

05,08

Управление свойствами спиновых волн в биоактивных системах на основе метаповерхностей ЖИГ/упорядоченные полимерные пленки с магнитными микрорезервуарами

© Ф.Е. Гаранин, А.Б. Хутиева, М.В. Ломова, А.В. Садовников

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

E-mail: garaninfedorwork@mail.ru

Поступила в Редакцию 28 мая 2024 г.

В окончательной редакции 1 августа 2024 г.

Принята к публикации 2 августа 2024 г.

В настоящей работе предложены конфигурации магннного микроволновода с двумерным массивом магнитных элементов, расположенных на поверхности микроволновода. Методом микромагнитного моделирования на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта показана возможность управления характеристиками распространения спиновых волн (СВ) в структуре с полимерными планарными упорядоченными микрорезервуарами на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке из галлий гадолиниевого граната (ГГГ) путем изменения конфигурации структуры, вариации направления поля подмагничивания и изменения величины намагниченности магнитного материала внутри микрорезервуара. Показано, что предложенные конфигурации магннных структур позволяют реализовывать методы управления спин-волновыми сигналами, что может найти применение в устройствах магннной логики и сенсорике биоактивных материалов.

Ключевые слова: спиновая волна, микромагнитное моделирование, микрорезервуары, магнитные наночастицы.

DOI: 10.61011/FTT.2024.09.58776.139

1. Введение

Спиновые волны (СВ) с длинами волн от миллиметров до нанометров в гигагерцовом и субтерагерцовом диапазоне частот [1–4] могут лечь в основу нового подхода „альтернативной электроники“ для реализации высокоскоростных вычислений и обработки сигналов на микро- и наноуровне. В то же время характеристики спиновых волн (СВ), распространяющихся по магннным микроволноводным структурам, можно варьировать путем изменения набора параметров, которые можно разделить на разные классы. К первому классу параметров относится геометрия волноведущей структуры (например, тип симметрии); второй — переменные (направление и значение внешнего магнитного поля H_0 , поле обменного взаимодействия и анизотропия самого материала [2]), включенные в эффективное поле H_{eff} в рамках подхода, принятого для описания динамики намагниченности, а именно решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта [5]; третьи — межфазные свойства, которые включают в себя в том числе неоднородное распределение намагниченности внутри волновода или соседней магнитной фазы сверху и/или в непосредственной близости от магннного волновода [6,7]. Последний класс параметров используют в качестве основы универсального метода видоизменения поверхности магнитной пленки и как альтернативный способ управления спин-волновыми свойствами, например, путем изготовления метаповерхностей на основе железо-иттриевого граната

(ЖИГ) — пленок с низкими потерями, декорированных магнитными структурами [8–11].

Гибридные квантовые системы, составляющие основу магннных, микроволновых, оптических и механических устройств, обладают уникальными свойствами: широким диапазоном перестройки частоты, низким уровнем магнитного затухания, большой нелинейностью и внутренней невязанностью [12]. Кроме того, важно помнить, изменение свойств СВ может лежать в основе чрезвычайно чувствительного метода описания взаимодействия магнитных материалов с окружающей средой. Поэтому магнитные ЖИГ волноводы могут быть использованы в качестве чувствительных магннтоэлектронных датчиков, например, для раннего обнаружения низких концентраций газообразного водорода [13–15]. Область применений магнитных ЖИГ и галлий гадолиниевого граната (ГГГ) датчиков растет и находит также свое применение, как биодатчики [16]. Гибридные структуры, использующие гигантский магннтоимпеданс [17], позволяют создавать сенсоры с высокой чувствительностью для обнаружения маркеров рака [18] и белков воспаления [19], получать универсальные покрытия для обнаружения различных заболеваний с использованием антител [20,21]. 3D-конструкция магнитных структур очень важна, поскольку позволяет увеличить поверхность контакта датчика со средой, свойства которой необходимо измерять. Таким образом, формирование объемных магнитных микроструктур может лечь в основу нового подхода при разработке высокоэффективных датчиков на основе ЖИГ.

Синтез магнитных наноструктур с воспроизводимыми параметрами является новой задачей в материаловедении, биомедицине и электронике [22]. Планарные полимерные микрорезервуары нашли биологическое применение, в частности был показан рост клеток нейробластомы на полимерной поверхности поверхности с одновременным высвобождением активных веществ из микрорезервуаров при их разрушении лазерным излучением [23]; было показано высвобождение низкомолекулярного вещества под действием гидролаз из полимерных микрорезервуаров [24], поверхность офтальмологических контактных линз была покрыта полимерным покрытием с микрорезервуарами для получения депосистем с пролонгированным высвобождением лекарственных средств для лечения глаз [25]. С помощью лазерного излучения было показано прижизненное высвобождение лекарственного средства из полимерных планарных микрорезервуаров на примере сосудов мыши [26] и др. Кроме этого, пленки с полыми 3D-контейнерами (камерами) проявляют чувствительность к СВЧ-диапазону, что позволяет создавать системы обратной связи и основу органической электроники для точной доставки лекарств и/или нейротрансмиттеров [27]. Магнитные наночастицы (МНЧ) широко используют для изготовления плоских нанокомпозитных покрытий и часто используются в процессе доставки лекарств [28]. Проявление высокочастотных магнитных свойств полимерной слоистой двумерной структуры, в которую внедрены МНЧ с варьированием их объемной доли было обнаружено экспериментально методом Мандельштам–Бриллюэновской спектроскопии [29]. В то же время введение наночастиц оксида железа в полимерные матрицы позволяет целенаправленно варьировать физические свойства нанокомпозитов и придавать им чувствительность к электромагнитным воздействиям [30]. Полимерные микрорезервуары, помимо депо-высвобождения лекарственного средства, также демонстрируют чувствительность к УФ-излучению, а также к радиоволнам [31–34]. 3D-биосовместимые биodeградируемые полимерные покрытия с/без включений металлических наночастиц успешно используются для биотехнологических и медицинских применений, а также являются прекрасными кандидатами для новых биосенсорных устройств с обратной связью.

