

# Частотно-селективная и невзаимная перекачка спиновых волн в латерально связанных двухслойных магнонных волноводах на основе ферритов с различной намагниченностью насыщения

А.С. Пташенко, А.В. Садовников

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

**Аннотация:** В работе представлены результаты комплексного экспериментального и численного исследования распространения поверхностных спиновых волн (СВ) в системе двух латерально связанных микроволноводов, выполненных на основе двухслойной структуры из ферритовых плёнок с различными магнитными параметрами (намагниченности насыщения 904 Гс и 1738 Гс, толщины 6,8 мкм и 8,9 мкм). Показано, что локализация СВ на границах раздела слоёв и интерфейсах «феррит/воздух» приводит к формированию двух частотных диапазонов распространения и проявлению невзаимности. Экспериментально зарегистрирована селективная перекачка энергии от активного волновода к пассивному через магнитостатическое взаимодействие, что подтверждается характером амплитудно-частотных характеристик на трёх выходных портах. Анализ дисперсионных зависимостей выявил условия фазового сопряжения, определяющие эффективность обмена энергией между волноводами в определённых частотных окнах. Полученные результаты открывают возможности для разработки магнонных логических элементов и устройств управления спин-волновыми потоками.

**Ключевые слова:** магноника, спиновые волны, поверхностные спиновые волны, ферритовые плёнки

## 1. Введение

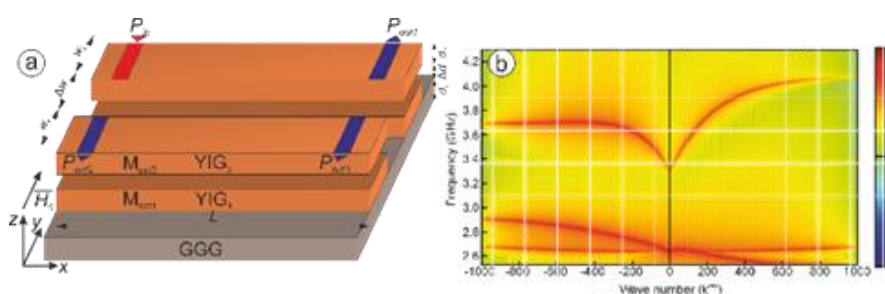
Современная магноника — область спинтроники, посвящённая управлению и использованию спиновых волн (СВ) для передачи и обработки информации, — активно развивается как альтернатива традиционной электронике благодаря потенциально низкому энергопотреблению и отсутствию джоулева нагрева [1]. Одним из ключевых направлений является разработка функциональных магнонных элементов, таких как логические вентили, фильтры и маршрутизаторы спин-волновых сигналов [2]. В этом контексте особый интерес представляют структуры с латеральным связыванием микроволноводов [3,4], где перенос информации осуществляется за счёт магнитостатического взаимодействия между соседними каналами. Особенно перспективными являются двухслойные ферритовые системы [5,6], в которых различие магнитных параметров слоёв позволяет управлять локализацией и дисперсией спиновых волн, а также реализовывать эффекты невзаимности [7] и частотной селективности [8]. В данной работе представлены результаты экспериментального и численного исследования распространения и перекачки энергии СВ в системе двух латерально связанных микроволноводов на основе двухслойной структуры из плёнок железо-иттриевого граната (YIG) с различной намагниченностью насыщения.

## 2. Методы и описание исследуемой структуры

Исследуемая структура состоит из двух параллельных микроволноводов шириной ~10 мкм, выполненных на подложке GGG и образованных двухслойной ферритовой

плёнкой YIG (рис.1а). Первый слой имеет намагниченность насыщения  $M_{s1} = 904$  Гс и толщину  $d_1 = 6,8$  мкм, второй —  $M_{s2} = 1738$  Гс и  $d_2 = 8,9$  мкм. Активный (первый) волновод возбуждается с помощью копланарной микрополосковой антенны, подключённой к генератору СВ-сигнала. Второй волновод пассивен: в нём не предусмотрено прямое возбуждение, и любой регистрируемый сигнал обусловлен исключительно магнитоэлектрическим связыванием с активным каналом.

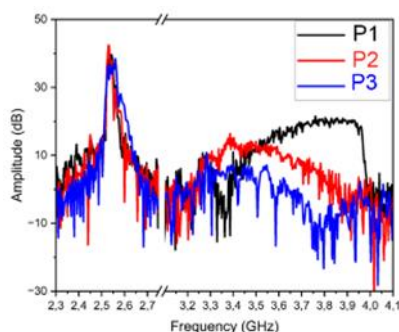
Для регистрации сигнала использовались три выходных порта: порт 1 — напротив возбуждающей антенны в активном волноводе, порты 2 и 3 — на противоположных концах пассивного волновода. Измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) проводились в диапазоне частот 4–9 ГГц. Численное моделирование для расчета дисперсионных характеристик и пространственного распределения динамической намагниченности методом конечных элементов с учётом реальных геометрических и магнитных параметров структуры проводилось в программном пакете *numax3*.



**Рисунок 1.** (а) Схематическое изображение исследуемой структуры, (б) Дисперсионная характеристика двухслойного волновода с различными значениями намагниченности на порте P1.

