

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Распространение спиновых волн в наноразмерных связанных  
ферритовых пленках**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2211 группы  
направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

Института физики

Балаевой Веры Вячеславовны

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

Морозова М.А.

Зав. кафедрой нелинейной физики

доцент, к.ф.-м.н.

Бегинин Е.Н.

Саратов 2024 г.

## Введение

В последние годы микро- и наноструктуры на основе магнитных материалов вызывают особый интерес в связи с возможностями их использования в системах связи нового поколения [1, 2]. Спиновые волны (СВ) на порядки короче по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты, что позволяет создавать наноразмерные устройства [3-5].

Одной из проблем магнитной технологии является эффективное и управляемое соединение отдельных устройств обработки сигналов в магнитную схему. Связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиофизических систем, так как появляется дополнительный управляющий параметр — связь. В случае двух связанных волноведущих ферромагнитных структур связь приводит к появлению симметричной и антисимметричной нормальных волн, распространяющихся с различными групповыми и фазовыми скоростями, а также к периодической перекачке мощности, а пространственным периодом можно управлять с помощью величины постоянного магнитного поля, ориентации статической намагниченности каналов, геометрии связанной структуры [6, 7].

Для реализации управляемого соединения между магнитными каналами планарная геометрия является более актуальной, т.к. экспериментальные исследования сэндвич структуры довольно сложны из-за отсутствия доступа к отдельным слоям для возбуждения и приема распространяющихся СВ. Большинство работ посвящено рассмотрению структур микронных размеров. Однако, современные технологии выращивания магнитных плёнок позволяют создавать плёнки наноразмерной толщины, что более актуально с точки зрения миниатюризации и энергоэффективности устройств.

В работе [8] рассмотрено распространение СВ в латерально связанных наноразмерных пленках для случая обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ), причем СВ распространялись преимущественно за счет обменного взаимодействия. Однако для заключения об эффективности использования связанных структур необходимо рассмотреть также случай

поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) и МСВ, распространяющихся за счет диполь-дипольного взаимодействия.

В данной работе исследуется распространение спиновых волн в латерально связанной структуре на основе нанометровых волноводов из железо-иттриевого граната ( $Y_3Fe_5O_{12}$ , ЖИГ). Внешнее поле направляется двумя способами для формирования ПМСВ и ООМСВ. Также исследуются связанные структуры на основе магнетонных кристаллов (МК), что позволяет реализовать частотное разделение сигнала, или демультимплексирование. Исследования спиновых волн производились на основе моделирования в среде для микромагнитного моделирования MuMax3. Полученные расчеты далее были обработаны с помощью программ и встроенных модулей в среде Matlab.

Таким образом, целью работы является исследование особенностей распространения и перекачки спиновых волн в латерально связанных ферритовых плёнках и магнетонных кристаллов нанометровой толщины с помощью методов микромагнитного моделирования в среде MuMax3.

Глава 1 посвящена теоретическому изложению основ теории спиновых волн. Представлено описание движения вектора намагниченности, волновые уравнения и выражения для дисперсионных характеристик в одиночных и связанных волноводах на основе пленок и МК. Приведены формула для длины перекачки мощности и качественный анализ влияния некоторых параметров на перекачку.

В главе 2 описаны методы для реализации моделирования и обработки расчетов, представлены полученные диаграммы и зависимости. Был произведен анализ результатов и представлены выводы.

### **Краткое содержание работы**

В среде микромагнитного моделирования MuMax3 решаются временная и пространственная задачи эволюции намагниченности в микро- и нанометровых масштабах. Для описания вынужденных колебаний вектора намагниченности используется уравнение Ландау – Лифшица.

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -\gamma [\bar{M} \cdot \bar{H}] + \frac{\alpha \gamma}{M} [\bar{M} [\bar{M} \cdot \bar{H}]], \quad (1)$$

где  $\bar{M}$  - вектор намагниченности,  $\bar{H}$  - вектор магнитного поля,  $\gamma = 28$  ГГц/Тл-гиромагнитное отношение,  $\alpha$  - безразмерный параметр затухания.