Для решения проблемы реализации управляемых режимов распространения спин-волнового сигнала в настоящей работе предложена конфигурация магнитной микроволноводы на основе пленки ЖИГ/ЛГГ с двумерным массивом магнитных элементов магнетита на примере полимерной пленки с упорядоченными магнитными микрорезервуарами. Методом микромагнитного моделирования показана возможность управления характеристиками распространения СВ на основе построения пространственных распределений намагниченности и спектральной плотности мощности сигнала в выходной секции рассматриваемой структуры. Рассмотрены две конфигурации структуры и трансформация спектров прохождения сигнала при вариации направления поля подмагничивания.

2. Описание исследуемой структуры и численной модели

Микромагнитное моделирование [35] было проведено для разных конфигураций решетки нерегулярной магнитной структуры с микрорезервуарами (рис. 1, 2). В качестве материалов были выбраны ЖИГ ($Y_3Fe_5O_{12}$) и магнетит (Fe_3O_4). Структура представляет собой два слоя, где на первом слое лежит ЖИГ микроволновод, выполненный в виде удлиненной полоски длиной $L_2 = 4 \text{ mm}$, шириной $L_1 = 300 \mu\text{m}$ и толщиной $b_1 = 10 \mu\text{m}$. На втором слое по центру структуры в зоне $a = 1 \text{ mm}$ располагаются микрорезервуары, толщиной $b_3 = 10 \mu\text{m}$. Намагниченность насыщения ЖИГ составляет $4\pi M_{YIG} = 1750 \text{ G}$, а намагниченность насыщения микрорезервуаров с магнетитом составляет $4\pi M_{\text{chamber}} = 6000 \text{ G}$. Были рассмотрены случаи, когда внешнее магнитное поле направлено в положительном или отрицательном направлении оси OY . В обоих случаях величина внешнего магнитного поля составляет $H_0 = 1200 \text{ Oe}$.

В ходе решения задачи о передаче спин-волнового сигнала для уменьшения отражений СВ от границ расчетной области на границах структуры, обозначенные на рис. 1 и рис. 2 заштрихованной областью, были введены поглощающие слои с экспоненциально возрастающим коэффициентом затухания α [36–37]. В качестве источника возбуждения спин-волнового сигнала непосредственно после области затухания располагалась микрополосковая антенна P_{in} шириной $30 \mu\text{m}$, а детектирующая область P_{out} располагались на выходе структуры, как показано на рис. 1 и рис. 2.

3. Характеристики систем ЖИГ/упорядоченные полимерные пленки с магнитными микрорезервуарами на основе микромагнитного моделирования

Рассмотрим принцип работы исследуемых структур: на входную антенну P_{in} подается микроволновой сигнал, частотный диапазон которого зависит от величины постоянного внешнего магнитного поля, а с выходной антенны P_{out} снимается m_z компонента намагниченности. С помощью микромагнитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (ЛЛГ) [38], было проведено исследование режимов распространения СВ в конфигурациях ЖИГ микроволноводов. Уравнение ЛЛГ можно представить в виде:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \gamma [H_{\text{eff}} \times M] + \frac{\alpha}{M_{s(x,y)}} \left[M \times \frac{\partial M}{\partial t} \right], \quad (1)$$

где M — вектор намагниченности, $\alpha = 10^{-5}$ — параметр затухания пленки ЖИГ, $H_{\text{eff}} = H_0 + H_{\text{demag}}$

