

01.5;06.3

## Управление хаотическими темными диссипативными солитонами огибающей в активном кольцевом резонаторе на основе магнетонного кристалла с динамическим дефектом

© А.С. Бир<sup>1</sup>, Д.В. Романенко<sup>1</sup>, В.Н. Скороходов<sup>1</sup>, С.А. Никитов<sup>1,2</sup>, С.В. Гришин<sup>1</sup><sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия  
E-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 19 января 2023 г.

В окончательной редакции 30 января 2023 г.

Принято к публикации 30 января 2023 г.

Осуществлено динамическое управление хаотическими темными диссипативными солитонами огибающей в микроволновом активном кольцевом резонаторе, содержащем два нелинейных элемента: одномерный магнетонный кристалл (МК) с динамическим линейным дефектом и транзисторный усилитель. Диссипативные солитоны огибающей формируются на длинноволновой поверхностной магнитостатической волне, распространяющейся в МК и параметрически распадающейся на коротковолновые спиновые волны. Постоянный электрический ток, протекающий по медному проводнику, создает динамический линейный дефект вдоль продольной оси МК и управляет скважностью генерируемых параметрических импульсов только на частоте запрещенной частоты МК.

**Ключевые слова:** диссипативные солитоны, магнетонные кристаллы, спиновые волны.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.07.54918.19509

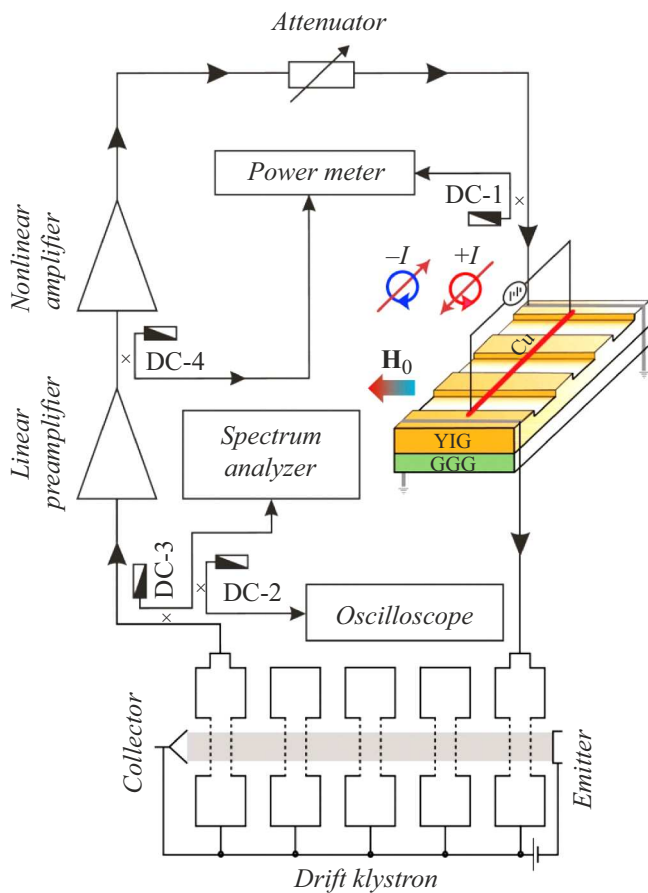
В последние годы как у нас в стране, так и за рубежом большой интерес вызывают исследования, направленные на изучение волновых и колебательных процессов в ферромагнитных микро- и наноструктурах [1–3]. Под воздействием идей спинтроники управление этими процессами с помощью постоянного тока дало толчок развитию нового научного направления, получившего название магнетонной спинтроники [4]. Известно, что динамическое управление квантами спиновых волн (СВ), магнонами, может осуществляться либо в результате их взаимодействия со спин-поляризованным током, который наводится в металлических и неметаллических ферромагнетиках за счет спин-Холл-эффекта [5,6], либо в результате изменения величины внутреннего магнитного поля ферромагнетика за счет внешнего постоянного электрического тока [7,8].