Основной особенностью связанных структур является периодическая перекачка сигнала между волноводами в направлении распространения волны. Длина перекачки определяется соотношением [9, 10]:

$$\Lambda = 2\pi / |k_s - k_{as}| \quad (2)$$

На рис. 1 (а) представлена схема латерально связанной структуры на основе ферромагнитных пленок (ФП) толщиной  $S$  и шириной  $w$ . ФП разделены воздушным зазором ширины  $d$ . Структура помещена во внешнее магнитное поле напряженностью  $H_0$ .

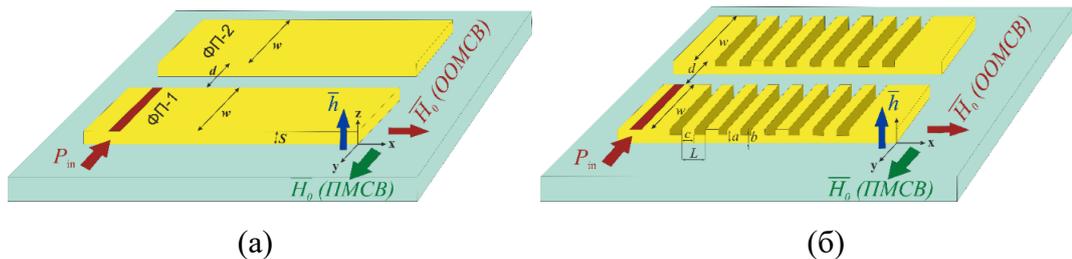


Рис. 1. Схема латерально связанной структуры на основе (а) ФП и (б) МК.

Рассмотрим также латерально связанную структуру на основе ФП с периодической системой канавок – магнетонных кристаллов (МК) (рис. 1 (б)). На поверхности плёнки нанесена периодическая структура с периодом  $L$  в виде канавок глубиной  $\Delta$  ( $\Delta = a - b$ ) и шириной  $p$  ( $c = L - p$ ).

Особенностью периодических структур является наличие брэгговских резонансов, которые приводят к появлению запрещенных зон (33) – непропускающих полос в спектре.

Допустим, что для МСВ в структуре МК-1/МК-2 существует волновое уравнение движения вектора намагниченности. Тогда решение волнового уравнения может быть представлено в виде суммы прямых и отраженных волн

$k_0$  и  $k_{-1}$ , связанных условием Брэгга [11, 12]:

$$k_{-1} = -k_0 + 2k_B, \quad (4)$$

где  $k_B = \pi/L = \pi/\lambda_B$ ,  $k_B$  и  $\lambda_B$  – брэгговские постоянная распространения и длина волны, соответственно.

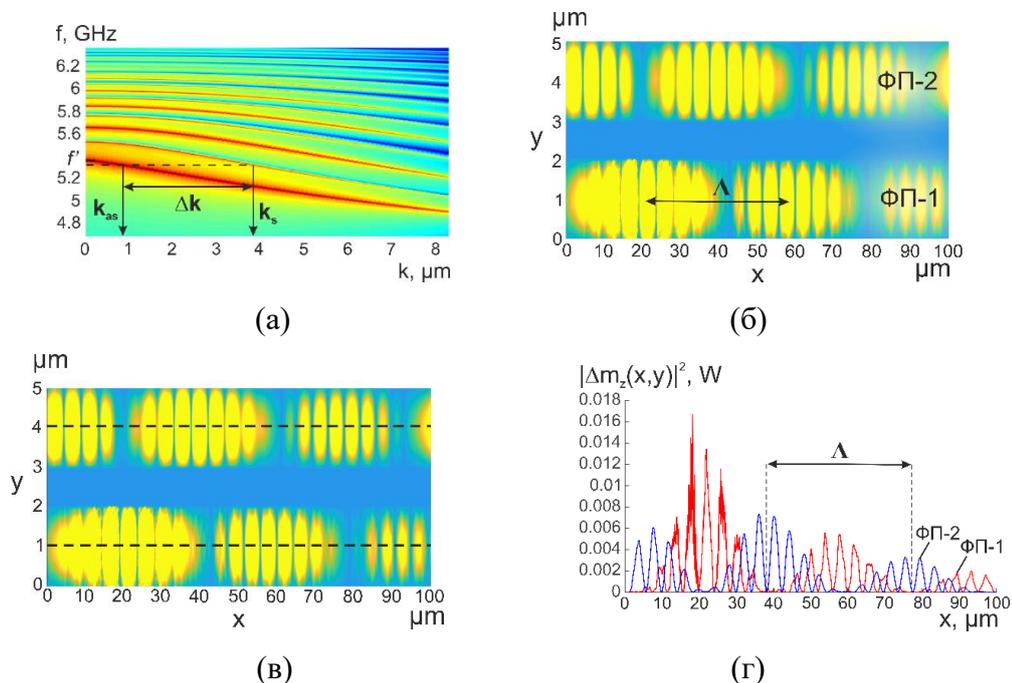
Параметры структур: внешнее поле  $B = 1200 \cdot 10^4$  Тл, толщина пленок  $S = 100$  нм, длина пленок  $L = 100$  мкм, ширина пленок  $w = 2-5$  мкм, ширина возбуждающего полоска  $w = 2$  мкм. Для МК: толщина канавок  $a = 100$  нм, глубина канавок  $\Delta = a - b = 10$  нм, период структуры  $L = 6$  мкм. Параметры материала ЖИГ: константа обмена  $A_{ex} = 3.614e^{-12}$  Дж/м, намагниченность насыщения  $M_{sat} = 1.39e^5$  А/м, константа затухания Гильберта  $\alpha_G = 0.0001$ .

