

05

## Управление характеристиками спиновых волн в системе ЖИГ-микроволноводов при изменении параметров дипольной связи

© А.Б. Хутиева, В.Р. Акимова, А.В. Садовников

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

E-mail: abkhutieva@gmail.com

Поступила в Редакцию 19 июля 2023 г.

В окончательной редакции 6 сентября 2023 г.

Принята к публикации 7 сентября 2023 г.

Исследовано распространение спиновых волн (СВ) в двуслойном массиве латерально и вертикально связанных микроволноводов. С помощью микромагнитного моделирования было получено пространственное распределение интенсивности и распределение динамической намагниченности СВ в массиве микроволноводов, образованных полосками железо-иттриевого граната (ЖИГ). Предложены и исследованы методы управления пространственной структурой спин-волнового пучка и его делением между каналами массива ЖИГ-микроволноводов. Показана возможность управления направлением распространения СВ в массиве латерально и вертикально связанных микроволноводов путем изменения величины сдвига фазы между гармоническими сигналами возбуждения, подаваемыми на два центральных канала одного из слоев, и путем вариации величины вертикального и латерального зазоров. Детально исследован режим концентрации мощности сигнала, закодированного в виде амплитуды и фазы СВ на концах срединных каналов с возможностью их отдельного включения, а также режим управления сигналом на концах микрополосок верхнего слоя ансамбля с возможностью изменения фазы выходного сигнала в отдельно взятом канале, что позволяет использовать массив микроволноводов в качестве управляемого логического устройства или многоканального делителя мощности.

**Ключевые слова:** спиновая волна, микромагнитное моделирование, спин-волновой пучок, дискретная дифракция.

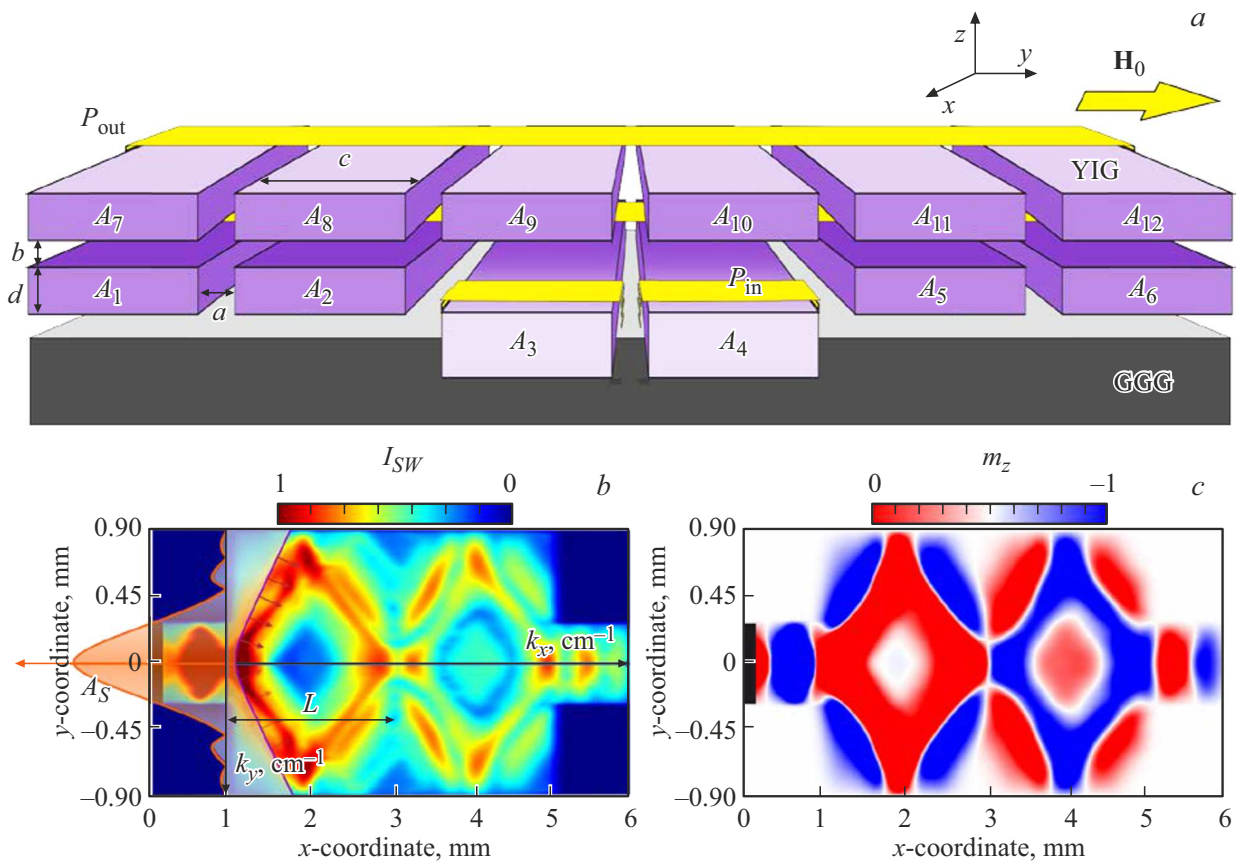
DOI: 10.61011/FTT.2023.10.56321.157

### 1. Введение

Перенос магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда, открывает новые возможности использования квантов спин-волновых возбуждений — магнонов для разработки методов и подходов обработки, передачи и хранения сигналов, закодированных в виде амплитуды и фазы спиновых волн (СВ) [1,2] в микроволновом и терагерцевом диапазонах [3,4]. При этом длины возбуждаемых СВ составляют величины от сотен микрон до десятков нанометров и могут меняться: изменением величины и направления поля намагничивания, путем варьирования типа и величины анизотропии магнитного материала, путем облучения поверхности магнитных пленок сфокусированным лазерным излучением [5–9].

