

Параметрическая генерация солитоноподобных импульсов спиновых волн в кольцевых резонаторах на основе ферромагнитных пленок

А. А. Серга¹), М. П. Костылев*, Б. А. Калиникос²)*, С. О. Демокритов³), Б. Хиллебрандс³), Х. Беннер³)⁺

Department of Physics, Kaiserslautern University of Technology, 67663, Kaiserslautern, Germany

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

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

Поступила в редакцию 11 февраля 2003 г.

Осуществлены эксперименты, в результате которых под воздействием периодической импульсной параллельной магнитной накачки получена параметрическая генерация интенсивных солитоноподобных импульсов спиновых волн в кольцевых резонаторах на основе ферромагнитных пленок. В зависимости от периода следования импульсов накачки и положения их несущей частоты относительно спектра собственных частот кольцевого резонатора наблюдались различные типы нелинейных импульсных последовательностей. Предложено теоретическое объяснение наблюдавшемуся явлению.

PACS: 75.30.Ds, 75.70.-i, 85.70.Ge

Известно, что в нелинейных диспергирующих средах возможно возбуждение и распространение нелинейных импульсов-солитонов огибающей (см., например, [1, 2]). Сравнительно недавно было предложено использовать “активные кольца”, построенные на основе нелинейных диспергирующих волноведущих сред, для автогенерации солитонов огибающей. Так, например, “активные кольца” на основе ферромагнитных пленок были использованы для автогенерации как светлых, так и темных солитонов огибающей сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн [3–6]. В таких кольцах “внешний” СВЧ усилитель, включенный последовательно с ферромагнитной пленкой, служил для компенсации потерь спиновой волны и других элементов кольца. Компенсация потерь могла переводить кольцо, фактически являющееся резонатором бегущих волн, в режим многочастотной автогенерации с дискретным спектром генерируемых частот. С помощью активных резонансных колец было реализовано два различных механизма *стационарной автогенерации* спин-волновых солитонов. Эти механизмы были основаны на *временной* [3] и *частотной* [4–6] фильтрации циркулирующего сигнала. Таким образом, в предыдущих работах было показано, что активные резонансные кольца на основе фер-

ромагнитных пленок могут быть использованы для эффективной автогенерации периодических последовательностей солитонов огибающей спиновых волн.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности *параметрической генерации* периодических последовательностей нелинейных импульсов спиновых волн в кольцевом резонаторе за счет использования пространственно локализованной импульсной параллельной магнитной накачки. В отличие от предыдущих работ, посвященных генерации спин-волновых солитонов в кольцах, в описываемых ниже экспериментах для компенсации потерь резонансного кольца использовался “внутренний” механизм параметрического усиления спиновых волн.

Механизм параметрического усиления импульсов спиновых волн, в том числе и нелинейных солитоноподобных импульсов, с помощью пространственно локализованной параллельной накачки достаточно хорошо изучен [7–16]. В частности, в ходе предыдущих исследований было показано, что для реализации параметрического усиления как линейных, так и нелинейных импульсов (светлых солитонов – “bright solitons”) спиновых волн наиболее удобными являются так называемые обратные объемные спиновые волны (ООСВ), распространяющиеся вдоль направления постоянного магнитного поля в касательно намагниченной ферромагнитной пленке. Экспериментально полученные значения коэффициента усиления для короткого импульса ООСВ в режиме импульсной накачки превышают 30 дБ [13].

¹) Постоянный адрес: Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, радиофизический факультет, Украина, 01033, Киев, ул. Владимирская 64.

²) e-mail: borisk@borisk.usr.etu.spb.ru

³) S. O. Demokritov, B. Hillebrands, H. Benner.

Кроме того, было показано, что параметрическое усиление ООСВ с помощью импульсной параллельной накачки пространственно локализованным СВЧ магнитным полем имеет целый ряд особенностей в сравнении с усилением спин-волнового сигнала с помощью обычного СВЧ усилителя. Такими особенностями являются сопоставимые по величине коэффициенты параметрического усиления множества толщинных мод, а также формирование встречного и сонаправленного холостых импульсов одновременно с усилением сигнального импульса.

