

# Наблюдение солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидной слоистой структуре

А. Б. Устинов<sup>1)</sup>, А. В. Кондрашов, А. А. Никитин, М. А. Черкасский, Б. А. Калинин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. Ульянова (Ленина),  
197376 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 28 октября 2014 г.

Экспериментально наблюдались солитоны огибающей гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ). Солитоны формировались при автогенерации ЭСВ в активном кольцевом резонаторе, нелинейной диспергирующей волноведущей средой которого являлась мультиферроидная слоистая структура феррит–сегнетоэлектрик. Продемонстрировано влияние диэлектрической проницаемости структуры на нелинейные свойства ЭСВ. Экспериментально и теоретически обоснована гибридно-волновая природа солитонов.

DOI: 10.7868/S0370274X14240151

Одним из фундаментальных физических явлений, наблюдаемых в различных средах, являются солитоны огибающей волн различной природы. Это нелинейные локализованные волновые пакеты, формирующиеся при распространении импульсного возмущения в результате компенсации “размазывающего” влияния дисперсии “группирующим” действием нелинейности [1]. Солитоны огибающей могут также формироваться за счет развития собственной и индуцированной модуляционных неустойчивостей при непрерывном распространении в диспергирующей нелинейной среде волн конечной амплитуды [1, 2].

Солитоны огибающей были обнаружены и изучены в различных средах, таких, как оптические волокна, ферромагнитные пленки, электромагнитные линии передачи, конденсат Бозе–Эйнштейна и т.д. (см., например, [1, 3–5]). Исследования солитонных явлений активно ведутся и в настоящее время. К последним достижениям в этой области можно отнести наблюдение автогенерации солитонов в метаматериалах, изготовленных на основе искусственных линий передачи с отрицательной дисперсией [6].

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованию взаимодействий магнитных и электрических возбуждений в различных искусственных мультиферроидных структурах [7]. Магнитоэлектрическое взаимодействие в искусственных мультиферроиках может быть вызвано двумя эффектами. Один из них представляет собой сочетание пьезоэлектрических и магнестрикционных эффектов, сопровождающихся механической деформаци-

ей мультиферроидной структуры, во внешних электрическом и/или магнитном полях. Он хорошо проявляется в искусственных структурах, изготовленных из ферромагнетиков и пьезоэлектриков [8]. Другой эффект обусловлен электродинамическим взаимодействием спиновых и электромагнитных волн. Такой эффект может приводить к образованию гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ), которые распространяются в волноведущих мультиферроидных (феррит–сегнетоэлектрических) структурах [9].

Несмотря на то что исследование слоистых мультиферроидных структур началось сравнительно давно [10], нелинейные процессы в них изучались мало. В работе [11] была впервые изучена бистабильность нелинейных колебаний намагниченности мультиферроидного резонатора, изготовленного из планарной композитной структуры ферромагнетик–пьезоэлектрик. Статья [12] посвящена исследованию преобразования частот за счет нелинейного магнитоэлектрического взаимодействия в таких структурах. В [13] теоретически изучена комбинированная волновая нелинейность ЭСВ, распространяющихся в мультиферроидной среде, а в [14] теоретически предсказано формирование светлых и темных солитонов огибающей ЭСВ в слоистой структуре феррит–сегнетоэлектрик.

Обзор литературы приводит к выводу о том, что солитоны огибающей, подробно исследованные в различных волноведущих средах, в мультиферроиках изучены явно недостаточно. Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование солитонов огибающей электромагнитно-

<sup>1)</sup>e-mail: ustinov-rus@mail.ru

спиновых волн, которые формируются в искусственной мультиферроидной среде, а именно в слоистой волноведущей структуре феррит–сегнетоэлектрик.

Известно, что одним из способов возбуждения солитонов огибающей является их автогенерация [6, 15–17]. Поэтому для проведения экспериментов нами было изготовлено активное кольцо обычного вида, в котором планарная мультиферроидная структура служила нелинейной диспергирующей средой.