Рекордно низкое затухание СВ в пленках ЖИГ лежит в основе направления исследования, происходящих в структурированных пленках процессов переноса спина, исследуемых в рамках научного направления физики магнитных явлений и физики конденсированного состояния — диэлектрической магноники [10]. При этом ЖИГ используется в качестве материалов и сред для исследования процессов, обуславливающих управление такими характеристиками СВ как: величина и направ-

ление групповой скорости, пространственное распределение амплитуды и фазы СВ, частотные диапазоны возбуждения и распространения СВ, использование различных методов управления связью СВ в многослойных структурах и др. [11]. В ряде работ показана возможность использования структур на основе ЖИГ для демонстрации принципов работы логических устройств в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Планарные ферритовые волноведущие микроструктуры конечной ширины на основе ЖИГ могут быть использованы, как базовые элементы „магнонных сетей“ для создания различных устройств обработки сигналов: линий задержки, фильтров, интерферометров, переключателей, мультиплексоров и др., в которых информация передается посредством спиновых волн, а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции. Использование латеральных магнитных микроструктур представляется важным для разработки элементов межсоединений в планарных топологиях магнонных сетей [12,13]. Управление перестройкой частоты и параметрами выходного сигнала в латеральных микроструктурах с сегнето- и пьезоэлектрическими слоями [14–18] осуществляется, например, путем изменения эффективной диэлектрической и магнитной



**Рис. 1.** (a) Схематическое изображение решетки микроволноводов из пленок ЖИГ на подложке из ГГГ. На рисунке введены обозначения:  $A_{1-12}$  — номера микроволноводов в решетке,  $a$  — вертикальный зазор,  $b$  — горизонтальный зазор,  $c$  — ширина,  $d$  — толщина,  $H_0$  — внешнее магнитное поле,  $P_{in}$  и  $P_{out}$  — микрополосковые антенны для возбуждения и приема СВ соответственно. (b) Пространственное распределение интенсивности СВ и кривая, отражающая эффективность возбуждения поперечных волновых чисел СВ, и изочастотная характеристика СВ для частоты 5.25 GHz. (c) Карта пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в структуре, образованной одним слоем ЖИГ-пленки.

проницаемости слоистой мультиферроидной структуры при вариации внешних электрического и магнитного полей соответственно. Однако построение таких структур требует точного согласования при расположении пьезоэлектрических слоев на поверхности ЖИГ-волноводов или в процессе ионно-лучевого осаждения ЖИГ на поверхность пьезоэлектрических или полупроводниковых подложек [5,19–20]. Исследование многослойных структур, каждый слой которых образован системой микроволноводов, разделенных воздушным зазором и расположенных на одной подложке, позволяет рассмотреть способ управления спектрами спиновых волн и режимами распространения сигнала, возбуждаемого в микроволноводах одного из слоев путём изменения расстояния между отдельными волноводами и между слоями системы. Такой метод управления разделением сигнала между каналами структуры расширяет функциональность магнитных структур, используемых в задачах параллельной обработки информационных сигналов.

В настоящей работе были исследованы режимы распространения спиновых волн в массивах микроволно-

водов, образованных двумя слоями ЖИГ. Исследованы механизмы, приводящие к формированию различных „паттернов“, образованных спин-волновым сигналом при его распространении в системе продольно-нерегулярных тонкопленочных магнитных микроволноводов, расположенных в каждом слое структуры. Проведено исследование влияния геометрических параметров на характеристики распространяющихся СВ. А именно, было рассмотрено влияние зазора между слоями (в вертикальном направлении) и зазоров между отдельными ферритовыми микрополосками на формирование асимметричных „паттернов“ динамической намагниченности в каждом слое структуры.

## 2. Исследуемая структура и численная модель

Микромагнитное моделирование [21] проводилось для системы латерально и вертикально связанных ферритовых микроволноводов (рис. 1). В качестве материала был выбран ЖИГ. Микроволноводы выполнены в

виде удлиненных полосок длиной  $L = 4 \text{ mm}$ , шириной  $c = 300 \mu\text{m}$  и толщиной  $d = 10 \mu\text{m}$ . Структура представляет собой два слоя, каждый из которых содержит по шесть параллельно ориентированных микроволноводов, разделенных воздушным зазором. Намагниченность насыщения ЖИГ составляет  $M = 139 \text{ G}$ , а величина внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси  $y$ , составляет  $H_0 = 1200 \text{ Oe}$ . Численное исследование проводилось на частоте  $5.25 \text{ GHz}$  для всех случаев, рассмотренных в настоящей работе. При этом данная конфигурация намагничивания обеспечивает эффективное возбуждение поверхностных спиновых волн (ПМСВ). Как известно, связанные ферритовые структуры расширяют функциональные возможности СВЧ-устройств ввиду дополнительного управляющего параметра, которым является связь между СВ, распространяющимися в отдельно взятых ферромагнитных пленках [22–26]. Можно отметить, что при экспериментальном исследовании таких структур ЖИГ-волноводы формируются на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) [27].

