

Наблюдение модуляционной неустойчивости и солитонов спиновых волн в ферромагнитных пленках в условиях сосуществования четырехволновых и трехволновых параметрических процессов

© М.А. Черкасский, Н.Г. Ковшиков, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: spinlab@eltech.ru

(Поступила в Редакцию 8 февраля 2010 г.
В окончательной редакции 10 марта 2010 г.)

Экспериментально исследованы нелинейные явления, возникающие при распространении спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках в условиях одновременного существования трехволнового и четырехволнового параметрических процессов. Исследования проводились как в одночастотном, так и в двухчастотном режиме возбуждения интенсивных спиновых волн. На частотах, где разрешены трехволновые распадные процессы, впервые обнаружена спонтанная модуляционная неустойчивость монохроматической бегущей спиновой волны. На этих же частотах при возбуждении двух монохроматических спиновых волн наблюдалась хорошо выраженная генерация периодической последовательности светлых спин-волновых солитонов.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (№ 08-02-00959), Президента РФ, Министерства образования и науки РФ и Немецкого научного общества DFG (N 436 RUS 113/644/0-1).

1. Введение

Спин-система тонких ферромагнитных пленок демонстрирует богатую нелинейную динамику. В частности, большое число экспериментов, выполненных на ферромагнитных пленках, было посвящено изучению таких важных нелинейных явлений, как солитоны огибающей (см., например, работы [1–6] и ссылки в них), собственная [6–8] и наведенная [9–12] модуляционная неустойчивости спиновых волн, а также хаос в системе спиновых волн [13–15]. Сравнительно недавно были экспериментально обнаружены формирование фракталов [16] и возвращаемость [17].

Принято различать два типа модуляционной неустойчивости бегущих волн: собственную (или спонтанную) и наведенную (или вынужденную) [18]. В экспериментах собственная неустойчивость проявляется в одночастотном режиме возбуждения, т.е. для начально монохроматических волн. Наведенная неустойчивость может возникать при двухчастотном (а также многочастотном) возбуждении затравочных волн. Как собственная, так и наведенная неустойчивость относятся к ключевым явлениям нелинейной волновой динамики диспергирующих сред [19]. Они вызываются четырехволновыми („солитонными“) процессами взаимодействия начальных возбуждений.

В случае магнетиков оба вида неустойчивости наблюдались для сильно дисперсионных дипольно-обменных спиновых волн, возбуждающихся в ферромагнитных пленках [6,7]. Наведенная неустойчивость спиновых волн (СВ) наблюдалась только для слабодисперсионных

СВ [9]. Собственная же неустойчивость слабодисперсионных СВ не наблюдалась.

Насколько нам известно, все экспериментальные исследования, посвященные изучению солитонов огибающей СВ, а также явлений как собственной, так и вынужденной модуляционной неустойчивости СВ в ферромагнитных пленках, выполнены в условиях, когда трехволновые процессы были невозможны. Иными словами, несущие спиновые волны были устойчивы по отношению к процессам параметрического распада.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование модуляционной неустойчивости, а также возбуждения солитонов огибающей слабодисперсионных СВ на частотах, на которых одновременно разрешены как четырехволновые, так и трехволновые параметрических процессы.

2. Эксперименты

Эксперименты проводились на обычном макете типа линии задержки [1,2]. Макет представлял собой поликоровую пластину, на которой были фотолитографически сформированы входная и выходная микрополосковые антенны спиновых волн шириной $50\ \mu\text{m}$ и длиной $2\ \text{mm}$ с подводными линиями. Расстояние между антеннами составляло $7\ \text{mm}$. Поликоровая пластина крепилась на металлическом основании. Исследуемый пленочный образец накладывался на антенны сверху и фиксировался с помощью прижимного устройства. Макет помещался в зазор постоянного магнита, обеспечивавшего про-