Динамическое управление магнонами с помощью постоянного электрического тока лежит в основе работы нового спин-волнового устройства, получившего название динамического магнетонного кристалла (ДМК) [9,10]. Известно, что магнетонный кристалл (МК) представляет собой магнетик с периодической структурой, наличие которой по аналогии с фотонными кристаллами приводит к образованию полос непропускания (запрещенных зон), удовлетворяющих условию Брэгга. В отличие от статических МК у ДМК характеристики запрещенных зон в спектре СВ зависят от постоянного электрического тока. Таким образом, изменяя величину или полярность тока, можно управлять уровнем потерь на частотах запрещенных зон ДМК. Такое динамическое управление

уровнем потерь СВ указывает на возможность использования ДМК для управления режимами генерации сигналов в активных кольцевых резонаторах с помощью постоянного электрического тока.

До настоящего времени статические магнетонные кристаллы [11] и квазикристаллы [12], поддерживающие трехволновый параметрический распад поверхностной магнитостатической СВ (ПМСВ), использовались в микроволновых активных кольцевых резонаторах в качестве нелинейных фильтров для генерации хаотических светлых диссипативных солитонов огибающей. Управление режимами генерации таких параметрических импульсов осуществлялось с помощью переменного аттенюатора. В последние годы были получены темные диссипативные солитоны огибающей ультракороткой (субнаносекундной) длительности в микроволновых активных кольцевых резонаторах с двумя нелинейными элементами [13]. Одним из них являлся нерегулярный (изогнутый) магнетонный микроволновод, поддерживающий трехволновый параметрический распад магнитостатической СВ, а другим — транзисторный усилитель, работающий в режиме насыщения выходной мощности. Управление солитонными режимами здесь также осуществлялось механически. Далее приводятся результаты, демонстрирующие динамическое управление скважностью хаотических темных диссипативных солитонов огибающей с помощью постоянного электрического тока.

На рис. 1 приведена схема активного кольцевого резонатора, содержащего одномерный (1D) МК с динамическим линейным дефектом, усилительный каскад,



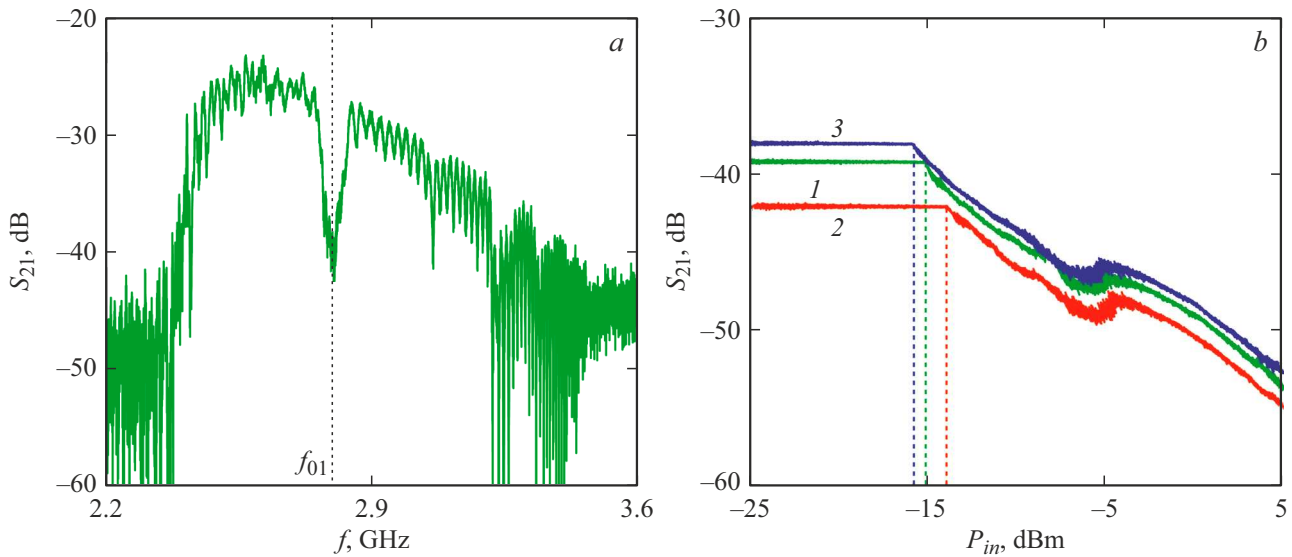
**Рис. 1.** Блок-схема микроволнового кольцевого генератора хаотических темных диссипативных солитонов огибающей.