Рассматривая один слой структуры с нулевой величиной латерального зазора, можно пронаблюдать режим дифракции СВ в области сочленения микроволноводов входной секции шириной  $2c = 600 \mu\text{m}$  и основной секции структуры шириной  $6c = 900 \mu\text{m}$ . На рис. 1, *b* для этого случая при частоте входного сигнала  $f = 5.25 \text{ GHz}$  показан результат расчета пространственного распределения интенсивности спиновой волны

$$I_{sw}(x, y) = \sqrt{m_x^2(x, y) + m_y^2(x, y)},$$

где  $m_x$ ,  $m_y$  — динамические компоненты намагниченности. Можно отметить, что для касательно намагниченной пленки ЖИГ при распространении поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) и дифракции на области сочленения микроволноводов наблюдается режим формирования двух каустических пучков волн, распространяющихся под углами  $\phi$  к продольной оси  $x$  структуры (см. рис. 1, *b*) [26,28–29]. При этом направление фазовой скорости задано антенной, расположенной во входной секции микроволновода шириной  $2c$ , и совпадает с направлением оси  $x$ . Направление групповой скорости  $v_{gr}$  определяется нормалью к изочастотной характеристике, показанной пунктирной кривой, в точке, которой соответствуют волновое число  $\mathbf{k}$  с компонентами  $(k_x, k_y)$ , как показано на рис. 1, *b*. При этом важно отметить, что диапазон поперечных волновых чисел определяется шириной входной секции и максимальное значение возбуждаемого поперечного волнового числа определяется из соотношения:  $[k_y]_{\max} = \pi/(2c)$ . Для пояснения определения диапазона продольных и поперечных волновых чисел в рассматриваемой структуре на рис. 1, *b* показана рассчитанная зависимость величины амплитуды возбуждения СВ от  $k_y$ . Видно, что в центральной области структуры шириной  $6c$  наблюдается формирование двух пучков СВ, и отражение их от границ структуры. На рис. 1, *b* введено расстояние от

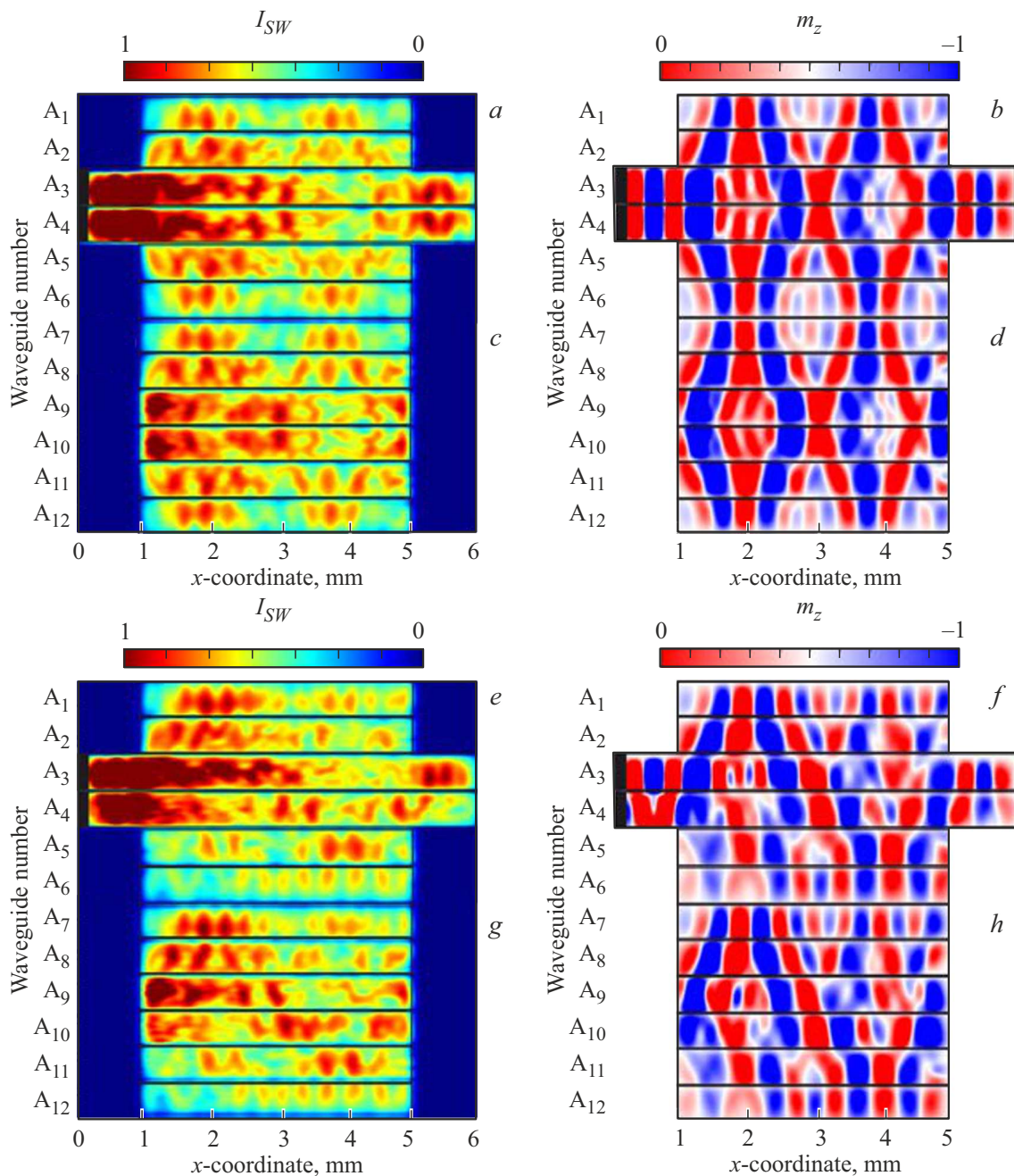
начала области сочленения микроволноводов до первой перетяжки спин-волнового пучка  $L = 2.0 \text{ mm}$ . Распространение СВ в центральной части микроструктуры может быть также описано, основываясь на представлениях об интерференции поперечных спин-волновых мод. Как видно из рис. 1, *c*, на котором представлено распределение величины компоненты  $m_z(x, y)$  динамической намагниченности, в поперечном сечении образуется распределение поля волны, образованное целым числом длин полуволн  $3\Lambda/2$ , где  $\Lambda = 2\pi/k_y$ , из чего можно сделать вывод, что в системе наблюдается интерференция первой и третьей шириных мод с поперечными волновыми числами  $k_y^I = \pi/(6c)$  и  $k_y^{III} = \pi/(6c)$  и продольными волновыми числами  $k_x^I = k_x^I(f)$  и  $k_x^{III} = k_x^{III}(f)$ , частотная зависимость которых определяется из закона дисперсии для плоскопараллельного ферритового волновода конечной ширины [30,31]. Амплитуда поля при этом может быть описана соотношением:

