

Генерация многосолитонных комплексов, состоящих из темных спин-волновых солитонов, в активном кольцевом резонаторе с управляемой дисперсией и конкурирующими нелинейностями

А.С. Бир, С.В. Гришин

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе приводятся результаты экспериментального исследования режимов генерации многосолитонных комплексов в активном кольцевом резонаторе с касательно намагниченным Г-образным магннным волноводом. Показано, что управление дисперсией магннстатических волн в таком волноводе совместно с конкуренцией трех- и четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий обуславливают формирование многосолитонных комплексов, состоящих из темных солитонов огибающей спиновых волн с длительностью < 1 нс.

Ключевые слова: многосолитонные комплексы, спиновые волны, нерегулярный магннный волновод

1. Введение

Многосолитонные комплексы являются связанными состояниями светлых и темных солитонов, которые активно изучаются в последние два десятилетия в нелинейной оптике [1-3], конденсации Бозе-Эйнштейна [4] и спин-волновой электронике [5,6]. Эти структуры обладают свойствами, присущими двухатомной молекуле вещества [2], и являются перспективными для применения в качестве расширенных информационных битов в системах оптической связи [3]. Светлые солитоны, содержащиеся в многосолитонных комплексах, представляют собой импульсы или волновые пучки, распространяющиеся над шумовым фоном. Амплитудный профиль светлого солитона имеет колоколообразную форму, внутри которого фаза не меняется во времени [7]. С другой стороны, темный солитон формируется в виде узкого провала на амплитудном фоне [7]. Фаза внутри такого провала может претерпеть скачок на π .

В нелинейной оптике теоретически и экспериментально изучены следующие типы многосолитонных комплексов: 1) солитонная молекула - связанное состояние двух светлых и одного темного временных солитонов [2]; 2) солитонный кристалл, состоящий из нескольких десятков солитонных молекул [3,8]; и 3) солитонный кластер, содержащий вращающиеся связанные состояния светлых и темных пространственных солитонов [9]. Все упомянутые выше связанные состояния образуются либо за счет управляемой дисперсии, когда оптические волокна с положительной и отрицательной дисперсией одновременно используются в цепи обратной связи лазера с пассивной синхронизацией мод [3], либо за счет конкурирующих нелинейностей, когда оптическая среда поддерживает конкуренцию трех- и четырехволновых нелинейных взаимодействий [9]. Во всех случаях темные солитоны всегда образуют связанные состояния со светлыми солитонами. Нам известна только одна теоретическая работа, в которой рассматривалось распространение цепочки темных солитонов через оптическую среду [10].

В спин-волновой электронике большая часть теоретических и экспериментальных работ была посвящена фундаментальным светлым и темным спин-волновым

солитонам огибающей [11]. Такие структуры формировались в регулярных магннных волноводах или в активных кольцевых резонаторах, содержащих эти волноводы. В последнем случае периодические последовательности светлых или темных спин-волновых солитонов генерировались из одиночного импульса, циркулирующего по кольцу. Фазовый сдвиг между соседними импульсами последовательности равен 2π , а их длительность составляла несколько десятков наносекунд [12, 13]. Впервые генерация многосолитонных комплексов, содержащих только светлые спин-волновые солитоны, была получена в неавтономном кольцевом резонаторе [5]. Автономная генерация темных солитонных пар была продемонстрирована в работе [14]. Первое экспериментальное наблюдение связанных состояний светлых и темных спин-волновых солитонов было получено на активном кольцевом резонаторе с пассивной синхронизацией мод, в котором поддерживалась конкуренция между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями [6]. Фазовый сдвиг между соседними импульсами многосолитонного комплекса отличался от 2π и зависел от количества циркулирующих в кольце солитонов. Однако многосолитонные комплексы, состоящие только из темных спин-волновых солитонов, здесь не наблюдались.

В настоящей работе демонстрируется автогенерация многосолитонных комплексов, содержащих только из темных спин-волновых солитонов. Для получения локализованных во времени связанных состояний в цепи обратной связи кольцевого резонатора используется нерегулярный Г-образный магннный волновод. Как показано в [15], Г-образный магнноволновод обеспечивает преобразование ширинных мод обратной объемной магнитостатической волны (ОМСВ), обладающей отрицательной дисперсией, в ширинные моды поверхностной МСВ (ПМСВ), обладающей положительной дисперсией. Кроме того, он поддерживает как трех-, так и четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия.