Для моделирования и исследования спиновых волн в работе представлены алгоритмы для построения и обработки амплитудно-частотных (АЧХ) и дисперсионных характеристик, а также карты пространственного распределения намагниченности в плоскости структуры.

На рис. 2 (а) приведена дисперсионная характеристика для ООМСВ в связанных ФП. Каждая из дисперсионных кривых расщеплена на симметричную и антисимметричную нормальные моды. Рассмотрим пространственное распределение намагниченности  $\Delta m_z(x, y, t)$ , возведенной в квадрат -  $|\Delta m_z(x, y, t)|^2$  - величина, пропорциональная мощности  $P$ .

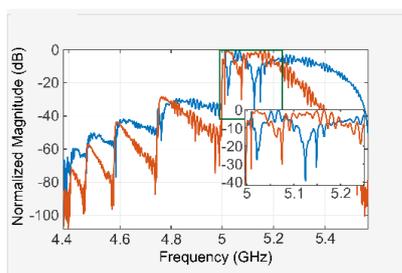
На рис. 2 (б) приведена карта распределения  $|\Delta m_z(x, y, t)|^2$  в плоскости волноводов для ООМСВ. Длину перекачки  $\Lambda$  определим как расстояние между соседними максимальными значениями  $|\Delta m_z(x, y, t)|^2$  в одной пленке (на рис. 4 (б)). Будем снимать значения величины вдоль центральной линии каждой из пленок (на рис. 4 (в)). На рис. 4 (г) приведена зависимость  $|\Delta m_z(x, y, t)|^2$  от продольной координаты  $x$ . На графике также можно видеть максимумы и минимумы в ФП-1 и ФП-2, чередующиеся в противофазе, что свидетельствует о перекачке мощности между волноводами. Амплитуда

максимумов уменьшается вдоль направления распространения, что связано с потерями в ферромагнитной среде.



Р  
и  
с  
.

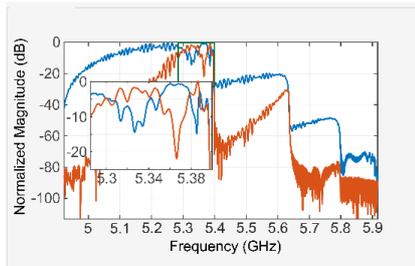
На рис. 3 приведены АЧХ для ООМСВ и ПМСВ на выходе ФП-1 (синяя кривая) и ФП-2 (красная кривая). На рисунках видна последовательность максимумов и минимумов коэффициента передачи ФП-1 и ФП-2, расположенных в противофазе. Данная особенность свидетельствует и перекачке мощности между плёнками. Отметим, что частотный диапазон перекачки обратнопропорционален величине зазора между волноводами  $d$ : для рис. 5 (а, б)  $d = 1$  мкм, а для рис. 5 (в, г)  $d = 2$  мкм.



