

04,05

Влияние ориентации магнитного поля на спиновые волны в кольцевом резонаторе

© Н.Ю. Яснев, А.А. Манышева, К.Е. Жумабекова, А.В. Садовников

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

E-mail: yasnev06@mail.ru

Поступила в Редакцию 6 марта 2026 г.

В окончательной редакции 9 марта 2026 г.

Принята к публикации 13 марта 2026 г.

Исследованы механизмы управления распространением спиновых волн в компактной интегрированной магнотонной структуре с квадратным резонатором на основе плёнки железо-иттриевого граната. Численное моделирование динамики намагниченности выполнено на основе уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта. Показано, что изменение угла φ приложения внешнего магнитного поля относительно продольной оси структуры (в диапазоне 75° – 105°) приводит к управляемой пространственной неоднородности эффективного поля, обусловленной геометрией резонатора и распределением размагничивающих полей. Выявлены режимы распространения ширинных мод при поперечной ориентации поля ($\varphi = 90^\circ$) и смешанных мод с нарушенной зеркальной симметрией при угловых отклонениях ($\varphi = 75^\circ$, 105°), что определяет перераспределение энергии между входным и выходным каналами. Управление частотными характеристиками достигается путём варьирования ориентации внешнего поля при сохранении неизменной геометрии структуры. Это создаёт предпосылки для конструирования энергоэффективных перестраиваемых фильтров и логических компонентов, интегрируемых в магнотонные схемы.

Ключевые слова: спиновые волны, магнотоника, кольцевой микрорезонатор, железо-иттриевый гранат, ориентация магнитного поля, численное моделирование, перестраиваемые фильтры.

DOI: 10.61011/FTT.2026.08.63686.17NN

1. Введение

Современная микроэлектроника сталкивается с фундаментальными ограничениями, связанными с энергопотреблением и тепловыделением. В этом контексте магнотоника — направление, использующее спиновые волны для передачи и обработки информации — предлагает альтернативу традиционным подходам. Спиновые волны представляют собой коллективные возбуждения магнитного порядка, распространение которых не сопровождается переносом заряда, что исключает джоулевы потери и позволяет создавать энергоэффективные устройства высокой плотности интеграции [1,2].

Особый интерес представляют резонансные магнотонные структуры, способные осуществлять частотную фильтрацию сигналов. Кольцевые микрорезонаторы, интегрированные с линейными волноводами, позволяют реализовать компактные фильтры, в которых частотная селективность обусловлена интерференцией спиновых волн, циркулирующих по замкнутому контуру [3]. Ключевой задачей при этом является обеспечение возможности динамической перестройки резонансных характеристик без изменения геометрии устройства. Кроме того, возможность масштабирования спиноволновых структур до нанометрового диапазона позиционирует магнотонику как одну из ключевых технологий для будущих систем обработки и хранения данных [4].

Актуальность исследований в области магнотоники обусловлена появлением новых устройств на основе принципов спин-волновых вычислений [5,6] и разработке многослойных магнотонных архитектур [7–9]. Переход от планарных (2D) к объёмным (3D) магнотонным сетям представляет особый научный интерес, поскольку открывает возможности для реализации новых концепций обработки информации, включая параллельное и многопоточное мультиплексирование и демуплексирование сигналов в частотной, временной и пространственной областях [10]. В настоящей работе исследуется планарная (2D) структура, которая может служить базовым элементом для будущих 3D-систем, где несколько таких резонаторов располагаются в разных плоскостях и связаны через диполь-дипольное взаимодействие. Данная эволюция архитектур критически важна в контексте задач дальнейшей миниатюризации и повышения энергоэффективности вычислительных систем.

В качестве базового материала для реализации магнотонных устройств наиболее перспективным считается железо-иттриевый гранат (ЖИГ). Данный материал характеризуется экстремально низкими потерями на распространение спиновых волн, что обусловлено малой шириной линии ферромагнитного резонанса и низким значением параметра затухания Гильберта. ЖИГ совместим с наномасштабированием и требует минимальных энергетических затрат для возбуждения магноволн, что

делает его пригодным для создания энергонезависимой памяти, спиновых транзисторов, логических элементов, магнитных сенсоров и управляемых СВЧ-устройств диэлектрической магноники. Тем не менее, традиционные методы синтеза плёнок ЖИГ, в частности жидкофазная эпитаксия, накладывают существенные ограничения на интеграцию таких структур с полупроводниковыми технологиями и формирование монолитных мультиферроидных гетероструктур.

