

Автогенерация последовательностей солитонов огибающей спиновых волн с различными периодами

Б. А. Калиникос¹⁾, Н. Г. Ковшиков, М. П. Костылев, Х. Беннер²⁾ *

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, 197376 Санкт-Петербург, Россия

* Darmstadt University of Technology, D-64289 Darmstadt, Germany

Поступила в редакцию 2 августа 2002 г.

Экспериментально исследован процесс автогенерации периодических последовательностей солитонов огибающей сверхвысокочастотных спиновых волн в “активных кольцах” на основе ферромагнитных пленок. В одном и том же кольце наблюдалась автогенерация последовательностей светлых солитонов с различными периодами. Различные периоды автогенерируемых последовательностей солитонов получены за счет частотно-селективного управления затуханием спиновых волн, циркулирующих в активном кольце.

PACS: 75.30.Ds, 75.70.—i, 85.70.Ge

Известно, что в нелинейных диспергирующих средах возможно возбуждение и распространение двух типов солитонов огибающей – светлых солитонов и темных солитонов. Свойства таких солитонов изучены достаточно подробно (см., например, [1, 2]). Сравнительно недавно было предложено использовать “активные кольца”, изготовленные на основе нелинейных диспергирующих сред, для автогенерации солитонов огибающей. Так, например, “активные кольца” на основе ферромагнитных пленок были использованы для автогенерации солитонов огибающей сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн [3, 4]. В этих работах период T наблюдавшихся последовательностей солитонов определялся длиной кольца l и скоростью солитонов v как $T = l/v$. Иными словами, наблюдавшиеся последовательности можно было трактовать как образовавшиеся в результате циркуляции в кольце одного солитона. Аналогичную трактовку можно дать и экспериментам с оптическими солитонами, генерировавшимися в кольцах на основе оптических волокон (см., например, [5]).

В то же время из простых физических соображений было понятно, что в общем случае в кольце возможна циркуляция и большего числа солитонов. Недавно в теоретических работах [6, 7] были получены строгие аналитические одно- и многосолитонные стационарные решения задач для колец на основе диспергирующих сред, описание нелинейных волн в которых возможно на основе одномерного нелинейного уравнения Шредингера. Однако вопрос эксперимен-

тального наблюдения в одном и том же кольце автогенерации последовательностей солитонов, имеющих различные периоды, оставался открытым.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности автогенерации периодических последовательностей светлых солитонов сверхвысокочастотных спиновых волн, имеющих различные периоды. Иными словами, исследовалась возможность управления плотностью нелинейно генерируемых последовательностей спин-волновых солитонов.

При планировании эксперимента мы исходили из соображений, которые легко качественно объяснить в спектральных терминах. Очевидно, что любая автогенерируемая периодическая последовательность радиоимпульсов (в частном случае – солитонов) имеет дискретный спектр частот. При этом расстояние между соседними гармониками в спектре Δf определяет период последовательности как $T = 1/\Delta f$ (что и наблюдалось в [3, 4] при автогенерации темных и светлых солитонов). Если, например, необходимо уменьшить период генерируемой последовательности импульсов, то в спектральных терминах это означает, что необходимо увеличить расстояние между соседними частотными гармониками, формирующими последовательность. Таким образом, если мы говорим об управляемой генерации в активном резонансном кольце, то для ее реализации необходимо создать условия, когда в нелинейный процесс автогенерации вовлекается только выбранная часть собственных гармоник (резонансных мод) кольца.

В данной работе для одного и того же кольца были реализованы два режима автогенерации. В одном

¹⁾ e-mail: borisk@borisk.usr.etu.spb.ru

²⁾ H. Benner.

режиме в генерации последовательности светлых солитонов участвовали гармоники кольца, выбранные “через одну”, что соответствовало двухсолитонному режиму циркуляции. В другом режиме в генерации последовательности светлых солитонов участвовали все собственные гармоники кольца, что соответствовало односолитонному режиму циркуляции. Начальный выбор затравочных гармоник, то есть резонансных мод кольца, был осуществлен за счет частотно-селективного управления затуханием спиновых волн, циркулирующих в активном кольце. Вовлечение в генерацию всех резонансных мод кольца, как будет показано ниже, было достигнуто путем увеличения коэффициента усиления, то есть путем компенсации затухания в кольце.