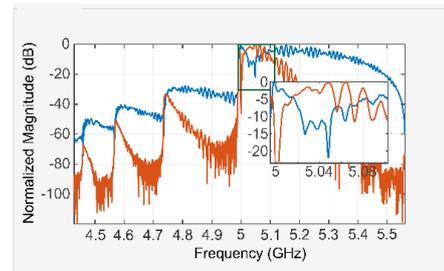
(а)

(б)

Н  
Н  
а  
я



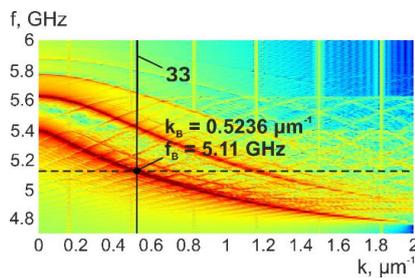
(в)



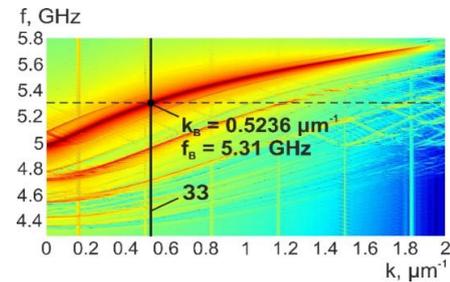
(г)

Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики для связанных пленок на выходе ФП-1 (синяя кривая) и ФП-2 (красная кривая) с шириной  $w = 2$  мкм: ООМСВ  $d = 1$  мкм (а), ПМСВ  $d = 1$  мкм (б), ООМСВ  $d = 2$  мкм (в), ПМСВ  $d = 2$  мкм (г).

Рассмотрим МСВ в одиночном МК и определим запрещенные зоны (ЗЗ). Для нашей структуры получим волновое число Брэгга по формуле (4), при  $L = 6$  мкм получили  $k_B = 0.5236 \mu\text{m}^{-1}$ , на дисперсионных характеристиках на рис. 4 для ООМСВ (а) и ПМСВ (б) проведем вертикальную линию и на пересечении с кривой для первой моды отметим частоту  $f_B$ .



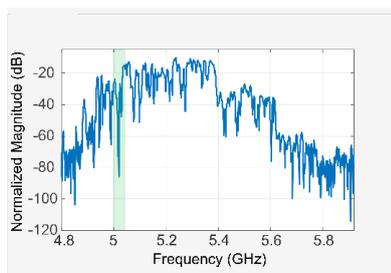
(а)



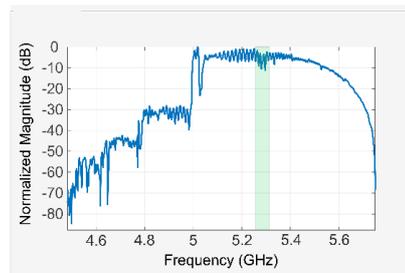
(б)

Рис. 4. Дисперсионные характеристики для (а) ООМСВ и (б) ПМСВ в одиночном МК при  $w = 2$  мкм,  $\Delta = 10$  нм.

Построим АЧХ для одиночных МК, соответствующие дисперсиям на рис. 4. На рис. 5. представлены АЧХ для ООМСВ (а) и ПМСВ (б). Зеленым цветом обозначены ЗЗ, которые близки по частоте с зонами на рис. 4. Небольшая величина частотных провалов ЗЗ обусловлена наличием ширинных и толщинных (в случае ООМСВ) мод.



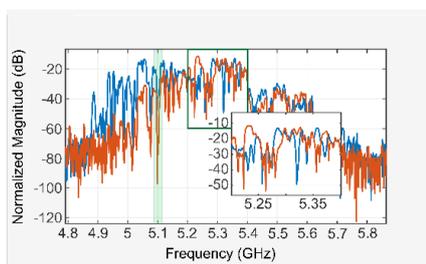
(a)



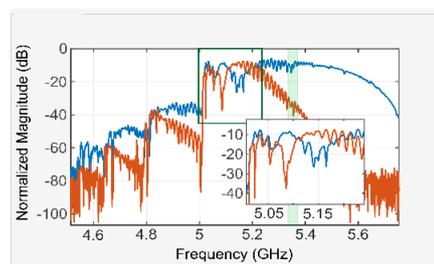
(б)

Рис. 5. АЧХ для одиночных МК при  $w = 2$  мкм,  $\Delta = 10$  нм.

