

01.5;06.3

## Индукцированная светом генерация темных диссипативных солитонов огибающей в активном кольцевом резонаторе на основе бикомпонентного магнонного кристалла ферромагнетик—полупроводник

© А.С. Бир<sup>1</sup>, М.А. Морозова<sup>1</sup>, Д.В. Романенко<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 3 августа 2023 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2023 г.

Принято к публикации 29 сентября 2023 г.

Осуществлена индуцированная светом генерация темных диссипативных солитонов огибающей в микроволновом активном кольцевом резонаторе, содержащем нелинейный бикомпонентный магнонный кристалл. Последний представляет собой пленку железо-иттриевого граната, на поверхности которой располагается одномерная периодическая структура из тонких полупроводниковых полосок кремния. Освещение бикомпонентного магнонного кристалла лазерным лучом приводит к сдвигу частоты его запрещенной зоны за счет изменения проводимости Si и генерации темных (серых) диссипативных солитонов огибающей в условиях четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий.

**Ключевые слова:** магнонные кристаллы, полупроводники, диссипативные солитоны, спиновые волны.

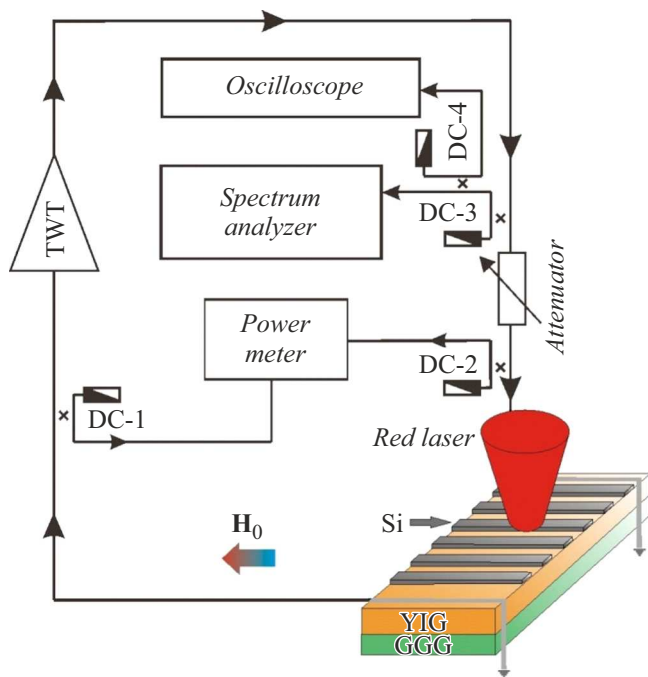
DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56596.19701

На данный момент одним из актуальных направлений в магнетике является магнонная спинтроника, которая изучает взаимодействие магнонов — квантов спиновых волн (СВ) — со свободными носителями заряда спин-поляризованного или электрического токов [1]. Для создания спинтронных устройств, работающих как в микроволновом, так и в терагерцевом диапазоне, интерес представляют феррит-полупроводниковые структуры [2–11], а также ферро- или антиферромагнитные полупроводники [12], в которых бегущие СВ взаимодействуют со свободными носителями заряда. В работах [2,3] было исследовано усиление бегущих поверхностных магнитостатических СВ (ПМСВ) в феррит-полупроводниковой структуре, помещенной в постоянное электрическое поле. Кроме того, создание из полупроводникового материала периодической (брэгговской) решетки на поверхности ферритовой пленки (бикомпонентный магнонный кристалл, БМК) и прикладывание к этой решетке постоянного электрического поля позволяли эффективно управлять брэгговским резонансом в спектре бегущих СВ [4]. Управление брэгговскими резонансами в спектре бегущих СВ с помощью электрического поля было осуществлено и в однокомпонентном магнонном кристалле [5]. Здесь периодическая структура в виде столбиков и канавок, сформированная на поверхности самой ферритовой пленки, граничила с пленкой полупроводника, к которой прикладывалось электрическое поле.

Помимо линейных эффектов были исследованы и нелинейные эффекты в виде светлых солитонов огибающей в феррит-полупроводниковых структурах [6–9]. Было продемонстрировано электрическое управление светлыми солитонами огибающей, распространяющимися в ферритовой пленке, на поверхности которой располагалась пленка полупроводника [6–8], а также брэгговскими солитонами огибающей, существующими в однокомпонентном магнонном кристалле, граничащем с пленкой полупроводника [9].