$$A(x, y) = a_I \Phi_I(y) \exp(-ik_x^I x) + a_{III} \Phi_{III}(y) \exp(-ik_x^{III} x),$$

где функции  $\Phi_{I,III}(y)$  описывают поперечный профиль первой и третьей шириных мод [32]. При этом можно показать, что характерное расстояние между положениями максимумов поля на продольной оси структуры будет равно величине, называемой длиной связи и определяемой соотношением:  $L = \pi/|k_x^{III} - k_x^I|$  [33]. В диапазоне возбуждения поверхностных магнитостатических волн наблюдается изменение величины длины связи, при этом зависимость  $L(f)$  имеет монотонно возрастающий характер, как показано в ряде работ [6,12,27]. Важно отметить, что изменение величины латерального зазора в диапазоне от  $10$  до  $40 \mu\text{m}$  приводит к изменению длины связи в  $4$  раза [27] для одного и того же значения частоты спиновой волны.

### 3. Результаты микромагнитного моделирования режимов распространения спиновых волн в массиве ЖИГ-полосок

Перейдем к исследованию метода управления пространственной структурой спин-волнового пучка и его делением между каналами в массиве латерально и вертикально связанных волноводов СВ. Будем исследовать режим концентрации мощности СВ на концах срединных каналов с возможностью их отдельного включения, а также режим управления сигналом на концах микрополосок верхнего слоя ансамбля с возможностью изменения фазы выходного сигнала. При этом будем рассматривать влияние условий возбуждения и величины вертикального и латерального зазора на положение перетяжки спин-волнового пучка при введении в структуру двух слоев, состоящих из ЖИГ-микроволноводов, изображенных на рис. 1, *a*.