Предыдущие эксперименты со спин-волновыми солитонами нашли хорошее объяснение с помощью одномерного нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Согласно модели НУШ,

$$\partial a / \partial t + v_g \partial a / \partial z - iD/2 \partial^2 a / \partial z^2 + iN|a|^2 = 0, \quad (1)$$

светлые солитоны огибающей могут существовать в волноведущих средах, когда дисперсионный и нелинейный коэффициенты несущей волны имеют различные знаки. Этому условию удовлетворяет так называемая обратная объемная спиновая волна, распространяющаяся в касательно намагниченных ферромагнитных пленках. Эта волна имеет монотонную дисперсию $\omega(k)$ в длинноволновой области спектра [8, 9]. При этом ее дисперсионный коэффициент $D = \partial^2 \omega / \partial k^2$ положителен, а нелинейный коэффициент $N = \partial \omega / \partial |a|^2$ отрицателен. Кроме того, при возбуждении этой волны легко реализуется одномерный режим распространения спиновых волн [10], что особенно важно для исключения нежелательных интерференционных эффектов при изучении солитонных явлений. Поэтому обратная объемная спиновая волна была использована в качестве несущей волны в описываемых экспериментах.

Для проведения экспериментов использовалось “активное кольцо”, основными элементами которого были пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), сверхвысокочастотный усилитель и аттенюатор. Подчеркнем, что рабочие характеристики усилителя (полоса усиливаемых частот и динамический диапазон) были выбраны таким образом, чтобы нелинейные свойства кольца заведомо определялись пленкой ЖИГ. Аттенюатор служил для плавной регулировки величины затухания в кольце и перевода его в режим генерации. Для ввода и вывода СВЧ сигнала в кольцо использовались направленные ответвители. Эксперименты выполнялись на узких

образцах пленок ЖИГ (“волноводах” спиновых волн) шириной 2 мм. Волноводы были вырезаны из высококачественной монокристаллической пленки ЖИГ толщиной $L = 5.2$ мкм, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Возбуждение и прием сверхвысокочастотных спиновых волн осуществлялись с помощью обычной конструкции [11, 12], имевшей короткозамкнутые входную и выходную микрополосковые антенны шириной 50 мкм и длиной, равной ширине пленочного волновода. Расстояние между антеннами было выбрано равным 5 мм, исходя из условия получения последовательностей солитонов с периодами в десятки наносекунд.

Эксперименты можно условно разделить на два этапа. На первом этапе регулировалась и исследовалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) активного кольца как кольцевого резонатора. Главной задачей этого этапа было получение АЧХ кольцевого резонатора, обеспечивающей минимальные потери у нескольких, расположенных “через одну”, собственных резонансных мод. При этом самые малые потери должна была иметь резонансная мода, расположенная достаточно глубоко в спектре обратных объемных спиновых волн так, чтобы нелинейно генерируемые гармоники оставались в пределах этого спектра. Для получения желаемой неравномерности АЧХ кольца подбиралась АЧХ внешней (по отношению к ферромагнитной пленке) части электронного СВЧ тракта.

На втором этапе проводились эксперименты по автогенерации последовательностей нелинейных импульсов спиновых волн. Главной задачей этого этапа было получить автогенерацию солитонных последовательностей, имеющих различные периоды.

На рис.1 показана АЧХ кольцевого резонатора, записанная вблизи порога автогенерации при $G = -0.2$ дБ и напряженности поля подмагничивания $H = 1020$ Э. Порог автогенерации $G = 0$ измерялся по появлению монохроматической генерации СВЧ сигнала в кольце. Возникновение генерации определялось с помощью высокочувствительного анализатора спектра типа HP70206. Собственная резонансная мода кольца, имевшая минимальные потери, обозначена на рис.1 кружком. При выполнении нелинейных экспериментов эта мода первой выходила в режим автогенерации при $G \geq 0$ и таким образом при дальнейшем увеличении коэффициента усиления служила несущей частотой генерируемой последовательности импульсов. Обратим внимание, что следующие резонансные моды, имевшие сравнительно небольшие потери, были расположены через одну от несущей моды