Перейдем к исследованию связанных МК. На рис. 6 представлены АЧХ для ООМСВ (а) и ПМСВ (б) в связанных МК. Из теории формирования ЗЗ в связанных структурах, для симметричных МК ( $L_1/L_2 = 1$ ) зоны, соответствующие  $k_{s-as}$  и  $k_{as-s}$ , будут совпадать друг с другом и с зоной для одиночного МК. На рис. 6 зеленым цветом обозначена ЗЗ первого порядка, соответствующая зонам при  $k_{s-as}$  и  $k_{as-s}$ . Также выделены области перекачки мощности, частотный диапазон которых совпадает со случаем связанных ФП.



(a)



(б)

Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики для связанных МК на выходе МК-1 (синяя кривая) и МК-2 (красная кривая) с шириной  $w = 2$  мкм, зазором  $d = 1$  мкм, глубиной канавок  $\Delta = 10$  нм: ООМСВ (а), ПМСВ (б).

Теперь углубим канавки в МК. В таком случае, приближение в виде малых канавок в теории прямых и отражённых волн для МК перестает быть применимым. Для ООМСВ уже при глубине канавок  $\Delta = 20$  нм, было получено практически отсутствие МСВ. Таким образом, в наноразмерных пленках для распространения объемных волн глубина канавки  $\Delta$  должна быть мала по

сравнению с толщиной пленки и составлять не более, чем 1/10 долю от толщины пленки.

Далее построим АЧХ (рис. 7) и дисперсии (рис. 8) для ПМСВ в одиночном МК при  $w = 2$  мкм при больших значениях глубины канавок и сравним расчеты для  $\Delta = 10$  нм, 30 нм и 50 нм.

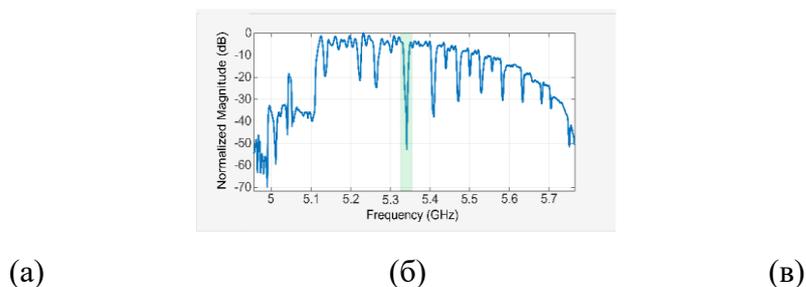


Рис. 7. АЧХ для ПМСВ в одиночных МК при  $w = 2$  мкм с глубиной канавок (а)  $\Delta = 10$  нм, (б)  $\Delta = 30$  нм и (в)  $\Delta = 50$  нм.

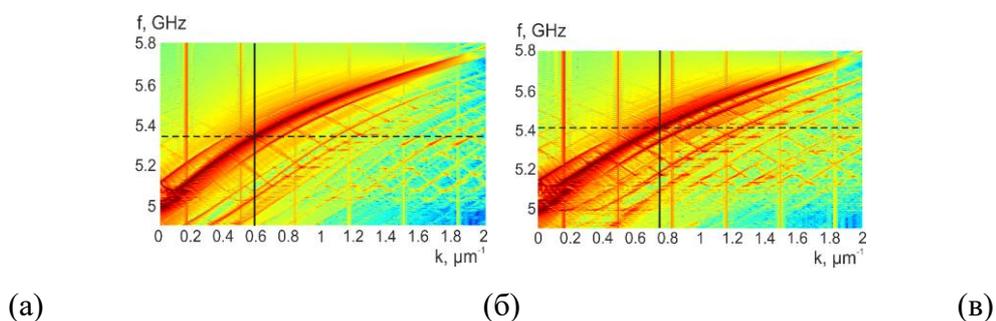


Рис. 8. Дисперсионные характеристики для ПМСВ в одиночном МК с обозначением разрывов, соответствующих ЗЗ на АЧХ, при  $w = 2$  мкм с глубиной канавок (а)  $\Delta = 10$  нм, (б)  $\Delta = 30$  нм и (в)  $\Delta = 50$  нм.