2. Экспериментальный макет

Представленный на рисунке1 Г-образный магннный волновод изготовлен из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 10 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс, выращенной на подложке из гадолиний галлиевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм с использованием метода жидкофазной эпитаксии. Нерегулярный волновод имеет «входное плечо» и «выходное плечо», над которыми размещаются входной и выходной микрополосковые преобразователи. Оба преобразователя сформированы на поликоровой подложке толщиной 500 мкм, имеют ширину $w_1 = 30$ мкм и длину $l_1 = 1$ мм. Они используются для возбуждения и приема МСВ, распространяющихся в Г-образном волноводе. Входное и выходное плечи волновода имеют одинаковую ширину $w = 1$ мм и одинаковую длину $L = 4$ мм. Угол между ними равен $\pi/2$. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 приложено касательно к поверхности волновода и направлено перпендикулярно ко входному преобразователю. Такая конфигурация поля поддерживает распространение ОМСВ во входном плече и распространение ПМСВ в выходном плече волновода. В цепи обратной связи, помимо Г-образного волновода, используется каскад из двух транзисторных усилителей, один из которых работает в режиме насыщения выходной мощности. Уровень мощности сигнала на входе Г-образного волновода регулируется с помощью переменного аттенюатора. Генерируемый в кольце СВЧ-сигнал через направленные ответвители поступает на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки.

На рисунке2 приведены спектр мощности, временные реализации и фазовый портрет генерируемых многосолитонных комплексов при коэффициенте усиления

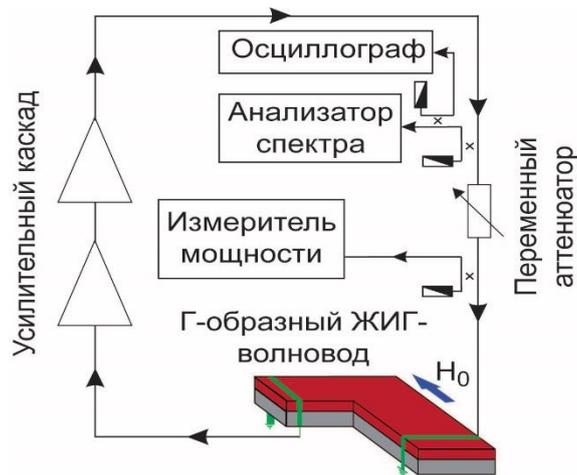


Рисунок 1. Схематическое изображение генератора многосолитонных комплексов.

кольца $G=9.85$ дБ (где $G=K-A$, K – коэффициент усиления усилительного каскада, A – общие потери сигнала в кольце). В этом случае средняя мощность сигнала на входе Г-образного магнетонного волновода имеет значение $P=+18$ дБмВт, при котором на ПМСВ развиваются как трех-, так и четырехволновые процессы взаимодействия спиновых волн. Выходной усилитель усилительного каскада работает в режиме глубокого насыщения выходной мощности. Спектр сигнала, представленный на рисунке 2а, является широкополосным и содержит сетку частот, которая генерируется вследствие четырехволновых процессов взаимодействия на частотах собственных мод кольцевого резонатора. При этом на частоте каждой кольцевой моды спектр сигнала является «зашумленным» вследствие развития трехволновых процессов взаимодействия спиновых волн, что обуславливает «замазанную» структуру фазового портрета (см. рисунок 2в). Это приводит к тому, что во временной области (см. рисунок 2б) на фоне амплитудного пьедестала формируются провалы длительностью $T_{d1} \approx 200$ нс, в которые вложены провалы меньшей длительности. При внимательном рассмотрении представленной на рисунке 2б временной реализации на ее амплитудном фоне можно выделить четыре характерных широких провала с $T_{d1} \approx 200$ нс, которые повторяются с квазипериодом $T_{T0} \approx 2$ мкс. Между указанными провалами устанавливаются квазипериоды следования $T_{T1} \approx 410$ нс, $T_{T2} \approx 540$ нс и $T_{T3} \approx 400$ нс, которые отмечены на рисунке 2д. Данные квазипериоды соответствуют частотам автомодуляции спиновых волн $f_{am0} \approx 500$ кГц, $f_{am1} \approx 2.4$ МГц, $f_{am2} \approx 1.8$ МГц, $f_{am3} \approx 2.5$ МГц, возникающим в спектре сигнала за счет трехволновых параметрических спин-волновых взаимодействий. В тоже самое время, как следует из результатов, представленных на рисунках 2г,е, внутри каждого широкого провала наблюдается более тонкая структура в виде провалов гораздо меньшей длительности, количество которых может достигать ~ 10 . Амплитудный профиль центрального провала из этой последовательности имеет наибольшую глубину, что соответствует наибольшему изменению фазы внутри него. Фазовый сдвиг между соседними провалами тонкой структуры отличен от 2π . Как следует из результатов, представленных на рисунках 2ж,з, длительность узких провалов имеет величину $T_{d2} \approx 600-800$ пс, а их период следования $T_{T2} \approx 15-16$ нс определяет частотный интервал между модами спектральной сетки частот.