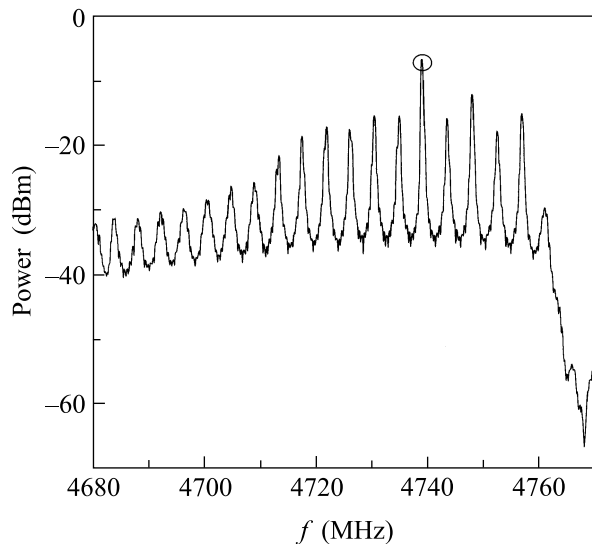


Рис.1. Амплитудно-частотная характеристика активного кольца на основе пленки железитриевого граната, измеренная вблизи порога генерации при коэффициенте усиления $G = -0.2$ дБ

вверх и вниз по частоте на расстояниях $2\Delta f$. Моды же, расположенные рядом с несущей, то есть на расстоянии $\pm\Delta f$, имели несколько большие потери. Такое соотношение затуханий мод приводило к тому, что при увеличении коэффициента усиления вслед за несущей модой в процесс автогенерации вовлекались другие резонансные моды, имевшие густоту спектра $2\Delta f$. Затем, по мере роста коэффициента усиления, все моды кольцевого резонатора, имевшие густоту спектра Δf , вовлекались в процесс автогенерации.

Развитие процесса автогенерации, происходившее по мере роста коэффициента усиления, иллюстрируется рис.2. Слева на рисунке показаны огибающие автогенерируемого СВЧ сигнала, а справа – соответствующие им частотные спектры. Как ясно из рисунка, уже при небольшом превышении порога генерации при $G = 0.1$ дБ вслед за одночастотной монохроматической генерацией возникает многочастотная генерация. Однако при $G = 0.1$ дБ нелинейный процесс еще недостаточно развит, что проявляется в наличии на осциллограмме рис.2а “пьедестала”. При $G = 0.8$ дБ автогенерируемая импульсная последовательность имеет хорошо выраженный характер кноидальных волн (“поезда” светлых солитонов) (рис.2b). Период последовательности оказывается равным $T = 1/2 \Delta f$, а длительность одного солитона, измеренная по половинному уровню амплитуды, $\tau_1 = 29$ нс.

Обращает на себя внимание то, что с дальнейшим увеличением коэффициента усиления происходит по-

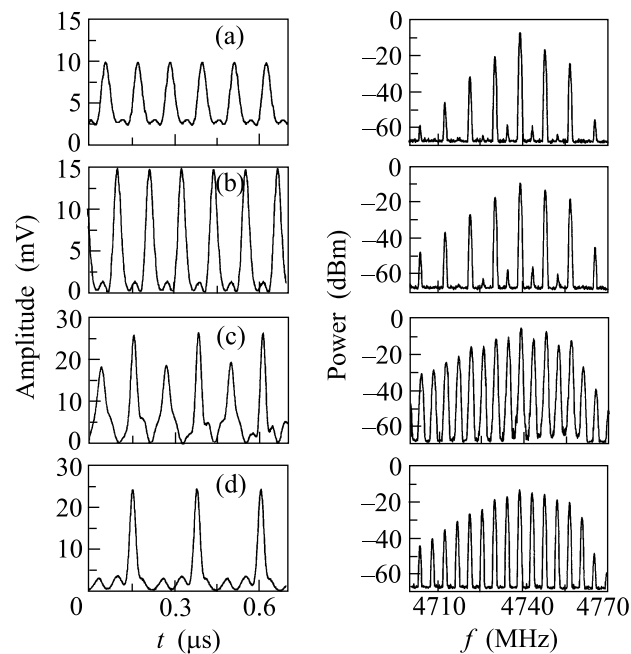


Рис.2. Формы огибающей СВЧ сигнала, циркулирующего в активном кольце (слева), и соответствующие им частотные спектры (справа), измеренные при различных значениях коэффициента усиления: (а) $G = 0.1$ дБ, (б) $G = 0.8$ дБ, (с) $G = 1$ дБ, (д) $G = 1.3$ дБ

давление одних нелинейных импульсов и рост других (рис.2с). При $G = 1.3$ дБ автогенерируемая периодическая последовательность снова принимает вид стационарного “поезда” солитонов (рис.2d). Период этой последовательности оказывается ровно в два раза больше, чем у последовательности на рис.2b, а длительность одного солитона равна $\tau_1 = 27$ нс³).