Для выполнения экспериментов в данной работе применялось активное резонансное кольцо, основными элементами которого были касательно намагниченная пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), сверхвысокочастотный усилитель и аттенюатор. В качестве "рабочей" использовалась обратная объемная спиновая волна. Важно отметить, что СВЧ усилитель служил главным образом для компенсации потерь на согласование в антеннах, применявшихся для возбуждения и приема спиновых волн в пленке. Подчеркнем, что параметры усилителя (полоса усиливаемых частот и динамический диапазон) были выбраны таким образом, чтобы нелинейные свойства резонансного кольца заведомо определялись пленкой ЖИГ. Аттенюатор служил для плавной регулировки величины затухания в кольце.

Эксперименты выполнялись на узком образце пленки ЖИГ ("волноводе" спиновых волн) шириной 1.5 мм. Волновод был вырезан из монокристаллической пленки толщиной $L = 4.9$ мкм, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Возбуждение и прием сверхвысокочастотных спиновых волн осуществлялись с помощью обычной конструкции типа "линии задержки" [17, 18], имевшей короткозамкнутые входную и выходную микрополосковые антенны шириной 50 мкм. Расстояние между входной и выходной микрополосковыми антеннами было выбрано равным 8 мм. Посередине между входной и выходной антеннами параллельно им располагался элемент накачки, выполненный из проволоки диаметром 50 мкм в виде полуволнового резонатора, настроенного на частоту 14.518 ГГц.

Эксперименты по параметрической генерации солитоподобных импульсов, формируемых низшей толщинной модой ООСВ, выполнялись в несколько этапов. На первом этапе измерений при разорванной цепи обратной связи в заведомо линейном режиме измерялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) спин-волновой линии задержки при подаче на ее вход непрерывного стороннего сигнала. Измеренная АЧХ показана на рис.1а. Как видно из ри-

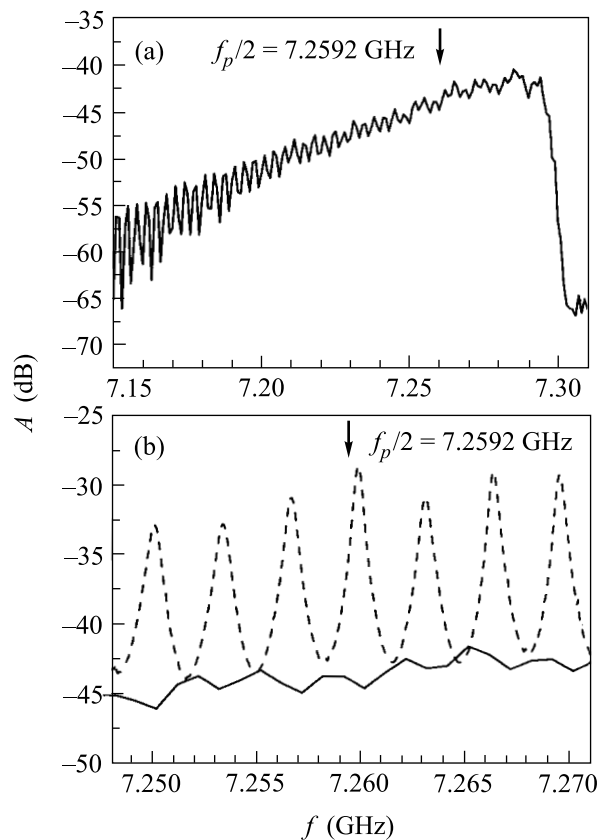


Рис.1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) разомкнутого кольца (а) и ее рабочий участок (б) (показаны сплошными линиями). На рис.(б) штриховой линией показан рабочий участок АЧХ замкнутого кольца, измеренный при коэффициенте усиления СВЧ усилителя 43 дБ в отсутствие сигнала импульсной накачки. Стрелкой показано положение половинного значения несущей частоты импульсов накачки

сунка, потери на прохождение СВЧ сигнала на рабочей частоте в макете составили около 45 дБ. Элементарный расчет (базирующийся на известной величине полуширины кривой ферромагнитного резонанса пленки $\Delta H = 0.4$ Э) показывает, что собственно потери на распространение ООСВ в экспериментальном макете составляли около 11 дБ. Это означает, что основной вклад в результирующие потери давали потери на преобразование сигнала в антеннах (около 34 дБ).