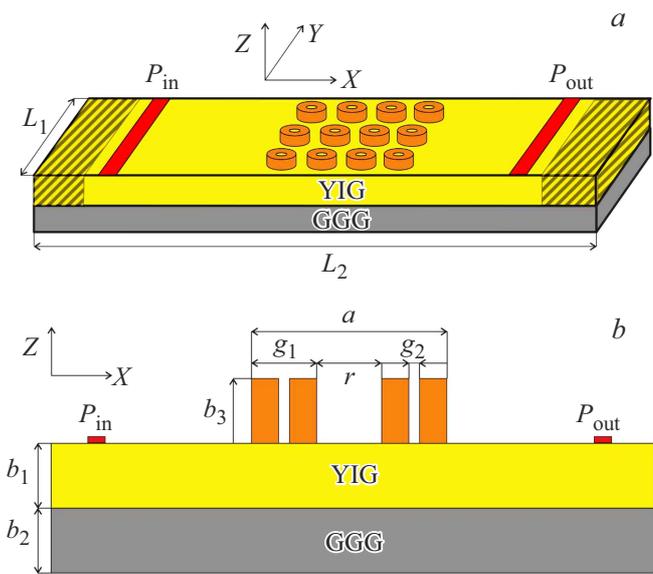


Рис. 1. Схематическое изображение структуры с микрорезервуарами (а). На рисунке введены обозначения: L_1 — ширина микроволновода, L_2 — длина микроволновода, P_{in} и P_{out} — микрополосковые антенны для возбуждения и приема СВ, соответственно; (б) схематическое изображение структуры с микрорезервуарами в плоскости $Z-X$, где b_1 — толщина пленки ЖИГ, b_2 — толщина пленки ГГГ, b_3 — толщина микрорезервуара, a — область нанесения микрорезервуаров, g_1 — диаметр внешнего кольца микрорезервуаров, g_2 — диаметр внутреннего кольца, r — расстояние между микрорезервуарами.

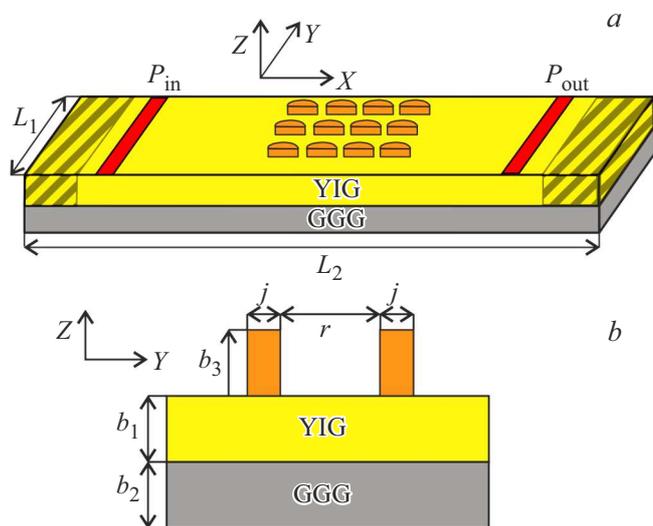


Рис. 2. Схема структуры с микрорезервуарами (а) в плоскости $OZ-OY$ (б), где j — диаметр микрорезервуара, r — расстояние между микрорезервуарами.

$+H_{ex} + H_a$ — эффективное магнитное поле, H_0 — внешнее магнитное поле, H_{demag} — поле размагничивания, H_{ex} — обменное поле, H_a — поле анизотропии, $\gamma = 2.8 \text{ МГц/Ое}$ — гиромагнитное отношение.

Важно отметить, что учет изменения структуры внутреннего магнитного поля в ЖИГ за счет микрорезервуаров обеспечивался путем учета поля размагничивания, создаваемого внутри ЖИГ микроволновода магнетитом, локализованным в микрорезервуаре.

Для анализа влияния конфигурации микрорезервуаров на свойства СВ в ЖИГ представляется важным провести анализ спектров прохождения СВЧ сигналов через рассматриваемый микроволновод. Для этого на входной антенне задавалось магнитное поле в виде $h = h_0 \sin(2\pi ft)$ с различной амплитудой колебаний h_0 и частотой f .

Для получения информации о том, что происходило с волной после взаимодействия с системой микрорезервуаров, проводили построение спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала, полученной путем записи в файл временной реализации интегральной величины $m_z(x = x_{out}, t)$ для интервала времени длительностью $T_{max} = 300 \text{ ns}$ в области выходной антенны при $x = x_{out}$. На рис. 3,а построена амплитудно-частотная характеристика для конфигурации структуры с полимерными планарными упорядоченными микрорезервуарами, изображенной на рис. 1, при параметрах $g_1 = 20 \mu\text{m}$, $g_2 = 8 \mu\text{m}$ и $r = 10 \mu\text{m}$. На рис. 3,б построена амплитудно-частотная характеристика для конфигурации структуры, изображенной на рис. 1, при параметрах $j = 10 \mu\text{m}$, $r = 20 \mu\text{m}$. Синяя кривая на рис. 3, (а, б) соответствует случаю, когда внешнее магнитное поле $H_0 = 1200 \text{ Ое}$ направлено противоположно оси OY , красная кривая соответствует случаю, когда внешнее магнитное поле H_0 направлено вдоль оси OY . Черная кривая построена для референсного микроволновода. В моделировании случай референсного микроволновода рассматривался для конфигураций структуры при $M_{chamber} = 0 \text{ G}$. При этом видно, что при рассмотрении микроволновода с магнетитом уровень прохождения сигнала падает на величину порядка 20 dB. Также на частотных зависимостях спектральной плотности мощности можно выделить частоты $f_{1,2}$, на которых наблюдается появление провала при смене направления внешнего поля подмагничивания.