Эксперименты проводились при комнатной температуре. Мультиферроидная структура состояла из слоев феррита (1) и сегнетоэлектрика (2) (см. рис. 1). Ферритовый слой был изготовлен из эпитаксиальной

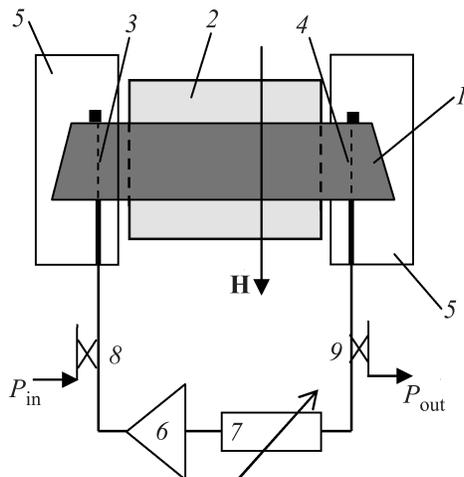


Рис. 1. Схема эксперимента

пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 5.7 мкм, шириной 2 мм и длиной 40 мм. Сегнетоэлектрический слой представлял собой пластину титаната бария-стронция (БСТ) толщиной 500 мкм, имеющую размеры в плоскости  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ . Две микрополосковые антенны (3 и 4), служившие для возбуждения и приема бегущих волн, располагались на расстоянии 6.7 мм. Антенны были сформированы методом фотолитографии на поликоровых подложках 5. Приемная антенна соединялась с возбуждающей антенной цепью обратной связи, состоявшей из широкополосного сверхвысокочастотного (СВЧ) усилителя 6 и переменного аттенюатора 7, контролирующего полный коэффициент усиления  $G$  в кольце.

При комнатной температуре керамика БСТ, использовавшаяся в экспериментах, находилась в параэлектрической фазе. Она имела изотропную диэлектрическую проницаемость. Поэтому спонтанная поляризация в ней отсутствовала. Слоистая структура намагничивалась в ее плоскости перпендикуляр-

но направлению распространения волн. Такая ориентация статического магнитного поля обеспечивала условия для распространения квазиповерхностных ЭСВ [18].

Рассмотрим распространение волновых СВЧ-возбуждений в кольце (рис. 1). Электромагнитная волна, прошедшая цепь обратной связи, преобразуется в поверхностную спиновую волну при помощи входной микрополосковой антенны 3. Эта спиновая волна проходит короткое расстояние в пленке ЖИГ и входит в мультиферроидную структуру. На границе структуры спиновая волна преобразуется в квазиповерхностную ЭСВ, которая затем распространяется в структуре ЖИГ–БСТ. Достигнув конца мультиферроидной структуры, ЭСВ превращается обратно в спиновую волну, которая принимается выходной микрополосковой антенной 4 и преобразуется ею в электромагнитную волну. Последняя, распространяясь по цепи обратной связи, усиливается и поступает на входную микрополосковую антенну 3.

В описанной кольцевой схеме электромагнитная цепь обратной связи играет роль активной части кольцевого резонатора, нелинейность которого определяется в основном нелинейностью электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в мультиферроидной структуре. Заметим, что СВЧ-усилитель имел частотную полосу (2–8 ГГц) шире полосы пропускания мультиферроидной структуры. Заметим также, что время распространения несущего СВЧ-сигнала в мультиферроидной структуре было гораздо больше времени его распространения в цепи обратной связи.

Направленные ответвители 8 и 9 с коэффициентами связи  $-10$  дБ на входе и выходе волноведущей структуры использовались для ввода и вывода тестового электромагнитного СВЧ-сигнала, необходимого для измерения характеристик кольца ниже порога автогенерации ЭСВ. Для наблюдения за формой сигналов, генерируемых выше этого порога, небольшая часть СВЧ-мощности выводилась из кольца через выходной направленный ответвитель 9.

Для управления дисперсией ЭСВ за счет изменения диэлектрической проницаемости пластины БСТ на обе ее поверхности были нанесены хромовые электроды. Толщина металлического электрода, находившегося между пленкой ЖИГ и пластиной БСТ, была намного меньше, чем глубина скин-слоя для СВЧ-сигнала рабочей гигагерцовой частоты. Она составляла приблизительно 50 нм. Такая толщина обеспечивала эффективную гибридизацию спиновых волн, локализованных в основном в пленке ЖИГ, с элек-

тромагнитными волнами, локализованными в основном в пластине БСТ.

В соответствии с теоретической моделью [19] собственные моды активного кольцевого резонатора, построенного на структуре феррит-сегнетоэлектрик, имеют частоты, определяемые условием квантования фазы:

$$k_{\text{sew}}(f)d_{\text{sew}} + k_{\text{sw}}(f)d_{\text{sw}} + \varphi_e = 2\pi n, \quad (1)$$

где  $k_{\text{sew}}$  и  $k_{\text{sw}}$  – волновые числа электромагнитно-спиновых волн в структуре ЖИГ-БСТ и спиновых волн в пленке ЖИГ,  $f$  – частота волн,  $d_{\text{sew}}$  и  $d_{\text{sw}}$  – длины распространения волн,  $\varphi_e$  – фаза СВЧ-сигнала, набегающая в цепи обратной связи кольца,  $n$  – целое число.