Кроме измерения потерь, при подаче стороннего сигнала на разомкнутое кольцо измерялся коэффициент усиления импульса спиновых волн параллельной накачкой. Максимальный внутренний коэффициент усиления (то есть измеренный без учета потерь на преобразование сигнала в антеннах) составил 13 дБ. Это показало, что данный экспериментальный макет в режиме параллельной накачки обеспечивает воз-

возможность полной компенсации потерь на распространение импульса ООСВ, но не обеспечивает компенсацию потерь в антеннах. Поэтому для компенсации потерь в антеннах был использован СВЧ усилитель.

На втором этапе экспериментов кольцо замыкалось и коэффициент усиления в цепи обратной связи выбирался таким, чтобы компенсировать потери на преобразование в антеннах, не допуская при этом перевода системы в режим самопроизвольной автогенерации. В таких условиях при подаче на вход линии задержки стороннего монохроматического сигнала снова измерялась АЧХ макета “на проход”. Участок АЧХ, находящийся в районе частоты, впоследствии выбранной рабочей, приведен на рис.1б. Рисунок показывает, что, как и должно быть в случае кольцевого резонатора, измеренная АЧХ характеризуется набором узких резонансных пиков. Расстояние между пиками (3.2 МГц) хорошо соответствует длине пробега спиновых волн в пленке ЖИГ. Простые расчеты, использующие теоретическую величину групповой скорости спиновых волн и расстояние между антеннами, показали, что из всего времени циркуляции сигнала в кольце t_1 , которое оказалось равным 315 нс, время задержки СВЧ сигнала в цепи обратной связи составляет всего 5 нс.

Далее на вход накаченного элемента подавалась периодическая последовательность коротких прямоугольных СВЧ импульсов длительностью 24 нс и периодом T_p . Этот период был выбран равным периоду циркуляции сигнала в кольце, то есть $T_p = t_r = 315$ нс. Несущая частота накачки была взята $f_p = 14.518$ ГГц. При этом за счет изменения поля подмагничивания половинное значение частоты накачки $f_p/2$ помещалось в начальную часть спектра ООСВ. (На рис.1 положение половинной частоты накачки $f_p/2$ относительно АЧХ макета показано вертикальной стрелкой.) Мощность импульсов накачки выбиралась такой, чтобы превысить порог импульсной параметрической генерации спиновых волн в кольце.

Измерения показали, что стабильная параметрическая генерация коротких импульсов спиновых волн наблюдается в очень узком интервале изменения периода следования импульсов накачки. Одновременно в ходе измерений было обнаружено, что несущую частоту накачки, на которой наблюдается эффективная параметрическая генерация нелинейных солитонподобных импульсов, можно было легко перестраивать. При этом перестройка имела дискретный характер. Дискрет перестройки (то есть расстояние между соседними частотами, на которых возникала эффективная параметрическая генерация нелиней-

ных солитонподобных импульсов) оказался равным 1.59 МГц. Иными словами, несущая частота генерируемых импульсов (определяемая нами как равная половине несущей частоты накачки $f_p/2$) легко перестраивалась с названным выше дискретом в 1.59 МГц. Типичный профиль наблюдаемой последовательности генерируемых импульсов приведен на рис.2 жирной линией. Профиль получен при частоте накачки $f_p = 14.518$ ГГц и напряженности магнитного поля 1852 Э.

