Письма в ЖЭТФ, том 110, вып. 5, с. 348 – 353

Генерация темных многосолитонных комплексов в магнонном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями

А. С. Бир[1)], *С. В. Гришин*[1)]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 11 июля 2019 г.
После переработки 2 августа 2019 г.
Принята к публикации 2 августа 2019 г.

Получена генерация многосолитонных комплексов в активном кольцевом резонаторе с Г-образным магнонным микроволноводом и насыщающимся усилителем. Показано, что нерегулярный микроволновод одновременно поддерживает как распространение магнитостатических спиновых волн с разной дисперсией (нормальной и аномальной), так и конкуренцию между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями. Генерируемые многосолитонные комплексы состоят из квазипериодических последовательностей двух темных параметрических импульсов, содержащих "солитонные поезда", которые формируются из трех темных четырехволновых солитонов огибающей ультракороткой длительности. Установлено, что квазипериодические последовательности многосолитонных комплексов, генерируемых активным кольцевым резонатором с регулярным магнонным микроволноводом, состоят из одного темного параметрического импульса, который также содержит три темных четырехволновых солитона. Однако, в отличие от предыдущего случая, четырехволновые солитоны, имея большую длительность, не формируют "солитонных поездов" внутри темного параметрического импульса.

DOI: 10.1134/S0370274X19170120

Многосолитонные комплексы представляют собой локализованные в пространстве или во времени связанные состояния нескольких солитонов, которые активно исследуются в последние два десятилетия в нелинейной оптике [1–5], конденсации Бозе–Эйнштейна [6] и спин-волновой электронике [7–11]. В оптике многосолитонные комплексы формируются в кольцевых лазерных резонаторах и в нелинейных оптических средах либо за счет управления дисперсией [2, 3], либо за счет конкурирующих нелинейностей [5, 4]. Среди многосолитонных комплексов, состоящих из двумерных пространственных солитонов (солитонные кластеры), выделяют солитоны кольцеобразной формы, относительная фаза между которыми зависит от их количества и определяется на основе следующего выражения [4]:

$$\theta = 2\pi n/m, \tag{1}$$

где m – количество солитонов в кластере, а n – полный поворот фазы вокруг кольца. Выражение (1) применимо также и к многосолитонным комплексам, которые генерируются в активных кольцевых резонаторах с магнонными волноводами [11].

В спин-волновой электронике генерация солитонов огибающей, до настоящего времени, исследовалась в активных кольцевых резонаторах с регулярными магнонными волноводами, в которых развивались, в основном, только четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия [12]. В таких автоколебательных системах, работающих как в автономном [7, 8, 10], так и в неавтономном [9] режимах генерации, были получены "солитонные поезда", в формировании которых принимало участие от двух до шести светлых [8, 9] или темных [7, 10] четырехволновых солитонов огибающей. Недавно были получены многосолитонные комплексы, которые генерировались в активном кольцевом резонаторе с пассивной синхронизацией мод [11]. В отличие от предыдущих работ, используемый здесь регулярный магнонный волновод поддерживал конкуренцию между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями, которая приводила к генерации светлых параметрических импульсов, содержащих внутри себя три четырехволновых светлых солитона огибающей. Однако во всех перечисленных выше работах длительность четырехволновых солитонов была порядка десятков наносекунд.