Также стоит отметить, что, меняя намагниченность магнитного материала внутри микрорезервуара $4\pi M_{chamber}$, можно добиться изменения характера распространения СВ. Для этого были построены АЧХ для структуры, изображенной на рис. 1, при $4\pi M_{chamber} = 6000 \text{ G}$, 3800 G , 1900 G (см. рис. 4) в случае, когда внешнее магнитное поле равно 1200 Ое и ориентировано в положительном направлении оси OY . Видно, что в выбранном диапазоне при вариации величины намагниченности $4\pi M_{chamber}$ наблюдалось сужение диапазона прохождения сигнала (синяя кривая на рис. 4) и появление областей непрохождения сигнала в начале спектра поверхностных магнитостатических волн. При приближении величины намагниченности $4\pi M_{chamber}$ к

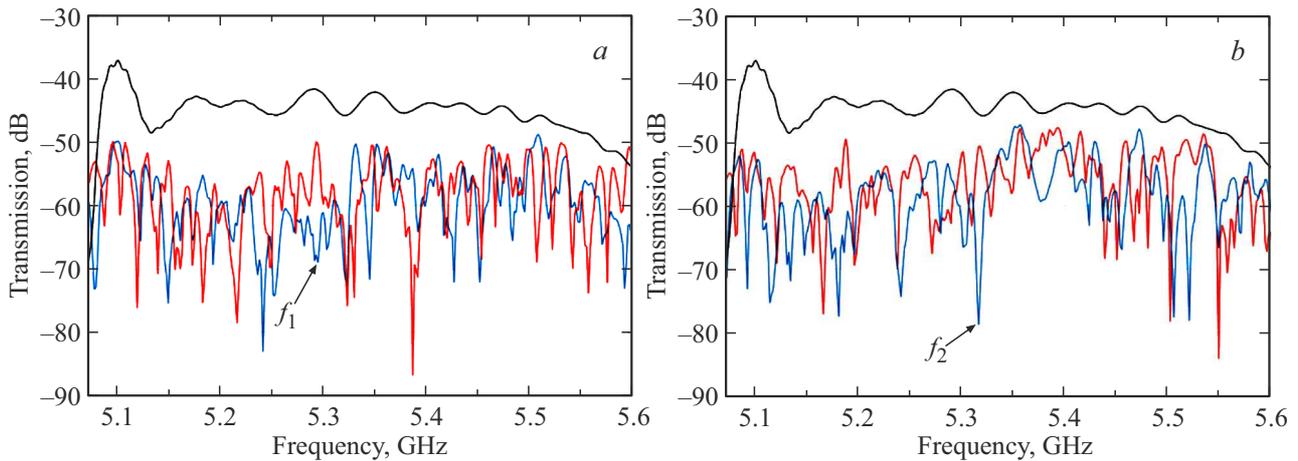


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики: (а) для структуры, изображенной на рис. 1, (b) для структуры, изображенной на рис. 2, снятые с P_{out} .

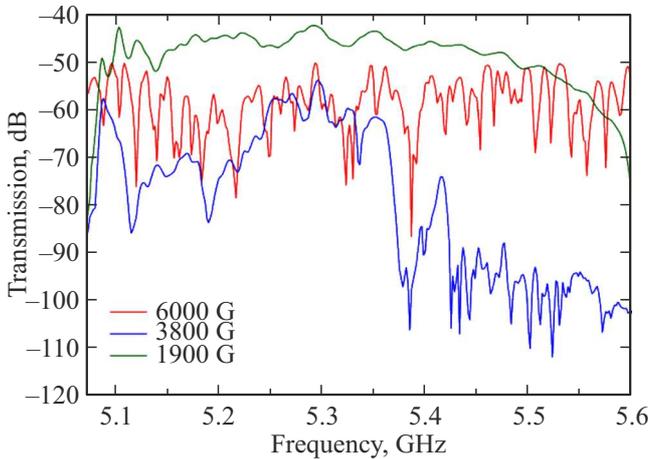


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики: для структуры с кольцами при разной намагниченности магнетита $4\pi M_{chamber} = 6000\text{ G}, 3800\text{ G}, 1900\text{ G}$, снятые с P_{out} в случае, когда внешнее магнитное поле ориентировано в положительном направлении оси OY .

величине намагниченности ЖИГ полоса частот прохождения сигнала занимает весь диапазон частот (зеленая кривая на рис. 4). При этом выбранный диапазон частот 5.07–5.6 GHz соответствует полосе возбуждения и прохождения поверхностных магнитоэлектрических волн при величине поля 1200 Oe, при этом основной эффект, как показывают результаты микромагнитного моделирования наблюдается для величины отстройки от частоты ферромагнитного резонанса касательно намагниченной пленки 200 MHz и 300 MHz для частот пиков f_1 и f_2 , соответственно.

Для наблюдаемых на амплитудно-частотных характеристиках провалов были построены пространственные карты распределения m_z -компоненты и интенсивности спиновых волн $I = \sqrt{m_z^2 + m_x^2}$ при частотах

$f_1 = 5.295\text{ GHz}$ для структуры, изображенной на рис. 1 (см. рис. 5) и при $f_2 = 5.315\text{ GHz}$ для структуры, изображенной на рис. 2 (см. рис. 6), когда внешнее магнитное поле направлено в положительном или отрицательном направлении оси OY .