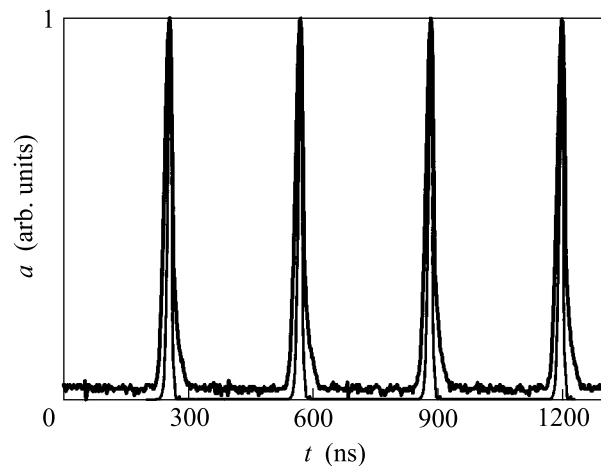


Рис.2. Профиль параметрически генерируемой последовательности импульсов спиновых волн. Жирная линия – эксперимент, тонкая линия – численный расчет. Толщина пленки ЖИГ – 4.9 мкм, расстояние между входной и выходной антеннами – 8 мм, ширина микрополоскового резонатора – 50 мкм, постоянное магнитное поле – 1852 Э, длительность импульсов накачки – 24 нс, период следования – 315 нс

Последним этапом измерений было исследование различных режимов генерации, возникающих с изменением периода следования импульсов накачки. При этом были получены одноимпульсный и двухимпульсный режимы генерации. Как уже было сказано выше, одноимпульсный режим наблюдался, когда период следования импульсов накачки выбирался равным времени циркуляции импульса в кольце (см. рис.2). Двухимпульсный режим генерации наблюдался, когда период следования импульсов накачки был в два раза меньше, чем время циркуляции импульса в кольце. Типичные периодические последовательности генерируемых импульсов, полученные в этих режимах, показаны на рис.3. Заметим, что при установившейся генерации малое изменение периода следования импульсов накачки (около 10 нс) приводило к срыву генерации.

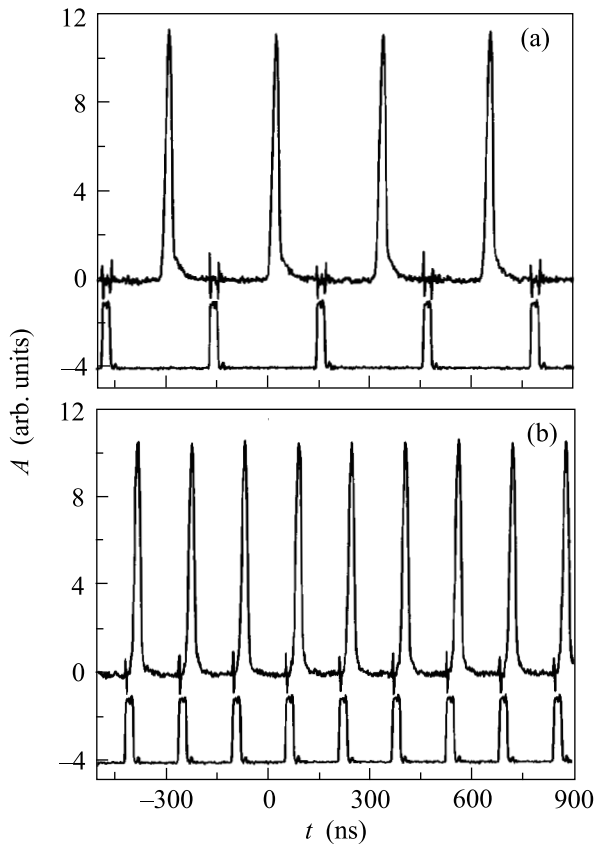


Рис. 3. Экспериментальные профили огибающей генерируемой периодической последовательности импульсов. (а) Период следования импульсов накачки выбран равным периоду импульса циркуляции спиновых волн, то есть $T_p = t_r = 315$ нс; при этом в кольце циркулирует 1 импульс спиновых волн. (б) Период следования импульсов накачки выбран равным половине периода импульса циркуляции спиновых волн, то есть $T_p = t_r/2 = 155$ нс; при этом в кольце циркулируют 2 импульса спиновых волн