Для задач 3D магноники важным является задача оптимизации размеров функциональных блоков на основе спин-волновых элементов. Ввиду этого реализация планарных устройств с обратной связью является важной задачей на пути создания „чисто-магнетонных“ элементов для обработки сигналов. В настоящей работе исследуется компактная интегрированная структура на основе плёнки ЖИГ, в которой замкнутый волноводный контур квадратной формы (далее для краткости называемый „кольцевым резонатором“) непосредственно соединён с входным и выходным микроволноводами без зазора. Такая топология обеспечивает максимальную эффективность связи между волноводом и резонатором, что критически важно для создания миниатюрных функциональных элементов.

Целью работы является теоретическое исследование механизмов управления распространением спиновых волн в интегрированной системе „волновод-кольцо“ посредством вариации ориентации внешнего магнитного поля. Анализируется влияние геометрической анизотропии квадратного контура на распределение эффективного поля и дисперсионные свойства спиновых волн, рассматривается возможность перестройки резонансной частоты при сохранении высокой частотной селективности. Полученные результаты могут лечь в основу разработки перестраиваемых магнетонных фильтров и логических элементов для энергоэффективных информационных схем.

2. Исследуемая структура

Объектом исследования является компактная интегрированная магнетонная структура на основе эпитаксиальной плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ), выполненная в виде замкнутого волноводного контура квадратной формы [11], непосредственно соединённого с входным и выходным микроволноводами (рис. 1, а). Такая конфигурация формирует единый непрерывный магнетонный путь, обеспечивающий эффективную связь между волноводными каналами и резонансной системой за счёт прямого диполь-дипольного взаимодействия.

Кольцевой микрорезонатор имеет сторону $900\text{ }\mu\text{m}$ и ширину стенки $w_r = 300\text{ }\mu\text{m}$. Прямолинейные входной и выходной микроволноводы имеют ширину $300\text{ }\mu\text{m}$ и длину $1050\text{ }\mu\text{m}$ каждый. Торцы волноводов примыкают к противоположным сторонам квадратного резонатора,