[1)]e-mail: bir.evstegneeva.1997@gmail.com; sergrsh@yandex.ru

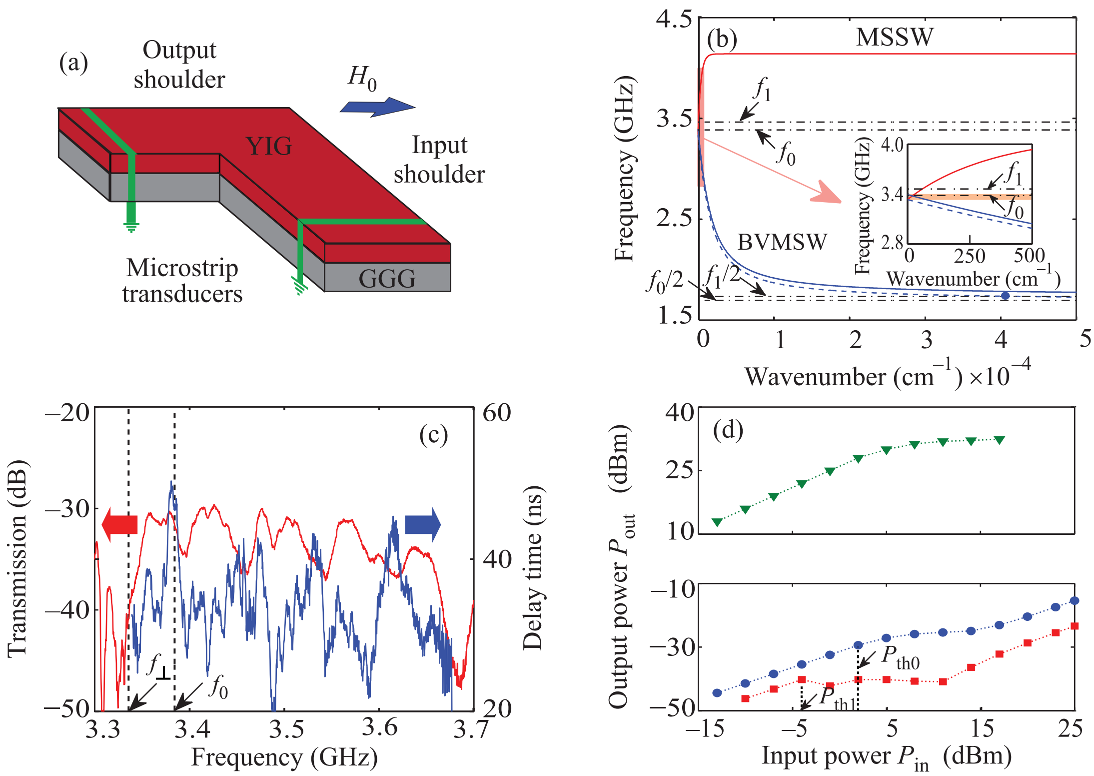

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Схематическое изображение Г-образного микроволновода. (b) – Представлены дисперсионные характеристики ПМСВ и ООМСВ, распространяющихся в свободной ферромагнитной пленке. (c) – Приведены зависимости коэффициента передачи и времени задержки от частоты Г-образного микроволновода, измеренные при $P_{\rm in} = -30$ дБмВт. (d) – Показаны зависимости $P_{\rm out}(P_{\rm in})$ Г-образного микроволновода, измеренные на частотах $f_0 = 3384$ МГц (кружки) и $f_1 = 3462$ МГц (квадратики). Здесь же приведена зависимость $P_{\rm out}(P_{\rm in})$ выходного усилителя (треугольники), измеренная на частоте f_0

В нелинейной оптике для уменьшения длительности солитонов используются отрезки световодов с разной дисперсией – нормальной и аномальной [3]. Формирующиеся в этом случае солитоны называют солитонами с управлением дисперсией (УД) или "УД-солитонами" [1]. В магнонике уникальным элементом, в котором одновременно могут распространяться магнитостатические волны (МСВ) с разными видами волноводной дисперсии (нормальной и аномальной), является Г-образный магнонный микроволновод [13]. Такой нерегулярный волновод может использоваться в активном кольцевом резонаторе для управления дисперсией МСВ и одновременно поддерживать конкуренцию между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями.

В настоящем сообщении демонстрируется генерация многосолитонных комплексов, состоящих из темных параметрических импульсов, которые содержат "солитонные поезда", формирующиеся из нескольких темных четырехволновых солитонов ультракороткой длительности. В отличие от работ [7, 10], полученные темные многосолитонные комплексы генерируются в условиях управления дисперсией МСВ, конкуренции между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями и насыщения выходной мощности усилителя.

На рисунке 1a приведено схематическое изображение Г-образного магнонного микроволновода. Он изготовлен из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 13 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс, выращенной на подложке гадолиний-гелиевого граната толщиной 500 мкм с использованием метода жидкофазной эпитаксии. Г-образный микроволновод имеет "входное плечо" и "выходное плечо", над которыми размещаются входной и выходной микрополосковые преобразователи. Преобразователи сформированы на поликоровой подложке толщиной 500 мкм, имеют ширину 30 мкм и длину 1 мм. Они используются для возбуждения и приема МСВ, распространяющихся в магнонном микроволноводе. Оба плеча Г-образного микроволновода имеют одинаковую ширину 950 мкм и одинаковую длину 4 мм. Угол между ними равен $\pi/2$. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 620$ Э приложено касательно к поверхности волновода и направлено параллельно входному микрополосковому преобразователю. Такая конфигурация поля поддерживает распространение поверхностных МСВ (ПМСВ) во входном плече волновода и обратных объемных МСВ (ООМСВ) в его выходном плече.