Для объяснения полученных результатов были выполнены аналитические расчеты и численное моделирование эксперимента. При построении модели были сделаны следующие упрощения. Кольцо в волновом отношении считалось однородным, а его свойства, в том числе погонные потери на распространение сигнала, описывались как целиком обуславливаемые ферромагнитной пленкой, в которой распространяется обратная объемная спиновая волна. Подчеркнем, что в модели учитывалось пространственно локализованное параметрическое усиление только низшей толщинной моды ООСВ. При этом для получения однонаправленной циркуляции для холостого импульса задавались много большие (чем естественные для ЖИГ) потери на распространение в те ин-

тервалы времени, когда накачка выключена. Тем самым обратно направленный параметрически генерируемый холостой импульс оказывался полностью подавленным до момента его очередного столкновения с усиленным.

Моделирование осуществлялось на основе системы нелинейных параметрических уравнений, ранее предложенных в работе [14]. Эти уравнения были получены для пространственных фурье-компонент переменной намагниченности ООСВ и СВЧ поля накачки. В настоящей работе эти уравнения были модифицированы на случай периодического кольцевого пространства путем введения дискретного волнового числа с дискретом $\Delta k = 2\pi/l$, где l – длина кольцевого пленочного резонатора. В уравнениях были учтены трехволновое параметрическое взаимодействие СВЧ магнитного поля импульсной периодической параллельной накачки с пакетом ООСВ, четырехволновой процесс самовоздействия волн волнового пакета, а также дисперсия ООСВ. Отметим, что при записи уравнений для пространственных фурье-компонент переменной намагниченности использовался реальный спектр бегущих ООСВ в ферромагнитной пленке $\omega(k)$, но с дискретными значениями волнового числа k .

Пример результатов численного расчета, выполненного для одноимпульсного режима генерации, показан на рис.2 тонкой линией. Расчет показал, что при частоте следования импульсов накачки равной частоте циркуляции кольца, начиная с шумового уровня, возникает и начинает быстро нарастать по амплитуде импульс спиновых волн. Вследствие большой величины коэффициента параметрического усиления форма генерируемого импульса сразу же после выключения накачки в основном определяется длительностью импульса накачки, пространственной длиной области накачки и фазовыми соотношениями в кольце. По мере движения по кольцу форма импульса слегка сглаживается дисперсией. При приближении амплитуды генерируемых импульсов к порогу нелинейного четырехволнового самовоздействия, то есть к односолитонному порогу⁴⁾, происходит расширение спектра пространственных и, соответственно, временных гармоник волнового пакета. Вследствие этого порождаются гармоники за пределами спектральной полосы накачки. Такие гармоники не участвуют в процессе усиления и поэтому являются

⁴⁾ Моделирование показывает, что для данной длительности импульсов накачки односолитонный порог составляет 1–2 градуса при измерении по углу прецессии локального магнитного момента).

сильно затухающими. Постоянная передача энергии этим гармоникам за счет четырехволнового процесса самовоздействия, возрастающая с увеличением амплитуды огибающей волнового пакета, увеличивает результирующий уровень потерь в системе и в итоге останавливает дальнейший рост амплитуды. Из результатов численного моделирования можно сделать вывод, что хотя стационарно генерируемые импульсы и не имеют форму, характерную для одиночного солитона огибающей, в то же время их формирование идет именно по солитонному механизму. Такой процесс характерен для нашей волновой системы, в которой дисперсионный и нелинейный коэффициенты имеют разные знаки.

Обратимся теперь к трактовке экспериментально обнаруженного эффекта периодичности следования частотных полос генерации (при изменении половинной частоты накачки с шагом в 1.59 МГц). Для объяснения этого эффекта производилось численное моделирование для двух случаев. Результаты расчета приведены на рис.4. Рис.4а демонстрирует случай (тот же, что и на рис.2), когда половинная частота на-

ли мгновенной мощности импульсов, а нижние – их фазовые профили.