Концентрацией носителей заряда в полупроводнике можно управлять не только с помощью прикладываемого постоянного электрического поля, но и посредством светового (лазерного) излучения, которое наводит постоянное электрическое поле в светочувствительном полупроводнике [10]. В [11] было показано, что лазерное излучение, направленное на феррит-полупроводниковую структуру, позволяет управлять невзаимностью бегущих ПМСВ. Однако управление солитонами огибающей, а тем более их фотовозбуждение исследовано не было. В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие фотовозбуждение темных солитонов огибающей в БМК, находящемся в цепи обратной связи активного кольцевого резонатора.

На рис. 1 приведена схема активного кольцевого резонатора, содержащего одномерный (1D) БМК, ЛБВ-усилитель (ЛБВ — лампа бегущей волны) и переменный аттенюатор. 1D БМК создан на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной

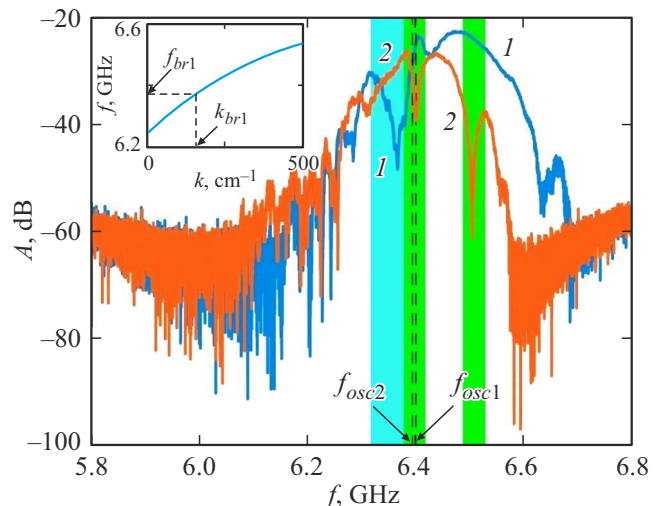


**Рис. 1.** Блок-схема микроволнового кольцевого генератора темных диссипативных солитонов обтекающей.

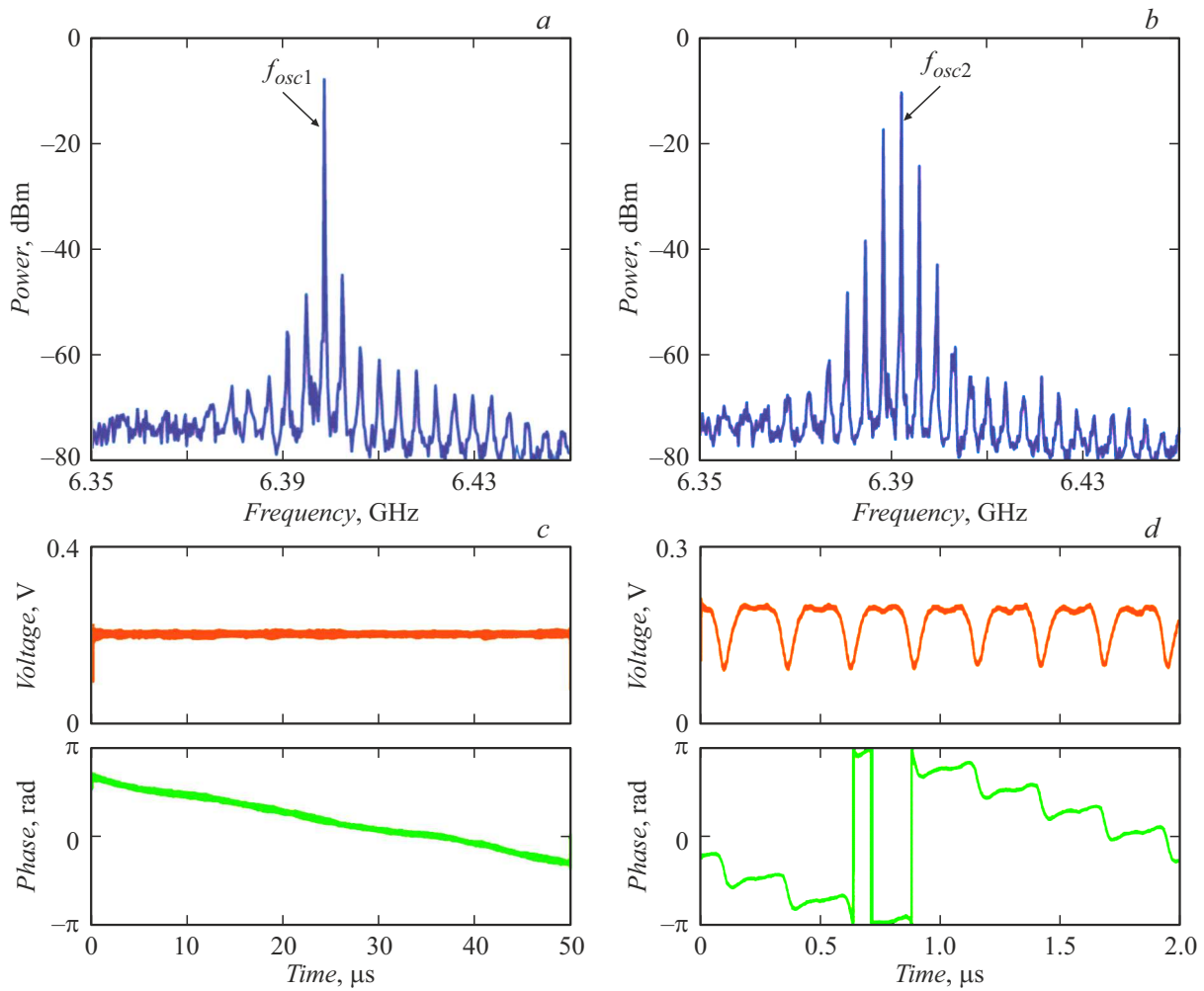
$d = 10 \mu\text{m}$ , шириной  $4 \text{ mm}$  с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1750 \text{ G}$  и шириной линии ферромагнитного резонанса  $0.5 \text{ Oe}$ , измеренной на частоте  $9.2 \text{ GHz}$ . На поверхности пленки ЖИГ с использованием техники литографии была сформирована периодическая структура из полосок кремния с периодом  $200 \mu\text{m}$ . Полупроводниковые полоски имели ширину  $100 \mu\text{m}$ , толщину  $200 \text{ nm}$  и проводимость  $5 \cdot 10^{-7} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Длина 1D периодической структуры  $5 \text{ mm}$ . При проведении эксперимента использовался красный лазер с длиной волны  $830 \text{ nm}$  и интенсивностью, варьировавшейся в диапазоне  $0\text{--}400 \text{ mW}$ . Фокусное пятно лазерного луча имело диаметр  $4 \text{ mm}$ . Поскольку длина волны красного лазера больше ширины запрещенной зоны кремния, при облучении кремния лазером возникает фоторезистивный эффект. В результате проводимость кремния зависит от интенсивности лазерного излучения. Возбуждение и прием ПМСВ, распространяющейся в 1D БМК, осуществлялись с помощью входного и выходного микрополосковых преобразователей. Каждый