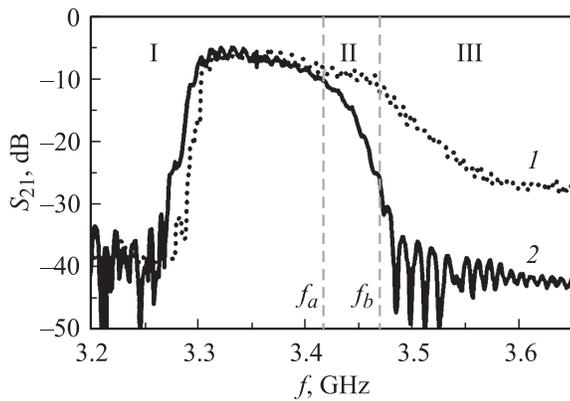


Рис. 1. АЧХ, полученная ниже порога трехволнового взаимодействия при входной мощности $P = -20$ dB (1), и АЧХ, полученная выше порога трехволнового взаимодействия при входной мощности $P = 5$ dB (2). Обе АЧХ измерены при напряженности магнитного поля $H = 585$ Ое. Вертикальными штриховыми линиями обозначены границы переходной области $f_a = 3.421$ GHz и $f_b = 3.474$ GHz.

странственно однородное магнитное поле. Измерения выполнялись при комнатной температуре.

Исследуемый образец ферромагнитной пленки шириной 2 mm („волновод спиновых волн“) был вырезан из монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной $6.9 \mu\text{m}$ с малыми магнитными потерями. Пленка была выращена на подложке из гадолиний-галлиевого граната методом жидкофазной эпитаксии. Величина намагнитченности насыщения пленки составляла 1750 G.

Для выполнения экспериментов была выбрана пленка ЖИГ со свободными поверхностными спинами. Методика определения состояния поверхностных спинов описана в [1]. Пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем, которое было направлено касательной к ее плоскости перпендикулярно направлению распространения волн. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке поверхностных спиновых волн (ПСВ). Огибающая спин-волновых сигналов и их спектральный состав регистрировались с помощью осциллографа HP 54615B и анализатора спектра HP 8563A. Для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) использовался векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZVA 40.

2.1. Характерные спектральные области. Эксперименты проводились в несколько этапов. Величина постоянного поля подмагничивания была выбрана таким образом, чтобы обеспечить одновременное присутствие в спин-системе пленки ЖИГ частотных зон запрещенных и разрешенных трехволновых процессов. В качестве критерия наличия в спин-системе пленки ЖИГ названных частотных зон использовались амплитудно-частотные характеристики линии задержки, измеренные в заведомо линейном и нелинейном режимах возбуждения и распространения спиновых волн.

На рис. 1 представлены АЧХ линии задержки для двух различных значений входной мощности. Пунктирная кривая 1 получена при малой входной мощности. Она соответствует линейному режиму распространения ПСВ. Экспериментально полученное значение частоты нижней границы полосы пропускания для малой мощности $f_{\perp}^{\text{exp}} = 3.271$ GHz хорошо согласуется с теоретическим рассчитанным значением частоты ферромагнитного резонанса для касательно намагниченной пленки (см., например, [20]). Ширина полосы пропускания определяется дисперсией ПСВ и эффективностью возбуждения и приема спиновых волн микрополосковыми антеннами [21].

Амплитудно-частотная характеристика, представленная на рис. 1 сплошной кривой 2, измерена при относительно высокой входной мощности $P = 5$ dB, т.е. в нелинейном режиме распространения ПСВ.¹ Из рис. 1 видно, что увеличение входной мощности приводит к уменьшению частоты ферромагнитного резонанса, иными словами, к нелинейному сдвигу частоты. Сдвиг частоты, вызванный уменьшением намагнитченности насыщения пленки с ростом входной мощности, является стабильным нелинейным процессом [22].

Важно отметить, что при изменении входной мощности имеет место не только нелинейный сдвиг частоты, но и изменение формы АЧХ. Как ясно из АЧХ, показанной на рис. 1 кривой 2, на ней появляется отчетливо выраженная зона повышенного затухания СВ. Такое затухание, хорошо выраженное выше частоты f_a , объясняется включением трехволновых распадных процессов несущей ПСВ, когда энергия волны накачки передается вторичным волнам. Иными словами, трехволновые распадные процессы вызывают нелинейное затухание несущей ПСВ.

