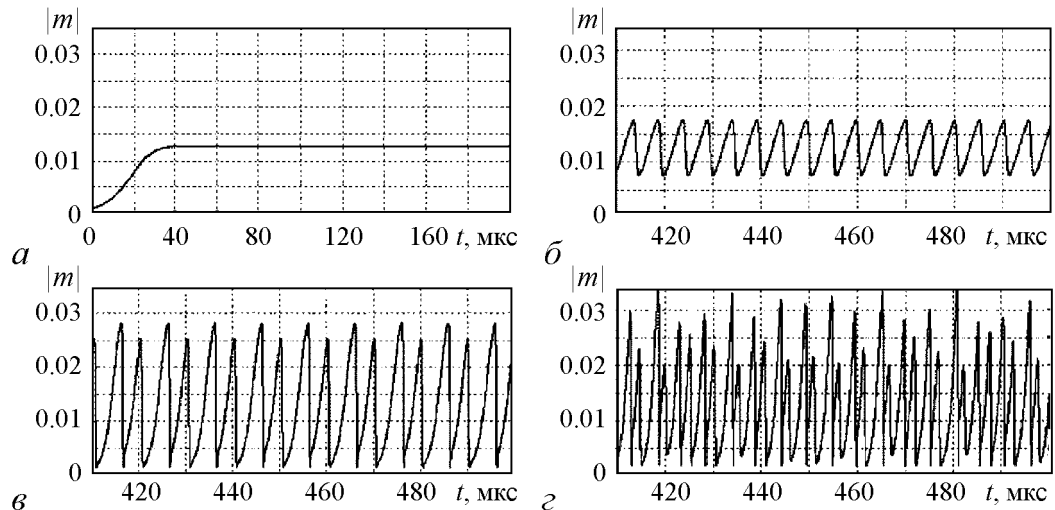


Рис. 4. Эволюция модуля комплексной амплитуды МСВ при увеличении коэффициента усиления в кольце: 0 (а), 0.55 (б), 0.85 (в), 1.05(г)

стеме наблюдается квазигармоническая автомодуляция (рис. 4, б). При дальнейшем увеличении G_m ($G_m = 0.85$) период автомодуляции уменьшается, а форма сигнала начинает напоминать релаксационные колебания (рис. 4, в). При больших значениях коэффициента усиления (рис. 4, г) в системе возникает стохастическая автомодуляция, которая аналогична хаотической последовательности импульсов, наблюдаемых в эксперименте.

Заключение

В работе была построена модель для описания огибающей магнитостатической волны, возбуждаемой в ферромагнитной пленке в условиях, когда разрешены параметрические процессы первого порядка при взаимодействии МСВ со спиновыми волнами, а сама пленка включена в кольцевую схему с усилением. Данная модель позволяет наблюдать все режимы, характерные для исследуемой кольцевой системы при типичных значениях управляющих параметров. Результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для активной кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной пленки.

Выражаю благодарность С.В. Гришину и Ю.П. Шараевскому за ценные обсуждения и помощь в осуществлении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № 14.740.11.0612).

Библиографический список

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
3. Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калинин Б.А., Веннер Н. Автогенерация хаотического СВЧ-сигнала в активных кольцах на основе ферромагнитных пленок // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, № 11. С. 81.
4. 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.
5. 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.
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 трехмагнонных процессах распада и кинетической неустойчивости волн в ферромагнитной пленке // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89, № 2. С. 59.
9. Темирязов А.Г., Тихомирова М.П. Трехмагнонный 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.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 13.01.2012

CHAOTIC MICROWAVE PULSE TRAIN GENERATION IN SELF-OSCILLATORY SYSTEM BASED ON A FERROMAGNETIC FILM

D.V. Romanenko

Experimental investigations results of the ring self-oscillatory system based on a ferromagnetic film at three-wave interactions were considered. The model describing this system was constructed. The typical regimes of a generation, including generation of the chaotic microwave train were calculated with the help of the constructed model. The numerical simulations and experimental results had a good agreement.

Keyword: Ferromagnetic structure, self-oscillatory system, chaos, three-magnon processes.



Романенко Дмитрий Владимирович родился в Саратове (1988), окончил Саратовский государственный университет (2010). В 2011 году поступил на работу в ОФНС НИИ ЕН СГУ в качестве младшего научного сотрудника. Основные области научных интересов: волновая динамика в ферромагнитных структурах, динамический хаос.

410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: dmitrii.romanenk@mail.ru