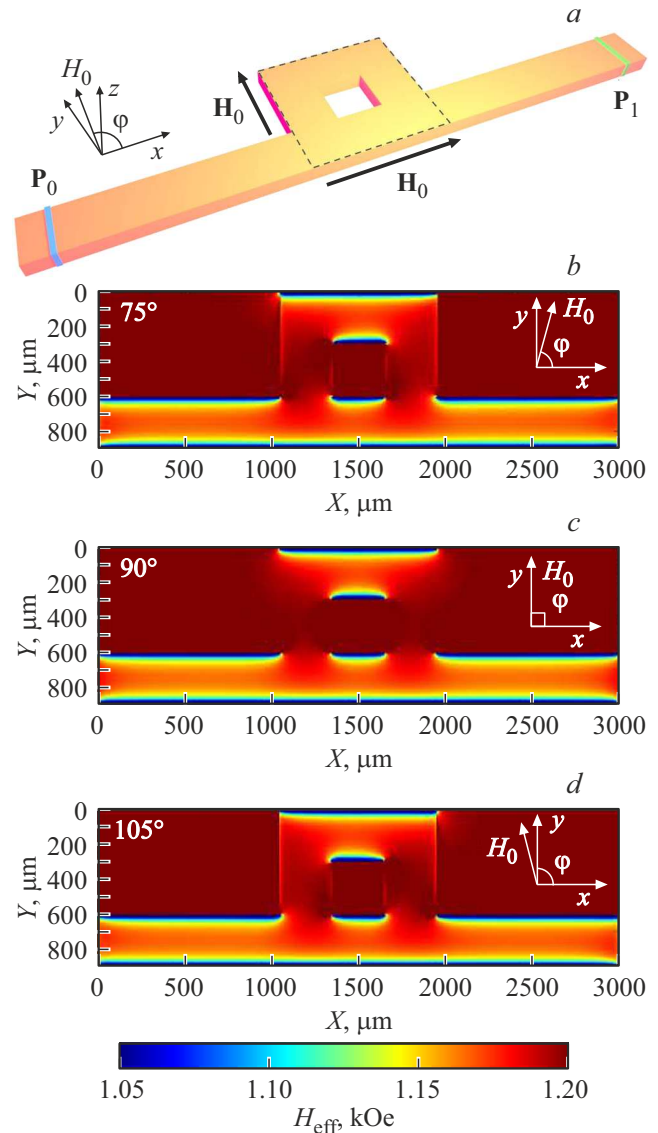


Рис. 1. (а) Схематическое изображение исследуемой структуры на основе плёнки ЖИГ, (b) карты распределения эффективного магнитного поля H_{eff} в структуре при различных углах приложения внешнего поля $\phi = 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$ относительно оси X .

образуя непрерывную магнитную структуру без разрывов. Такая геометрия обеспечивает эффективное возбуждение азимутальных мод в резонаторе и их интерференцию, что лежит в основе частотно-селективных свойств устройства. Выбор квадратной формы резонатора обусловлен наличием углов, в которых локально концентрируются размагничивающие поля, что создаёт условия для управления неоднородностью внутреннего поля путём изменения ориентации внешнего поля намагничивания.

В численном моделировании рассматривалась плёнка ЖИГ толщиной $10\text{ }\mu\text{m}$. Выбор данного материала обусловлен его уникальными свойствами: экстремально низким параметром затухания Гильберта и высокой од-

нородностью магнитных характеристик, что критически важно для наблюдения чётких резонансных эффектов и обеспечения большой длины затухания спиновых волн. В расчётах использовались параметры, соответствующие высококачественным эпитаксиальным структурам: намагниченность насыщения $4\pi M_s = 1750$ G, константа обменного взаимодействия $A_{ex} = 3.614 \cdot 10^{-7}$ erg/cm, параметр затухания Гильберта $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$.

Возбуждение спиновых волн задавалось в области входного волновода (порт P_0), расположенной на расстоянии $500 \mu\text{m}$ от начала расчётной области, а регистрация сигнала — в области выходного волновода (порт P_1). Возбуждение осуществлялось путём приложения переменного магнитного поля, моделирующего воздействие микрополосковой антенны. Направление переменного возбуждающего поля — вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости структуры)

Для анализа влияния ориентации поля на распространение волн рассматривались два диапазона углов φ между направлением внешнего поля и продольной осью волноводов (ось X): квази-продольный ($\varphi = -15^\circ, 0^\circ, +15^\circ$) и квази-поперечный ($\varphi = 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$). Такой выбор обусловлен стремлением исследовать влияние отклонений от строго симметричной геометрии намагничивания, при которой достигается максимальная однородность эффективного поля в кольце. Углы $\pm 15^\circ$ от оси X позволяют сохранить однодоменное состояние в структуре, при этом вызывая заметную неоднородность эффективного внутреннего поля за счёт анизотропии формы квадратного контура.

3. Методы исследования

Численное моделирование динамики намагниченности в исследуемой магнитной структуре выполнено с использованием программного пакета MuMax3 [12], реализующего решение уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта методом конечных разностей во временной области на графических процессорах. Данное уравнение описывает эволюцию вектора намагниченности $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ под действием эффективного магнитного поля:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{H}_{\text{eff}} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right],$$

где γ — гиромагнитное отношение, α — безразмерный параметр затухания Гильберта, M_s — намагниченность насыщения. Эффективное поле $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{\text{demag}} + \mathbf{H}_{\text{ex}} + \mathbf{H}_a$ где $\mathbf{H}_0$ — внешнее магнитное поле, $\mathbf{H}_{\text{demag}}$ — поле размагничивания, $\mathbf{H}_{\text{ex}}$ — обменное поле, $\mathbf{H}_a$ — поле анизотропии. При этом поле анизотропии ЖИГ не учитывалось.

Пространственная дискретизация расчётной области выполнена с шагом $2.5 \mu\text{m}$ по всем направлениям, что обеспечивает корректное описание диполь-дипольного взаимодействия при сохранении приемлемых вычислительных затрат. Для подавления паразитных отражений

спиновых волн от границ моделируемой области на концах волноводов реализованы поглощающие слои с плавно нарастающим коэффициентом затухания α в диапазоне от 10^{-5} до 1. Такой подход позволяет минимизировать влияние граничных эффектов на интерференционную картину в центральной части структуры.