Подчеркнем, что режим автогенерации спиноволновых солитонов, представленный на рис.2b, получен авторами. Такой режим соответствует циркуляции в кольце двух солитонов одновременно. Режим автогенерации, представленный на рис.2d, подобен описанному в работе [4]. Как показывают элементарные расчеты, скорость солитонов в обоих режимах (рис.2b и рис.2d) одинакова и примерно равна групповой скорости несущей спиновой волны ($v_g = 2.4 \cdot 10^6$ см/с), имеющей частоту 4739 МГц и волновое число 80 рад/см.

Необходимо отметить, что автогенерируемые частоты всех наблюдаемых последовательностей очень хорошо совпадают с частотами собственных резонансных мод кольца (сравните рис.1 и рис.2). Такое

³) При дальнейшем увеличении коэффициента усиления кольцо начинает демонстрировать хаотическую динамику, что требует самостоятельного изучения.

соответствие позволяет сделать вывод, что наблюдаемый процесс автогенерации можно трактовать как процесс модуляционной неустойчивости, обусловленный четырехволновым взаимодействием спиновых волн, отвечающих резонансным модам кольца.

Для того чтобы убедиться в том, что наблюдавшаяся автогенерация последовательности нелинейных импульсов действительно есть процесс автогенерации солитонов, нами была построена модель процесса и выполнено численное моделирование. При построении модели было сделано упрощение, а именно, составной кольцевой резонатор рассматривался как однородный кольцевой резонатор бегущих спиновых волн. Длина такого резонатора l была определена нами как $l = v_g/T$, где v_g – групповая скорость спиновых волн на центральной частоте полосы пропускания кольца в линейном режиме. Форма частотной полосы пропускания этого резонатора в численном эксперименте могла варьироваться.

Основным механизмом, отвечающим за нелинейное взаимодействие спиновых волн, как и обычно в теории солитонов огибающей, мы считаем четырехволновое взаимодействие. Обычно при анализе четырехволновых процессов в неограниченной ферромагнитной среде [13] или в ферромагнитной пленке [14] уравнения движения записываются в пространстве волновых векторов для фурье компонент a_k пространственной переменной. В анализируемом случае для того, чтобы учесть резонансные свойства кольца, мы выводим систему для амплитуд резонансных гармоник a_n циркулирующего в кольце пакета спиновых волн, имеющего безразмерную скалярную огибающую $a(z, t)$. Исходя из системы, включающей уравнение движения магнитного момента Ландау–Лифшица и уравнения магнитостатики, и используя формализм, развитый для нелинейных спиновых волн [13], мы получаем

$$\begin{aligned} & \partial a_n / \partial t + i\omega_n a_n + i(N - i\nu) \times \\ & \times \sum_{n'} \sum_{n''} \sum_{n'''} a_{n'} a_{n''}^* a_{n'''} \delta(n' - n'' + n''' - n) = -\gamma_n a_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что при переходе в случае “узкого” волнового пакета к уравнению для огибающих система (2) принимает вид известного уравнения Гинзбурга–Ландау [2], а при $\nu = 0$ и $\gamma_n = 0$ – нелинейного уравнения Шредингера (1). В уравнении (2) обозначено: $a_n(t)$ – безразмерная скалярная амплитуда n -ой резонансной моды спиновых волн в кольцевом резонаторе, ω_n – ее собственная частота, а N – нелинейный четырехволновой коэффициент взаимодействия спиновых волн, ν – параметр нелинейного затухания спиновых волн.

Собственные частоты ω_n резонансных спиновых волн в ферромагнитном пленочном кольце задаются дискретным набором волновых чисел $k_n = 2\pi n/l$, определяемых периодическими граничными условиями

$$a(z + l, t) = a(z, t), \quad \partial a(z + l, t) / \partial z = \partial a(z, t) / \partial z, \quad (3)$$

поэтому $\omega_n = \omega(k_n)$. Напомним, что мы рассматриваем только волны, принадлежащие нижней толщинной моде обратных объемных спиновых волн, закон дисперсии $\omega(k)$ которых хорошо изучен [8, 9].