Таким образом, из представленных на рисунке 2 результатов следует, при выбранном значении усиления кольца генерируется квазипериодическая последовательность многосолитонных комплексов, состоящих из параметрических темных солитонов (провалы большой длительности), внутри которых вложены

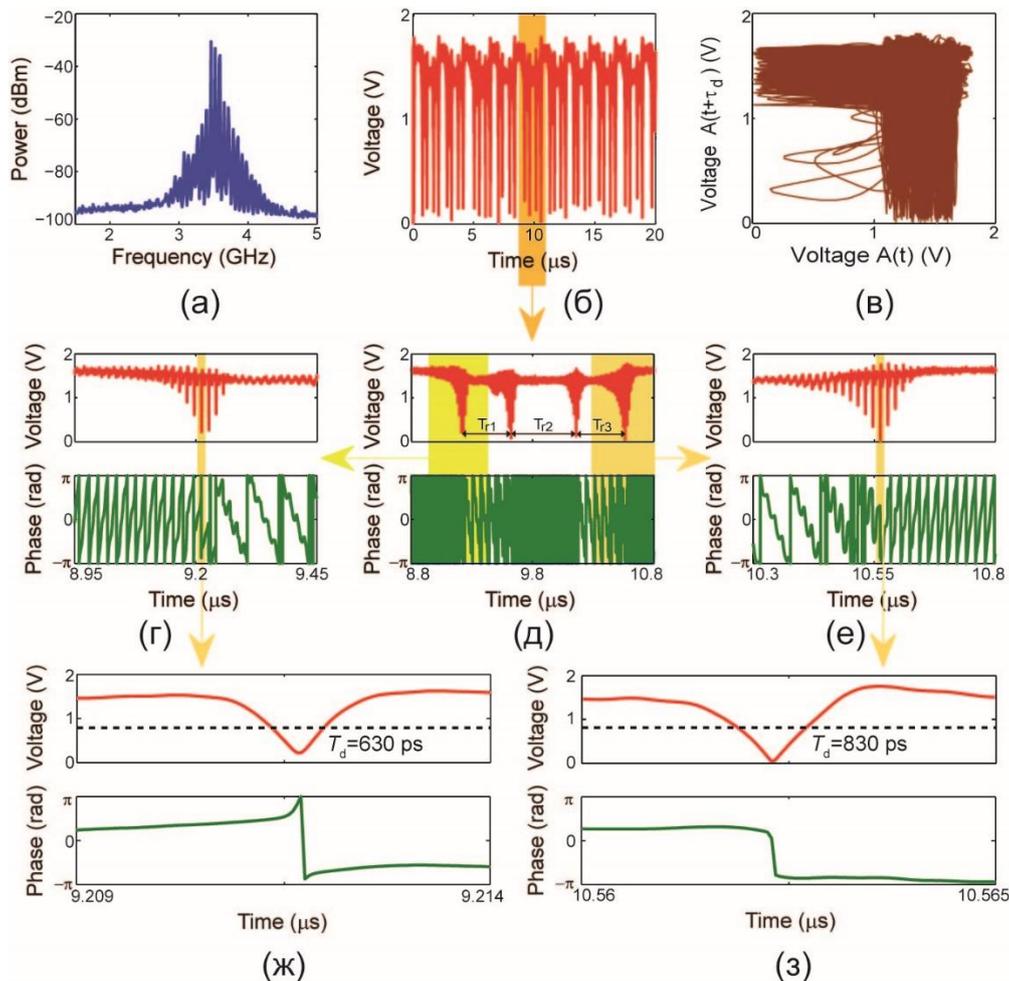


Рисунок 2. Спектр мощности (а), временные реализации (б,г-з) и фазовый портрет последовательности многосолитонных комплексов, состоящих из темных спин-волновых солитонов.

