

# Краевые моды в двухслойных структурах на основе железо-иттриевого граната

А.А. Мартышкин, Е.Н. Бегинин, А.В. Садовников

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

**Аннотация:** в работе исследовано распространение магнитостатических спиновых волн в двухслойной структуре на основе железо-иттриевого граната с варьируемой шириной и намагниченностью слоев. С использованием микромагнитного моделирования показано, что за счет геометрической и магнитной неоднородности вблизи границ верхней пленки формируются локальные области пониженного внутреннего магнитного поля, в которых эффективно возбуждаются локализованные краевые моды спиновых волн. Установлено, что частотный диапазон этих мод располагается ниже диапазона объемных и поверхностных волн, распространяющихся в центральной части структуры, что обеспечивает возможность пространственно-частотного разделения сигналов. Полученные амплитудно-частотные характеристики и карты распределения намагниченности подтверждают потенциал использования таких систем в качестве компактных частотно-селективных элементов магной электроники.

**Ключевые слова:** спиновые волны, железо-иттриевый гранат, краевые моды, микромагнитное моделирование

## 1. Введение

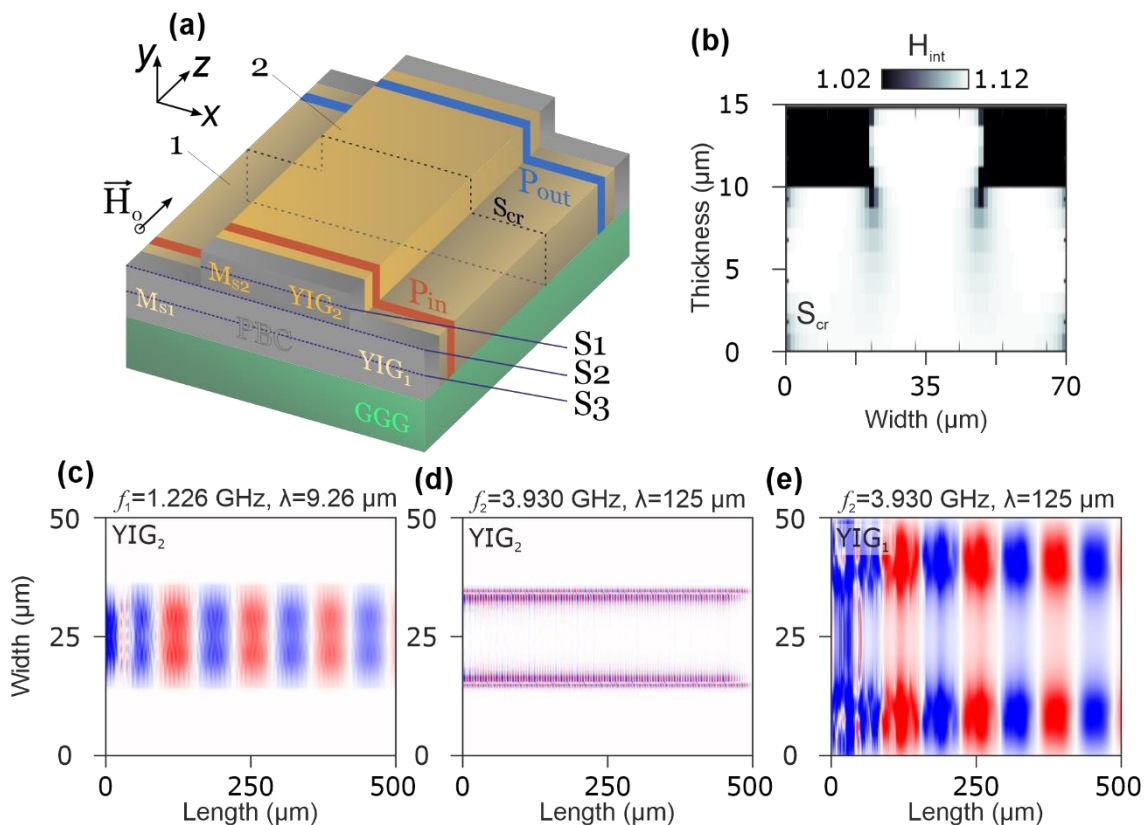
Магنونика представляет собой актуальное направление современной физики, сосредоточенное на использовании спиновых волн — коллективной прецессии магнитных моментов — для эффективной передачи, обработки и хранения информационных сигналов [1]. Благодаря когерентному характеру прецессии, данные возбуждения позволяют реализовывать сложные логические операции на микро- и наноуровне при минимальных энергетических затратах [2]. Магنونные устройства рассматриваются как жизнеспособная альтернатива традиционной КМОП-электронике, позволяющая преодолеть её фундаментальные ограничения. Одним из ключевых подходов в этой области является применение структурированных тонкоплёночных волноводов на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ), который обладает рекордно малым затуханием и высокой добротностью в СВЧ-диапазоне.

