

# Частотно-селективное демультимплексирование сигнала в ортогональных ЖИГ-микроволноводах с кольцевым микрорезонатором

А.А. Манышева, Н.Ю. Яснев, А.В. Садовников

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

**Аннотация:** в данной работе проведено моделирование распространения спиновых волн в магнонной структуре с кольцевым резонатором на основе железо-иттриевого граната. Показано, что микрорезонатор обеспечивает фильтрацию и передачу сигнала между ортогональными волноводами. Спиновые волны связываются в областях взаимопересечения микроволноводов, что приводит к взаимодействию и управляемой асимметрии в пространственных распределениях амплитуды спиновой волны.

**Ключевые слова:** спиновые волны, магноника, кольцевой резонатор, железо-иттриевый гранат, микромагнитное моделирование

## 1. Введение

Современная полупроводниковая микроэлектроника сталкивается с барьерами, обусловленными тем, что дальнейшее уменьшение размеров элементов приводит к росту энергетических затрат и тепловой нагрузке, что делает их неэффективными в контексте энергосбережения. Поэтому большое внимание привлекают альтернативные подходы к обработке информации, основанные не на движении электронов, а на коллективных магнитных возбуждениях в упорядоченных средах. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является магноника — дисциплина, где информационные сигналы переносятся спиновыми волнами (СВ), обеспечивающими низкое энергопотребление и потенциал для создания энергоэффективных вычислительных архитектур.

Основой для реализации магнонных схем традиционно выбирают железо-иттриевый гранат ( $Y_3Fe_5O_{12}$ , ЖИГ). Благодаря минимальным потерям при распространении спиновых волн в этом диэлектрике становится возможным создание эффективных фильтрующих элементов. Речь идет о задачах пространственно-частотной фильтрации, реализуемых, в частности, в интерферометрах или системах с крестообразным соединением волноводных каналов [1–4].

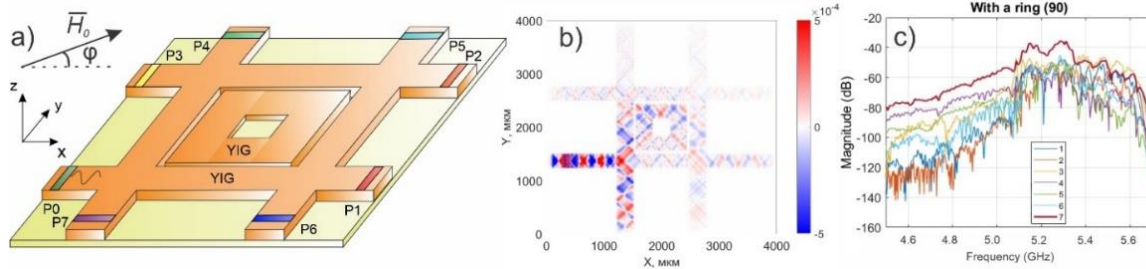
Целью работы является объединение кольцевого ЖИГ-микрорезонатора и ортогонально сочленённых магнонных микроволноводов для реализации цифрового демультимплексирования сигналов, где информационными параметрами выступают амплитуда спиновой волны.

## 2. Описание структуры и метода моделирования

Объектом численного анализа выступила магнонная структура, основанная на ортогональных волноводах из ЖИГ и встроенном кольцевом резонаторе. Центральным элементом служит квадратный кольцевой контур со стороной 900 мкм (рис. 1а), который сопряжен с четырьмя прямолинейными каналами. Эти каналы ориентированы под прямым углом друг к другу, имеют ширину 300 мкм и протяженность 4000 мкм, формируя крестообразную топологию. Толщина магнитной пленки во всех элементах фиксирована на отметке 10 мкм. Входное возбуждение

спиновых волн задавалось в порту  $P_0$ . Такая топология дает возможность изучать не только распространение волн вдоль волноводов, но и эффекты резонансного обмена энергией с кольцом [5–9].

Моделирование динамики намагниченности выполнялись в MuMax3 [10], что позволило учесть все существенные магнитные взаимодействия. С целью подавления краевых отражений периметр расчетной области был дополнен слоями с нарастающим коэффициентом диссипации. Материальные параметры соответствовали характеристикам эпитаксиальных пленок ЖИГ: коэффициент затухания принят равным  $\alpha = 10^{-4}$  [11], а намагниченность насыщения составляла  $M_s = 139$  кА/м.



**Рисунок 1.** (а) Схема структуры с кольцевым микрорезонатором; (б) Карта распределения фазы колебаний намагниченности при частоте  $f = 5.288$  GHz, внешнем поле  $H_0 = 1.2$  kOe, направленном вдоль оси  $Y$ , и возбуждении в терминале  $P_0$ ; (с) Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) на выходах  $P_1 - P_7$  при том же значении магнитного поля.

### 3. Анализ динамики спиновых волн и условий демультиплексирования

Функциональность структуры анализировалась путем варьирования двух управляющих параметров: частоты входного сигнала  $f$  и угла ориентации внешнего магнитного поля  $\varphi$ . Зависимости амплитуды от частоты (АЧХ) были получены для каждого из семи портов вывода ( $P_1 - P_7$ ) при разных углах  $\varphi$  (рис. 1с). Полученные зависимости дают возможность локализовать резонансные пики, соответствующие максимуму энергопереноса в конкретные каналы, и выделить частотные окна для селективной маршрутизации.

