

# Системы обработки информационных сигналов на основе трехмерных магнонных структур

А.В. Садовников<sup>1</sup>, Е.Н. Бегинин<sup>1</sup>, А.А. Мартышкин<sup>1</sup>, С.А. Никитов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Аннотация:** в данной работе проведено исследование спектров спиновых волн в трехмерных наноструктурах на основе меандровых магнонных микроволноводов. Приведены результаты исследования методом Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии, широкополосного ферромагнитного резонанса и микромагнитного моделирования. Показаны механизмы управления положением и частотной шириной запрещенных зон в спектре спиновых волн, распространяющихся в меандровых структурах при вариации угла подмагничивания структуры и геометрических параметров. Методом микромагнитного моделирования выявлены особенности в спектре спиновых волн при изменении геометрических параметров 3D структур и варьировании угла подмагничивания. На основе сравнения данных экспериментального исследования и расчетов проведено обобщение полученных результатов и выявлены основные закономерности, учет которых необходим при создании функциональных устройств обработки сигнала на принципах магноники.

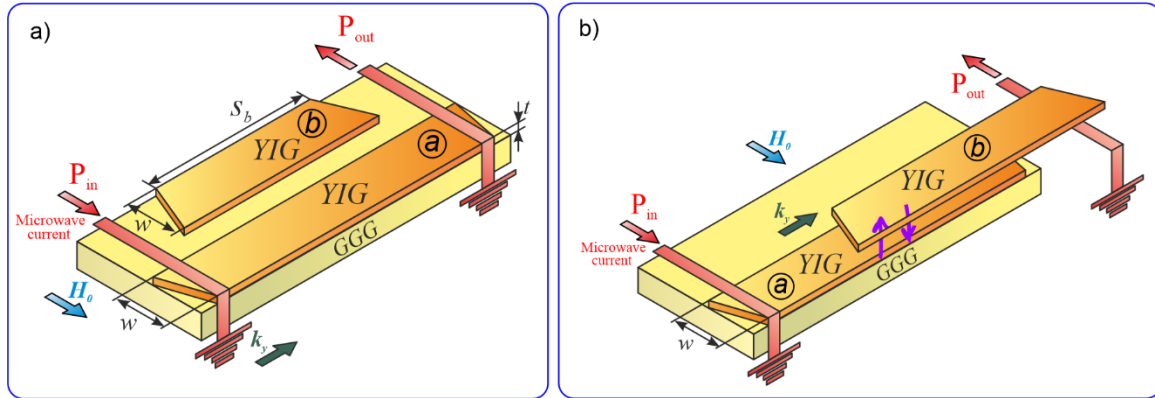
**Ключевые слова:** спиновые волны, магноны, магнонные кристаллы

## 1. Введение

Переход от двумерной архитектуры магнонных сетей к трехмерной в настоящее время представляет большой интерес ввиду развития концепций обработки и хранения данных на принципах магноники [1]. В электронике трехмерные схемы требуют эффективного отвода джоулева тепла от вычислительных элементов, что представляет собой технологическую проблему. Для сравнения, магноника позволяет передавать информационный сигнал, закодированный в амплитуду и фазу спиновых волн (СВ), что не сопровождается нагревом.

Стоит отметить два важных преимущества при использовании СВ в качестве носителей информационного сигнала: отсутствие омических потерь при распространении СВ и миниатюризация до нанометровых размеров структур, поддерживающих передачу спин-волнового сигнала.

Одним из вариантов создания элементов межсоединений на основе магнитных квазидвумерных и трехмерных (3D) структур в латеральных и вертикальных топологиях с микро- и нанометровыми размерами волноведущих элементов является базовый элемент, выполненный в виде ферритовых микроволноводов, расположенных на одной подложке и связанных через боковую стенку (рис.1а), либо связанных в вертикальном направлении (рис.1б). При этом межсоединения будут выполнять не только передачу информационного сигнала, закодированного в виде амплитуды и фазы СВ, а также и функциональную обработку, осуществляя режимы параллельного и многопоточного (де)мультиплексирования спин-волнового сигнала в частотной, временной и пространственной области.