Выполненный расчет показал, что эффективная генерация последовательностей импульсов возможна в обоих случаях. При этом амплитудные профили генерируемых последовательностей полностью совпадают. Однако, что касается их фазовых профилей, то здесь имеется существенное различие. Все импульсы последовательности в случае (а) оказываются синфазными, тогда как в случае (б) при переходе от импульса к импульсу фаза изменяется на 180° .

Обсуждаемому эффекту можно дать следующее физическое объяснение. Периодическая импульсная накачка с частотой следования импульсов, равной частоте циркуляции сигнала в кольце – 3.18 МГц, обладает дискретным спектром частот, причем гармоники этого спектра также расположены на расстоянии 3.18 МГц друг от друга. Это означает, что спектр параметрической накачки, измеренный на половинной частоте (частоте параметрического усиления спиновых волн), состоит из гармоник, расположенных на расстоянии 1,59 МГц. Отсюда следует, что только каждая вторая частотная гармоника накачки может попадать на собственную частоту кольцевого резонатора и, соответственно, принимать эффективное участие в процессе параметрического усиления циркулирующего волнового пакета. Спектр периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов, как известно, имеет максимальную гармонику на несущей частоте импульса (в нашем случае – f_p). При последовательном смещении несущей частоты накачки на 3.18 МГц эта максимальная гармоника половинным значением своей частоты f_p последовательно попадает либо на собственную резонансную частоту кольца, либо в середину расстояния между собственными частотами. В первом случае наибольший коэффициент параметрического усиления имеет только одна из собственных частот резонансного кольца, которая становится несущей частотой параметрически генерируемой импульсной последовательности. Во втором случае наибольший коэффициент параметрического усиления имеют две собственные частоты резонансного кольца. Именно эти две частоты оказываются затравочными частотами параметрически генерируемой импульсной последовательности. Таким образом, в этом случае формируется последовательность противофазных импульсов с подавленной центральной несущей частотой (рис.4б)⁵. К таким же выводам приводит и числен-

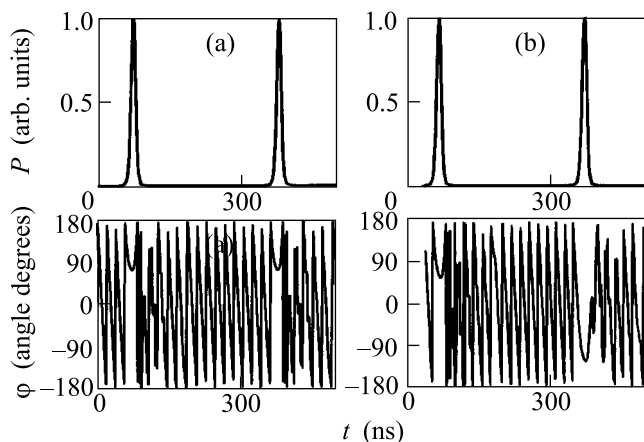


Рис.4. Расчетные профили мгновенной мощности и фазы огибающей параметрически генерируемой последовательности импульсов: (а) половинная частота накачки равна 7261 МГц, что соответствует 15 резонансной моде кольца; (б) половинная частота накачки равна 7259.4 МГц, что соответствует середине расстояния по частоте между 14-й и 15-й резонансными модами кольца. Остальные параметры – такие же, как и на рис.2

качки точно совпадает с частотой одной из собственных резонансных мод кольца (в данном конкретном случае – 15-й моды), а рис.4б – когда половинная частота накачки расположена точно посередине между 14-й и 15-й модами (то есть на 1.59 МГц вверх от 15-й моды). Верхние кривые на рис.4 показывают профи-

⁵Обратим внимание, что здесь легко просматривается аналогия с результатами работы [19].

ное фурье-преобразование, дающее частотные спектры последовательностей импульсов, приведенных на рис.4.