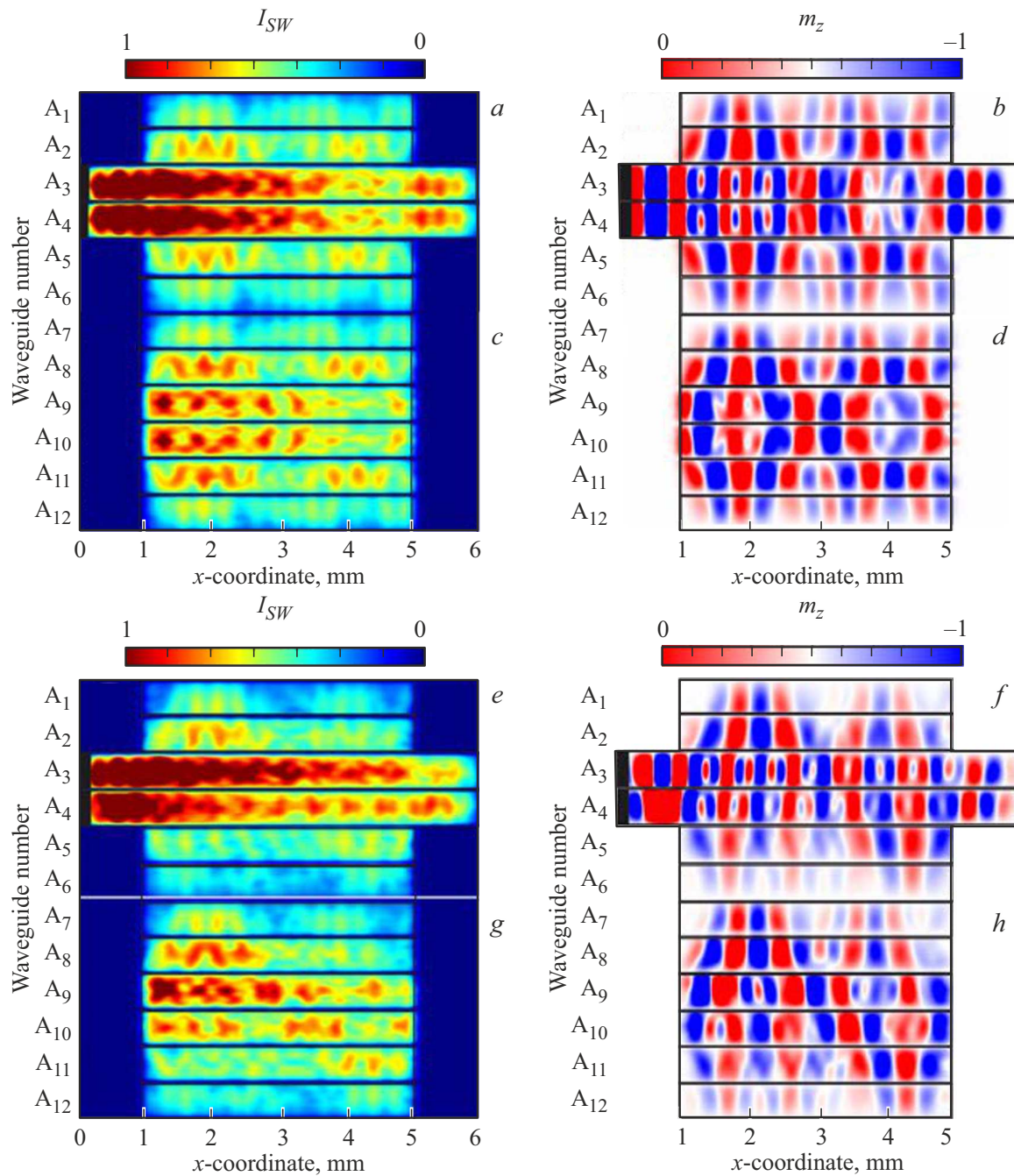


**Рис. 2.** Результаты расчета стационарного профиля СВ в каждом из слоев структуры для двух типов возбуждения входных центральных микроволноводов. (a, c, e, g) Пространственное распределение интенсивности СВ. (b, d, f, h) Карты пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов, где величина латерального и вертикального зазора составляет  $10\ \mu\text{m}$ . Результаты расчета приведены для значения частоты входного сигнала 5.25 GHz величины магнитного поля 1200 Oe.

Рассмотрим принцип работы исследуемой структуры. На входные антенны, расположенные на микроволноводах  $A_{3,4}$ , подается микроволновой сигнал  $P_{in}$ . Возбуждение структуры было реализовано путем создания локализованной области с переменным внешним магнитным полем на двух центральных микроволноводах в одном из слоев. Благодаря связи между СВ, распространяющимися в отдельных слоях и каналах двуслойной структуры,

меняются динамические свойства волновых процессов. Было проведено численное моделирование режимов распространения СВ в решетке ЖИГ-микроволноводов на основе решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (ЛЛГ) [34]. Рассмотрено два случая возбуждения СВ на источниках: синфазного (см. рис. 2, a, b) для нижнего слоя, для верхнего слоя (рис. 2, c, d) и случай противофазного возбуждения на рис. 2, e, f нижнего слоя и



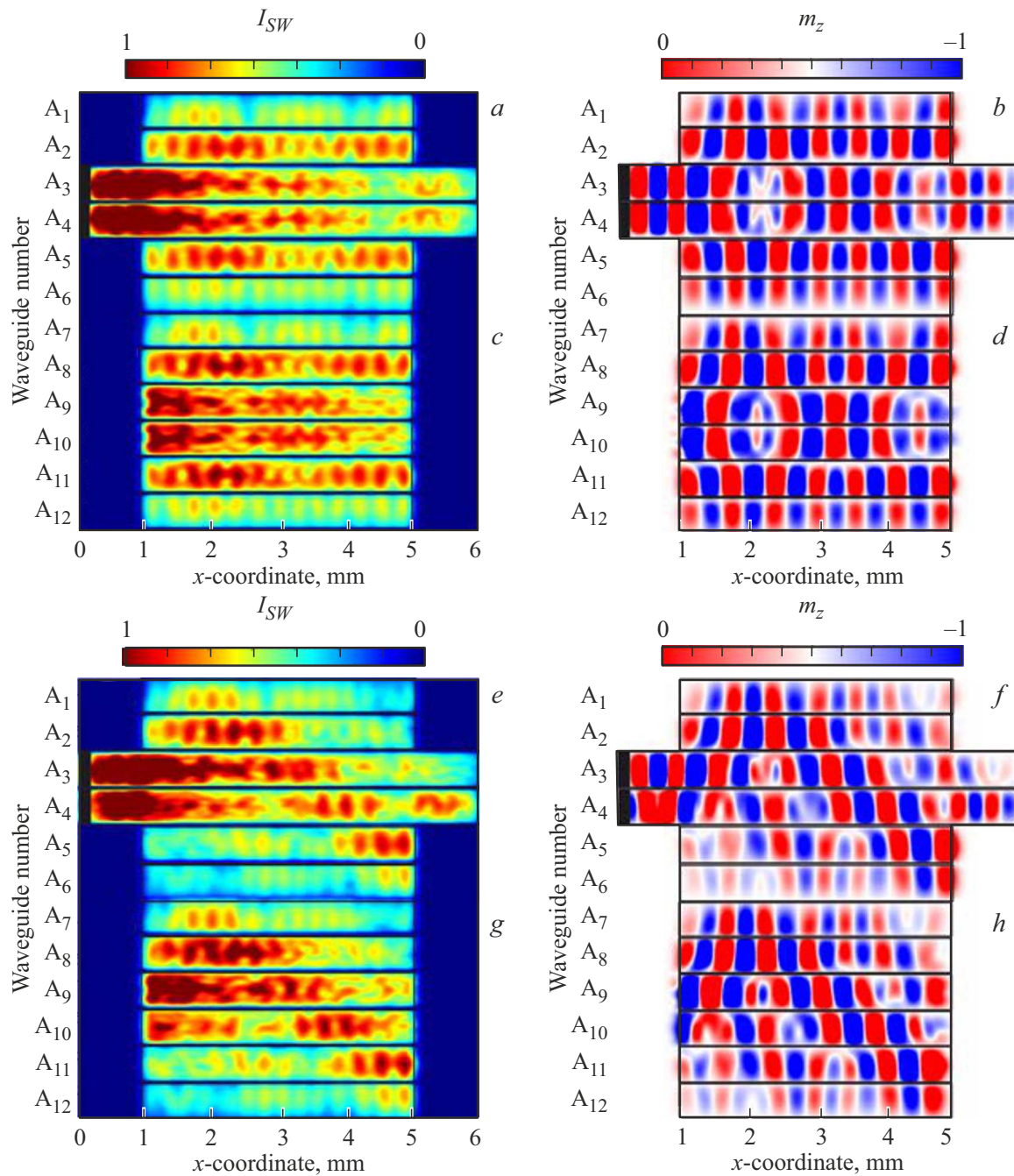


**Рис. 3.** Результаты расчета режимов распространения СВ в массиве микроволноводов в каждом из слоев структуры для двух типов возбуждения входных центральных микроволноводов с величинами латерального и вертикального зазора  $20\ \mu\text{m}$ . (a, c, e, g) Пространственное распределение интенсивности СВ. (b, d, f, h) Карты пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности для СВ.