Остановимся на проявлении трехволновых процессов на наблюдаемой АЧХ. Как известно, трехволновой процесс требует выполнения законов сохранения частот и волновых векторов

$$\omega(\mathbf{k}_0) = \omega(\mathbf{k}_1) - \omega(\mathbf{k}_2), \quad \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2, \quad (1)$$

где $\omega(\mathbf{k}_0)$ и \mathbf{k}_0 — частота и волновой вектор первичной волны накачки. Процесс (1) развивается при превышении мощностью волны накачки некоторого порогового значения. На первый взгляд кажется, что „включение“ порогового процесса (1) должно привести к скачкообразному возрастанию измеряемого затухания несущей ПСВ (т.е. к скачкообразному изменению формы АЧХ), поскольку процесс (1) является резонансным. Однако более внимательное рассмотрение показывает, что это не так. Резкому скачку затухания препятствует нелинейный сдвиг частоты, плавно „уводящий“ несущую частоту

¹ Обратим внимание на то, что все значения мощности, касающиеся АЧХ, здесь и далее указаны в единицах, нормированных относительно экспериментально измеренного значения порога возникновения трехволнового распадного процесса. При этом значение порога условно принято за нуль децибелл.

из резонансного условия. Физически такой сдвиг частоты обусловлен изменением намагниченности насыщения, происходящим по мере уменьшения амплитуды бегущей волны накачки. Попутно заметим, что этот механизм нелинейного сдвига частоты подобен ранее описанному при исследованиях эффектов „foldover“ [23] и бистабильности [24]. В результате наибольшее затухание, вызываемое трехволновым распадом, достигается на частоте f_b , когда нелинейный сдвиг частоты становится несущественным по сравнению с обычной релаксацией.

Расчеты, базирующиеся на резонансных условиях (1) и полном спектре дипольно-обменных спиновых волн [25], показывают, что в пренебрежении нелинейным сдвигом частоты законы сохранения (1) выполняются выше частоты, отмеченной на рис. 1 как f_b . Для экспериментальных параметров эта частота равна $f_b = 3.473$ GHz. Учет нелинейного сдвига частоты, отвечающего амплитудно-частотной характеристике, показанной на рис. 1 кривой 1, приводит к значению частоты $f_a = 3.421$ GHz. При этом в качестве родившихся (вторичных) волн выступают СВ, распространяющиеся практически перпендикулярно направлению распространения волны накачки. Заметим, что эти вторичные волны являются короткими ($k > 10^5$ cm $^{-1}$) и потому не принимаются микрополосковыми антеннами.

Из указанного выше следует, что АЧХ, полученная при высоком уровне мощности, может быть разделена на три характерные области: область I — область запрещенных трехволновых процессов, лежащую ниже частоты $f_a = 3.421$ GHz, область II — переходную область, лежащую в интервале частот между f_a и f_b , и область III — область разрешенных трехволновых процессов, находящуюся выше частоты $f_b = 3.473$ GHz. Заметим еще раз, что приведенные значения граничных частот f_a и f_b найдены исходя из экспериментально измеренных параметров.

Что касается четырехволновых параметрических процессов, в частности солитонных процессов самовоздействия, то, как следует из простых физических представлений, они возможны во всей частотной области существования поверхностных СВ.

Таким образом, на первом этапе измерений были установлены характерные частотные области спектра СВ и определены причины существования плавной переходной области затухания ПСВ.

2.2. Модуляционная неустойчивость. На следующем этапе экспериментов проводились исследования возможности возникновения собственной модуляционной неустойчивости СВ в различных зонах спектра. Для этого систематически изменялись частота и мощность входного СВЧ-сигнала.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Пунктирной кривой показана АЧХ линии задержки, полученная при запороговом значении входной мощности. Вертикальной линией указана верхняя частотная граница f_b переходной области. Мощность генератора, излучавшего сигнал накачки, была равна 5 dB. Как