В отличие от активного кольцевого резонатора на магнитной пленке кольцевой резонатор на основе мультиферроидной структуры обладает свойством двойного управления волновыми параметрами. Это реализуется благодаря зависимости групповой скорости  $v_{\text{sew}}$  и волнового числа  $k_{\text{sew}}$  электромагнитно-спиновых волн как от магнитной, так и от диэлектрической проницаемости мультиферроидного волновода. Таким образом, собственные моды кольца изменяют свои частоты при изменении магнитного ( $H$ ) и электрического ( $E$ ) полей смещения. При этом частотное разделение между модами тоже изменяется.

На рис. 2 приведен коэффициент передачи кольца, измеренный чуть ниже порога автогенерации при

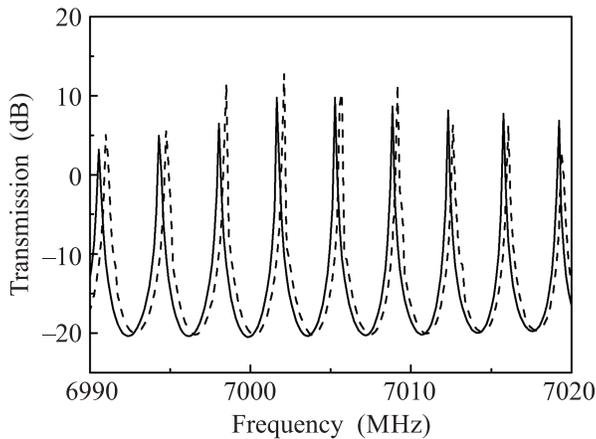


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика мультиферроидного кольцевого резонатора при полях смещения  $E = 0$  (сплошная линия) и  $12 \text{ кВ/см}$  (штриховая линия)

$H = 1750 \text{ Э}$ . Для измерений на вход кольца от СВЧ-генератора подавался сигнал низкого уровня мощности величиной  $-20 \text{ дБм}$ . Из рисунка видно, что ко-

эффициент передачи демонстрирует серию узких пиков, соответствующих собственным модам кольцевого резонатора. Экспериментальные данные отчетливо показывают сдвиг частот собственных мод кольца в результате уменьшения диэлектрической проницаемости слоя БСТ при приложении к нему электрического поля. В соответствии с теорией [19] резонансные частоты смещаются больше при малых  $k_{\text{esw}}$  (которые соответствуют более низким частотам) и почти не изменяются при больших  $k_{\text{esw}}$  (которые соответствуют более высоким частотам). В частности, собственные моды кольца на частотах около  $7.0 \text{ ГГц}$  сдвигаются на величину в несколько сотен кГц.

Эксперименты показывают, что величина потерь при распространении ЭСВ в мультиферроидной структуре является сравнительно слабой функцией приложенного поля смещения  $E$ . В итоге для разных значений  $E$  автогенерация монохроматической волны в кольце возникает при разных значениях результирующего коэффициента усиления  $G$ . В данных экспериментах было условно принято, что автогенерация для поля  $E = 12 \text{ кВ/см}$  начинается при  $G = 0 \text{ дБ}$ . В связи с этим при отсутствии поля смещения автогенерация возникала при  $G = 0.2 \text{ дБ}$ . Формирование периодических последовательностей солитонов начиналось при  $G = 0.25 \text{ дБ}$  в отсутствие поля смещения и при  $G = 0.05 \text{ дБ}$  в поле смещения  $E = 12 \text{ кВ/см}$ .

Как и ожидалось для нелинейной диспергирующей среды с нелинейностью типа “отталкивание” [20], в экспериментах наблюдалось образование темных солитонов огибающей ЭСВ. На верхних панелях рис. 3 приведены типичные результаты экспериментов, демонстрирующие автогенерацию периодических последовательностей солитонов. Экспериментально измеренные последовательности показаны кружками. На том же рисунке сплошными линиями приведены результаты численного моделирования, которые будут обсуждаться ниже.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3а, были получены для коэффициента усиления  $G = 0.3 \text{ дБ}$  в отсутствие электрического поля смещения. При таких условиях происходило формирование темных солитонов длительностью  $77 \text{ нс}$  с периодом следования  $273 \text{ нс}$  и несущей частотой  $7003.40 \text{ МГц}$ .