состоящий из трех усилителей, и переменный аттенуатор. 1ДМК изготовлен из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной  $10\ \mu\text{m}$ , шириной  $4\ \text{mm}$ , длиной  $10\ \text{mm}$  с намагниченностью насыщения  $1750\ \text{G}$ . На поверхности пленки ЖИГ с использованием методов травления и литографии сформирована периодическая структура в виде столбиков и канавок с периодом  $200\ \mu\text{m}$ . Столбики и канавки имеют одинаковую ширину —  $100\ \mu\text{m}$ . Канавки характеризуются глубиной травления  $1\ \mu\text{m}$ . Длина периодической структуры  $4\ \text{mm}$ . Динамический линейный дефект создается постоянным электрическим током, протекающим по медной проволоке диаметром  $100\ \mu\text{m}$  и длиной  $4.5\ \text{mm}$ , расположенной вдоль продольной оси симметрии 1ДМК. Расстояние между медной проволокой и поверхностью пленки ЖИГ  $\sim 100\ \mu\text{m}$ , что позволяет исключить влияние нагрева на распространение магнитоэлектрической СВ. В зависимости от полярности тока внутреннее магнитное поле 1ДМК в области проволочного проводника может как увеличиваться, так и уменьшаться. Возбуждение и прием ПМСВ, распространяющейся в 1ДМК, осуществляются с помощью входного и выходного микрополосковых преобразователей. Каждый из них имеет ширину  $30\ \mu\text{m}$  и длину  $6\ \text{mm}$ . Расстояние между ними  $6\ \text{mm}$ . Внешнее

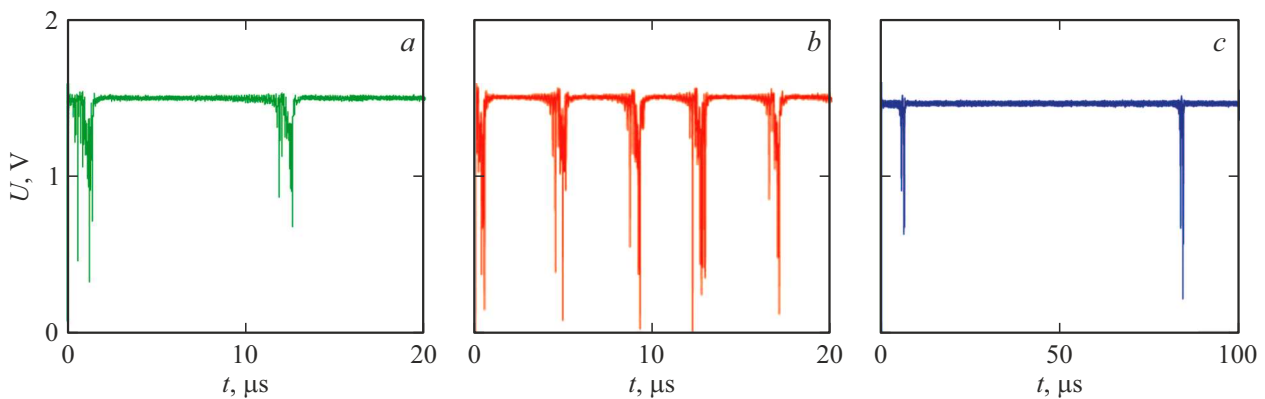
постоянное магнитное поле  $H_0$  прикладывается касательно к поверхности 1ДМК и параллельно микрополосковым преобразователям. Выбор напряженности поля  $H_0 = 356\ \text{Oe}$  обусловлен необходимостью создания условий для развития трехволнового параметрического распада ПМСВ.