В нашей модели в зависимости от частоты собственной резонансной моды кольца она может быть либо затухающей, либо усиливаемой. Этот факт учитывается в уравнении (2) эффективным параметром γ_n , зависящим от номера резонансной моды n . При этом затухающие резонансные моды обладают положительным, а моды за порогом автогенерации – отрицательным значением γ_n . Нулевая величина γ_n соответствует порогу автогенерации. Подчеркнем, что эффективный параметр γ_n учитывает как собственные потери на распространение спиновых волн в ферромагнитной пленке, так и частотно-зависимые потери на фильтрацию сигнала в антеннах, а также частотно-независимое усиление сигнала СВЧ усилителем.

Параметр ν в уравнении (2) описывает нелинейное затухание спиновых волн. Этот параметр введен в уравнение феноменологически и взят частотно-независимым. (Отметим, что аналогичный способ описания нелинейного затухания волн используется в нелинейной оптике [2].) Его величина была измерена экспериментально в мохроматическом режиме возбуждения спиновых волн в спин-волновой линии задержки. Для центральной (несущей) частоты $f_0 = 4739$ МГц величина ν оказалась равной 10^9 1/с. Физически нелинейное затухание несущей спиновой волны, которая является сравнительно длинноволновой ($k = 80$ рад/см), может быть объяснено ее рассеянием в коротковолновые спиновые волны.

В ходе численных расчетов было, в частности, установлено, что для получения устойчивого стационарного режима автогенерации периодических последовательностей солитонов постоянной амплитуды необходимо использовать асимметричные АЧХ колец. В противном случае – симметричной АЧХ – в стационарном режиме наблюдаются медленные колебания амплитуд генерируемых солитонов. Это явление требует дальнейшего исследования путем машинного моделирования. На основании же уже полученной численной информации ему можно дать следующее

физическое объяснение. Введение асимметрии АЧХ создает условия для “направленного оттока” энергии в сторону частотных гармоник, имеющих большие (заданные) потери. Таким образом подавляется возможность периодического обмена энергией между симметрично расположенными относительно центральной частоты собственными резонансными гармониками кольца и обеспечивается стационарный режим, в котором генерируется последовательность солитонов постоянной амплитуды. Отметим, что в реальной экспериментальной ситуации асимметрия АЧХ всегда имеет место. При этом затухание низкочастотных обратных объемных спиновых волн выше, чем у высокочастотных.

Кроме того, в ходе численных расчетов было выяснено, что для достижения стабильного стационарного режима автогенерации периодических последовательностей импульсов достаточно увеличить потери лишь одной из соседних с центральной модой собственных мод кольца, расположенной на расстоянии $2\Delta f$ от нее. При этом две моды (центральная и выбранная “через одну”), имеющие минимальные потери и расположенные на расстоянии $2\Delta f$, играют роль затравочных гармоник, чья модуляционная неустойчивость, развивающаяся с увеличением коэффициента усиления, приводит к генерации “поезда” солитонов.

Рис.3 демонстрирует пример численного расчета по уравнениям (2). На рис.3а показана характеристика потерь $\gamma_n(k_n)$ некоторого фильтрующего кольца, имеющего асимметричную АЧХ и локальную немонотонность полосы пропускания (увеличение потерь при $n = 1$). (При описании рис.3 номера n носят чисто условный смысл.) В данном случае роль затравочных гармоник играют гармоники с номерами $n = 0$ и $n = 2$. На рис.3б показан спектр пространственных гармоник стационарного волнового пакета, сформированного в таком кольце. Временная огибающая $|a(z, t)|$ этого пакета для некоторой точки z кольца показана на рис.3с. Как видно из рис.3б, все нечетные гармоники имеют очень небольшие амплитуды (в сравнении с центральной гармоникой $n = 0$ и остальными гармониками с четными номерами). В результате эти нечетные гармоники практически не вносят вклада в форму пространственной огибающей волнового пакета, вследствие чего огибающая модуля амплитуды нелинейно генерируемого сверхвысокочастотного сигнала имеет вид двух солитоноподобных импульсов, циркулирующих в кольце. Полученная для стационарного режима длительность одного нелинейного импульса в периодической последо-