На основе проведенного микромагнитного моделирования было установлено, что во входном плече Г-образного микроволновода внутреннее магнитное поле равно $H_{\text{int}1}=H_0+H_d = 603$ Э (где $H_d = -17$ Э – поле размагничивания), а в его выходном плече – $H_{\text{int}2} = H_0$. На рисунке 1b приведены дисперсионные характеристики ПМСВ и ООМСВ, рассчитанные для двух значений внутреннего магнитного поля $H_{\text{int}1}$ и $H_{\text{int}2}$ с использованием дисперсионных уравнений, полученных для свободной ферромагнитной пленки [14, 15]. Из представленных на рис. 1b результатов расчета следует, что ПМСВ и ООМСВ могут существовать одновременно в некоторой области частот (выделена цветом), ширина которой зависит от разности значений частот отсечек ПМСВ и ООМСВ. Как было показано в работах [13, 16], МСВ, распространяясь в Т- или Г-образном магнонном микроволноводе, конвертируют свою дисперсию из прямой в обратную и наоборот в указанной области частот. Предполагая, что дисперсия кольцевого резонатора определяется только волноводной дисперсией МСВ, а длина распространения МСВ с разной дисперсией одинакова, по аналогии с оптикой [1, 2], можно ввести среднюю дисперсию на пути распространения солитона как $D_{av} = (D_+ + D_-)/2$ (где $D_+ > 0$ – дисперсия групповой скорости (ДГС) ООМСВ, а $D_- < 0$ – ДГС ПМСВ [17]). Если $D_{av} \ll D_\pm$, то в этом случае можно говорить об управлении дисперсией в системе [1].

Как следует из результатов, представленных на рис. 1b, частота $f_0 = 3384$ МГц находится в выделенной цветом частотой области, в которой происходит преобразование высшей ширинной моды ПМСВ в низшую ширинную моду ООМСВ [13, 16]. Данная частота соответствует частоте генерации монохроматического сигнала в кольце, на которой трехволновые процессы распада запрещены. Это обусловлено тем, что частота $f_0/2$ располагается ниже спектра ООМСВ (пунктирная кривая), параметрически возбуждаемых ПМСВ при $H_{\text{int}1} = 603$ Э. В то же самое время, частота $f_1 = 3462$ МГц, находясь вне выделенной цветом области, принадлежит области частот, в которой происходит преобразование высшей ширинной моды ПМСВ в высшие ширинные моды ООМСВ [13, 16]. На этой частоте трехволновые процессы распада разрешены, так как частота $f_1/2$ лежит в спектре параметрически возбуждаемых ООМСВ (пересечение штрихпунктирной линии, соответствующей частоте $f_1/2$, с пунктирной линией, соответствующей дисперсионной характеристике ООМСВ, отмечено кружком). При $H_{\text{int}2} = 620$ Э частоты $f_0/2$ и $f_1/2$ находятся вне спектра ООМСВ (сплошная кривая). Таким образом, во входном плече Г-образного микроволновода могут развиваться как трех-, так и четырехволновые нелинейные спинволновые взаимодействия.

На рисунке 1c приведены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и зависимость времени задержки от частоты Г-образного микроволновода. Из полученных результатов следует, что на АЧХ волновода присутствуют пики, которые образуются вследствие трансформации ширинных мод ПМСВ в ширинные моды ООМСВ [13]. Пики, находящиеся ниже частоты ферромагнитного резонанса $f_\perp = \sqrt{f_{H_{\text{int}1}}(f_{H_{\text{int}1}} + f_M)}$ (где $f_{H_{\text{int}1}} = \gamma H_{\text{int}1}$, γ – гиромагнитная постоянная, $f_M = 4\pi\gamma M_0$), формируются на высших ширинных модах ПМСВ, а пики, находящиеся выше этой частоты, – на низших ширинных модах ООМСВ. Вблизи частоты f_0 зависимость времени задержки от частоты характеризуется экстремумом в виде максимума, где $D_{av} = 0$. Таким образом, на частотах $\sim f_0$ управление дисперсией в кольце будет наиболее ярко выраженным.