Важнейшей задачей является управление модовой структурой спиновых волн, включая селективное возбуждение локализованных мод. Ранее подобные состояния были зафиксированы в структурах с геометрическими неоднородностями, где градиенты внутреннего магнитного поля приводили к формированию так называемых «спин-волновых колодцев» [3]. Особый интерес вызывают гетероструктуры, объединяющие слои с различной намагниченностью насыщения [4]. В таких системах варьирование ширины, толщины и конфигурации слоёв позволяет создавать локальные неоднородности эффективного поля на наномасштабе. В частности, в зонах перехода между плёнками с различными магнитными свойствами могут возникать области пониженного поля, функционирующие как волноводные каналы для локализованных мод [5]. Такие многослойные системы обладают дополнительными степенями свободы для управления сигналом и перспективны для создания частотно-селективных элементов. В настоящей работе исследуется двухслойная структура  $YIG(Ms1)/YIG(Ms2)$ , где поперечная модуляция поля вблизи границ раздела

обеспечивает пространственно-частотное разделение спин-волновых мод.

## 2. Микромагнитное моделирование и локализация краевых мод

В данной работе проведено исследование двухслойной магнитной системы YIG(Ms1)/YIG(Ms2), состоящей из двух пленок ЖИГ с различной шириной и намагниченностью насыщения (рис.1a). Нижняя плёнка (1) имеет ширину 50 мкм, толщину 10 мкм, а намагниченность насыщения  $M_{s1} = 1,38 \times 10^5$  А/м. На её поверхности, симметрично по ширине, расположена плёнка (2) с шириной 20 мкм и толщиной 5 мкм, намагниченностью насыщения  $M_{s2} = 0,72 \times 10^5$  А/м. Была решена статическая задача, выполненная методом численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта в программном пакете MuMax3 при приложении внешнего поля в конфигурации Деймона–Эшбаха. Установлено, что за счет геометрической и магнитной неоднородности вблизи границ верхней пленки формируются локальные области существенно пониженного внутреннего магнитного поля (рис.1b). Микромагнитное моделирование подтвердило, что в этих областях эффективно возбуждаются локализованные краевые моды, частотный диапазон которых располагается ниже основной полосы пропускания объемных и поверхностных волн центральной части структуры. Визуализация распределения намагниченности позволила изучить пространственную структуру данных мод и подтвердить их устойчивое распространение вдоль границ раздела. На рисунке 1c-e показаны пространственные распределения  $m_z$ -компоненты намагниченности: S1 — нижний слой, S2 — верхний слой, S3 — область их перекрытия или наоборот.



**Рисунок 1.** (a) Схематическое изображение двухслойной структуры; (b) Распределение внутреннего поля  $H_{int}$ ; Пространственные карты  $m_z$ -компоненты намагниченности в слоях S1 (c), S2 (d) и S3 (e).

Механизм локализации данных мод обусловлен неоднородным профилем

эффективного магнитного поля, возникающим из-за суперпозиции полей размагничивания обоих слоев. В областях, где внутреннее поле достигает локального минимума, формируется область пониженного внутреннего магнитного поля, что приводит к значительному сдвигу резонансных частот. При увеличении частоты возбуждающего сигнала наблюдается трансформация модового состава: от узко локализованных краевых состояний к модам, распределенным по всей ширине волновода. Характерно, что наличие двух слоев с различной намагниченностью позволяет динамически управлять глубиной и формой этой потенциальной ямы, что обеспечивает более гибкий выбор частотной области прохождения сигнала по сравнению с однослойными микроструктурами. Таким образом, варьирование параметров внешнего поля и геометрических размеров слоев позволяет реализовать режим однонаправленного или многоканального распространения спиновых волн, что критически важно для построения интегральных магнонных схем

### 3. Заключение

Результаты проведенного микромагнитного моделирования подтверждают возможность реализации эффективного пространственно-частотного разделения спин-волновых сигналов в пределах единой гетероструктуры. Выявлено, что формирование локальных минимумов внутреннего магнитного поля вблизи границ раздела слоев позволяет селективно возбуждать краевые моды, пространственно отделенные от основного потока магнонов в центральной части волновода. Использование таких локализованных состояний открывает широкие перспективы для создания компактных частотно-селективных элементов магнонной логики, включая многоканальные демультимплексоры и энергоэффективные фильтры. Исследование демонстрирует, что варьирование параметров слоев в многослойных системах является мощным инструментом прецизионного управления характеристиками спин-волновых возбуждений.

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

#### Список литературы

1. Chumak A. V. et al. Magnon spintronics // *Nature physics*. – 2015. – Т. 11. – №. 6. – С. 453-461.
2. Kruglyak V. V. et al. Magnonics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2010. – Т. 43. – №. 26. – С. 264001.
3. Park J. P. et al. Spatially resolved dynamics of localized spin-wave modes in ferromagnetic wires // *Physical review letters*. – 2002. – Т. 89. – №. 27. – С. 277201.
4. Aleksandrova Y. V. et al. Peculiarities of the spin wave spectrum in transversely confined YIG microwaveguides with inhomogeneous magnetization profile // *Physics of Metals and Metallography*. – 2024. – Т. 125. – №. 4. – С. 346-354.
5. Wang Q. et al. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // *Nature Electronics*. – 2020. – Т. 3. – №. 12. – С. 765-774.