Как можно заметить из анализа профилей распределения намагниченности на рис. 5 (b, d), сигнал СВ на частоте f_1 при направлении внешнего магнитного поля вниз по оси OY не проходит до конца структуры, а при противоположном направлении внешнего магнитного поля (см. рис. 5 (c, e)), наоборот, проходит. Из этого можно сделать вывод, что изменение направления внешнего магнитного поля в структуре 1 влияет на характер распространения СВ. В области после микрорезервуаров при $x > 2.5\text{ mm}$ распределение поля указывает на то, что не наблюдается регулярного волнового процесса после прохождения спиновой волновой области взаимодействия с микрорезервуарами.

Как можно заметить из анализа профилей распределения намагниченности на рис. 6 (b, d), сигнал СВ на частоте f_2 при направлении внешнего магнитного поля вниз по оси OY не проходит до конца структуры, а при противоположном направлении внешнего магнитного поля (см. рис. 6 (c, e)), наоборот, проходит. Из этого можно сделать вывод, что изменение направления внешнего магнитного поля в структуре 2 влияет на характер распространения СВ. При этом можно отметить распространение волнового процесса в области микрорезервуаров при $x > 2.5\text{ mm}$ по характеру распределения поля соответствует СВ, возбуждаемое в области, где расположена входная антенна.

Конфигурация резервуаров в виде полуцилиндров (см. рис. 2) позволяет менять чувствительность системы для применений сенсорики, и в тоже время, как следует из результатов моделирования, представленных на рис. 6, e, в линейно ориентированной области между микрорезервуарами наблюдается локализация мощности

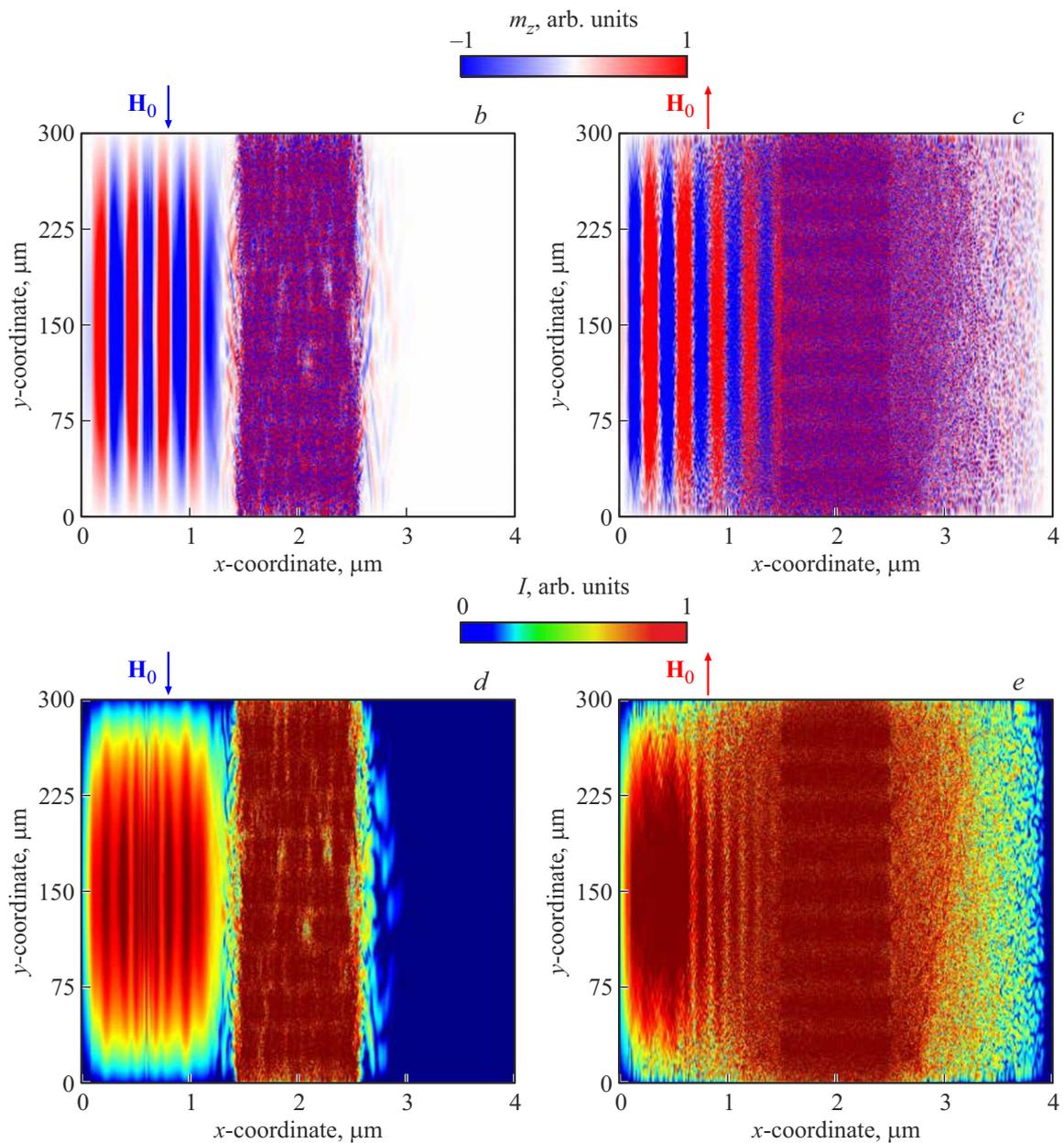


Рис. 5. Пространственные карты распределения m_z компоненты (b, c) и интенсивности (d, e) спиновых волн для структуры 1 при частоте f_1 в случае магнитного поля, ориентированного в отрицательном (b, d) и положительном (c, e) направлении оси OY .