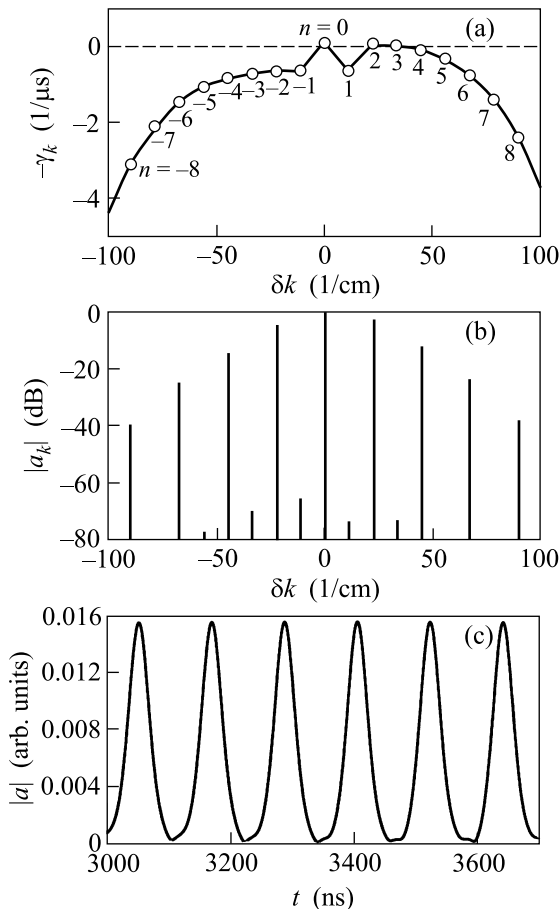


Рис.3. Результаты численного моделирования процесса автогенерации пар солитонов в активном кольце на основе пленки железо-иттриевого граната: (а) заданный вид амплитудно-частотной характеристики кольца; (б) спектр пространственных гармоник автогенерируемой периодической последовательности; (с) периодическая последовательность автогенерируемых солитонов

вательности равна 38 нс, что согласуется с экспериментальным значением ($\tau_2 = 29$ нс).

Таким образом, численное моделирование показало, что путем управления частотной формой АЧХ активного резонансного кольца в нем возможно получение стационарной циркуляции волнового пакета, представляющего собой пару импульсов. На временной огибающей этот процесс проявляется в виде последовательности солитоноподобных импульсов с частотой следования, равной удвоенной частоте циркуляции волнового пакета в кольце.

Более подробные экспериментальные результаты и их сопоставление с теорией будут опубликованы позднее.

В заключение отметим, что описанный способ управления плотностью нелинейно автогенерируе-

мых солитонов огибающей в активных кольцах на ферромагнитных пленках может быть распространена и на другие диспергирующие кольцевые системы. При этом электрическая длина кольца должна измеряться примерно единицами или десятками длин волн используемого волнового процесса, чтобы несмотря на наличие потерь в системе спектр ее собственных резонансных частот оставался дискретным.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект # 02-02-16485, Немецким научным обществом (Deutsche Forschungsgemeinschaft), грант DFG # 436 RUS 113/644/0-1 и организацией ИНТАС, грант INTAS # 99-812.

-
1. M. Remoissenet, *Waves Called Solitons: Concepts and Experiments*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
 2. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, San Diego, 1995.
 3. B. A. Kalinikos, M. M. Scott, and C. E. Patton, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4697 (2000).

4. M. M. Scott, B. A. Kalinikos, and C. E. Patton, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 970 (2001).
5. F. Guty, P. Grelu, N. Huot et al., *Electronics Lett.* **37**, 745 (2001).
6. L. D. Carr, C. W. Clark, and W. P. Reinhardt, *Phys. Rev.* **A62**, 063610 (2000).
7. L. D. Carr, C. W. Clark, and W. P. Reinhardt, *Phys. Rev.* **A62**, 063611 (2000).
8. А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, М.: Физматлит, 1994.
9. B. A. Kalinikos, in *Linear and nonlinear spin waves in magnetic films and Superlattices*, Ed. M. G. Cottam, World Scientific Publishing Company, Ltd., Singapore, 1994.
10. В. Ф. Дмитриев, Б. А. Калиникос, Н. Г. Ковшиков, *ЖТФ* **56**, 2169 (1986).
11. Б. А. Калиникос, Н. Г. Ковшиков, А. Н. Славин, *ЖЭТФ* **94**, 159 (1983).
12. M. Chen, M. A. Tsankov, J. M. Nash, and C. E. Patton, *Phys. Rev.* **B49**, 12773 (1994).
13. В. С. Львов, *Нелинейные спиновые волны*, М.: Наука, 1987.
14. A. N. Slavin and I. V. Rojdestvenski, *IEEE Trans. on Magnetics* **30**, 37 (1994).