Внешнее постоянное магнитное поле напряжённостью $H_0 = 1.2$ kOe прикладывалось в плоскости структуры. Управление резонансными характеристиками осуществлялось путём варьирования угла φ между направлением H_0 и продольной осью волноводов.

Возбуждение спиновых волн моделировалось путём приложения гармонического поля в области входной антенны. Для этого в области размером $30 \mu\text{m}$ в направлении оси x и $300 \mu\text{m}$ в направлении оси y добавлялась z -компонента внешнего магнитного поля величиной 0.1 Oe. Частотное сканирование проводилось в диапазоне 3.8 – 5.8 GHz с шагом 10 MHz в линейном режиме, что исключает проявление нелинейных эффектов [13,14]. Для извлечения амплитудно-частотных характеристик рассчитывался комплексный коэффициент передачи S_{21} как отношение Фурье-образов сигнала в выходном и входном портах. Пространственное распределение фазы динамической намагниченности $m_z(x, y)$ определялось как аргумент комплексной амплитуды на фиксированной частоте, что позволяет визуализировать интерференционную картину и идентифицировать типы возбуждаемых мод.

4. Результаты

В предложенной архитектуре квадратный кольцевой микрорезонатор, непосредственно соединённый с входным и выходным микроволновдами, функционирует как элемент с распределённой обратной связью [15]. Интерференция волн формирует устойчивую картину стоячих волн, которая определяет условия передачи сигнала в выходную секцию. Таким образом, кольцевой резонатор вводит в канал передачи частотно-зависимую обратную связь: амплитуда и фаза сигнала на выходе определяются условием фазового синхронизма после полного оборота волны по кольцу.

Был проведён расчёт амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) выходного сигнала в области, обозначенной микрополосковой антенной P_1 на рис. 1, а. Возбуждение спиновых волн осуществлялось гармоническим полем в области входного порта P_0 . Значения динамической намагниченности $m_z(x, y, t)$ записывались в ходе моделирования с последующим применением преобразования Фурье для получения частотных характеристик.

При изменении угла приложения внешнего магнитного поля в квази-поперечном диапазоне (75° – 105°) наблюдается управляемый сдвиг резонансного пика (рис. 2), обусловленный модификацией пространственного распределения эффективного магнитного поля в

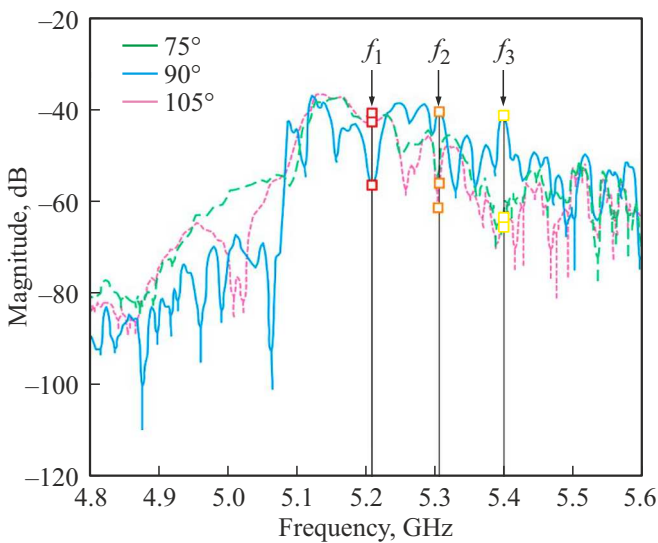


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики спин-волнового сигнала полученные в области P_1 при направлении внешнего магнитного поля $\varphi = 75^\circ$, 90° и 105° .

резонаторе. При этом добротность резонанса сохраняется на высоком уровне, что подтверждает возможность частотной перестройки без ухудшения селективных характеристик фильтра. При возбуждении спиновых волн во входном волноводе на переходе „микроволновод–кольцо“ происходит рассеяние падающей моды спиновой волны на несколько собственных мод резонатора [16]. Эти моды интерферируют друг с другом. В зависимости от частоты возбуждения интерференция может быть конструктивной с формированием резонансного пика передачи (например, при частоте $f_3 = 5.4$ GHz при $\varphi = 90^\circ$) или деструктивной — амплитуда сигнала в выходном волноводе подавляется, что проявляется как провал в спектре (например, при частоте $f_1 = 5.2$ GHz при $\varphi = 90^\circ$).