спиновой волны, при этом такой эффект оказывается возможным только лишь при переориентации направления внешнего поля. Так, можно сравнить наблюдаемый эффект с эффектом коллимации спиновой волны, описанным в работе [39]. Количество максимумов в поперечной структуре поля соответствует количеству рядов микрорезервуаров. При этом стоит отметить, что локализация более проявлена именно в случае полуцилиндров по сравнению с кольцами, что видно из сравнения результатов построения карт намагниченности на рис. 5, e и рис. 6, e . Выбор конфигурации метаповерхности позволяет управлять структурой поля поверхностной волны, что является важным для применений senso-

рики, идея которых в том, что заполненная биоактивным материалом область с микрорезервуарами может быть использована как среда с изменением магнитных свойств за счет воздействия вводимых химических агентов, которые могут менять конфигурацию микрорезервуаров, а следовательно профиль распределения магнитного материала в виде наночастиц магнетита, расположенных внутри микрорезервуара.

В области под микрорезервуарами наблюдается распределение намагниченности, близкое к тому случаю, когда на длине этой области взаимодействия укладывается одна длина волны, при этом хорошо видно, что длина волны, возбуждаемой антенной, примерно в

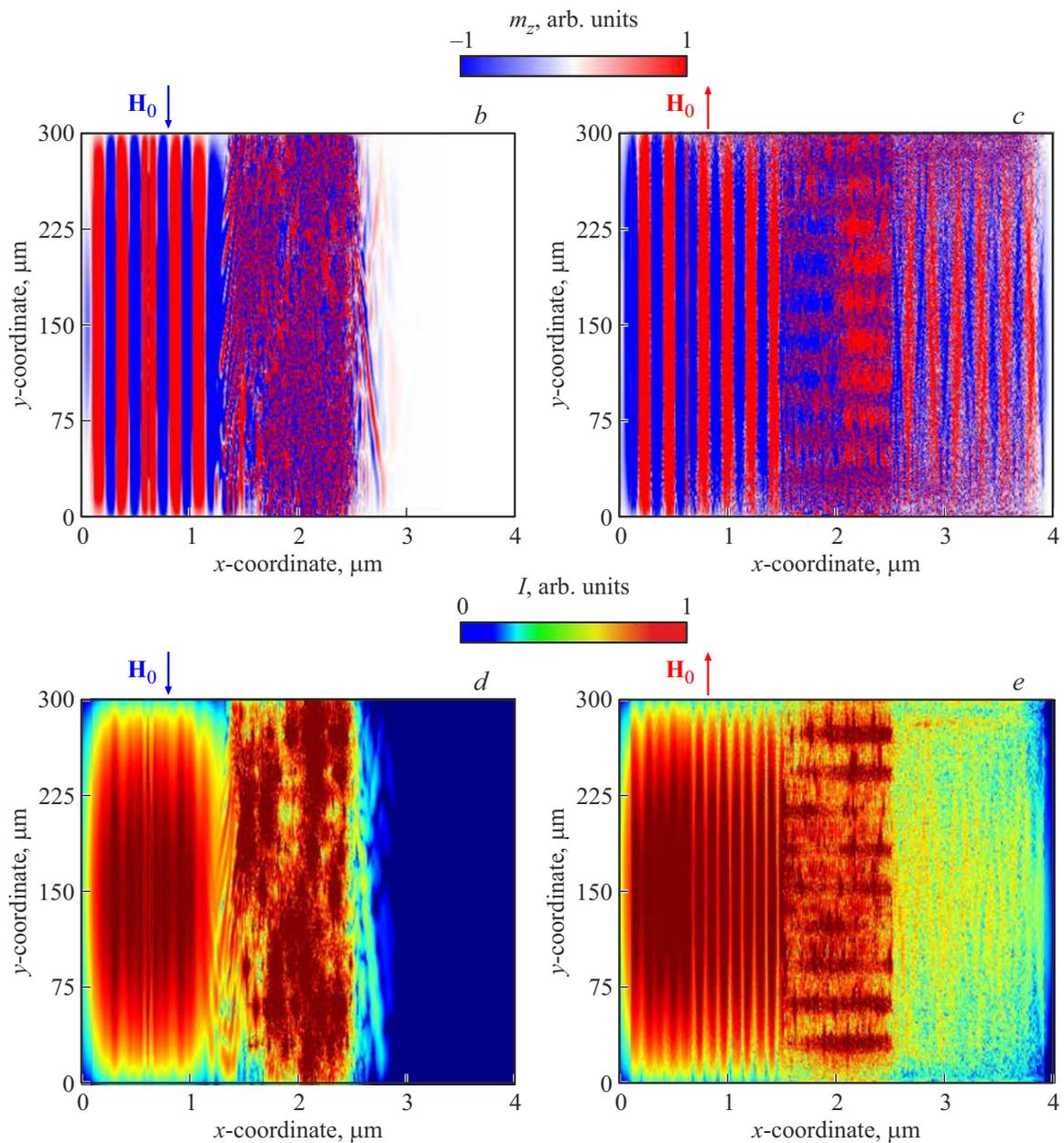


Рис. 6. Пространственные карты распределения m_z компоненты (b, c) и интенсивности (d, e) спиновых волн для структуры 2 (получилиндры) при частоте f_2 в случае магнитного поля, ориентированного в отрицательном (b, d) и положительном (c, e) направлении оси OY .

5 раз больше, чем длина волны до области с микрорезервуарами. Такая разница в длинах волн может быть объяснена анализом величины внутреннего поля в ЖИГ в области под микрорезервуарами. Действительно, величина внутреннего поля достигает уровня 0.8 кОе в области под магнетитом, что вместе с искусственно созданным резонатором под магнетитом может быть причиной изменения длины спиновой волны. При этом можно заметить, что при изменении конфигурации магнетитных структур с одновременной вариацией направления поля подмагничивания на основе предложенного метода нанесения микрорезервуаров, заполненных маг-

нетитом, может оказаться возможным реализация способов управления спин-волновыми сигналами, что может найти применение в устройствах магнетронной логики и сенсорике.

4. Заключение

Таким образом, проведено исследование управления характеристиками СВ в структуре с полимерными планарными упорядоченными микрорезервуарами с магнетитными включениями на основе пленки ЖИГ при измене-