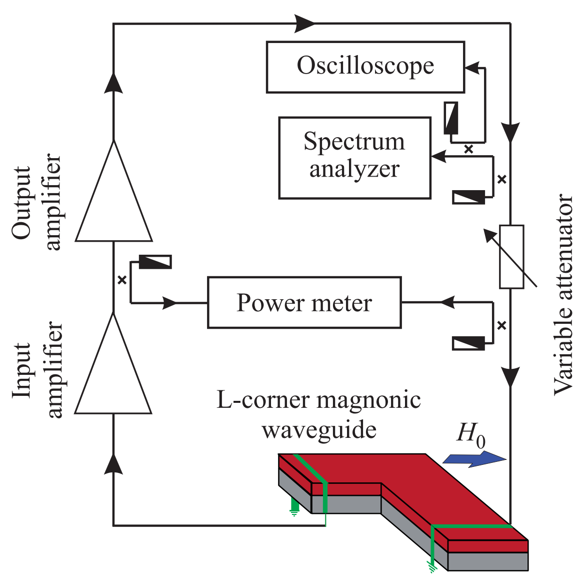

Рис. 2. (Цветной онлайн) Блок-схема экспериментального макета активного кольцевого резонатора с нерегулярным магнонным мироволноводом

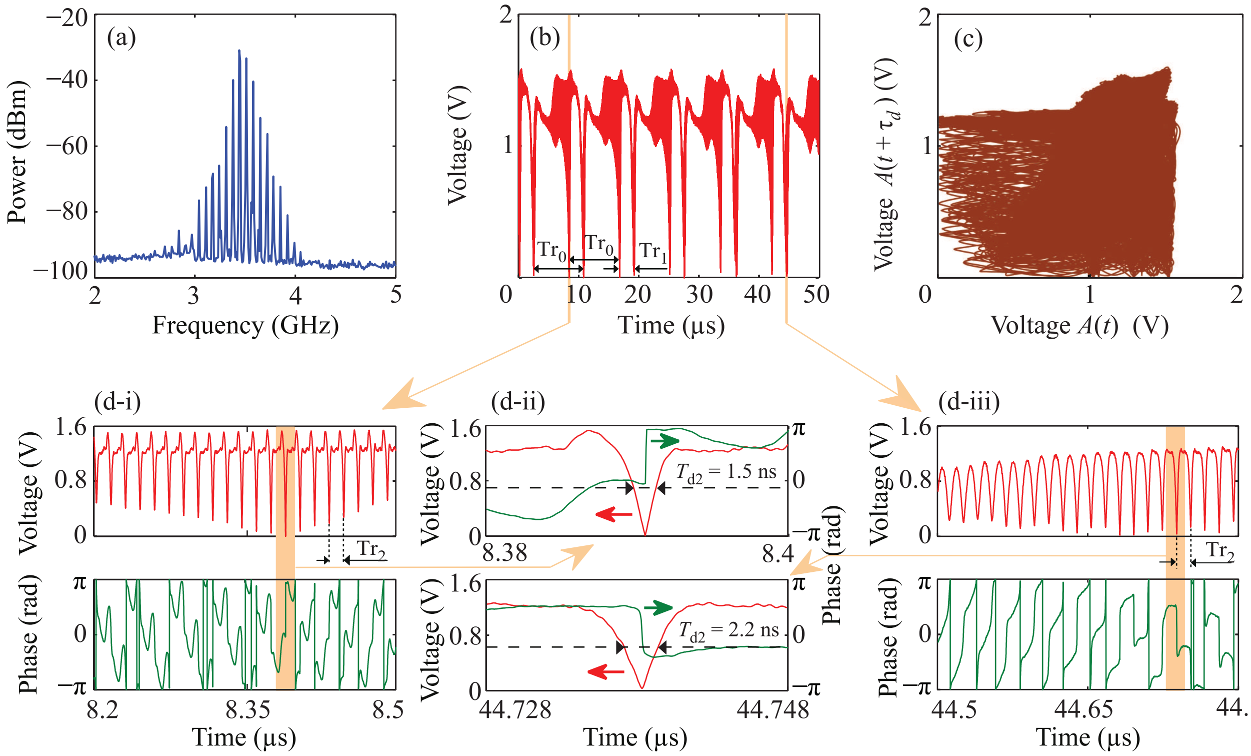

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектр мощности СВЧ-сигнала (a), временные реализации (b), (d-i), (d-ii), (d-iii) и проекции фазового портрета на плоскость параметров $(a(t)a(t+\tau))$ огибающей (c), полученные на кольцевом резонаторе с нерегулярным микроволноводом при $G = 5$ дБ. На (c) τ – временной сдвиг, равный 100 нс