Усилительный каскад состоит из клистрона-усилителя и двух транзисторных усилителей, которые необходимы для компенсации потерь в полосе запрещенной зоны 1ДМК. Выходной усилитель каскада работает в режиме насыщения выходной мощности, а остальные два усилителя — в режиме линейного усиления. Помимо этого клистрон-усилитель, являясь усилителем резонансного типа с центральной частотой  $\sim 2.8\ \text{GHz}$ , настраивается на частоту, находящуюся вблизи центральной частоты запрещенной зоны 1ДМК. Уровень мощности сигнала на входе 1ДМК регулируется с помощью переменного аттенуатора. Генерируемый в кольце СВЧ-сигнал поступает на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки.

На рис. 2, а приведена амплитудно-частотная характеристика 1ДМК, измеренная в линейном режиме. Видно, что в спектре ПМСВ существует полоса непропускания (запрещенная зона), центральная частота которой  $f_{01} = 2797\ \text{MHz}$  соответствует частоте первого брэгговского резонанса. На рис. 2, б приведены зависимости коэффициента передачи 1ДМК от мощности сигнала на его входе, измеренные при нескольких значениях постоянного электрического тока, прикладываемого к проволочному проводнику. Рассматриваются три случая: 1) ток не прикладывается к проводнику; 2) к проводнику прикладывается ток положительной полярности; 3) к проводнику прикладывается ток отрицательной полярности. Из представленных на рис. 2, б результатов следует, что в отсутствие постоянного электрического тока зависимость  $S_{21}(P_{in})$  содержит как линейный, так и нелинейный участок. Порог, при котором 1ДМК переходит в нелинейный режим работы, наблюдается при входной мощности  $-15\ \text{dBm}$ . В этом случае ПМСВ начинает параметрически распадаться на СВ. Если к проволочному проводнику прикладывается постоянный электрический ток положительной полярности, то это приводит к увеличению как линейного уровня потерь, так и нелинейного порога. Данный факт обусловлен увеличением внутреннего магнитного поля 1ДМК в области протекания тока. При токе отрицательной полярности уровень линейных потерь ПМСВ и значение нелинейного порога уменьшаются. Это связано с уменьшением внутреннего магнитного поля 1ДМК в области протекания тока. Таким образом, прикладывая к проволочному проводнику постоянный электрический ток разной полярности, можно управлять уровнем не только линейных, но и нелинейных потерь ПМСВ на фиксированной частоте за счет сдвига частоты запрещенной зоны 1ДМК. Для выбранных значений полярности тока динамический диапазон изменения линейных потерь составляет величину  $\sim 4\ \text{dB}$ , а динамический



**Рис. 2.** *a* — амплитудно-частотная характеристика 1D МК с динамическим линейным дефектом, измеренная при  $P_{in} = -30$  dBm; *b* — зависимости коэффициента передачи 1D МК от  $P_{in}$ , измеренные на частоте запрещенной зоны при значениях постоянного электрического тока  $I = 0$  (1),  $+500$  (2) и  $-500$  мА (3).



**Рис. 3.** Хаотические последовательности темных диссипативных солитонов огибающей, полученные при значениях постоянного электрического тока  $I = 0$  (а),  $+320$  (b) и  $-200$  мА (с).

диапазон изменения пороговой мощности  $\sim 2$  dB. Необходимо отметить, что на частотах, находящихся вдали от запрещенной зоны, постоянный электрический ток не оказывает заметного влияния на уровни линейных и нелинейных потерь ПМСВ.

На рис. 3 приведены результаты, полученные при включении 1D МК в цепь обратной связи активного кольцевого резонатора. Временные ряды измерены при коэффициенте усиления кольца  $G = K - A = 31$  dB (где  $K$  — усиление усилительного каскада,  $A$  — общий уровень потерь в кольце). В этом случае интегральная мощность сигнала на входе 1D МК имеет значение  $P_{in} = +3$  dBm, которое превышает нелинейный порог на 18 dBm, а выходной усилитель каскада работает в режиме глубокого насыщения выходной мощности. Из представленных на рис. 3, *a* результатов следует, что в отсутствие постоянного тока ( $I = 0$ ) формируется хаотическая последовательность