Для анализа физической природы наблюдаемых эффектов были построены пространственные распределения $m_z(x, y)$ компоненты динамической намагниченности на выбранных резонансных частотах f_1 , f_2 и f_3 , наличие которых свидетельствует о накоплении энергии в кольце за счет многократной циркуляции.

Конечная ширина волновода кольца w_r приводит к квантованию поперечной компоненты волнового вектора $k_{x,n} = n\pi/w_r$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Это означает, что в кольце могут распространяться только дискретные собственные моды. Спектр передачи определяется „свёрткой“ дисперсионного соотношения с этим набором разрешённых мод: если на данной частоте ни одна из квантованных мод не удовлетворяет условию фазового синхронизма для эффективной связи с выходным волноводом, наблюдается подавление передачи. На рис. 3, *b* можно отметить формирование второй шириной моды ($n = 2$). При этом при намагничивании вдоль оси y (в квази-поперечной ориентации внешнего поля) в плечах коль-

цевого резонатора наблюдается формирование обратных объёмных волн [17], для которых $k \parallel M$. При этом дисперсионное соотношение существенно анизотропно: направление групповой скорости зависит от ориентации волнового вектора. Это приводит к формированию каустических траекторий — спиновые волны распространяются под фиксированными углами, многократно отражаясь от внутренних границ кольца, что становится еще более выраженным при отклонении угла магнитного поля (см. рис. 3, *a, c*). В результате энергия может оказаться „запертой“ внутри резонатора без эффективного выхода в выходной волновод, что также вносит вклад в формирование провалов.

Визуализация распределения $m_z(x, y)$ -компоненты динамической намагниченности (рис. 3) на резонансных частотах показывает формирование стоячих волн с четко выраженными узлами и пучностями внутри кольцевого контура [18]. Это подтверждает, что сигнал в выходной секции является результатом интерференции волн, прошедших различные пути внутри замкнутого контура обратной связи. В случае $\varphi = 90^\circ$ (рис. 3, *b*) фазовый профиль обладает зеркальной симметрией относительно оси Y , что указывает на возбуждение чистых азимуталь-

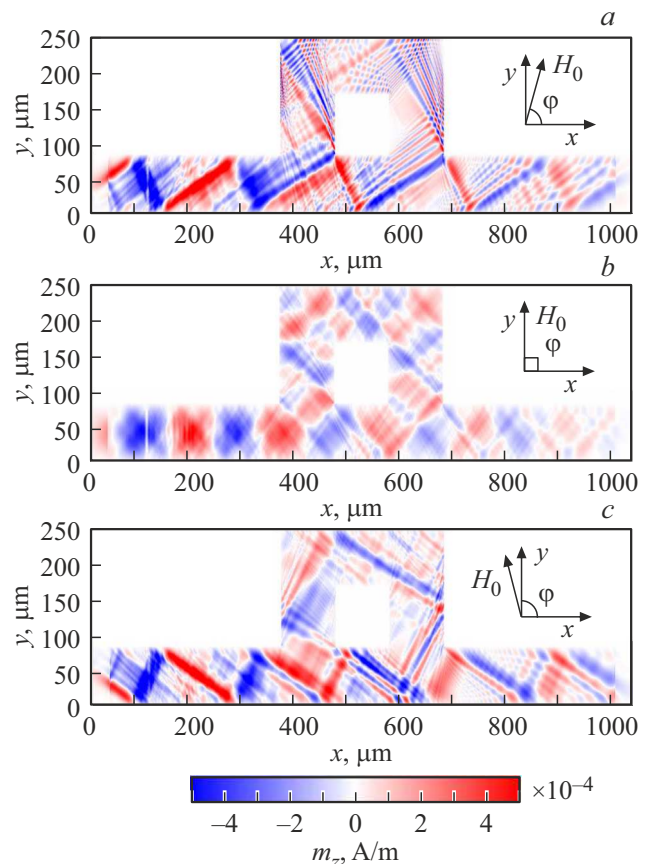


Рис. 3. Пространственные карты m_z -компоненты намагниченности в волноведущей структуре с кольцевым резонатором при направлении внешнего магнитного поля под углом $\varphi = 75^\circ$ (*a*), 90° (*b*) и 105° (*c*).