Из рис. 7 заметим, что чем глубже канавки, тем сильнее провалы в ЗЗ на АЧХ. Сопоставим частоты ЗЗ на АЧХ из рис. 7 и разрывы на дисперсиях – на рис. 8 пунктирными линиями обозначены такие частоты, пересекающие дисперсию в области разрывов (в ЗЗ). Таким образом получим, что волновые числа брэгговских резонансов первого порядка линейно возрастают с ростом глубины канавок, как показано на рис. 9.

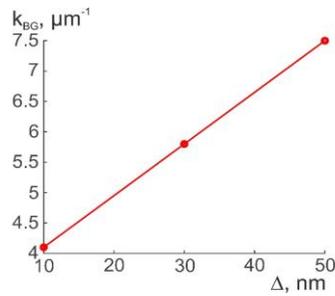


Рис. 9. Зависимость волнового числа, соответствующего запрещенной зоне первого порядка, от глубины канавки в одиночном МК шириной  $w = 2$  мкм.

На рис. 10 представлены АЧХ и дисперсия для связанных МК с параметрами  $w = 2$  мкм,  $d = 1$  мкм,  $\Delta = 50$  нм. Положение ЗЗ приблизительно равно частоте в случае одиночного МК, но незначительно сдвигается в сторону больших волновых чисел (т.е. частота увеличивается). Это наблюдается для связанных МК при любой глубине канавок.

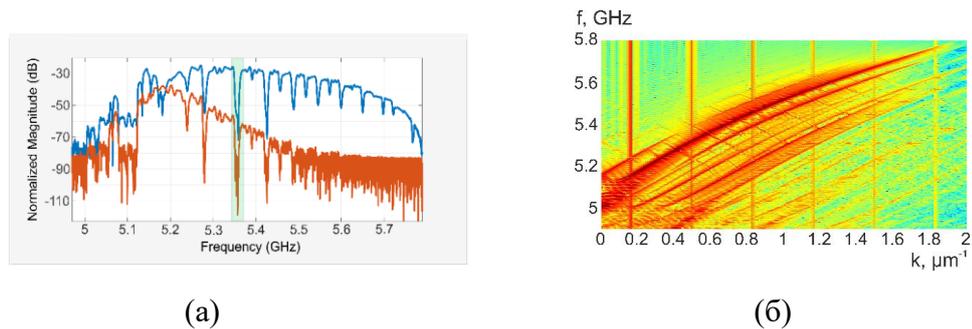


Рис. 10. (а) АЧХ и (б) дисперсионная характеристика для связанных МК  $w = 2$  мкм,  $d = 1$  мкм,  $\Delta = 50$  нм.

Рассмотрим зависимости частоты отсечки первой моды от ширины пленок в связанной структуре, представленные на рис. 11. На рис. 11 (а) графики для разной величины зазора ( $d = 1$  мкм и  $d = 2$  мкм) практически идентичны, что говорит о малом влиянии величины зазора на частоту отсечки. На рис. 11 (б) представлена зависимость для связанных МК. Из сравнения графиков для связанных ФП и связанных МК следует, что наличие периодической структуры не влияет на частоту отсечки.

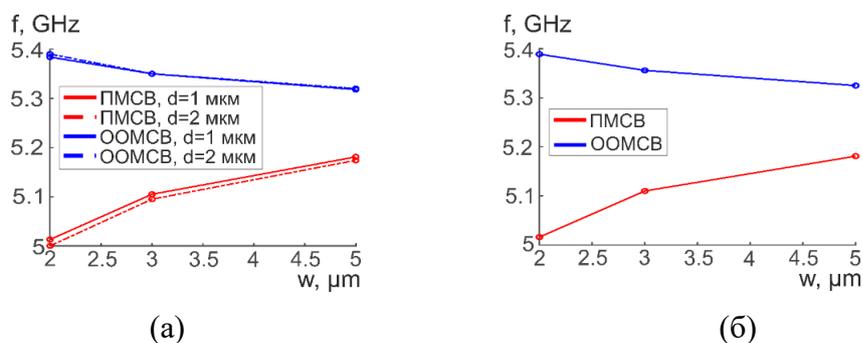


Рис. 11. Зависимость частоты отсечки первой моды для латерально связанной структуры от ширины пленок  $w$  для (а) связанных ФП и (б) связанных МК (при  $d = 1$  мкм).