Опираясь на данные АЧХ, были определены резонансные частоты, для которых построены карты пространственного распределения фазы прецессии намагниченности. Под фазой в контексте данной работы понимается нормированная (проецированная на ось, перпендикулярную плоскости структуры) компонента намагниченности  $m_z$ . Её визуализация для случая  $\varphi = 90^\circ$  и частоты  $f = 5.288$  GHz представлена на рис. 1б. Полученное изображение демонстрирует траекторию распространения спиновой волны (моды) от входного порта  $P_0$  к выходным портам, что позволяет оценить эффективность перераспределения энергии между ветвями структуры.

В рабочем диапазоне частот (рис. 1с) возбуждение затрагивает все четыре волновода, однако доминирующий канал распространения меняется в зависимости от частоты и угла  $\varphi$ . Следовательно, подбирая частоту, можно реализовать различные сценарии маршрутизации сигнала, получая на выходе структуры требуемое распределение мощности между каналами.

### 4. Заключение

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована возможность частотно-селективного демультиплексирования спин-волновых сигналов в системе ортогонально сочленённых ЖИГ-микроволноводов с интегрированным кольцевым микрорезонатором.

Установлено, что в диапазоне частот 4,500–5,700 GHz при различных значениях угла  $\varphi$  наблюдается управляемая асимметрия в распределении амплитуды спиновых волн. В частности, при  $\varphi = 75^\circ$  и частоте 5,265 GHz основная мощность передается в канал  $P_4$ , тогда как при  $\varphi = 90^\circ$  и частоте 5,288 GHz сигнал преимущественно направляется в каналы  $P_3$  и  $P_7$ . Это свидетельствует о высокой степени пространственного контроля над распространением спиновых волн, реализуемого за счёт резонансного взаимодействия с кольцевым элементом.

Кроме того, кольцевой резонатор сам по себе может хранить «внутреннее состояние»: на разных частотах в нём возбуждаются бегущие моды по/против часовой стрелки или стоячие волны. Это позволяет использовать резонатор не только как пассивный фильтр, но и как элемент памяти или контекстного отклика, сохраняющего информацию в диапазоне частот, а не в дискретной точке. Такой подход естественным образом совместим с концепцией Processing-in-Memory (PIM): спиновые волны позволяют одновременно хранить и обрабатывать информацию без перемещения заряда, минимизируя энергозатраты и задержки.

Полученные результаты открывают перспективы для создания функциональных магнонных устройств, таких как частотные фильтры, переключатели и демультимплексоры, которые могут быть интегрированы в многослойные топологии магнонных сетей. Предложенная структура демонстрирует потенциал для реализации энергоэффективных вычислительных архитектур, где обработка информации осуществляется на основе коллективных магнитных возбуждений без использования движущихся электронов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027).

#### Список литературы

1. X. Yang, Y. Hou, H. He. A processing-in-memory architecture programming paradigm for wireless Internet-of-Things applications //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 1. – С. 140. DOI: 10.3390/s19010140
2. B. Flebus et al. The 2024 magnonics roadmap //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2024. – Т. 36. – №. 36. – С. 363501. DOI: 10.1088/1361-648X/ad399c
3. A. Barman et al. The 2021 magnonics roadmap //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. – Т. 33. – №. 41. – С. 413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a
4. N. Zenbaa, C. Abert, F. Majcen, M. Kerber, R. O. Serha, S. Knauer, Q. Wang, T. Schrefl, D. Suess, A. V. Chumak. A universal inverse-design magnonic device //Nature Electronics. – 2025. – Т. 8. – №. 2. – С. 106-115. DOI: 10.1038/s41928-024-01333-7
5. S.V. Grishin, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, D.V. Romanenko, A.V. Sadovnikov, Y.P. Sharaevskii, I.V. Sysoev, T. Medvedeva, E.P. Seleznev, S. A. Nikitov. Space-quasiperiodic and time-chaotic parametric patterns in a magnonic quasicrystal active ring resonator //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 16. – №. 5. – С. 054029. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054029
6. F. Vilsmeier, T. Taniguchi, M. Lindner, C. Riedel, C. Back. Spin wave propagation in a ring-shaped magnonic waveguide //arXiv preprint arXiv:2504.17920. – 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.17920
7. Q. Wang, A. Hamadeh, R. Verba, V. Lomakin, M. Mohseni, B. Hillebrands, A. V. Chumak, P. Pirro. A nonlinear magnonic nano-ring resonator //npj Computational Materials. – 2020. – Т. 6. – №. 1. – С. 192.
8. S.A. Odintsov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov. Lateral and vertical spin-wave transport in a multimode magnonic ring coupler //Physical Review Applied. – 2024. – Т. 22. – №. 1. – С. 014042. DOI: 10.1038/s41524-020-00465-6
9. A.A. Martyshkin, S.E. Sheshukova, A.V. Sadovnikov. Nonlinear magnonic coupler using backpropagating surface spin waves //Applied Physics Letters. – 2024. – Т. 124. – №. 9. DOI: 10.1063/5.0190510
10. Z. Chen, G. Lim, C.C.I. Ang, T. Jin, T. Funan, B.W.H. Cheng, W.S. Lew. Voltage-controlled half adder via magnonic inverse design //Applied Physics Letters. – 2025. – Т. 126. – №. 13. DOI: 10.1063/5.0256599
11. А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. – 1994.