рис. 2, g, h) верхнего слоя микроволноводов. По мере распространения СВ, наблюдается „перекачка“ спинового сигнала во все микроволноводы, в зависимости от разности фаз подаваемого микроволнового сигнала на входные антенны.

На рис. 2, a–d) показано синфазное возбуждение, когда величина латерального и вертикального зазоров составляет  $10\ \mu\text{m}$ , интенсивность СВ имеет максимум в двух

центральных каналах, при  $x = 3.8\ \text{mm}$ . В этом случае можно наблюдать перераспределение интенсивности из двух центральных каналов  $A_{3,4}$  в боковые  $A_{1,2,5,6}$ . На нижнем слое структуры, в котором расположены возбуждаемые волноводы, наблюдается локализация мощности СВ в области выходных секций центральных каналов  $A_{3,4}$  (см. рис. 2, a, b). При этом видно, что во входной и выходных областях центральных кана-



**Рис. 4.** (a, c, e, g) Пространственное распределение интенсивности СВ. (b, d, f, h) Карты пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов, где величина латерального зазора составляет  $20 \mu\text{m}$ , вертикального —  $10 \mu\text{m}$ .

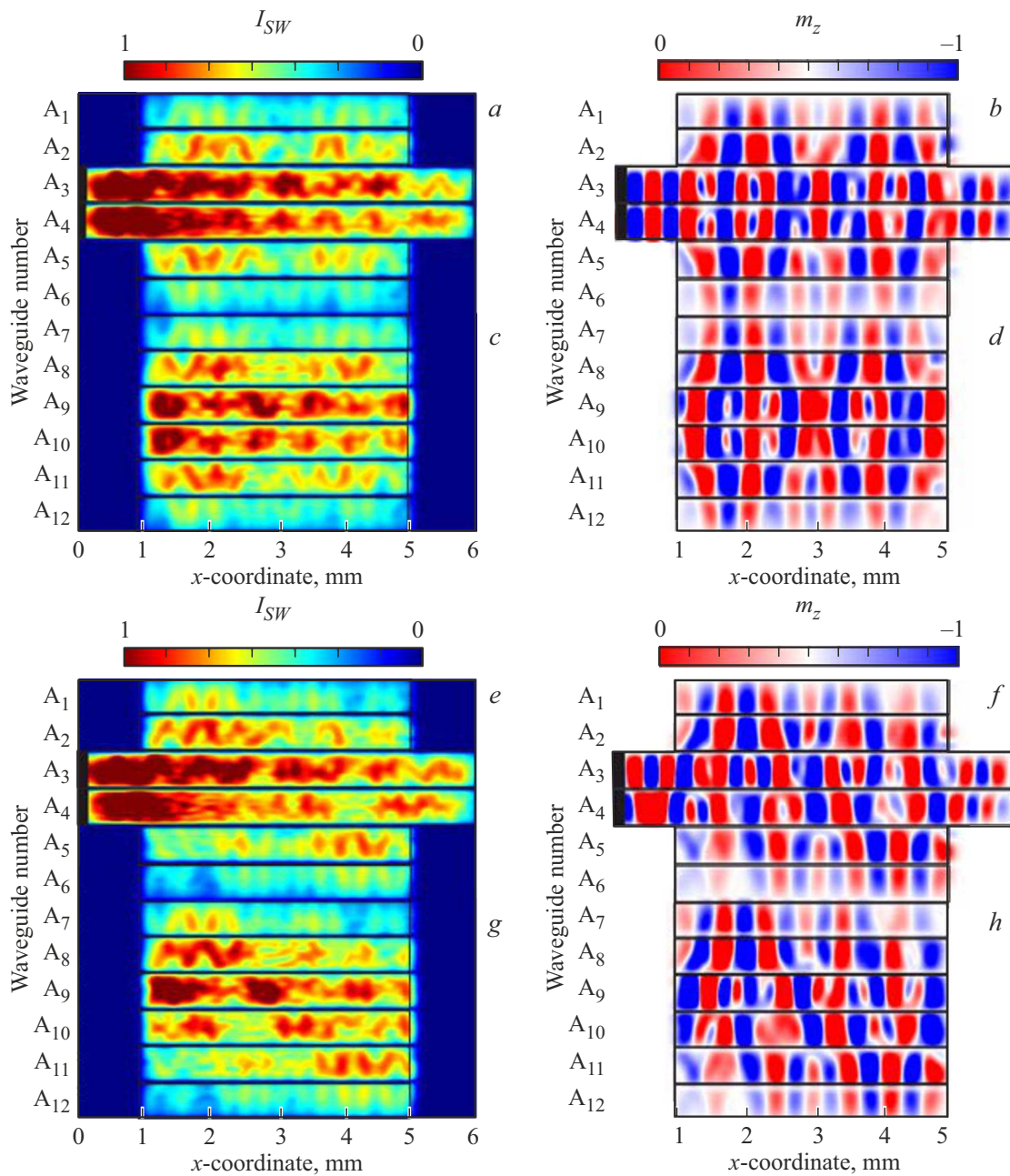
лов  $A_{3,4}$  длина СВ составляет величину  $500 \mu\text{m}$ , что соответствует расчету дисперсии симметричной моды латеральной структуры с данными геометрическими размерами [27].

