

Пространственно-частотное демультиплексирование спиновых волн в мультитерминальных магنونных схемах

А.А. Солянов, П.А. Жиронкин, А.В. Садовников

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

Аннотация: в работе исследованы процессы распространения спиновых волн в структуре на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ), представляющей собой систему пересекающихся микроволноводов с центральным кольцевым резонатором. Методами микромагнитного моделирования (MuMax³) продемонстрирована возможность пространственно-частотной селекции сигналов за счёт изменения ориентации внешнего магнитного поля. Проведён анализ собственного спектра резонатора, выявивший моды, ответственные за узкополосную передачу в диапазоне 5.0–5.7 ГГц. Для количественной оценки развязки каналов рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между выходными портами. Показано, что нарушение геометрической симметрии вектором намагничивающего поля позволяет реализовать функцию реконфигурируемого демультиплексора с высоким уровнем изоляции каналов.

Ключевые слова: спиновые волны, железо-иттриевый гранат, магنونика, кольцевой резонатор, демультиплексирование, корреляционный анализ, микромагнитное моделирование

1. Введение

Современное развитие спинтроники и магنونики направлено на создание энергоэффективных устройств обработки информации, где носителем сигнала выступает спин-волновое возбуждение [1]. Ключевым преимуществом магنونных схем является возможность управления распространением волн намагниченности с помощью внешнего магнитного поля без протекания токов [2]. Железо-иттриевый гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$, ЖИГ) остаётся основным материалом для таких устройств благодаря рекордно низкому затуханию спиновых волн (СВ) [3].

Актуальной задачей является разработка многопортовых устройств маршрутизации сигналов (деммультиплексоров), способных динамически перераспределять энергию между каналами. Существующие решения часто требуют сложной геометрии или электрического управления [4]. В настоящей работе предлагается подход, основанный на использовании геометрической симметрии крестообразной структуры с интегрированным резонатором, где управление осуществляется исключительно изменением угла приложения внешнего магнитного поля. Особое внимание уделено частотной селекции на основе собственных мод резонатора и количественной оценке независимости каналов.

2. Модель структуры и результаты моделирования

Исследуемая структура представляет собой систему из четырёх ортогонально пересекающихся микроволноводов из плёнки ЖИГ толщиной $h = 10$ мкм. В области пересечения волноводов интегрирован кольцевой резонатор с внешним радиусом $R_{out} = 500$ мкм и внутренним радиусом $R_{in} = 250$ мкм (Рис. 1а).

Микромагнитное моделирование проводилось в программном пакете MuMax³ [5], решающем уравнение Ландау–Лифшица–Гилберта:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -\gamma[\bar{M} \times \bar{H}_{eff}] + \frac{a}{M_s} \left[\bar{M} \times \frac{d\bar{M}}{dt} \right] \quad (1)$$

где \bar{M} — вектор намагниченности, γ — гиромангнитное отношение, $a = 2.5 \times 10^{-4}$ — параметр затухания. Использовались стандартные параметры ЖИГ: $M_s = 139$ кА/м, $A_{ex} = 3.614 \times 10^{-12}$ Дж/м. Внешнее магнитное поле $\bar{H}_0 = 120$ мТл прикладывалось в плоскости структуры.

Для обоснования частотной селекции было проведено отдельное моделирование изолированного кольцевого резонатора. Спектральный анализ отклика намагниченности позволил идентифицировать собственные частоты структуры. В диапазоне 4.8–5.8 ГГц были выявлены резонансные моды, соответствующие азимутальным колебаниям намагниченности. Наиболее выраженная мода на частоте 5.3 ГГц демонстрирует максимальную добротность и эффективную связь с волноводными каналами, что объясняет формирование узкополосных пиков пропускания в полной структуре.

Возбуждение спиновых волн осуществлялось на одном из входов крестообразной структуры. На Рис. 1b представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) передачи сигнала на выходные каналы при различной ориентации магнитного поля. При ориентации поля вдоль оси симметрии ($\theta = 90^\circ$) наблюдается симметричное распределение энергии. При отклонении угла на $15\text{--}30^\circ$ нарушается зеркальная симметрия, что приводит к перенаправлению потока энергии в предпочтительный канал.

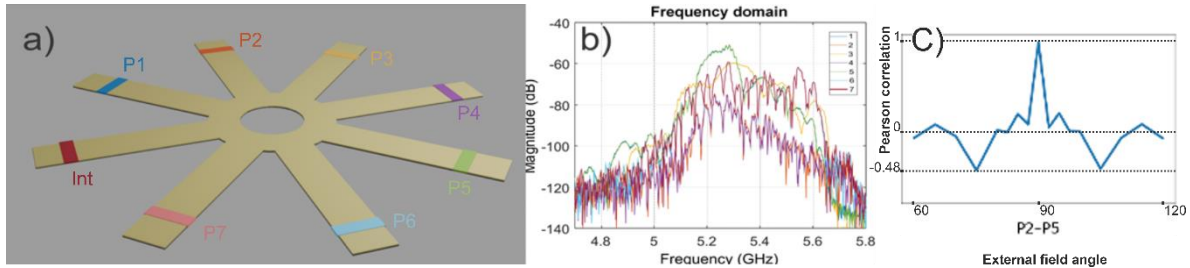


Рисунок 1. (a) Схема исследуемой структуры; (b) АЧХ передачи на выходах при разных углах поля; (c) зависимость коэффициента корреляции Пирсона между выходными портами от угла магнитного поля.

Для количественной оценки эффективности демультиплексирования был проведён корреляционный анализ сигналов на выходных антеннах. На Рис. 1c показана зависимость коэффициента корреляции Пирсона (r) между основным и побочным каналами от угла магнитного поля. В режиме симметрии ($\theta = 90^\circ$) корреляция высока ($r \rightarrow 1$), что указывает на идентичность сигналов в эквивалентных плечах. В режиме демультиплексирования ($\theta = 70^\circ$) корреляция между активным и пассивным каналами стремится к нулю ($r < 0.2$), что подтверждает высокую степень пространственной развязки и независимости каналов передачи.

Таким образом, комбинация резонансной селекции по частоте (обусловленной модами кольца) и управления направлением распространения через угол поля позволяет реализовать функцию пространственно-частотного демультиплексирования.

3. Заключение

В работе продемонстрирована возможность реализации реконфигурируемого демультиплексора спиновых волн на основе крестообразной ЖИГ-структуры с

центральным кольцевым резонатором. Анализ собственного спектра резонатора подтвердил, что частотная селекция обусловлена возбуждением конкретных базисных мод в диапазоне 5.0–5.7 ГГц.

Применение корреляционного анализа Пирсона позволило количественно оценить изоляцию каналов: показано, что изменение угла магнитного поля не только перераспределяет амплитуду, но и статистически развязывает сигналы на выходах. Полученные результаты подтверждают перспективность использования симметричного подхода при проектировании магнетронных логических элементов. В ближайшем будущем планируется изготовление опытных образцов для экспериментальной верификации данных моделирования.

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

Список литературы

1. Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics // *Nature Physics*. – 2015. – Vol. 11. – P. 453–461.
2. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2010. – Vol. 43. – P. 264001.
3. Serga A.A., Vasyuchka V.I., Chumak A.V. YIG magnonics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2010. – Vol. 43. – P. 264002.
4. Martyshkin A.A., Sadovnikov A.V. Magnonic demultiplexer-switch based on the cluster of coupled ferrimagnetic Mach–Zehnder interferometers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2024. – Vol. 595. – P. 171644.
5. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. The design and verification of MuMax3 // *AIP Advances*. – 2014. – Vol. 4. – P. 107133.