На рисунке 1d приведены две зависимости $P_{\rm out}(P_{\rm in})$ Г-образного микроволновода, измеренные на частотах f_0 и f_1. Видно, что обе зависимости являются нелинейными, причем на частоте f_0 пороговая мощность, при которой зависимость $P_{\rm out}(P_{\rm in})$ отклоняется от линейной, на 6 дБ больше, чем на частоте f_1. Пороговый уровень мощности $P_{th1} = -4$ дБмВт на частоте f_1 соответствует трехволновым процессам распада ПМСВ, а пороговый уровень мощности $P_{th0} = +2$ дБмВт на частоте f_0 соответствует четырехволновым процессам взаимодействия.

Экспериментальные исследования режимов генерации многосолитонных комплексов проводились на лабораторном макете активного кольцевого резонатора, схематическое изображение которого представлено на рис. 2. Основными элементами кольцевого резонатора являются касательно намагниченный Г-образный магнонный микроволновод, каскад твердотельных усилителей и переменный аттенюатор. Входной усилитель каскада работает в режиме линейного усиления сигнала, а выходной усилитель – в режиме глубокого насыщения выходной мощности, который достигается при входной мощности более 10 мВт (см. рис. 1d). Уровни мощности сигнала на входах двух нелинейных элементов контролируются с помощью двухканального измерителя мощности N1914A. Управление мощностью сигнала на входе магнонного микроволновода осуществляется с помощью переменного аттенюатора. Большая часть мощности сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала с выхода усилительного каскада возвращается обратно в кольцо, а другая (меньшая) часть через микрополосковые противонаправленные ответвители поступает на входы анализатора спектра E4408B и осциллографа реального времени Infiniium DSO81004B (Agilent Technologies). Осциллограф характеризуется полосой пропускания 10 ГГц и используется для анализа временных рядов.

На рисунке 3 приведены спектральные и временные характеристики многосолитонных комплексов, генерируемых при коэффициенте усиления кольца $G = 5$ 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 магнонного микроволновода достигает значения $P_{av} = +2$ дБмВт, при котором в его входном плече развиваются как трех-, так и четырехволновые нелинейные взаимодействия. Спектр СВЧ-сигнала (см. рис. 3a) является широко-