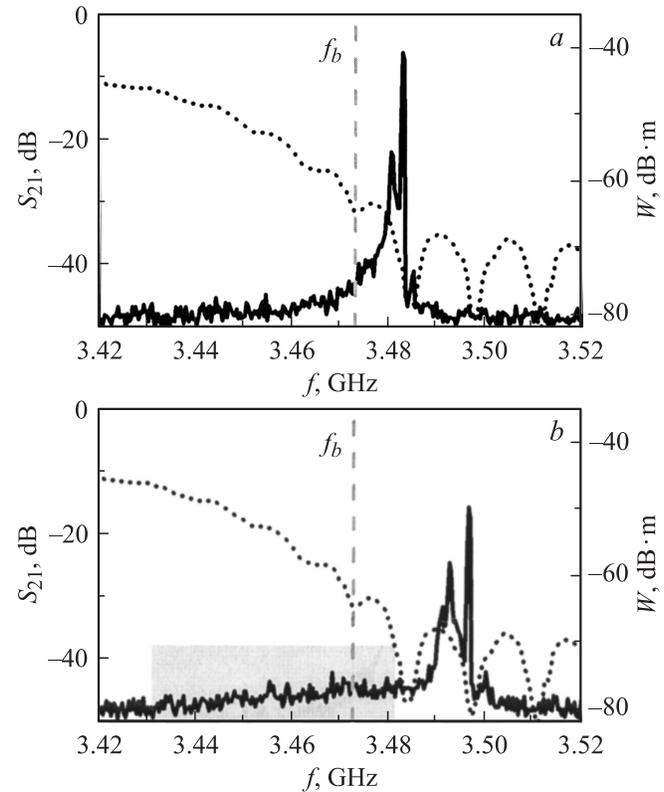


Рис. 2. Спектры модуляционной неустойчивости спиновых волн (сплошные кривые) в области трехволнового взаимодействия, записанные при $P = 5$ dB для входных частот $f = 3.483$ (a) и 3.496 GHz (b). Пунктирными линиями показаны АЧХ при $P = 5$ dB. Здесь и на рис. 3, 4 S_{21} — мощность АЧХ, W — мощность выходного сигнала. Серым прямоугольником на части b отмечена слабая шумовая генерация в частотном интервале 3.430–3.482 GHz.

отмечалось выше, это значение указано относительно порога возникновения трехволнового процесса.

При подаче монохроматического сигнала мощностью выше порога трехволновой параметрической неустойчивости на частоте, лежащей внутри области III, возникла собственная модуляционная неустойчивость. Эта неустойчивость выражалась в генерации низкочастотного (относительно частоты накачки) сателлита. Наиболее развитая собственная модуляционная неустойчивость, т.е. наибольшая амплитуда сателлита, наблюдалась при частоте накачки 3.483 GHz, лежащей в области III (см. рис. 2, a). В этом случае мощность сателлита на выходе пленки ЖИГ была слабее мощности волны накачки на 9 dB.

С увеличением частоты накачки более f_b при постоянной входной мощности амплитуды выходных спектральных гармоник уменьшались. Спектрограмма, показанная на рис. 2, b, была получена для входной частоты 3.496 GHz при мощности, превышающей экспериментально измеренное значение трехволнового порога. Отметим также появление в этом режиме набора нели-

нейных гармоник очень малой амплитуды в частотном интервале 3.430–3.482 GHz, расположенном левее f_b . Этот интервал на рис. 2, *b* затенен.

Таким образом, в спектральной области разрешенных трехволновых процессов наблюдалась собственная модуляционная неустойчивость распадно-неустойчивых ПСВ.

2.3. Солитоны огибающей. На следующем этапе проводилось экспериментальное исследование процессов возбуждения солитонов огибающей спиновых волн. Для этого использовался механизм вынужденной (индуцированной) модуляционной неустойчивости, реализующийся за счет двухчастотного возбуждения. Затравочные частоты входных ПСВ f_1 и f_2 выбирались лежащими в области трехволнового распада, а их мощности превышали пороговое значение. Таким образом, формирование солитонов огибающей происходило в условиях одновременного существования трехволнового и четырехволнового взаимодействий.

На рис. 3 представлен типичный спектр выходного спин-волнового сигнала и его временная реализация.