из них имел ширину  $30 \mu\text{m}$  и длину  $6 \text{ mm}$ . Расстояние между ними  $6 \text{ mm}$ . Внешнее постоянное магнитное поле  $H_0$  прикладывалось касательно к поверхности 1D БМК и параллельно микрополосковым преобразователям. Выбор напряженности поля  $H_0 = 1520 \text{ Oe}$  обусловлен необходимостью работы БМК на частотах выше  $5 \text{ GHz}$ , где влияние освещенных полосок Si на бегущую ПМСВ в пленке ЖИГ становится наиболее ярко выраженным. Кроме того, в пленке ЖИГ при такой напряженности внешнего постоянного магнитного поля могут развиваться только четырехволновые нелинейные спин-волновые

взаимодействия [13]. ЛВВ-усилитель работал в режиме линейного усиления сигнала и служил для компенсации потерь в кольце. Уровень мощности сигнала на входе 1D БМК регулировался с помощью переменного аттенюатора и контролировался с помощью измерителя мощности. Генерируемый в кольце СВЧ-сигнал поступал на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки.

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики 1D БМК, измеренные вне кольца в линейном режиме как в отсутствие, так и при наличии лазерного излучения. Из представленных на рис. 2 результатов следует, что в отсутствие лазерного излучения в низкочастотной области спектра ПМСВ наблюдается полоса непропускания (отмечена бирюзовой заливкой; цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи), центральная частота которой  $f_c = 6.3645 \text{ GHz}$  соответствует волновому числу ПМСВ  $k_c = 148 \text{ cm}^{-1}$ , находящемуся вблизи значения волнового числа первого брэгговского резонанса  $k_{br1} = 157 \text{ cm}^{-1}$  (см. вставку на рис. 2). Небольшое расхождение между волновыми числами  $k_c$  и  $k_{br1}$  и соответствующими им частотами  $f_c$  и  $f_{br1} = 6.3707 \text{ GHz}$  может быть обусловлено уменьшением величины внутреннего магнитного поля пленки ЖИГ за счет поля размагничивания, появляющегося при ограничении пленки ЖИГ по ширине [14]. При наличии лазерного излучения с интенсивностью  $136 \text{ mW}$  указанная полоса непропускания (первая запрещенная зона 1D БМК) смещается вверх по частоте и одновременно с этим в более высокочастотной области спектра ПМСВ появляется вторая полоса непропускания, соответствующая, по всей видимости, второму брэгговскому