В случае противофазного возбуждения на рис. 2, e–h, распространение СВ имеет ассиметричный профиль спин-волнового пучка на верхнем слое структуры в волноводах  $A_{7-9}$  (см. рис. 2, g). В выходных секциях микроволноводов можно пронаблюдать локализации

мощности СВ при  $x = 5.5 \text{ mm}$ , а именно максимум интенсивности в  $A_3$  и наоборот минимум в  $A_4$ .

При увеличении латерального и вертикального зазоров в 2 раза, когда  $a = b = 20 \mu\text{m}$ , наблюдается эффективная „перекачка“ спин-волнового сигнала в верхний слой структуры. При этом сигнал не поступает в волноводы  $A_{1,6}$  на нижнем слое и  $A_{7,12}$  на верхнем слое. В случае синфазного возбуждения, в нижнем слое энергия распространяется одинаковой мощности, а при





**Рис. 5.** *a, c, e, g* — пространственное распределение интенсивности СВ; *b, d, f, h* карты пространственного распределения компоненты  $m_z$  динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов, где величина латерального зазора составляет  $20\ \mu\text{m}$ , вертикального —  $40\ \mu\text{m}$ .

противофазном включении, распространяется только в центральных микроволноводах.

При сравнении результатов численного моделирования для массива микроволноводов размерностью  $2 \times 6$  на рис. 2 и 3 при одинаковых значениях латерального и вертикального зазора равных  $10$  и  $20\ \mu\text{m}$  соответственно, наблюдается изменение величины связи между микроволноводами, что влияет на перераспределение мощности в соседние каналы структуры. Отметим, что при сравнении синфазного случая возбуждения на рис. 2 и 3, видно увеличение расстояния  $L$  по оси  $x$  на  $0.2\ \text{mm}$ .

В решетке микроволноводов на рис. 4 величина латерального зазора  $20\ \mu\text{m}$ , а вертикального составляет  $10\ \mu\text{m}$ . При таких геометрических размерах в структуре при синфазном возбуждении рис. 4, а от начала области сочленения микроволноводов до первой перетяжки спин-волнового пучка  $L = 2.8\ \text{mm}$ , в отличие от одно-слойной пленки на рис. 1, *b*.

Сравнивая нижний и верхний слой при противофазном случае возбуждения на рис. 4, *e, f*, наблюдается перераспределение интенсивности, а именно мощности СВ передаются из двух центральных каналов  $A_{3,4}$  в боковые

$A_{1,2,7,8}$ . На нижнем слое структуры, в котором расположены возбуждаемые волноводы, наблюдается локализация мощности СВ в области канала  $A_4$  (см. рис. 4,  $e$ ) при  $x = 5.5$  mm. В случае противофазного возбуждения на рис. 4,  $e-h$ , распространение СВ происходит с набегом фазы между слоями, а именно, положение нулевого значения пространственного распределения компоненты  $mz$  динамической намагниченности в возбуждаемом слое и втором слое сдвинуто на  $200 \mu\text{m}$  при длине спиновой волны  $500 \mu\text{m}$ .

В этом варианте конфигурации структуры видно, что в центральной области наблюдается формирование двух пучков СВ, при расстоянии от начала области сочленения микроволноводов до первой перетяжки спин-волнового пучка  $L = 2.3$  mm.

Также было выявлено, что при увеличении вертикального зазора, распределение интенсивности сигнала между первым и вторым слоями системы микроволноводов становится все менее идентичным, при этом величина параметра  $L$  в каждом слое структуры имеет различное значение. Таким образом, мы получаем два режима спин-волнового транспорта: режим концентрации СВ на выходных секциях центральных каналов  $A_{3,4}$ , с возможностью их отдельного включения, а также режим управления сигналом с возможностью изменения фазы выходного сигнала. Так в нижнем слое структуры можно пронаблюдать три режима в выходных секциях микроволноводов  $A_{3,4}$  при  $x = 5.5$  mm: первый на рис. 2,  $e$ , где максимум энергии приходится на волновод  $A_3$ , второй на рис. 4,  $e$  максимум можно получить на канал  $A_4$ . Третий случай, когда в обоих каналах  $A_{3,4}$  при  $x = 5.5$  mm наблюдается одинаковое значение интенсивности СВ. Как было отмечено в разделе 2, изменение величины латерального зазора приводит к изменению величины длины связи. Аналогичное утверждение справедливо и для вертикального зазора, при этом при рассмотрении эффектов дипольной связи спиновых волн в вертикальном направлении увеличение величины воздушного зазора приводит к росту длины связи [1,10,22–24].

Таким образом, анализируя полученные в микромагнитном моделировании карты пространственного распределения намагниченности с разным типом возбуждения СВ, была показана возможность управления поперечной структурой поля спиновой волны в каждом слое и в выходных секциях структуры. Рассматриваемая структура на основе массива ЖИГ-микроволноводов может быть использована для создания систем многоканального разделения сигнала, что может быть осуществлено при расположении антенн в области выходов каждого из микроволноводов.

