

НАБЛЮДЕНИЕ АВТОГЕНЕРАЦИИ ТЕМНЫХ СОЛИТОНОВ ОГИБАЮЩЕЙ СПИНОВЫХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

Б.А.Калиникос¹⁾, Н.Г.Ковшиков, К.Е.Паттон*²⁾

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

* Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA

Поступила в редакцию 7 июля 1998 г.

Осуществлены эксперименты, в результате которых получена автогенерация темных солитонов огибающей сверхвысокочастотных спиновых волн. Устойчивая автогенерация темных солитонов наблюдалась в замкнутой цепи, состоящей из касательно намагниченной пленки железо-иттриевого граната и усилителя сверхвысокочастотного сигнала.

PACS: 75.30.Ds, 76.50.+g, 85.70.Ge

Известно, что в нелинейных волноведущих диспергирующих средах возможно распространение двух типов солитонов огибающей – светлых солитонов и темных солитонов (см., например, [1]). Подавляющее большинство экспериментальных работ посвящено исследованию светлых солитонов. Лидирующее место здесь занимают световые солитоны в оптических волокнах [2], а также спин-волновые солитоны в ферромагнитных пленках (см., например, [3–6] и литературу в них). В то же время процессы генерации и распространения темных солитонов как световых (подробную информацию о которых можно найти в недавнем обзоре [7]), так и спин-волновых (нам известна единственная работа [8]), исследованы явно недостаточно.

В настоящей работе сообщается об экспериментальном наблюдении генерации темных солитонов огибающей сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн. Как и в [6]), где была получена генерация светлых солитонов, для экспериментов использовалась замкнутая цепь, состоящая из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) и усилителя СВЧ сигнала. Подчеркнем, что внешний СВЧ сигнал в исследуемую цепь не вводился. Иными словами, наблюдалась автогенерация темных СВЧ солитонов.

Предыдущие эксперименты, посвященные исследованию светлых солитонов огибающей как слабодисперсионных, так и сильнодисперсионных спиновых волн, нашли хорошее объяснение на основе модели нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Поэтому именно эта модель была использована при постановке описываемого эксперимента. Согласно модели НУШ,

$$i(\partial u / \partial t + V_g \partial u / \partial x) + (D/2) \partial^2 u / \partial x^2 - N|u|^2 u = 0, \quad (1)$$

темные солитоны огибающей могут наблюдаться в волноведущих средах, если дисперсионный и нелинейный коэффициенты несущей волны имеют одинаковые знаки.

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

²⁾ C.E.Patton

Этому требованию удовлетворяет квазиповерхностная спиновая волна, распространяющаяся в касательно намагниченных ферромагнитных пленках перпендикулярно полю подмагничивания. В случае монокристаллических пленок ЖИГ, имеющих свободные поверхностные спины, такая волна имеет монотонную дисперсию $\omega(k)$ в длинноволновой области спектра $kL \ll 1$ [9]. При этом ее дисперсионный коэффициент $D = \partial^2\omega/\partial k^2$ и нелинейный коэффициент $N = \partial\omega/\partial|u|^2$ отрицательны.

Для экспериментов использовались образцы в виде узких полос пленок ЖИГ ("волноводы" спиновых волн) шириной 1.5 мм. Такие волноводы вырезались из монокристаллических пленок ЖИГ толщиной $L = 5.2$ мкм, выращенных на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Возбуждение и прием спиновых волн осуществлялись с помощью обычной конструкции типа "линии задержки" [3, 4], имевшей короткозамкнутые возбуждающую и приемную микрополосковую антенны шириной по 50 мкм и длиной, равной ширине пленочного волновода. Расстояние между антеннами, фотолитографически сформированными на подвижных керамических подложках, могло регулироваться. Волноводы спиновых волн помещались на антенны сверху.