На рис. 3б показаны результаты экспериментов, проведенных при  $G = 0.1 \text{ дБ}$  и  $E = 12 \text{ кВ/см}$ . В данном случае за счет уменьшения групповой скорости ЭСВ период следования солитонов увеличился до  $282 \text{ нс}$ . При этом длительность солитонов уменьшилась до  $67 \text{ нс}$ . Таким образом, эксперименталь-

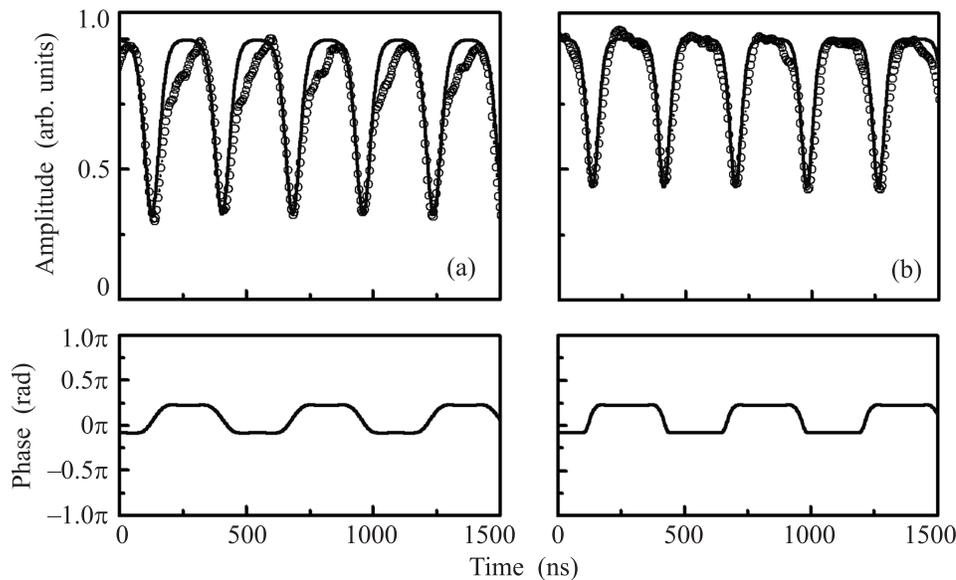


Рис. 3. Сверху – экспериментальные и теоретические профили темных солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн, автогенерируемых при  $E = 0$  (a) и 12 кВ/см (b). Снизу – соответствующие фазовые профили

ные результаты демонстрируют возможность управления свойствами солитонов огибающей ЭСВ электрическим полем.

Для подтверждения солитонной природы наблюдавшихся нелинейных волновых образований было выполнено численное моделирование. Исходя из физики образования и циркуляции солитонов в активном кольце их можно отнести к диссипативным солитонам [21]. Поэтому в качестве модельного уравнения, описывающего нелинейную динамику электромагнитно-спиновых волн в кольцевом резонаторе, было выбрано уравнение Гинзбурга–Ландау:

$$i \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + V_g \frac{\partial u}{\partial x} + (\omega_r - \alpha)u \right] + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (N - i\nu)|u|^2 u = 0, \quad (2)$$

где  $u$  – медленно меняющаяся амплитуда сигнала, циркулирующего в кольце,  $V_g$ ,  $D$  и  $N$  – групповая скорость, дисперсионный и нелинейный коэффициенты модели соответственно,  $\omega_r$  и  $\nu$  – линейная и нелинейная частоты релаксации электромагнитно-спиновых волн, а параметр  $\alpha$  отражает процесс усиления.

Определение закона дисперсии ЭСВ для экспериментальной структуры производилось с использованием формулы (1). Величины  $k_{\text{sew}}(f)$  и  $k_{\text{sw}}(f)$  были рассчитаны по теориям для ЭСВ [18] и для спиновых волн [5] соответственно. Зависимость диэлектрической проницаемости пластины БСТ от поля  $E$  описывалась квадратичной функцией  $\varepsilon(E) = 2700 - 4.86E^2$ , коэффициенты которой были определены из условия совпадения теоретических и экспериментальных час-

тот собственных мод кольцевого резонатора с помощью метода наименьших квадратов.