нии параметров структуры, вариации направления поля подмагничивания и изменения величины намагниченности магнитного материала внутри микрорезервуара. Были построены пространственные карты распределения m_z компоненты и интенсивности спиновых волн для разных параметров структуры. Показано, что изменение ориентации магнитного поля на противоположное приводит к изменению уровня прохождения спин-волнового сигнала и образованию областей частот на амплитудно-частотных характеристиках, в которых сигнал перестает распространяться. Предложенные конфигурации ЖИГ микро-волноводов с системой микрорезервуаров на поверхности может быть использована в качестве управляемого ориентацией магнитного поля фильтра СВЧ сигнала, а также для разработки новых типов биосенсоров с обратной связью.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 23–13–00373.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak, A.O. Adeyeye, M. Krawczyk, J. Gräafe, C. Adelman, S. Cotozana, A. Nacemi, V.I. Vasyuchka, B. Hillebrands, S.A. Nikitov, H. Yu, D. Grundler, A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, J.-Y. Duquesne, M. Marangolo, G. Csaba, W. Porod, V.E. Demidov, S. Urazhdin, S.O. Demokritov, E. Albisetti, D. Petti, R. Bertacco, H. Schultheiss, V.V. Kruglyak, V.D. Poimanov, S. Sahoo, J. Sinha, H. Yang, M. Mäunzenberg, T. Moriyama, S. Mizukami, P. Landeros, R.A. Gallardo, G. Carlotti, J.-V. Kim, R.L. Stamps, R.E. Camley, B. Rana, Y. Otani, W. Yu, T. Yu, G.E. W. Bauer, C. Back, G.S. Uhrig, O.V. Dobrovolskiy, B. Budinska, H. Qin, S. van Dijken, A.V. Chumak, A. Khitun, D.E. Nikonov, I.A. Young, B.W. Zingsem, M. Winklhofer. *J. of Phys.: Condens. Matter* **33**, 413001 (2021).
- [2] A.G. Gurevich, G.A. Melkov. *Magnetization Oscillations and Waves* CRC-Press, London (1996). 464 p.
- [3] V.E. Demidov and S.O. Demokritov. *IEEE Trans. Magn.* **51**, 1 (2015).
- [4] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, V.K. Sakharov, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. B* **99**, 054424 (2019).
- [5] L.D. Landau, E.M. Lifschitz. *Phys. Z. Sowjet.* **8**, 153 (1935).
- [6] S. Demokritov. *Phys. Rep.* **348**, 6, 441 (2001).
- [7] S.O. Demokritov. *SpinWave Confinement: Propagating Waves*, 2nd ed. Jenny Stanford Publishing, N.Y. (2017). 448 p.
- [8] S.L. Vysotskii, Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, N.N. Novitskii, G.M. Dudko, A.I. Stognii, Y.A. Filimonov. *Phys. Solid State* **62**, 1659 (2020).
- [9] M. Krawczyk, D. Grundler. *J. Phys. Condens. Matter* **26**, 123202 (2014).
- [10] G. Tstis, E. Papaioannou, P. Patoka, J. Gutek, P. Fumagalli, M. Giersig. *Nano Lett.* **9**, 1, 1 (2009).
- [11] S. Neusser, D. Grundler. *Adv. Mater.* **21**, 2927 (2009).
- [12] X. Zhang. *Mater. Today Electronics* **5**, 100044 (2023).
- [13] I.S. Maksymov, M. Kostylev. *Chemosensors (Basel)* **10**, 49 (2022).
- [14] C. Lueng, P. Lupo, P.J. Metaxas, M. Kostylev, A.O. Adeyeye. *Adv. Mater. Technol.* **1**, 1, 1 (2016).
- [15] C. Lueng, P. Lupo, T. Schefer, P. Metaxas, A. Adeyeye, M. Kostylev. *Int. J. of Hydrogen Energy* **44**, 7715 (2019).