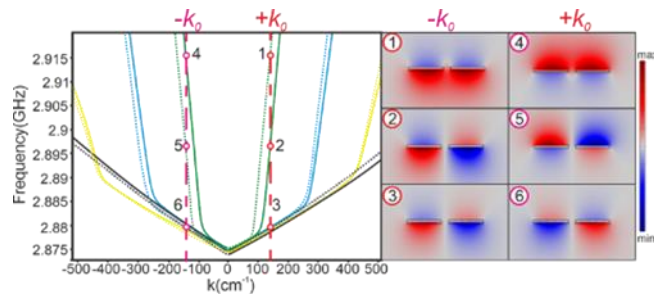
### 3. Полученные результаты

АЧХ (рис.2) демонстрируют наличие двух выраженных полос пропускания на порту 1, что связано с формированием двух мод поверхностных спиновых волн, локализованных в разных слоях двухслойной структуры. На портах 2 и 3, расположенных на пассивном волноводе, наблюдается сужение спектра и снижение добротности резонансов, что свидетельствует о частичной перекачке энергии от активного канала.



**Рисунок 2.** АЧХ на выходных антеннах в исследуемой структуре.

При этом эффективность передачи существенно зависит от частоты: максимумы перекачки совпадают с областями пересечения или близости дисперсионных ветвей связанных мод.



**Рисунок 3.** Дисперсионные характеристики для прямой и обратной СВ в ВЧ области исследуемой структуры (зеленые линии — первая мода, синие — вторая мода, желтые — третья мода,

Кроме этого, численное моделирование (рис. 1b, 3) подтвердило существование двухчастотных диапазонов распространения СВ, обусловленных различием в  $M_s$  и толщинах слоёв. Более того, выявлена явная невязанность дисперсионных зависимостей: ветви для волн с волновыми векторами  $k > 0$  и  $k < 0$  не совпадают, что связано с асимметричной локализацией мод вблизи границ раздела слоёв и интерфейсов «YIG/воздух». Анализ распределения динамической намагниченности (рис. 3, панели 1–6) показал, что при смене знака  $k$  максимумы амплитуды смещаются из одного слоя в другой, что дополнительно усиливает эффект невязанности и влияет на условия фазового сопряжения между связанными волноводами.

### 3. Заключение

Проведённое исследование показало, что в латерально связанных двухслойных микроволноводах на основе YIG с различной намагниченностью насыщения реализуется частотно-селективная перекачка энергии спиновых волн, обусловленная совместным влиянием геометрических параметров, магнитной неоднородности и условий фазового согласования. Невязанность распространения и двумодовый характер спектра открывают возможности для разработки новых типов магنونных устройств, включая неконтролируемые (unidirectional) маршрутизаторы [10], частотные фильтры и логические элементы с пространственным кодированием информации. Полученные результаты вносят вклад в фундаментальное понимание динамики связанных спин-волновых систем и служат основой для проектирования функциональных магنونных схем следующего поколения.

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

#### Список литературы

1. Krawczyk, M., Gräfe, J., Adelman, C., Cofofana, S., Naeemi, A., Vasyuchka, V.I., Hillebrands, B., Nikitov, S.A., Yu, H., Grundler, D. and Sadovnikov, A., 2021. The 2021 Magnonics Roadmap. *J. Phys.: Condens. Matter*, 33, p.413001.
2. Grubišić, A., Guimarães, M.H., Afanasiev, D., García Aguilar, J.H., Aguilera, I., Ali, M.N., Bhattacharyya, S., Blanter, Y.M., Bosma, R., Cheng, Z. and Dan, Z., 2025. Roadmap on quantum magnetic materials.
3. Saraiva, P., Nogaret, A., Portal, J.C., Beere, H.E. and Ritchie, D.A., 2010. Dipolar spin waves of lateral magnetic superlattices. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 82(22), p.224417.
4. Odintsov, S.A., Sheshukova, S.E., Nikitov, S.A. and Sadovnikov, A.V., 2025. Bilayer magnonic crystal directional coupler: Interlayer spin-wave coupling and formation of localized beams within a three-dimensional magnonic architecture. *Physical Review Applied*, 23(3), p.034043.
5. Tikhonov, V.V., Lock, E.H., Ptashenko, A.S. and Sadovnikov, A.V., 2023. Excitation of exchange spin waves in the transition layer of the two-layer ferrite-ferrite structure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 587, p.171251.

6. Grishin, A.M., Dellalov, V.S., Shkar, V.F., Nikolayev, E.I. and Linnik, A.I., 1989. Spin-wave resonances in two-layer garnet films. *Physics Letters A*, 140(3), pp.133-135.
7. Sadovnikov, A.V., Beginin, E.N., Sheshukova, S.E., Sharaevskii, Y.P., Stognij, A.I., Novitski, N.N., Sakharov, V.K., Khivintsev, Y.V. and Nikitov, S.A., 2019. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure. *Physical Review B*, 99(5), p.054424.
8. Davidková, K., Levchenko, K., Bruckner, F., Verba, R., Majcen, F., Wang, Q., Lindner, M., Dubs, C., Vlaminck, V., Klíma, J. and Urbánek, M., 2025. Nanoscale spin-wave frequency-selective limiter for 5G technology. *Physical Review Applied*, 23(3), p.034026.
9. Chumak, A.V., Kabos, P., Wu, M., Abert, C., Adelman, C., Adeyeye, A.O., Åkerman, J., Aliev, F.G., Anane, A., Awad, A. and Back, C.H., 2022. Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing. *IEEE Transactions on Magnetism*, 58(6), pp.1-72.