На рис. 12 представлены зависимости частоты отсечки первой моды МСВ от величины зазора  $d$  между волноводами. Для ООМСВ частота отсечки растёт при увеличении ширины зазора  $d$ , а для ПМСВ - уменьшается. При увеличении ширины волноводов  $w$  частота отсечки уменьшается для случая ООМСВ и увеличивается для ПМСВ.

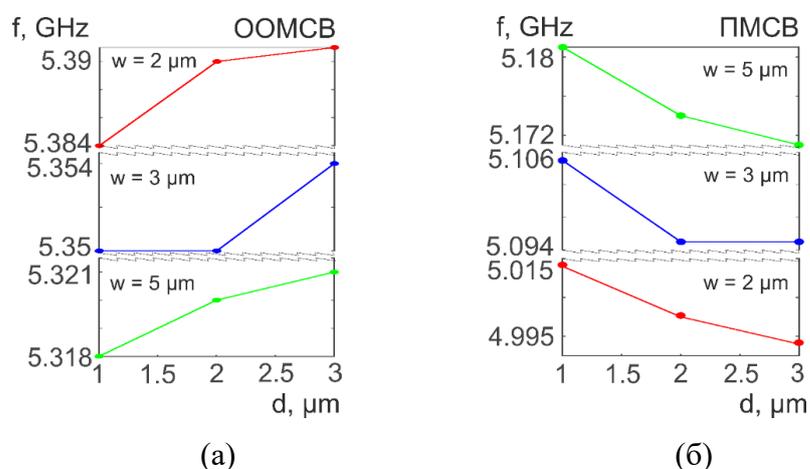


Рис. 12. Зависимости частоты отсечки первой моды ООМСВ (а) и ПМСВ (б) от ширины зазора  $d$  при разных значениях ширины пленок  $w$ .

На рис. 13 представлены зависимости длины перекачки от зазора между пленками  $d$ . Как для ООМСВ (а), так и для ПМСВ (б) зависимость  $\Lambda(d)$  является нелинейно возрастающей. Видно, что длина перекачки пропорциональна ширине пленок  $w$ .

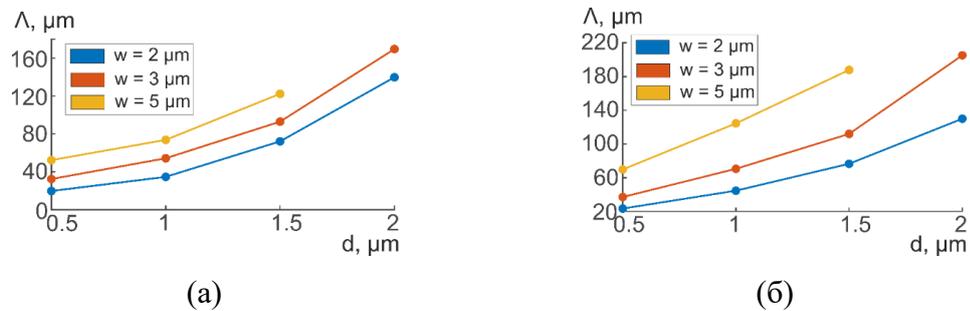


Рис. 13. Зависимости длины перекачки от расстояния между пленками  $d$  при разной ширине пленок  $w$  для (а) ООМСВ, (б) ПМСВ.

На рис. 14 приведена зависимость разности длин перекачки для ПМСВ и для ООМСВ  $\Lambda_{\text{ПМСВ}} - \Lambda_{\text{ООМСВ}}$  от ширины плёнок  $w$  для разных расстояний между плёнками  $d$ . Заметно, что разница длин перекачки возрастает как при увеличении ширины ФП, так и при увеличении их ширины.