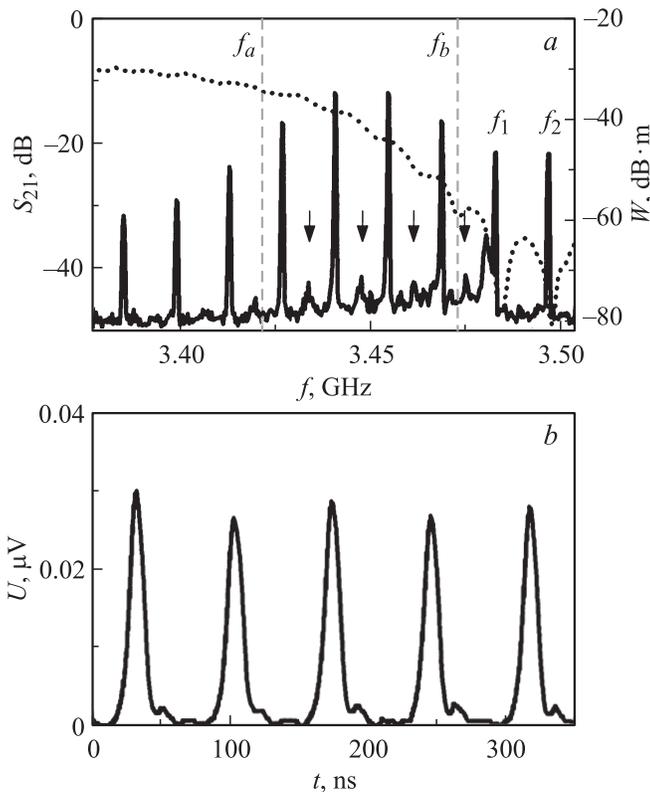


Рис. 3. Типичная спектрограмма солитонов огибающей ПСВ (*a*) и соответствующая временная реализация (*b*), полученные в условиях трехволнового взаимодействия. Пунктирной линией показана АЧХ при $P = 5$ dB; вертикальными штриховыми линиями обозначены границы переходной области $f_a = 3.421$ GHz и $f_b = 3.473$ GHz; входные частоты равны $f_1 = 3.483$ GHz и $f_2 = 3.497$ GHz; наиболее интенсивные спектральные гармоники выходного сигнала имеют значения 3.441 и 3.455 GHz. Стрелками отмечены частоты промежуточных гармоник: 3.434, 3.448, 3.462 и 3.475 GHz.

На рис. 3, *a* нанесены также АЧХ и частотные границы переходной области II. Рис. 3, *b* соответствует полученной временной реализации. Из рис. 3 видно, что благодаря нелинейным процессам происходит обогащение затравочного спектра и образование выходного спектра, соответствующего спектру последовательности светлых солитонов. Как показывает временная реализация, генерируется периодическая последовательность светлых солитонов огибающей СВ.

Необходимо отметить следующие особенности наблюдающейся генерации солитонов. Во-первых, частоты накачки $f_1 = 3.483$ GHz и $f_2 = 3.497$ GHz лежат в области разрешенных трехволновых процессов, а нелинейно генерируемые центральные (наиболее интенсивные) гармоники оказываются лежащими в переходной области. Эти гармоники имеют амплитуды на 12 dB больше, чем затравочные гармоники, что, по-видимому, объясняется различной степенью влияния распадного процесса.

Во-вторых, между основными гармониками наблюдаются эквидистантные промежуточные гармоники существенно меньшей амплитуды. Так как частотный интервал между основными и промежуточными гармониками в 2 раза меньше, чем интервал между основными гармониками, можно говорить о возникновении бифуркации удвоения периода.

Такая бифуркация, ведущая к „вторичной“ модуляции амплитуды последовательности солитонов, отчетливо проявляется при уменьшении входных частот затравочных волн накачки, т.е. при их смещении в переходную область II. Так, при подаче двух сигналов с частотами $f_1 = 3.448$ GHz и $f_2 = 3.455$ GHz, лежащими внутри переходной области, и мощностями, обеспечивающими наличие как трехволнового, так и четырехволнового взаимодействий, можно получить выходной спектр, изображенный на рис. 4, *a*. Этому спектру соответствует временная реализация, показанная на рис. 4, *b*.

Из рис. 4, *a* видно, что за счет нелинейности среды происходит перемножение частот и образование набора эквидистантных основных гармоник с интервалом $\Delta f_1 = 7$ MHz. Между гармониками основного набора присутствуют эквидистантные „промежуточные“ гармоники. Интервал между ближайшими гармониками из основного и вторичного набора равен $\Delta f_2 = 1/2\Delta f_1 = 3.5$ MHz.

Генерация „промежуточных“ гармоник, т.е. бифуркация удвоения периода, хорошо видна из рис. 4, *b*. Из этого рисунка ясно, что амплитуда нелинейных солитоноподобных импульсов промодулирована с периодом вдвое большим, чем период их следования. Как показывают измерения, „вторичная огибающая“ демонстрирует неустойчивое поведение, которое, возможно, обладает свойствами динамического хаоса. В пользу такого предположения свидетельствует слабая шумовая генерация, развивающаяся вблизи частоты накачки f_1 по мере увеличения ее мощности (см. затененную область на