- [16] A.L.R. Souza, M. Gamino, A. Ferreira, A.B. de Oliveira, F. Vaz, F. Bohn, M.A. Correa. *Sensors (Basel)* **21**, 6145 (2021).
- [17] C. Kang, T. Wang, C. Jiang, K. Chen, G. Chai. *J. Alloys Compd.* **865**, 158903 (2021).
- [18] M. Khorshid, P. Losada-Pérez, P. Cornelis, M. Dollt, S. Ingebrandt, C. Glorieux, F.U. Renner, B. van Grinsven, W. De Ceuninck, R. Thoelen, P. Wagner. *Sens. Actuators B Chem.* **310**, 127627 (2020).
- [19] Z. Yang, Y. Liu, C. Lei, X.-C. Sun, Y. Zhou. *Mikrochim. Acta* **182**, 2411 (2015).
- [20] G.V. Kuryandskaya, M.L. Sánchez, B. Hernando, V.M. Prida, P. Gorria, M. Tejedor. *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3053 (2003).
- [21] T. Wang, Z. Yang, C. Lei, J. Lei, Y. Zhou. *Biosens. Bioelectron.* **58**, 338 (2014).
- [22] D. Yu, X. Sun, J. Zou, Z. Wang, F. Wang, K. Tang. *J. of Phys. Chem. B* **110**, 21667 (2006).
- [23] O. Kopach, K. Zheng, O.A. Sindeeva, M. Gai, G.B. Sukhorukov, D.A. Rusakov. *Biomater. Sci.* **7**, 2358 (2019).
- [24] J. Zhang, R. Sun, A.O. DeSouza-Edwards, J. Frueh, G.B. Sukhorukov. *Soft Matter* **16**, 2266 (2020).
- [25] V. Kudryavtseva, M. Otero, J. Zhang, A. Bukatin, D. Gould, G.B. Sukhorukov. *ACS Nanoscience Au* **3**, 3, 256 (2023).
- [26] M.A. Kurochkin, O.A. Sindeeva, A.S. Abdurashitov, N.A. Pyataev, D.A. Gorin, G.B. Sukhorukov. *Biomacromolecules* **24**, 7, 3051 (2023).
- [27] D.T. Simon, S. Kurup, K.C. Larsson, R. Hori, K. Tybrandt, M. Gojny, E.W.H. Jager, M. Berggren, B. Canlon, A. Richter-Dahlfors. *Nature Mater.* **8**, 742 (2009).
- [28] M. Mabrouk, R.M. Abd El-Wahab, H.H. Beherei, M.M. Selim, D.B. Das. *International J. of Pharmaceutics* **587**, 119658 (2020).
- [29] D. Voronin, A. Sadovnikov, D. Shchukin, D.A. Gorin, E. Beginin, Y. Sharaevsky, S. Nikitov. *Tech. Phys. Lett.* **39**, 715 (2013).
- [30] M. Kolasinska, T. Gutberlet, R. Krastev. *Langmuir* **25**, 10292 (2009).
- [31] A.N. Khan, A.V. Ermakov, T. Saunders, H. Giddens, D. Gould, G. Sukhorukov, Y. Hao. *IEEE Sens. J.* **22**, 18162 (2022).
- [32] M.A. Kurochkin, O.A. Sindeeva, A.S. Abdurashitov, N.A. Pyataev, D.A. Gorin, G.B. Sukhorukov. *Biomacromolecules* **24**, 3051 (2023).
- [33] M.A. Kurochkin, O.A. Sindeeva, E.P. Brodovskaya, M. Gai, J. Frueh, L. Su, A. Sapelkin, V.V. Tuchin, G.B. Sukhorukov. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* **110**, 110664 (2020).
- [34] A.N. Khan, A. Ermakov, G. Sukhorukov, Y. Hao. *Appl. Phys. Rev.* **6**, 041301 (2019).

- [35] S.L. Vysotskiy, Yu.V. Khivintsev, V. Sakharov, Yu. Filimonov. *Tech. Phys.* **64**, 984 (2019).
- [36] G. Venkat, H. Fangohr, A. Prabhakar. *J. Magn. Magn. Mater.* **450**, 34 (2018).
- [37] M. Dvornik, A.N. Kuchko, V.V. Kruglyak. *J. Appl. Phys.* **109**, 07D350 (2011).
- [38] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Waeyenberge. *AIP Advances* **4**, 107133 (2014).
- [39] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.A. Odincov, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **108**, 172411 (2016).

Редактор Т.Н. Василевская