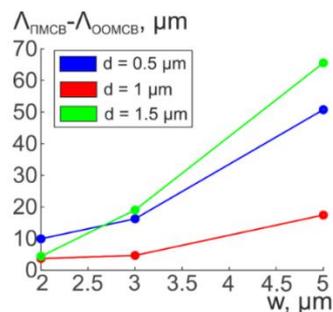


Рис. 14. Зависимость разности длин перекачки ПМСВ и ООМСВ от ширины пленок  $w$  и при разной ширине зазора  $d$ .

## Заключение

На основе микромагнитного моделирования в среде MuMax3 исследованы особенности распространения поверхностных и обратных объемных магнитостатических волн и перекачки мощности в наноразмерных латерально связанных ферритовых волноводах и магнонных кристаллах. Рассчитаны амплитудно-частотные, дисперсионные характеристики и пространственный период перекачки мощности вдоль направления распространения волны. Показано, что МСВ эффективно связываются на частотах, близких к границе области МСВ с областью высших (ширинных)

мод. Диапазон частот, на которых волны эффективно связываются, расширяется при уменьшении расстояния между волноводами.

Для магнетонных кристаллов с малой глубиной канавок была получена частота первого брэгговского резонанса на основе теоретической формулы и дисперсионной характеристики, а резонансные частоты на АЧХ с небольшой разницей подтвердили теоретический расчет в случае как ООМСВ, так и ПМСВ. При увеличении глубины канавок наблюдался линейный рост брэгговского волнового числа для ПМСВ, а ООМСВ переставали распространяться вообще.

Установлено, что длина перекачки мощности между волноводами возрастает при увеличении расстояния между ними. При увеличении ширины волноводов также увеличивается длина перекачки. Показано, что длина перекачки зависит от типа МСВ. При увеличении ширины волноводов длина перекачки для ПМСВ становится больше, чем для ООМСВ, причем разница длин перекачки возрастает по мере увеличения ширины волноводов. Также рост наблюдается при увеличении зазора между волноводами.

Исследовано влияние связи между волноводами на частоту отсечки. Расстояние между волноводами незначительно влияет на частоту отсечки, однако, для ООМСВ зависимость возрастающая и частота отсечки уменьшается с увеличением ширины волноводов, а для ПМСВ – убывающая и частота отсечки увеличивается с увеличением ширины волноводов.

Полученные результаты позволяют рассматривать исследуемые связанные структуры в качестве функционального элемента для частотного разделения сигналов, в частности, за счет наличия зон непропускания сигнала в магнетонных кристаллах, делителя мощности, а также эффективного элемента межсоединений в магнетонной сети.

## Литература

1. A. Mahmoud, F. Ciubotaru, F. Vanderveken, A. V. Chumak, S. Hamdioui, C. Adelman, and S. Cotofana, Introduction to spin wave computing, *Journal of Applied Physics* 128, 10.1063/5.0019328 (2020).
2. A. V. Chumak, P. Kabos, M. Wu, C. Abert, C. Adelman, and et al., Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing, *IEEE Transactions on Magnetism* 58, 1–72 (2022).].
3. The building blocks of magnonics / B. Lenk et al. // *Physics Reports*. – 2011. – V. 507. - P. 107 – 136.
4. V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov, D. Grundler, Magnonics. *J. Phys. D Appl. Phys.* 43, 264001 (2010).
5. A. Khitun, M. Bao, K. L. Wang, Magnonic logic circuits. *J. Phys. D Appl. Phys.* 43, 264005 (2010).
6. Q. Wang, P. Pirro, R. Verba, A. Slavin, B. Hillebrands, A.V. Chumak, Reconfigurable nano-scale spin-wave directional coupler, *Sci. Adv.* 4 (2017).
7. A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevskii, S.V. Grishin, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, Nonlinear spin wave coupling in adjacent magnonic crystals, *Appl. Phys. Lett.* 109 (2016).
8. A.V. Chumak, A.A. Serga, B. Hillebrands, Magnon transistor for all-magnon data processing, *Nat. Commun.* 5 (2014) 4700.
9. Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М., 1963.
10. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. V. 19. P. 308–320.
11. Elachi C. Waves in active and passive periodic structures: A review / C. Elachi // *Proceeding of IEEE*. – 1976. – V. 64. – P. 1666.
12. Marcuse D. Theory of Dielectric Optical Waveguides / D. Marcuse. – New York: Academic press, 1974. – 257 p.