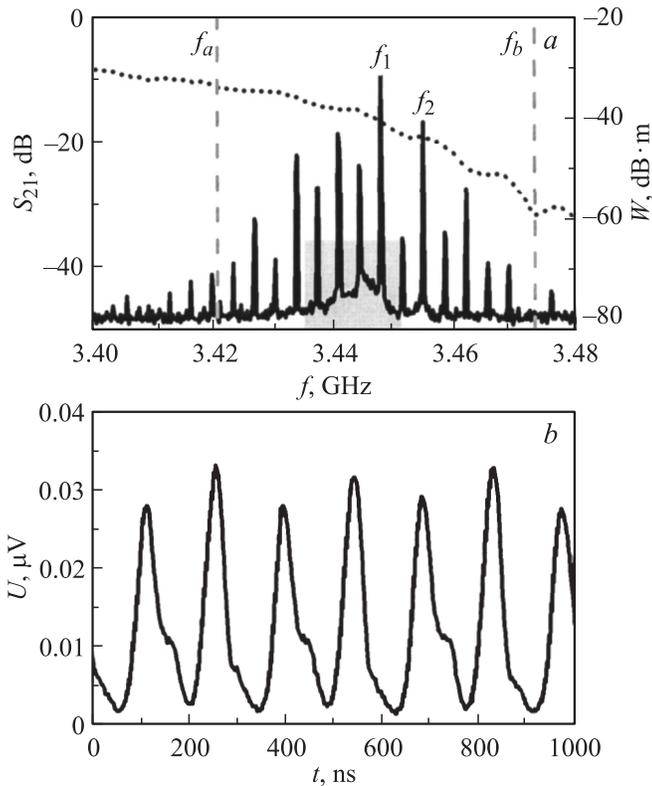


Рис. 4. Спектрограмма хаотических солитоноподобных импульсов (*a*) и соответствующая временная реализация (*b*). Параметры затравочных СВЧ-сигналов: $f_1 = 3.448$ GHz, $P_1 = 14$ dB и $f_2 = 3.455$ GHz, $P_2 = 16$ dB. Пунктирной линией показана АЧХ, полученная при мощности $P = 5$ dB. Серым прямоугольником отмечена слабая шумовая генерация в частотном интервале 3.435–3.451 GHz.

рис. 4, *a*). Однако это предположение требует самостоятельного изучения, которое выходит за рамки настоящей работы.

3. Обсуждение результатов

В настоящей работе для наблюдения как спонтанной модуляционной неустойчивости, так и вынужденного возбуждения солитонов огибающей в качестве несущих волн были использованы слабодисперсионные ПСВ. При этом эксперименты выполнялись на частотах, где одновременно разрешены как четырехволновые, так и трехволновые параметрические процессы.

Как известно, ПСВ вследствие невыполнения критерия Лайтхилла [18] являются устойчивыми для продольных возмущений. Следовательно, традиционная теория неустойчивости СВ, базирующая на нелинейном уравнении Шредингера, не дает ответа на вопрос о причинах возникновения неустойчивости в настоящих экспериментах. Одним из возможных путей теоретического объяснения описанной выше неустойчивости ПСВ является учет трехволнового взаимодействия при про-

ведении анализа неустойчивости СВ. Подобный анализ выходит за рамки настоящей работы и будет произведен в дальнейшем.

Возвращаясь к обсуждению явления генерации солитонов огибающей СВ (рис. 3), прежде всего отметим, что солитоны получены за счет индуцированной модуляционной неустойчивости. Такая неустойчивость развивается в спин-системе благодаря четырехволновому взаимодействию. При этом, как видно из рис. 3, *a*, часть спектра солитонов огибающей лежит в области, разрешенной для трехволнового взаимодействия. Поэтому можно говорить об образовании солитонов ПСВ в условиях одновременного существования четырехволнового и трехволнового взаимодействия, т.е. солитонов распадно-неустойчивых волн.

Хорошо известно, что индуцированная модуляционная неустойчивость позволяет получать солитоны, имеющие симметричный спектр относительно затравочных частот. При этом в спектре затравочные гармоники являются также и центральными. Характерной особенностью частотного спектра солитонов, изображенного на рис. 3, *a*, является несовпадение центральных гармоник с затравочными. Данный эффект объясняется неравномерным влиянием трехволнового распада на различные частотные гармоники спектра солитонов. Из сопоставления амплитудно-частотной характеристики и спектра, показанных на рис. 3, *a*, нетрудно сделать вывод, что наиболее интенсивные центральные гармоники подвергаются меньшему влиянию трехволнового распада, чем затравочные гармоники f_1 и f_2 . Таким образом, можно констатировать эффект смещения центральных частот спектра солитонов относительно затравочных в условиях нелинейного затухания, вызываемого параметрическими распадными процессами.