четырёхволновые солитоны ультракороткой длительности. Дальнейшее увеличение усиления кольца приводит к разрушению квазипериодической последовательности многосолитонных комплексов и к генерации солитонного газа в виде хаотических темных спин-волновых солитонов ультракороткой длительности. Необходимо отметить, что генерация квазипериодических последовательностей многосолитонных комплексов наблюдается и тогда, когда во входном плече Г-образного магннного волновода возбуждается ПМСВ. Однако, в этом случае уровень мощности на входе волновода на 16 дБ меньше, чем в случае возбуждения во входном плече волновода ООМСВ. Данный факт указывает на то, что формирование темных солитонов происходит на ПМСВ, что подтверждается полученными ранее экспериментальными результатами по наблюдению фундаментальных темных солитонов огибающей спиновых волн [13]. Кроме того, использование в кольцевой схеме вместо Г-образного магннного волновода обычного (регулярного) магннного волновода в конфигурации ПМСВ приводит к генерации солитонного газа в виде хаотических темных спин-волновых солитонов ультракороткой длительности. Однако устойчивой генерации квазипериодической последовательности многосолитонных комплексов нам зарегистрировать здесь не удалось. По всей видимости, данный факт обусловлен отсутствием в регулярном волноводе трансформации ширинных мод ООМСВ в ПМСВ, которое присуще Г-образному волноводу.

3. Заключение

В заключении отметим, что полученные экспериментальные результаты представляют определенный научный интерес, связанный как с фундаментальными исследованиями многосолитонных комплексов в магнонике, так и с прикладными исследованиями, направленными на разработку источников ультракоротких импульсов для систем связи микроволнового диапазона частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00075).

Список литературы

1. Akhmediev, N. (Ed) Dissipative solitons: from optics to biology and medicine / N. Akhmediev, A. Ankiewicz – Berlin: “Springer-Verlag”, 2008 - 479 с.
2. Stratmann, M. Experimental observation of temporal soliton molecules / M. Stratmann, T. Pagel, and F. Mitschke // *Physical Review Letters* - 2005. - Vol. 95. – P. 143902.
3. Grelu, P. Dissipative solitons for mode-locked lasers / P. Grelu, and N. Akhmediev // *Nature Photonics*. - 2012. - Vol. 6. - P. 84-92.
4. Yan, D. Multiple dark-bright solitons in atomic Bose-Einstein condensates / D. Yan, J.J. Chang, C. Hamner [et al.] // *Physical Review A* - 2011. - Vol. 84. – P. 053630.
5. Demokritov, S.O. Experimental observation of symmetry-breaking nonlinear modes in an active ring / S.O. Demokritov, A.A. Serga, V.E. Demidov, [et al.] // *Nature* - 2003. - Vol. 26. - P. 159-162.
6. Grishin, S.V. Self-generation of chaotic dissipative multisoliton complexes supported by competing nonlinear spin-wave interactions / S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, O.I. Moskalenko, [et al.] // *Physical Review E* - 2018. - Vol. 98. - P. 022209.
7. Kivshar, Yu. Optical solitons: from fibers to photonic crystals / Yu. Kivshar, G. Agrawal – Amsterdam: “Academic Press”, 2003 - 540 с.
8. Cole, D.C. Soliton crystals in Kerr resonators / D.C. Cole, E.S. Lamb, P. DelHaye, [et al.] // *Nature Photonics*. - 2017. - Vol. 11. - P. 671-676.
9. Kartashov, Y.V. Robust Propagation of two-color soliton clusters supported by competing nonlinearities / Y.V. Kartashov, L.C. Crasovan, D. Mihalache, and L. Torner // *Physical Review Letters* – 2002- Vol. 89. – P. 273902.
10. Stratmann, M. Chains of temporal dark solitons in dispersion-managed fiber / M. Stratmann, F. Mitschke // *Physical Review E*. – 2005 – Vol. 72. – P. 066616.
11. Wu, M. Nonlinear spin waves in magnetic film feedback rings / M. Wu // *Solid State Physics* – 2010- Vol. 62. - P. 163-224.
12. Kalinikos, B.A. Self-Generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films / B.A. Kalinikos, N.G. Kovshikov, C.E. Patton // *Physical Review Letters* – 1998 – Vol. 80. - P. 4301-4304.
13. Kalinikos, B.A. Self-generation of fundamental dark solitons in magnetic films / B.A. Kalinikos, M.M. Scott, C.E. Patton // *Physical Review Letters* – 2000 - Vol. 84. - P. 4697-4700.
14. Калиникос, Б.А. Наблюдение автогенерации темных солитонов огибающей спиновых волн в ферромагнитных пленках / Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, К.Е. Паттон // *Письма в ЖЭТФ* – 1998 – Т. 68. - № 3. – С. 229-233.
15. Sadovnikov, A.V. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide / A.V. Sadovnikov, C.S. Davies, V.V. Kruglyak, [et al.] // *Physical Review B* – 2017 – Vol. 96. P. 060401(R).