Описанная спин-волновая линия задержки соединялась с широкополосным усилителем СВЧ сигнала (рабочая полоса частот усилителя – более 300 МГц) и модулятором СВЧ сигнала в замкнутую цепь – "кольцо". Подчеркнем, что при всех использовавшихся уровнях СВЧ сигнала усилитель всегда работал в заведомо линейном режиме. Таким образом, нелинейные свойства кольца определялись нелинейностью спин-системы ферромагнитной пленки. Модулятор использовался для периодического "прерывания" кольца на короткие промежутки времени длительностью в единицы-десятки наносекунд. Имея в виду сопоставление с теорией, важно отметить, что использовавшийся модулятор не мог обеспечить полного прерывания кольца. Величина вводимого им ослабления относительно постоянного (максимального) уровня циркулирующего СВЧ сигнала составляла 41 дБ. Иными словами, согласно существующей терминологии [2, 7], модулятор обеспечивал режим генерации "серых" солитонов (gray solitons).

Для измерений использовалась установка аналогичная описанной в работе [6]. Эксперименты можно условно разделить на два этапа. На первом этапе исследовались волноведущие свойства кольца, в частности, измерялся спектр его резонансных частот при различных коэффициентах усиления циркулирующего СВЧ сигнала. Эти измерения выполнялись в отсутствие модуляции кольца. На втором этапе исследовались процессы генерации, когда модулятор обеспечивал модуляцию сигнала в кольце.

На рис.1а показана амплитудно-частотная характеристика кольца, снятая при коэффициенте усиления незначительно ниже порога возникновения СВЧ генерации в замкнутом кольце. Эта характеристика отражает резонансные свойства кольца в режиме почти полной компенсации потерь в нем. Волновые числа k_n резонансных спиновых волн могут быть найдены из условия $k_n d + \phi = 2\pi n$, где d – расстояние между антеннами спиновых волн, ϕ – набег фазы сигнала вне ферромагнитной пленки, n – целое число. Это резонансное условие позволяет определить дисперсионное уравнение $\omega(k)$ спиновых волн по экспериментальным пикам рис.1а. Такое уравнение было найдено в ходе работы как дисперсионное уравнение квазиповерхностной волны низшего типа [9]. Расчет по полученному дисперсионному уравнению дал следующие

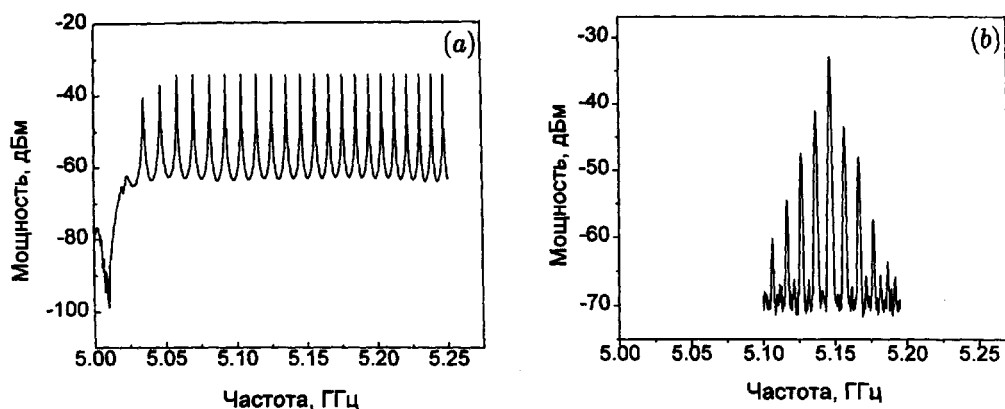


Рис.1. Амплитудно-частотная характеристика экспериментальной цепи (а) и частотный спектра автогенерируемой последовательности темных солитонов (б)

параметры спиновых волн: групповая скорость $V_g = 2.9 \cdot 10^6$ см/с, дисперсионный коэффициент $D = -3310$ см/рад·с и нелинейный коэффициент $N = -9.2 \cdot 10^9$ рад/с. (Значения параметров V_g , D и N даны для центральной несущей частоты, которая определена ниже.)