импульсных пакетов длительностью  $\sim 0.9 \mu\text{s}$ , каждый из которых содержит „провалы“ в виде темных импульсов. Одни из этих „провалов“ являются диссипативными черными солитонами огибающей длительностью  $\sim 30$  ns, так как их амплитуда спадает до нуля, а другие „провалы“ соответствуют диссипативным серым солитонам огибающей, так как их амплитуда не спадает строго до нуля. Усредненная на длине реализации частота следования хаотических импульсных пакетов имеет значение  $\sim 100$  kHz и соответствует частоте автомодуляции параметрически возбуждаемых СВ, рожденных в результате трехволнового распада ПМСВ. Скважность такой импульсной последовательности имеет значение  $q \sim 11$ . Короткие темные импульсы, находящиеся внутри импульсных пакетов, имеют усредненную частоту следования  $\sim 8$  MHz, значение которой характерно для четырехволновых взаимодействий.

На рис. 3, *b*, *c* приведены хаотические импульсные последовательности, полученные при подаче на проволочный проводник постоянного электрического тока разной полярности. Из представленных результатов следует, что при положительной полярности тока частота автомодуляции СВ увеличивается до значения  $\sim 250$  kHz (скважность уменьшается до  $q \sim 4$ ), а при отрицательной полярности тока она, наоборот, уменьшается до значения  $\sim 13$  kHz (скважность увеличивается до  $q \sim 80$ ). Таким образом, изменяя локально внутреннее магнитное поле 1ДМК за счет приложенного постоянного электрического тока разной полярности, можно управлять скважностью импульсных последовательностей, генерируемых на частоте запрещенной зоны 1ДМК.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки источников импульсных сигналов для систем магнотронной логики и спинтроники.

### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00274).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P. Pirro, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands, *Nat. Rev. Mater.*, **6**, 1114 (2021). DOI: 10.1038/s41578-021-00332-w
- [2] С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилук, *УФН*, **190** (10), 1009 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609 [S.A. Nikitov, A.R. Safin, D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.V. Logunov, M.A. Morozova, S.A. Odintsov, S.A. Osokin, A.Yu. Sharaevskaya, Yu.P. Sharaevsky, A.I. Kirilyuk, *Phys. Usp.*, **63** (10), 945 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609].
- [3] *Three-dimensional magnonics. Layered, micro- and nanostructures*, ed. by G. Gubbiotti (Jenny Stanford Publ., N.Y., 2019). DOI: 10.1201/9780429299155
- [4] A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands, *Nat. Phys.*, **11** (6), 453 (2015). DOI: 10.1038/nphys3347
- [5] M. Tsoi, A.G.M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, P. Wyder, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (19), 4281 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.4281
- [6] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, E. Saitoh, *Nature*, **464** (11), 262 (2010). DOI: 10.1038/nature08876
- [7] S.O. Demokritov, A.A. Serga, A. Andre, V.E. Demidov, M.P. Kostylev, B.A. Hillebrands, N. Slavin, *Phys. Rev. Lett.*, **93** (4), 047201 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.047201
- [8] K. Vogt, F.Y. Fradin, J.E. Pearson, T. Sebastian, S.D. Bader, B. Hillebrands, A. Hoffmann, H. Schultheiss, *Nat. Commun.*, **5**, 3727 (2014). DOI: 10.1038/ncomms4727
- [9] A.V. Chumak, T. Neumann, A.A. Serga, B. Hillebrands, M.P. Kostylev, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (20), 205005 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/20/205005
- [10] A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, A.A. Semenov, A.V. Chumak, A.A. Serga, V.I. Vasyuchka, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, B. Hillebrands, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (10), 102405 (2015). DOI: 10.1063/1.4914506
- [11] S.V. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, *IEEE Trans. Magn.*, **47** (10), 3716 (2011). DOI: 10.1109/TMAG.2011.2158293
- [12] S.V. Grishin, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, D.V. Romanenko, A.V. Sadovnikov, Yu.P. Sharaevskii, I.V. Sysoev, T.M. Medvedeva, E.P. Seleznev, S.A. Nikitov, *Phys. Rev. Appl.*, **16** (5), 054029 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054029
- [13] A.S. Bir, S.V. Grishin, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, M.O. Zhuravlev, D. Osuna Ruiz, *Phys. Rev. Lett.*, **125** (8), 083903 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.083903