Напомним, что результаты численного моделирования процесса автогенерации солитонов показаны на рис. 3 сплошными линиями. Моделирование проводилось для эффективных значений коэффициентов  $V_g$  и  $D$ , определенных из эксперимента. Для  $E = 0$  и 12 кВ/см значения  $V_g$  были равны  $2.45 \cdot 10^4$  и  $2.38 \cdot 10^4$  м/с, а значения  $D$  составляли  $-0.686$  и  $-0.551$  м<sup>2</sup>/(рад·с). Значения  $N$  были рассчитаны и составили  $1.167 \cdot 10^{10}$  и  $1.169 \cdot 10^{10}$  рад/с соответственно. Подгоночными параметрами являлись  $\nu$  и разность  $\omega_r - \alpha$ . Теоретические результаты хорошо описывают эксперимент при  $\nu = 10^9$  рад/с и  $\omega_r - \alpha = 1800$  рад/с. Такие значения являются вполне разумными. О солитонной природе полученных волновых образований позволяет также говорить наличие быстрого изменения фазы огибающей в минимумах амплитуды полученных последовательностей.

Таким образом, результаты расчетов подтверждают экспериментальные данные и свидетельствуют в пользу гибридно-волновой природы темных солитонов огибающей, автогенерируемых в активном кольцевом резонаторе, построенном на основе мультиферроидной структуры. Более подробные результаты численного моделирования и их сопоставление с экспериментальными данными будут опубликованы позднее.

Работа частично поддержана грантом РФФИ # 13-02-12414 офи\_м2, грантом Российского научного фонда # 14-12-01296, грантом Президента Рос-

сийской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ # НШ-4109.2014.2, грантом государственной финансовой поддержки ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), а также госзаданиями Минобрнауки РФ.

1. В. И. Карпман, *Нелинейные волны в диспергирующих средах*, Наука, М. (1973).
2. V. E. Zakharov and L. A. Ostrovsky, *Physika D* **238**, 540 (2009).
3. M. Remoissenet, *Waves Called Solitons: Concepts and experiments*, Springer-Verlag, Berlin (1999).
4. Ю. С. Кившарь, Г. П. Агравал, *Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам*, пер. с англ. под ред. Н. Н. Розанова, Физматлит, М. (2005), 648 с.
5. D. D. Stancil and A. Prabhakar, *Spin waves: Theory and applications*, Springer, N.Y. (2009).
6. A. B. Kozyrev, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 084105 (2014).
7. C. A. F. Vaz, *J. Phys.: Cond. Matt.* **24**, 333201 (2012).
8. S. Shastry, G. Srinivasan, M. I. Bichurin, V. M. Petrov, and A. S. Tatarenko, *Phys. Rev. B* **70**, 064416 (2004).
9. V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, and P. Edenhofer, *J. Appl. Phys.* **91**, 10007 (2002).
10. В. Б. Анфиногенов, Т. Н. Вербицкая, П. Е. Зильберман, Г. Т. Казаков, В. В. Тихонов, *Письма в ЖТФ* **12**, 454 (1986).
11. А. Б. Устинов, Ю. К. Фетисов, С. В. Лебедев, and G. Srinivasan, *Письма в ЖТФ* **36**, 41 (2010).
12. L. Y. Fetisov, Y. K. Fetisov, G. Sreenivasulu, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.* **113**, 116101 (2013).
13. М. А. Черкасский, Б. А. Калиникос, *Письма в ЖТФ* **39**, 87 (2013).
14. М. А. Черкасский, Б. А. Калиникос, *Письма в ЖЭТФ* **97**, 707 (2013).
15. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2827 (1997).
16. Е. Н. Бегинин, С. В. Гришин, Ю. П. Шараевский, *Письма в ЖЭТФ* **88**, 743 (2008).
17. M. Wu, *Nonlinear Spin Waves in Magnetic Film Feedback Rings*, in *Solid State Physics*, Academic Press, Burlington (2011), v. 62.
18. V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, S. F. Karmanenko, A. A. Semenov, and P. Edenhofer, *IEEE Trans. MTT* **51**, 2090 (2003).
19. А. А. Никитин, А. Б. Устинов, А. А. Семенов, Б. А. Калиникос, *ЖТФ* **82**, 98 (2012).
20. C. Sulem and P. L. Sulem, *The Nonlinear Schrödinger Equation: Self-Focusing and Wave Collapse*, in *Applied Mathematical Sciences*, Springer-Verlag, N.Y. (1999), v. 139.
21. *Dissipative Solitons: From Optics to Biology and Medicine*, ed. by N. Akhmediev and A. Ankiewicz, Springer, Berlin–Heidelberg (2008).