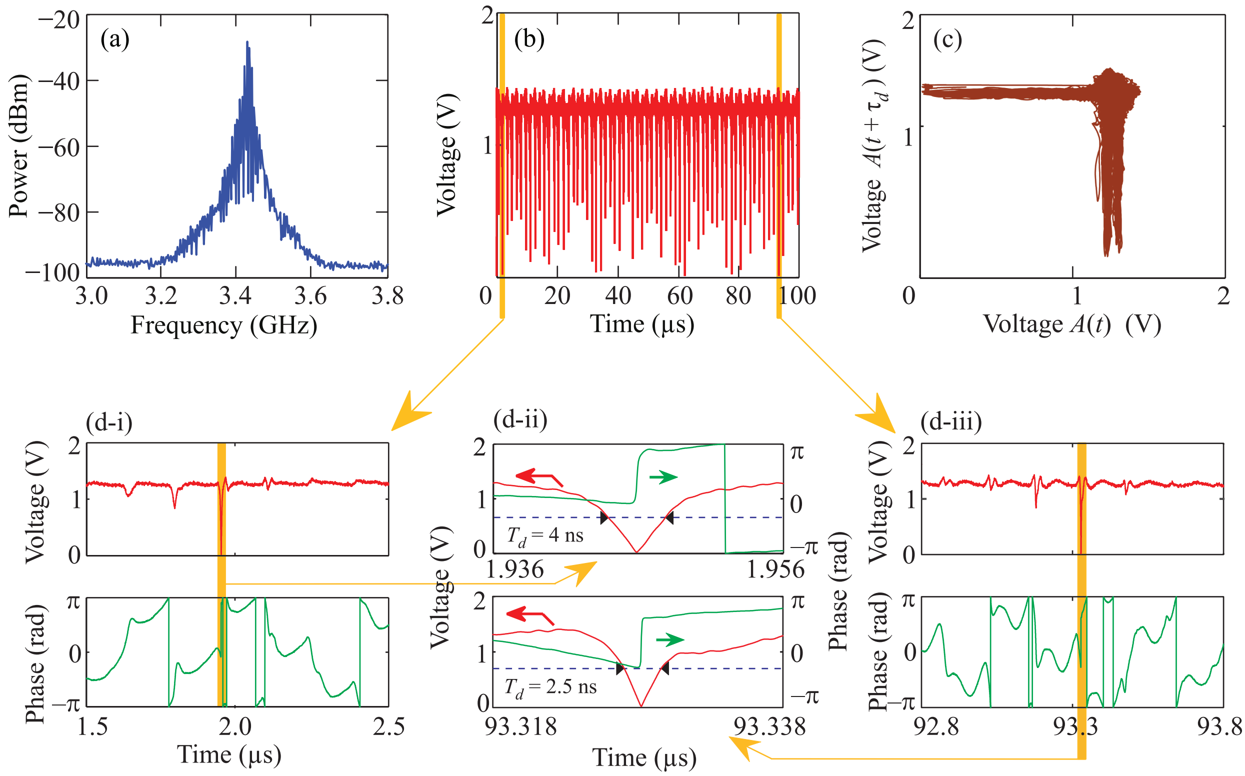

Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектр мощности СВЧ-сигнала (a), временные реализации (b), (d-i), (d-ii), (d-iii) и проекции фазового портрета на плоскость параметров $(a(t)a(t+\tau))$ (c) огибающей, полученные на кольцевом резонаторе с регулярным микроволноводом при $G = 4$ дБ. На (c) τ – временной сдвиг, равный 100 нс

полосным (~ 1 ГГц) и содержит гребенку частот, которая генерируется на частотах, находящихся вблизи пиков АЧХ Г-образного микроволновода.

Во временной области (см. рис. 3b) на амплитудном пьедестале формируются широкие провалы длительностью $T_{d1} \cong 530$ нс, среди которых можно выделить два характерных провала, обладающие квазипериодом следования $T_{r0} \cong 8$ мкс и отстоящие друг от друга на $T_{r1} \cong 2$ мкс. Данные квазипериоды соответствуют частотам автомодуляции спиновых волн $f_{am0} \cong 125$ кГц и $f_{am1} \cong 500$ кГц, возникающим в спектре сигнала за счет трехволновых взаимодействий. Длительность широких провалов определяет ширину спектра $\Delta f_1 \cong 2$ МГц на каждой частоте гребенки, в котором присутствуют частоты f_{am0} и f_{am1}.

Как следует из результатов, представленных на рис. 3d-i и 3d-iii, каждый из двух характерных широких провалов обладает тонкой структурой, состоящей из провалов меньшей длительности, которые формируются в результате четырехволновых взаимодействий. Относительная фаза между соседними провалами тонкой структуры $\sim 2\pi/3$, что указывает на циркуляцию в кольце трех импульсов, которые, повторяясь через 2π, формируют "поезда", состоящие не менее, чем из 20 импульсов. Так как относительная фаза между соседними провалами тонкой структуры не равна в точности $2\pi/3$, то генерируемые импульсы являются некогерентными. Кроме того, сильно "замазанная" структура фазового портрета (см. рис. 3c) указывает на то, что многосолитонные комплексы могут быть хаотическими.

Тонкая структура, изображенная на рис. 3d-i, состоит из связанных состояний в виде узких провалов и пиков, в то время как тонкая структура, изображенная на рис. 3d-iii, содержит только узкие провалы. Длительность этих провалов ($T_{d2} = 2.2$ нс) практически в 1.5 раза больше длительности провалов, изображенных на рис. 3d-i ($T_{d2} = 1.5$ нс). Для обеих тонких структур период следования узких провалов является $T_{r2} \cong 14$ нс. Он определяет частотный интервал $\Delta f_2 \cong 70$ МГц между основными частотами гребенки, появление которых обусловлено нелинейными взаимодействиями спиновых волн и нелинейностью выходного усилителя каскада. В этом случае время задержки сигнала в кольце τ_d определяется как $\tau_d = m \cdot T_{r2}$ и равно 42 нс. Как следует из результатов, представленных на рис. 1c, данная величина практически совпадает с величиной времени задержки Г-образного микроволновода на частоте f_0. Помимо этого, в спектре сигнала содержатся также частоты $\Delta f_2/2$ и $\Delta f_2/3$, возникающие в результате одновременной циркуляции в кольце двух и трех узких импульсов. На рис. 3d-ii приведены увеличенные фрагменты амплитудных и фазовых профилей центральных провалов обеих тонких структур, которые качественно соответствуют амплитудному и фазовому профилю темного солитона огибающей [18].