Интересно провести аналогию полученного результата с теоретическими предсказаниями работы [20], где даны аналитические решения граничных задач для одномерного уравнения Шредингера. В частности, в работе [20] показано, что для периодических граничных условий, моделирующих нелинейное диспергирующее кольцо, возможно два типа нелинейных решений. Один из типов нелинейных решений (“поездов светлых солитонов”) имеет аналогию с обычными линейными решениями уравнения Шредингера. Второй тип аналогии с линейными решениями не имеет и в этом смысле является уникальным. Этот тип решений был назван авторами [20] как “нарушающий симметрию” (“symmetry breaking”). Используя для описания полученных результатов терминологию работы [20], можно сказать, что рис.4б показывает нелинейные последовательности, сохраняющие симметрию, а рис.4а – нарушающие симметрию. Таким образом, рассмотренная нами нелинейная система, в которой нелинейное стационарное состояние определяется не только четырехволновым, но и трехволновым параметрическим взаимодействием, является еще одним типом системы, в которой возможно существование нелинейных стационарных состояний двух внутренне различных типов.

В заключение отметим, что в настоящей работе получена и исследована параметрическая генерация интенсивных солитоподобных импульсов спиновых волн под действием импульсной периодической параллельной магнитной накачки в кольцевых резонаторах на основе ферромагнитных пленок. В зависимости от периода следования импульсов накачки и положения частоты их следования относительно спектра собственных частот резонатора наблюдались различные типы генерируемых последовательностей. Предложено теоретическое объяснение наблюдаемому явлению на основе численного решения системы нелинейных уравнений, учитывающих трехволновое и четырехволновое взаимодействия, а также особенности спектра спиновых волн в ферромагнитной пленке. Выяснено, что ограничение роста амплитуды параметрически усиливаемого импульса, циркулирующего в пленочном резонаторе, а также формирование его стационарного профиля идет по солитонному механизму.

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

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, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4301 (1998).
4. B. A. Kalinikos, M. M. Scott, and C. E. Patton, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4697 (2000).
5. M. M. Scott, B. A. Kalinikos, and C. E. Patton, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 970 (2001).
6. Б. А. Калиникос, Н. Г. Ковшиков, М. П. Костылев, Х. Беннер, Письма в ЖЭТФ **76**, 310 (2002).
7. Г. А. Мелков, С. В. Шолом, ЖТФ **60**, 118 (1990).
8. B. A. Kalinikos and M. P. Kostylev, *IEEE Trans. on Magnetics* **33**, 3445 (1997).
9. Б. А. Калиникос, М. П. Костылев, Н. Г. Ковшиков и др., Письма в ЖЭТФ **66**, 346 (1997).
10. A. V. Bagada, G. A. Melkov, A. A. Serga, and A. N. Slavin, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2137 (1997).
11. P. A. Kolodin, P. Kabos, C. E. Patton et al., *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1976 (1998).
12. G. A. Melkov, A. A. Serga, V. S. Tiberkevich et al., *IEEE, Trans. on Magnetics* **35**, 3137 (1999).
13. Г. А. Мелков, А. А. Серга, А. Н. Славин и др., ЖЭТФ **116**, 2192 (1999).
14. М. П. Костылев, Б. А. Калиникос, ЖТФ **70**, 136 (2000).
15. G. A. Melkov, Yu. V. Kobljanskyj, A. A. Serga et al., *J. Appl. Phys.* **89**, 6689 (2001).
16. G. A. Melkov, A. A. Serga, V. S. Tiberkevich et al., *Phys. Rev.* **E63**, 066607 (2001).
17. Б. А. Калиникос, Н. Г. Ковшиков, А. Н. Славин, ЖЭТФ **94**, 159 (1983).
18. M. Chen, M. A. Tsankov, J. M. Nash, and C. E. Patton, *Phys. Rev.* **B49**, 12773 (1994).
19. B. A. Kalinikos, M. P. Kostylev, N. G. Kovshikov, and H. Benner, to appear in *IEEE Trans. on Magnetics* **38**, 3120 (2002).
20. L. D. Carr, C. W. Clark, and W. P. Reinhardt, *Phys. Rev.* **A62**, 06311 (2000).