ных мод, циркулирующих по кольцу в противоположных направлениях с равными амплитудами. Интерференция этих мод формирует стоячую волну с чётко выраженными узлами и пучностями, что обуславливает высокую добротность резонанса.

При изменении угла намагничивания до $\varphi = 75^\circ$ (рис. 3, *a*) симметрия фазового профиля нарушается: наблюдается асимметрия в распределении фазы между верхней и нижней частями кольца. Это свидетельствует о возбуждении смешанных мод — суперпозиции бегущих волн с разной амплитудой, циркулирующих по и против часовой стрелки. Аналогичная картина, но с противоположным знаком асимметрии, наблюдается при $\varphi = 105^\circ$ (рис. 3, *c*). Нарушение зеркальной симметрии интерференции приводит к перераспределению энергии между входным и выходным волноводами и, как следствие, к сдвигу резонансной частоты.

Дополнительный анализ распределения эффективного магнитного поля $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ показал, что при $\varphi = 90^\circ$ поле в кольце практически однородно, тогда как при углах 75° и 105° в углах квадратного контура возникают локальные неоднородности, обусловленные взаимодействием внешнего поля с размагничивающими полями, зависящими от геометрии (см. рис. 1, *b*). Неоднородность $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ модифицирует локальное волновое число $k(\omega, H_{\text{eff}})$, что приводит к изменению фазового набегу $\Delta\varphi = \int k \cdot dl$ на длине пути прохождения спиновой волной всего резонатора. Это эквивалентно перестройке условия фазового баланса в петле обратной связи (изменяется условие фазового накопления на длине окружности), что приводит к нарушению симметрии интерференционной картины и способствует дополнительному рассеянию и перераспределению энергии между модами. Таким образом, локальное изменение эффективного поля модифицирует дисперсионные характеристики волн в различных участках кольца, что обуславливает сдвиг резонансных пиков. Похожий эффект наблюдался в системе латерально ориентированных микроволноводов, где было проведено исследование влияния угла намагничивания на связь волноводов [19].

5. Заключение

В работе исследовано распространение спиновых волн в интегрированной магнотонной структуре на основе плёнки ЖИГ, содержащей квадратный кольцевой микрорезонатор, непосредственно соединённый с входным и выходным волноводами. Показано, что ориентация внешнего магнитного поля фиксированной величины выступает эффективным управляющим параметром: изменение угла приложения поля относительно продольной оси волноводов приводит к возникновению пространственной неоднородности эффективного магнитного поля в кольце, обусловленной геометрической

анизотропией квадратного контура. Данная неоднородность модифицирует локальные условия распространения спиновых волн и вызывает управляемый сдвиг резонансной частоты азимутальных мод в диапазоне 3.8–5.8 GHz при сохранении высокой частотной селективности. Анализ пространственных распределений динамической намагнитченности показывает, что угловая ориентация внешнего магнитного поля модифицирует профиль возбуждаемых спиновых волн и эффективность их связи с волноводами. Это определяет перераспределение энергии между входным и выходным каналами, позволяя кольцевому микрорезонатору функционировать как перестраиваемый элемент обратной связи. Данная конфигурация критически важна для проектирования магнотонных фильтров и логических схем с управляемыми частотными характеристиками. Провалы в спектре передачи возникают не вследствие простого затухания спиновых волн, а из-за частотно-зависимой интерференции множества квантованных резонаторных мод в условиях анизотропной дисперсии, геометрического ограничения и локальных градиентов магнитного поля. Резонансный пик в передаче наблюдается только при одновременном выполнении условия фазового синхронизма для полного обхода кольца и эффективного модового согласования в области сочленения „микроволновод–кольцо“.