На втором этапе выполнялись эксперименты по автогенерации темных солитонов огибающей спиновых волн. Эксперименты проводились в режиме периодической модуляции кольца прямоугольными "темными" импульсами. При выполнении экспериментов одновременно измерялись огибающая генерируемого сигнала и ее фазовая характеристика, а также частотный спектр генерации. Для получения устойчивой автогенерации подбирались несколько условий: 1. Для обеспечения равенства времени циркуляции спин-волновых СВЧ импульсов по кольцу t_0 (здесь $t_0 = d/V_g + t_e$, где t_e – время распространения СВЧ импульса вне ферромагнитной пленки) периоду внешней модуляции подбиралось расстояние d между входной и выходной антеннами. 2. С целью компенсации потерь и достижения режима устойчивой автогенерации темных сверхвысокочастотных солитонов подбирался коэффициент усиления кольца. 3. Для получения временных профилей амплитуды и фазы огибающей СВЧ сигнала, соответствующих темным солитонам, подбиралась длительность τ_{in} внешних импульсов, подаваемых на модулятор.

Важно отметить, что в терминах частот первое условие соответствует совпадению спектральных частот генерируемой последовательности нелинейных импульсов с собственными частотами кольца. Осуществление именно этого условия для нелинейного режима распространения спин-волновых импульсов было одной из главных идей эксперимента.

Результаты, иллюстрирующие режим автогенерации темных солитонов, представлены на рис.2. Осциллограммы, показанные на этом рисунке, были записаны при подаче на модулятор периодической последовательности темных прямоугольных импульсов длительностью $\tau_{in} = 22$ нс с тактовой частотой 10 МГц. Измерения были выполнены для следующих параметров: расстояние между входной и выходной антеннами $d = 2.3$ мм, полное время циркуляции СВЧ импульсов по кольцу $t_0 = 100$ нс, время распространения импульса вне ферромагнитной пленки $t_e = 20$ нс. Модность

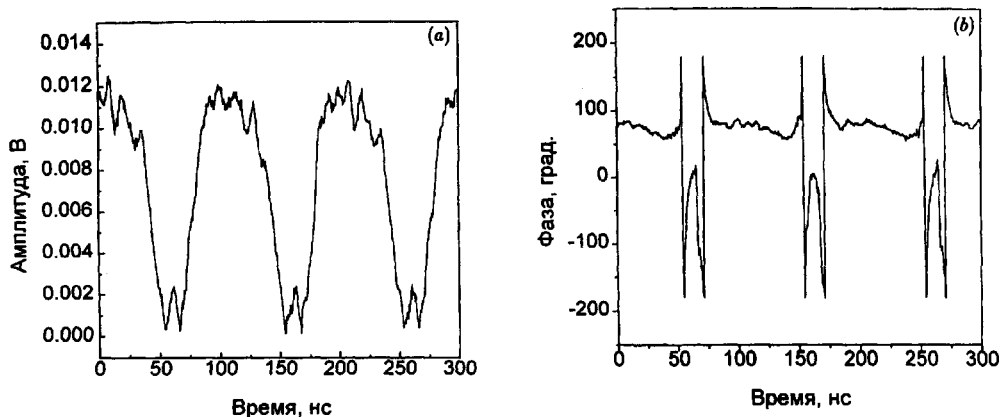


Рис.2. Временной профиль огибающей последовательности темных солитонов (а) и его фазовая характеристика (b)

спиновых волн на выходе линии задержки составляла 0.9 мВт. На рис.2а показана автогенерирующаяся последовательность СВЧ импульсов – темных солитонов огибающей спиновых волн, а на рис.2б – ее фазовая характеристика. (Измерения были произведены с помощью прибора НР70820А.) Частотный спектр этой последовательности, полученный с помощью анализатора спектра НР859Е, приведен на рис.1б. Как следует из результатов измерений, в описываемом случае автогенерация темных солитонов наблюдалась при нелинейной автосинхронизации более чем десяти мод кольца.

