

Управление режимами распространение спиновых волн в кольцевом ЖИГ-микрорезонаторе

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

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им.
Н.Г. Чернышевского

Аннотация: методом микромагнитного моделирования изучено распространение спиновых волн в двух вариантах структур на основе плёнки железо-иттриевого граната: кольцевой резонатор, соединённый с волноводами, и отдельный от них. Показано, что направление внешнего магнитного поля влияет на распределение эффективного поля внутри резонатора. При поперечной ориентации поле в кольце распределено почти равномерно, а при отклонениях в углах квадратного контура возникают локальные неоднородности из-за размагничивающих полей. Это меняет условия распространения спиновых волн и позволяет сдвигать резонансную частоту без потери добротности. Механизм работает для обеих топологий, что показывает универсальность углового управления для перестраиваемых магнонных фильтров.

Ключевые слова: спиновые волны, железо-иттриевый гранат, магноника, резонатор кольцевого типа, частотная селекция, микромагнитное моделирование.

1. Введение

Железо-иттриевый гранат (ЖИГ) широко используется в магнонных устройствах благодаря очень низким потерям на распространение спиновых волн (параметр затухания Гилберта $\alpha \sim 10^{-4}$) [1, 2]. Это позволяет наблюдать резонансные эффекты даже в структурах большого размера и делает ЖИГ подходящим материалом для спин-волновой электроники [3-5].

Кольцевые микрорезонаторы на основе ЖИГ интересны тем, что могут одновременно передавать и фильтровать магнонные сигналы в компактном исполнении. Однако важно иметь возможность менять их резонансные частоты без переделки геометрии.

В этой работе показано, что поворот вектора внешнего магнитного поля создаёт неоднородность внутреннего эффективного поля в структуре. Это позволяет управлять резонансными частотами и пропусканием сигнала. Такой подход может быть использован для создания перестраиваемых магнонных фильтров и логических элементов [6, 7].

2. Модель структуры и результаты моделирования

Первая структура представляет собой кольцевой резонатор, напрямую соединённый с входным и выходным волноводами [8]. Волны возбуждаются антенной на входе, сигнал регистрируется на выходе. Схема работает как частотный фильтр на основе интерференции мод. Вторая структура отличается наличием зазора шириной 30 мкм между кольцевым резонатором и линейным волноводом, что исключает прямой обмен спиновыми возбуждениями и реализует режим слабой связи через дальнедействующее диполь-дипольное взаимодействие. Несмотря на физическое разделение компонентов, энергетический обмен между волноводом и резонатором остаётся эффективным благодаря перекрытию динамических магнитных полей в области зазора, что позволяет возбуждать азимутальные моды в кольце при подаче СВЧ-сигнала на входную антенну. Слабосвязанная топология демонстрирует

функциональную гибкость, сопоставимую с интегрированной схемой, при этом обеспечивая технологические преимущества в виде возможности независимой настройки отдельных элементов.

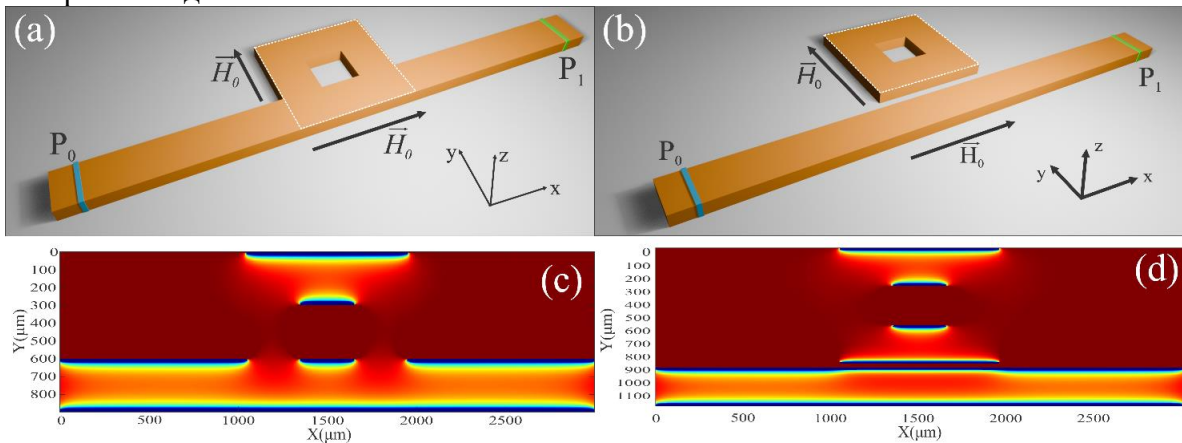


Рисунок 1. Геометрия исследуемых структур: (а) кольцевой резонатор, интегрированный с волноводом; (б) резонатор, отделенный зазором; Распределение эффективного поля H_{eff} при ориентации внешнего поля под углом 90° к оси X: (с) для первой структуры; (д) для второй структуры.

Моделирование проводилось в программном пакете MuMax3, реализующем решение уравнения Ландау-Лифшица-Гилберта [9]. Внешнее поле напряжённостью 1.2 кЭ прикладывалось в плоскости плёнки под различными углами к оси волновода. При ориентации поля, близкой к поперечной относительно оси волновода, поле внутри кольца распределено практически однородно, тогда как угловые отклонения приводят к появлению локальных неоднородностей в областях геометрических изломов квадратного контура. Эти неоднородности, обусловленные взаимодействием внешнего поля с размагничивающими факторами формы, модифицируют локальные дисперсионные соотношения и фазовые набегии спиновых волн.