**Рис. 2.** Амплитудно-частотные характеристики 1D БМК на основе пленки ЖИГ с периодической структурой из полупроводниковых полосок в отсутствие (1) и при наличии лазерного излучения интенсивностью  $136 \text{ mW}$  (2). На вставке приведена рассчитанная дисперсионная характеристика ПМСВ для свободной пленки ЖИГ с  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $4\pi M_0 = 1750 \text{ G}$  и  $H_0 = 1520 \text{ Oe}$ .



**Рис. 3.** Спектры мощности (*a, b*), а также амплитудные (верхние панели) и фазовые (нижние панели) профили огибающей (*c, d*) СВЧ-сигнала, генерируемого в активном кольцевом резонаторе с 1D БМК в отсутствие (*a, c*) и при наличии (*b, d*) лазерного излучения интенсивностью 136 мВт.

резонансу с  $k_{br2} = 314 \text{ cm}^{-1}$  (отмечены зеленой заливкой). Сдвиг частоты первого брэгговского резонанса вверх по частоте обусловлен тем, что с увеличением интенсивности лазерного излучения увеличиваются как электрическое поле в полосках Si, так и концентрация фотовозбужденных носителей тока (электронов) [10]. Последнее приводит к увеличению проводимости полосок Si, которые по своим свойствам приближаются к металлическим. В этом случае дисперсионная характеристика ПМСВ, распространяющейся в свободной пленке ЖИГ, приближается к дисперсионной характеристике ПМСВ, распространяющейся в пленке ЖИГ, вблизи поверхности которой находится металлический экран [15]. Если  $k_{br1} = \text{const}$ , то увеличение проводимости полосок Si приводит к сдвигу частоты, соответствующей первому брэгговскому волновому числу, вверх по частоте. Необходимо отметить, что термический нагрев, который присутствует при воздействии лазерного излучения на пленку ЖИГ, не превалирует над зависимостью частоты первого брэгговского резонанса от проводимости, так

как в противном случае он привел бы к сдвигу этой частоты не вверх, а вниз по частоте.

На рис. 3 приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие генерацию периодических последовательностей темных диссипативных солитонов огибающей, когда 1D БМК находится в цепи обратной связи активного кольцевого резонатора. Из представленных на рис. 3, *a, c* результатов следует, что в отсутствие лазерного излучения в автоколебательной системе генерируется многочастотный СВЧ-сигнал с частотой несущей  $f_{osc1} = 6.3985 \text{ GHz}$ , находящейся вблизи одного из основных пиков амплитудно-частотной характеристики 1D БМК (рис. 2). По обе стороны от частоты несущей находятся спутники, характеризующиеся частотой автомодуляции  $f_{am} = 3.75 \text{ MHz}$ . Последняя является результатом развития в 1D БМК четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий, так как параметрические трехволновые процессы распада ПМСВ запрещены на этих частотах. Однако уровень мощности наибольших по амплитуде спутников на 40 dB меньше уровня

мощности несущей, вследствие чего огибающая такого многочастотного СВЧ-сигнала имеет практически постоянный уровень амплитуды.