4. Заключение

Перечислим основные результаты настоящей работы.

1) Впервые обнаружена собственная модуляционная неустойчивость ПСВ, существующая в условиях трехволнового взаимодействия.

2) За счет механизма наведенной модуляционной неустойчивости впервые экспериментально получена последовательность светлых солитонов огибающей ПСВ со смещенными центральными частотами.

3) Показано, что внутри переходной частотной зоны, расположенной между зонами запрещенного и разрешенного трехволнового взаимодействия, возможно возникновение бифуркации удвоения периода. Такая бифуркация приводит к появлению „вторичной огибающей“ несущей волновой формы, где несущими возбуждениями являются солитоны огибающей спиновых волн.

Для однозначной интерпретации полученных экспериментальных результатов необходима разработка запороговой теории спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках.

Список литературы

- [1] Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, А.Н. Славин. *ЖЭТФ* **94**, 159 (1988).
- [2] M. Chen, M.A. Tsankov, J.M. Nash, C.E. Patton. *Phys. Rev. B* **49**, 12 773 (1994).
- [3] Yu.G. Rapoport, C.E. Zaspel, J.N. Mantha, V.V. Grimalsky. *Phys. Rev. B* **65**, 024 423 (2001).
- [4] R. Marcelli, S.A. Nikitov, Yu.A. Filimonov, A.A. Galishnikov, A.V. Kozhevnikov, G.M. Dudko. *IEEE Trans. Magn.* **42**, 1785 (2006).
- [5] Ю.К. Фетисов, С.Е. Паттон, В.Т. Сыногач. *Письма в ЖЭТФ* **83**, 579 (2006).
- [6] Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, А.Н. Славин. *Письма в ЖЭТФ* **10**, 936 (1984).
- [7] M. Wu, B.A. Kalinikos, C.E. Patton. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 237 202 (2005).
- [8] C.S. Tsai, D. Young, S.A. Nikitov. *J. Appl. Phys.* **84**, 1670 (1998).
- [9] В.Е. Демидов. *Письма в ЖЭТФ* **68**, 828 (1998).
- [10] J.W. Boyle, S.A. Nikitov, A.D. Boardman, K. Xie. *J. Magn. Magn. Mater.* **173**, 241 (1997).
- [11] А.О. Короткевич, С.А. Никитов. *ЖЭТФ* **116**, 2058 (1999).
- [12] X. Беннер, Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, М.П. Костылев. *Письма в ЖЭТФ* **72**, 306 (2000).
- [13] В.Е. Демидов, Н.Г. Ковшиков. *Письма в ЖЭТФ* **66**, 243 (1997).
- [14] M. Wu, B.A. Kalinikos, C.E. Patton. *Phys. Rev. Lett.* **93**, 157 207 (2004).
- [15] А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос, Н. Беннер. *Письма в ЖТФ* **34**, 11, 81 (2008).
- [16] M. Wu, B.A. Kalinikos, L.D. Carr, C.E. Patton. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 187 202 (2006).
- [17] M. Wu, C.E. Patton. *Phys. Rev. Lett.* **98**, 047 202 (2007).
- [18] M. Remoissenet. *Waves called solitons: concepts and experiments*. Springer-Verlag, Berlin (1996). 260 p.
- [19] V.E. Zakharov, L.A. Ostrovsky. *Physica D* **238**, 540 (2009).
- [20] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. *Магнитные колебания и волны*. Физматлит, М. (1994), 464 с.
- [21] В.Ф. Дмитриев, Б.А. Калиникос. *Изв. вузов. Физика* **31**, 24 (1988).
- [22] A.V. Ustinov, B.A. Kalinikos. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 252 510 (2007).
- [23] A. Prabhakar, D.D. Stancil. *J. Appl. Phys.* **85**, 4859 (1999).
- [24] Ю.К. Фетисов, К.Е. Паттон. *РЭ* **45**, 735 (2000).
- [25] B.A. Kalinikos, A.N. Slavin. *J. Phys. C: Solid State Phys.* **19**, 7013 (1986).