Таким образом, при выбранном значении усиления кольца генерируется квазипериодическая последовательность многосолитонных комплексов. Каждый многосолитонный комплекс состоит из двух широких провалов, формирующихся за счет трехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий (темные параметрические импульсы). Внутри этих провалов находятся "солитонные поезда", состоящие из трех импульсов ультракороткой длительности, которые формируются в результате четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий. Дальнейшее увеличение усиления кольца приводит к разрушению квазипериодической последовательности многосолитонных комплексов и к генерации их хаотических последовательностей.

На рисунке 4, для сравнения, приведены результаты, полученные на активном кольцевом резонаторе с регулярным магнонным микроволноводом в конфигурации ПМСВ. В этом случае квазипериодическая последовательность многосолитонных комплексов генерируется при $H_0 = 615$ Э и $P_{av} = +13.3$ дБмВт. Многосолитонные комплексы состоят из одиночных темных параметрических импульсов, внутри которых так же находятся три темных четырехволновых солитона огибающей. Однако, в отличие от предыдущей схемы, данные солитоны не формируют здесь "солитонных поездов", а длительность самых узких из них практически в 1.5 раза больше длительности темных солитонов, формирующихся в кольцевом автогенераторе на основе Г-образного волновода.

В заключении отметим, что полученные многосолитонные комплексы, состоящие из темных солитонов огибающей ультракороткой длительности, могут представлять интерес для систем связи и передачи информации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 19-79-20121).

1. *Dissipative solitons*, ed. by N. N. Akhmediev and A. Ankiewicz, Springer-Verlag, Berlin (2005).
2. M. Stratmann, T. Pagel, and F. Mitschke, Phys. Rev. Lett. **95**, 143902 (2005).
3. P. Grelu and N. Akhmediev, Nature Phot. **6**, 84 (2012).
4. A. S. Desyatnikov and Y. S. Kivshar, Phys. Rev. Lett. **88**, 053901 (2002).
5. Y. V. Kartashov, L. C. Crasovan, D. Mihalache, and L. Torner, Phys. Rev. Lett. **89**, 273902 (2002).
6. D. Yan, J. J. Chang, C. Hamner, P. G. Kevrekidis, P. Engels, V. Achilleos, D. J. Frantzeskakis, R. Carretero-González, and P. Schmelcher, Phys. Rev. A **84**, 053630 (2011).
7. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, JETP Lett. **68**, 243 (1998).
8. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, M. P. Kostylev, and H. Benner, JETP Lett. **76** 253 (2002).
9. S. O. Demokritov, A. A. Serga, V. E. Demidov, B. Hillebrands, M. P. Kostylev, and B. A. Kalinikos, Nature. **26**, 159 (2003).
10. A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, V. E. Demidov, and S. O. Demokritov, Phys. Rev. B. **80**, 052405 (2009).
11. S. V. Grishin, B. S. Dmitriev, O. I. Moskalenko, V. N. Skorokhodov, and Yu. P. Sharaevskii, Phys. Rev. E **98**, 022209 (2018).
12. M. Wu, Solid State Phys. **62**, 163 (2010).
13. A. V. Sadovnikov, C. S. Davies, V. V. Kruglyak, D. V. Romanenko, S. V. Grishin, E. N. Beginin, Y. P. Sharaevskii, and S. A. Nikitov, Phys. Rev. B **96**, 060401(R) (2017).
14. R. W. Damon and J. R. Eshbach, J. Appl. Phys. **19**, 308 (1961).
15. B. A. Kalinikos and A. N. Slavin, J. Phys. C: Solid State Phys. **19**, 7013 (1986).
16. A. V. Sadovnikov, S. Davies, S. Grishin, V. Kruglyak, D. Romanenko, Y. Sharaevskii, and S. Nikitov, Appl. Phys. Lett. **106**, 192406 (2015).
17. А. К. Звездин, А. Ф. Попков, ЖЭТФ **84**, 606 (1983).
18. 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).