#### 4. Заключение

В настоящей работе рассмотрены методы управления характеристиками спин-волнового сигнала на основе

изменения сигнала на источнике в синфазных и противофазных сигналах на двух центральных микроволноводах. С помощью микромагнитного моделирования были исследованы режимы распространения СВ в массивах микроволноводов, образованные полосками ЖИГ. Выявлено влияние способа возбуждения массива микроволноводов на профили спин-волнового сигнала и эффективного перераспределения мощности СВ в каждом из 12 каналов рассматриваемой структуры. В конфигурации, соответствующей синфазному и противофазному способу возбуждения двух центральных каналов нижнего слоя поверхностных магнитостатических спиновых волн, удастся наблюдать неидентичное распределение величины динамической намагниченности в каждом из слоев при изменении ориентации направления внешнего магнитного поля. Таким образом, предложенная структура может быть использована для эффективной фильтрации и обработки сигналов в различных приложениях, связанных с магнитной микроэлектроникой и спинтроникой.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда в рамках выполнения проекта №23-79-30027.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов, УФН **185**, 10, 1099 (2015). [S.A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I.V. Lisenkov, A.N. Slavin, Y.N. Barabanenkov, S.A. Osokin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevsky, Y.A. Filimonov, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotsky, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov. Phys. Usp. **58**, 10, 1002 (2015)].
- [2] V.E. Demidov, S. Urazhdin, A. Zholud, A.V. Sadovnikov, A.N. Slavin, S.O. Demokritov. Sci. Rep. **5**, 8578 (2015).
- [3] C.S. Davies, A. Francis, A.V. Sadovnikov, S.V. Chertopalov, M.T. Bryan, S.V. Grishin, D.A. Allwood, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. Phys. Rev. B **92**, 020408(R) (2015).
- [4] A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands. Nature Phys. **11**, 453 (2015).
- [5] A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, V.K. Sakharov, Yu.V. Khivintsev. Phys. Rev. B **99**, 054424 (2019).
- [6] A.V. Sadovnikov, A.A. Zyablovsky, A.V. Dorofeenko, S.A. Nikitov. Phys. Rev. Appl. **18**, 024073 (2022).
- [7] M. Balynsky, D. Gutierrez, H. Chiang, A. Kozhevnikov, G. Dudko, Y. Filimonov, A.A. Balandin, A. Khitun. Sci. Rep. **7**, 11539 (2017).



- [8] A.V. Ustinov, A.V. Drozdovskii, V.A. Kalinikos. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 142513 (2010).
- [9] L.A. Shelukhin, V.V. Pavlov, P.A. Usachev, P.Yu. Shamray, R.V. Pisarev, A.M. Kalashnikova. *Phys. Rev. B* **97**, 014422 (2018).
- [10] 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. Кириллук. *УФН* **190**, 1009 (2020).
- [11] A. Chumak. *IEEE Trans. Magn.* **58**, 6 (2022).
- [12] 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).
- [13] А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев. *ЖТФ* **68**, 91 (1998).
- [14] Y.K. Fetisov, G. Srinivasan. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 14 (2006).
- [15] С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, В.К. Сахаров, Ю.А. Филимонов. *ЖТФ* **89**, 1044 (2019).
- [16] A.V. Ustinov, A.V. Drozdovskii, A.A. Nikitin, A.A. Semenov, D.A. Bozhko, A.A. Serga, B. Hillebrands, E. Lähderanta, V.A. Kalinikos. *Commun. Phys.* **2**, 1, 137 (2019).
- [17] A.A. Grachev, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov. *Nanomater.* **12**, 9, 1520 (2022).
- [18] А.В. Садовников, А.А. Грачев, Е.Н. Бегинин, С.А. Одинцов, С.Е. Шешукова, Ю.П. Шараевский, С.А. Никитов. *Письма в ЖЭТФ* **105**, 6, 347 (2017).
- [19] A. Stognij, L. Lutsev, N. Novitskii, A. Bespalov, O. Golikova, V. Ketsko, R. Gieniusz, A. Maziewski. *J. Phys. D* **48**, 485002 (2015).
- [20] A.I. Stognij, L.V. Lutsev, V.E. Bursian, N.N. Novitskii. *J. Appl. Phys.* **118**, 023905 (2015).
- [21] G. Gubbiotti, A. Sadovnikov, E. Beginin, S. Nikitov, D. Wan, A. Gupta, S. Kundu, G. Talmelli, R. Carpenter, I. Asselberghs, I.P. Radu, C. Adelmann, F. Ciubotaru. *Phys. Rev. Appl.* **15**, 014061 (2021).
- [22] A.K. Ganguly, C. Vittoria. *J. Appl. Phys.* **45**, 4665 (1974).
- [23] H. Puszkarski. *Surf. Sci. Rep.* **20**, 45 (1994).
- [24] M.R. Daniel, P.R. Emtage. *J. Appl. Phys.* **53**, 3723 (1982).
- [25] B. Hillebrands. *Phys. Rev. B* **41**, 530 (1990).
- [26] А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский. *Магнитостатистические волны в электронике сверхвысоких частот. Изд-во Саратов. ун-та, Саратов (1993). 314 с.*
- [27] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **107**, 202405 (2015).
- [28] A.Y. Annenkov, S.V. Gerus, E.H. Lock. *Europhys. Lett.* **123**, 44003 (2018).
- [29] А.Б. Хутиева, А.В. Садовников, А.Ю. Анненков, С.В. Герус, Э.Г. Локк. *Изв. РАН. Сер. физ.* **85**, 11, 1542 (2021).
- [30] S.N. Bajpai. *J. Appl. Phys.* **58**, 910 (1985).
- [31] T.W. O'Keeffe, R.W. Patterson. *J. Appl. Phys.* **49**, 4886 (1978).
- [32] O. Buttner, M. Bauer, C. Mathieu, S.O. Demokritov, B. Hillebrands, P.A. Kolodin, M.P. Kostylev, S. Sure, H. Dotsch, V. Grimalsky, Y. Rapoport, A.N. Slavin. *IEEE Trans. Magn.* **34**, 1381 (1998).
- [33] V.E. Demidov, S.O. Demokritov, K. Rott, P. Krzysteczko, G. Reiss. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 252504 (2007).
- [34] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez. *AIP Adv.* **4**, 107133 (2014).

Редактор Ю.Э. Кутаев