Предложенный метод угловой перестройки позволяет управлять частотными характеристиками без изменения геометрии структуры или величины намагничивающего поля, что обеспечивает быстроедействие и энергоэффективность. Полученные результаты могут лечь в основу разработки компактных перестраиваемых магнотонных устройств для обработки информационных сигналов в энергоэффективных схемах следующего поколения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-79-30027.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Flebus, D. Grundler, B. Rana, Y. Otani, I. Barsukov, A. Barman, G. Gubbiotti, P. Landeros, J. Akerman, U. Ebels, P. Pirro, V.E. Demidov, K. Schultheiss, G. Csaba, Q. Wang, F. Ciubotaru, D.E. Nikonov, P. Che, R. Hertel, T. Ono, D. Afanasiev, J. Mentink, T. Rasing, B. Hillebrands, S.V. Kusminskiy, W. Zhang, C.R. Du, A. Finco, T. van der Sar, Y.K. Luo, Y. Shiota, J. Sklenar, T. Yu, J. Rao. *J. Phys.: Condens. Matter* **36**, 363501 (2024).
- [2] A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak, A.O. Adeyeye, M. Krawczyk, J. Gräfe, C. Adelmann, S. Cotozana, A. Naeemi, 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. Albigsetti, D. Petti, R. Bertacco, H. Schultheiss, V.V. Kruglyak, V.D. Poimanov, S. Sahoo, J. Sinha, H. Yang, M. Münzenberg, T. Moriyama, S. Mizukami, P. Landeros, R.A. Gallardo, G. Carloti, 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. Phys.: Condens. Matter* **33**, 41, 413001 (2021).
- [3] S.A. Odintsov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov. *Phys. Rev. Appl.* **22**, 1, 014042 (2024).
- [4] C. Chappert, A. Fert, F.N. Van Dau. *Nat. Mater.* **6**, 11, 813 (2007).
- [5] D.D. Awschalom, M.E. Flatté. *Nat. Phys.* **3**, 3, 153 (2007).
- [6] S.D. Bader, S.S.P. Parkin. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **1**, 1, 71 (2010).
- [7] S.O. Demokritov (ed.). *Spin Wave Confinement: Propagating Waves*. CRC Press (2017).
- [8] A. Sidorenko. *Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics*. Springer, Cham (2018).
- [9] G. Gubbiotti (ed.). *Three-Dimensional Magnonics: Layered, Micro- and Nanostructures*. CRC Press (2019).
- [10] G. Gubbiotti, A. Barman, S. Ladak, C. Bran, D. Grundler, M. Huth, H. Plank, G. Schmidt, S. van Dijken, R. Streubel, O. Dobrovolskiy, V. Scagnoli, L. Heyderman, C. Donnelly, O. Hellwig, L. Fallarino, M.B. Jungfleisch, A. Farhan, N. Maccaferri, P. Vavassori, P. Fischer, R. Tomasello, G. Finocchio, R. Clérac, R. Sessoli, D. Makarov, D.D. Sheka, M. Krawczyk, R. Gallardo, P. Landeros, M. d'Aquino, R. Hertel, P. Pirro, F. Ciubotaru, M. Becherer, J. Gartside, T. Ono, P. Bortolotti, A. Fernández-Pacheco. *J. Phys.: Condens. Matter* **37**, 14, 143502 (2025).
- [11] D.G. Rabus. *Integrated Ring Resonators: The Compendium*. Springer, Berlin, Heidelberg (2007).
- [12] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenberge. *AIP Adv.* **4**, 10, 107133 (2014).
- [13] Q. Wang, R. Verba, B. Heinz, M. Schneider, O. Wojewoda, K. Davidková, M. Urbánek, P. Pirro, A.V. Chumak. *Sci. Adv.* **9**, 32, eadg4609 (2023).
- [14] Q. Wang, A. Hamadeh, R. Verba, V. Lomakin, M. Mohseni, B. Hillebrands, A.V. Chumak, P. Pirro. *npj Comput. Mater.* **6**, 1, 192 (2020).
- [15] S.A. Odintsov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov. *Phys. Rev. Appl.* **22**, 1, 014042 (2024).
- [16] A.A. Martyshkin, S.E. Sheshukova, A.V. Sadovnikov. *Appl. Phys. Lett.* **124**, 9, 092401 (2024).
- [17] F. Vilsmeier, T. Taniguchi, M. Lindner, C. Riedel, C. Back. *arXiv preprint arXiv:2504.17920* (2025).
- [18] V.E. Demidov, S. Urazhdin, S.O. Demokritov. *Nat. Mater.* **9**, 12, 984 (2010).
- [19] A.B. Khutueva, A.A. Grachev, E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov. *Izv. VUZ. Appl. Nonlinear Dyn.* **32**, 1, 57 (2024).

Редактор Ю.Э. Кутаев