Ситуация меняется, если на полоски Si подается непрерывное лазерное излучение мощностью 136 mW (рис. 3, *b, d*). В этом случае частота несущей смещается немного вниз по частоте и становится равной  $f_{osc2} = 6.392$  GHz. При этом она находится на низкочастотном крае первой запрещенной зоны 1D БМК. Как результат, в спектре мощности сигнала наблюдается значительное увеличение амплитуд сателлитов, а во временной области формируется периодическая последовательность темных солитонов огибающей. Их амплитуда не спадает строго до нуля, а фаза не претерпевает скачок на  $\pi$  в центре солитона, поэтому такие темные солитоны являются серыми солитонами огибающей [13]. Частота следования импульсной последовательности соответствует частоте  $f_{am}$ , а их длительность равна 49 ns. Последняя определяется по уровню увеличения амплитуды в 1.4 раза от минимального значения и не превышает времени прохождения импульса через БМК. Необходимо отметить, что до сих пор в экспериментах с однокомпонентным магнетонным кристаллом, находящимся вне кольца, были получены как светлые, так и темные солитоны огибающей, когда на вход магнетонного кристалла подавались либо короткие СВЧ-импульсы [16], либо монохроматический СВЧ-сигнал разного уровня мощности [17]. Установлено, что светлые солитоны огибающей формировались либо из коротких импульсов ПМСВ [16], либо за счет развития модуляционной неустойчивости на обратных объемных магнитостатических спиновых волнах [17], когда частота несущей СВЧ-импульсов или частота монохроматического СВЧ-сигнала находилась на высокочастотном склоне брэгговского резонанса. В то же время формирование темных солитонов огибающей происходило тогда, когда частота монохроматического СВЧ-сигнала находилась на низкочастотном склоне брэгговского резонанса [17]. Таким образом, фотовозбуждение темных солитонов огибающей, наблюдаемое нами в автогенераторе на низкочастотном склоне брэгговского резонанса, не противоречит известным из литературы результатам.

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

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30027 (<https://rscf.ru/project/23-79-30027/>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands, *Nat. Phys.*, **11** (6), 453 (2015). DOI: 10.1038/nphys3347
- [2] В.П. Лукомский, Ю.А. Цвирко, *ФТТ*, **15** (3), 700 (1973).
- [3] Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, *Радиотехника и электроника*, **23** (5), 897 (1978).
- [4] Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, *ФТТ*, **25** (8), 2515 (1983).
- [5] М.А. Морозова, Д.В. Романенко, А.А. Сердобинцев, О.В. Матвеев, Ю.П. Шараевский, С.А. Никитов, *J. Magn. Magn. Mater.*, **514** (15), 167202 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167202
- [6] А.С. Киндяк, *ЖТФ*, **69** (6), 119 (1999). [A.S. Kindyak, *Tech. Phys.*, **44** (6), 715 (1999). DOI: 10.1134/1.1259449].
- [7] А.С. Киндяк, В.В. Киндяк, *ФТТ*, **41** (7), 1272 (1999). [A.S. Kindyak, V.V. Kindyak, *Phys. Solid State*, **41** (7), 1162 (1999). DOI: 10.1134/1.1130972].
- [8] A.S. Kindyak, A.D. Boardman, V.V. Kindyak, *J. Magn. Magn. Mater.*, **253** (1-2), 8 (2002). DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00195-0
- [9] О.В. Матвеев, Д.В. Романенко, М.А. Морозова, *Письма в ЖЭТФ*, **115** (6), 379 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822060052 [O.V. Matveev, D.V. Romanenko, M.A. Morozova, *JETP Lett.*, **115** (6), 343 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022100228].
- [10] А.С. Киндяк, *Письма в ЖТФ*, **21** (19), 68 (1995).
- [11] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, V.K. Sakharov, Yu.V. Khivintsev, S.A. Nikitov, *Phys. Rev. B*, **99** (5), 054424 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.054424
- [12] С.В. Гришин, А.В. Богомолова, С.А. Никитов, *Письма в ЖТФ*, **48** (5), 39 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52156.18955 [S.V. Grishin, A.V. Bogomolova, S.A. Nikitov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (3), 37 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.03.52881.18955].
- [13] M. Wu, *Solid State Phys.*, **62**, 163 (2010). DOI: 10.1016/B978-0-12-374293-3.00003-1
- [14] A.V. Sadovnikov, C.S. Davies, S.V. Grishin, V.V. Kruglyak, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (19), 192406 (2015). DOI: 10.1063/1.4921206
- [15] А.С. Киндяк, *ЖТФ*, **64** (11), 99 (1994).
- [16] А.В. Дроздовский, М.А. Черкасский, А.Б. Устинов, Н.Г. Ковшиков, Б.А. Калиникос, *Письма в ЖЭТФ*, **91** (1), 17 (2010). [A.V. Drozdovskii, M.A. Cherkasskii, A.B. Ustinov, N.G. Kovshikov, B.A. Kalinikos, *JETP Lett.*, **91** (1), 16 (2010). DOI: 10.1134/S0021364010010042].
- [17] А.В. Дроздовский, Б.А. Калиникос, *Письма в ЖЭТФ*, **95** (7), 397 (2012). [A.V. Drozdovskii, B.A. Kalinikos, *JETP Lett.*, **95** (7), 357 (2012). DOI: 10.1134/S0021364012070041].