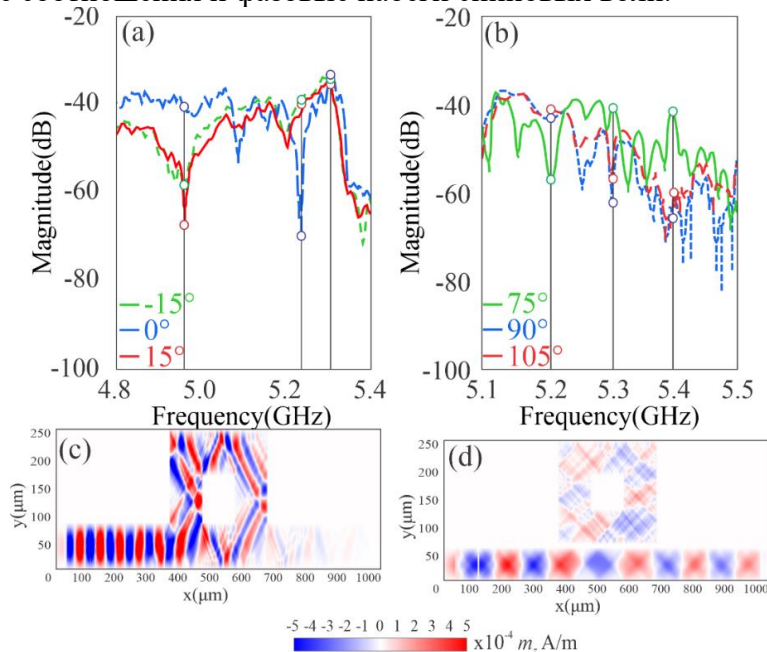


Рисунок 2. (а) АЧХ передачи сигнала: (а) для первой структуры; (б) для второй структуры; (с) Карты распределения фазы для первой структуры на частоте 5.2 ГГц при угле $\varphi = 90^\circ$; (д) Карты распределения фазы для второй структуры на частоте 5.2 ГГц при угле $\varphi = 90^\circ$

Анализ амплитудно-частотных характеристик показал наличие выраженных

резонансных пиков, положение которых зависит от угла приложения внешнего поля. Для первой структуры при углах $-15^\circ \dots +15^\circ$ наблюдается сдвиг основного резонанса в диапазоне 5.1-5.3 ГГц, при этом ширина пика остаётся малой, что свидетельствует о высокой добротности системы. Для второй структуры с зазором резонансные пики фиксируются в аналогичном частотном диапазоне, однако их амплитуда ниже из-за ослабленной связи между волноводом и резонатором. Тем не менее, селективность фильтра сохраняется, что подтверждает работоспособность механизма угловой перестройки для слабосвязанных топологий.

Распределения динамической намагниченности m_z , (рис. 2с, d), демонстрируют формирование стоячих волн внутри кольцевого контура на резонансных частотах. При симметричной ориентации поля (0° и 90°) фазовая картина обладает зеркальной симметрией, что соответствует возбуждению чистых азимутальных мод. При угловых отклонениях симметрия нарушается: наблюдается асимметрия фазового профиля между верхней и нижней частями кольца, что указывает на суперпозицию мод с разной амплитудой волн, циркулирующих по и против часовой стрелки. Это приводит к перераспределению энергии между входным и выходным каналами и, как следствие, к управляемому сдвигу резонансной частоты.

3. Заключение

Сравнение двух топологий показало, что поворот внешнего магнитного поля является простым и эффективным способом управления резонансными свойствами ЖИГ-структур. Неоднородность эффективного поля, возникающая при отклонении от поперечной ориентации, позволяет сдвигать резонансную частоту без потери селективности. Механизм работает как для структур с прямым контактом, так и для слабосвязанных систем. Это открывает возможности для проектирования гибридных магنونных схем, где отдельные резонаторы могут настраиваться независимо без изменения геометрии. Данный подход привлекателен для интеграции магنونных компонентов с иными платформами, где критически важны минимальное вмешательство и наличие внешнего параметра регулировки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-30027).

Список литературы

1. Barman A., Chumak A. V., Neusser S. et al. The 2021 magnonics roadmap // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2021. – Vol. 33. – No. 41. – P. 413001.
2. Flebus B., Brächer T., Chumak A. V. et al. The 2024 magnonics roadmap // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2024. – Vol. 36. – No. 36. – P. 363501.
3. Wang Q., Liu Y., Zhang J. et al. A nonlinear magnonic nano-ring resonator // *npj Computational Materials*. – 2020. – Vol. 6. – No. 1. – P. 192.
4. Chumak A. V., Pirro P. A nonlinear magnonic nano-ring resonator // *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Vol. 134. – No. 12. – P. 123901.
5. Rabus D. G. *Integrated Ring Resonators: The Compendium*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – 256 p.
6. Odintsov S. A., Sheshukova S. E., Nikitov S. A., Sadovnikov A. V. Lateral and vertical spin-wave transport in a multimode magnonic ring coupler // *Physical Review Applied*. – 2024. – Vol. 22. – No. 1. – P. 014042.
7. Martyshkin A. A., Sheshukova S. E., Sadovnikov A. V. Nonlinear magnonic coupler using backpropagating surface spin waves // *Applied Physics Letters*. – 2024. – Vol. 124. – No. 9. – P. 092401.
8. Vilsmeier F., Heussner F., Lägél B. et al. Spin wave propagation in a ring-shaped magnonic waveguide // *arXiv preprint arXiv:2504.17920*. – 2025.
9. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. The design and verification of MuMax3 // *AIP Advances*. – 2014. – Vol. 4. – No. 10. – P. 107133.