Отметим, что фазовая характеристика записывалась при подаче на НР70820А опорного сигнала с частотой 5146.6 МГц. Эта частота была взята в точности равной центральной несущей частоте автогенерирующейся последовательности темных солитонов (см. рис.1б). Фазовая характеристика рис.2б демонстрирует два резких изменения фазы несущего сверхвысокочастотного сигнала (на 180° каждый), происходящих "внутри" темных импульсов, что является прямым свидетельством их солитонного характера. Скорость распространения темных солитонов в пленке ЖИГ в пределах погрешности измерений, которые мы оцениваем в 10%, совпадает с групповой скоростью спиновых волн на центральной частоте.

Остановимся на описании данных рис.2 более подробно. Отметим, что каждый импульс автогенерируемой последовательности всегда получается с двумя минимумами на его профиле (на "дне" импульса) (см. рис.2а). Изменению амплитуды сигнала вблизи этих минимумов соответствуют быстрые изменения фазы: один на $+180^\circ$, а другой – на -180° . Такое поведение фазы сигнала говорит о том, что наблюдаемые нелинейные темные импульсы могут трактоваться как пары темных солитонов. (Отметим, что резкие броски фазы на 360° , которым соответствуют вертикальные линии на рис.2б, являются чисто приборным эффектом: они обусловлены особенностью функционирования прибора НР70820А и в рассмотрение приниматься не должны.) В целом два быстрых 180° -градусных изменений фазы, происходящие за время длительности темного импульса, компенсируют друг друга и результирующая фаза несущего СВЧ сигнала не изменяется. Этот экспериментальный факт

соответствует теоретическим представлениям о генерации пары темных солитонов из прямоугольного импульса [7, 10, 11].

Попутно отметим, что описанное поведение фазы пары темных солитонов принципиально отличается от случая светлых солитонов, где фаза несущего сигнала за время длительности спин-волнового солитона остается постоянной [6].

В заключение отметим, что полученная нелинейная импульсная спин-волновая автогенерация подтверждает теоретические представления о темных солитонах огибающей. С нашей точки зрения, как описанные выше эксперименты по автогенерации темных спин-волновых солитонов, так и приведенные в работе [6] эксперименты по автогенерации светлых спин-волновых солитонов могут быть распространены на разнообразные континуальные и дискретные волноведущие среды.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 96-02-19515, а также NATO Linkage Grant Program, Grant NTECH.LG 970538.

-
1. M.Remoissenet, *Waves Called Solitons: Concepts and Experiments*, Spinger-Verlag, Berlin, 1996.
 2. *Optical Solitons – Theory and Experiment*, Ed. J.R.Taylor, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
 3. Б.А.Калиникос, Н.Г.Ковшиков, А.Н.Славин, *ЖЭТФ* **94**, 159 (1983).
 4. M.Chen, M.A.Tsankov, J.M.Nash, and C.E.Patton, *Phys. Rev.* **B49**, 12773 (1994).
 5. R.Marcelli and P.DeGasperis, *IEEE Trans. Mag.* **30**, 26 (1994).
 6. B.A.Kalinikos, N.G.Kovshikov, and C.E.Patton, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4301 (1998).
 7. Yu.S.Kivshar and B.Luther-Davies, *Dark Optical Solitons*, Physics Reports, 1997.
 8. M.Chen, M.A.Tsankov, J.M.Nash, and C.E.Patton, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1707 (1993).
 9. B.A.Kalinikos, M.P.Kostylev, N.V.Kozhus, and A.N.Slavin, *J. Phys.: Condens. Matter* **2**, 9861 (1990).
 10. S.A.Gredeaskul and Yu.S.Kivshar, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 977 (1989).
 11. В.Ф.Дмитриев, Б.А.Калиникос, *Изв. ВУЗов, Физика* **31**, №11, 24 (1988).