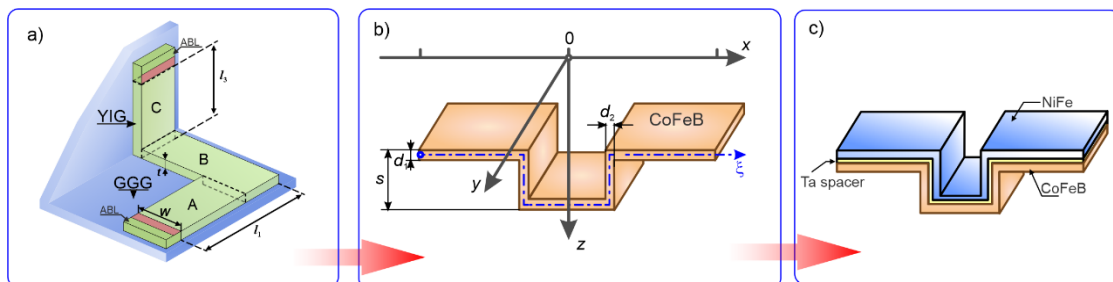


**Рисунок 1.** Варианты использования эффектов спин-волновой связи для создания элементов межсоединения в плоскостной (латеральной) геометрии (а) и с вертикальной ориентацией микроволноводов (б).

## 2. Исследование волноведущих структур меандрового типа

Ферромагнитные пленки и многослойные пленки меандрового типа, выращенные на поверхности периодически структурированных подложек, можно рассматривать как трехмерную магнито-кристаллическую структуру (см. рис.2). Недавние исследования трехмерных пленок в форме меандра на основе диэлектрических (YIG) [2-4] и металлических (CoFeB, NiFe) [5-7] материалов продемонстрировали способность управлять спектрами СВ. Магнитная зонная структура однослойных CoFeB и двухслойных пленок CoFeB /Ta/NiFe в форме меандра, получена с помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии. Более узкая ширина магнитной запрещенной зоны наблюдалась для структуры CoFeB/Ta/NiFe по сравнению с образцом CoFeB. Это может быть связано с межслойной дипольной связью, которая изменяет дисперсионную характеристику спиновых волн. Свойства отдельных мод дополнительно характеризовались фазовым соотношением (синфазным или не синфазным) между колебаниями намагниченности в двух слоях и их локализацией в горизонтальном и вертикальном сегментах.

Методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии оказывается возможным провести построения карт динамической намагниченности по всей поверхности пленки. С помощью методов микромагнитного моделирования и экспериментального метода широкополосного ферромагнитного резонанса (ФМР) показана трансформация спектров СВ при варьировании угла подмагничивания (см. рис.3). При этом помимо анизотропии типа «легкая ось» в меандровых структурах наблюдается формирование локализованных спин-волновых мод.



**Рисунок 2.** Структуры с нарушением трансляционной симметрии для передачи и обработки спин-волнового сигнала в виде сочленений магнитных микроволноводов (а) меандровых магнитных структур, выполненных в виде одного слоя ферромагнетика (б) или в виде двухслойной структуры (с).

Рассматриваемый класс 3D структур может найти применение в качестве элементов межсоединений для многослойных топологий магнонных сетей, выполняющих функции обработки информационных сигналов [8].

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект №20-79-10191)**.

#### Список литературы

1. Никитов С. А. et al. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // УФН. – 2020. – Т. 190. – С. 1009-1040.
2. Beginin E. N. et. al. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks // Appl. Phys. Lett. – 2018. – Т. 112. – С. 122404.
3. Sakharov V. K. et. al. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Т. 117. – С. 022403.
4. Sakharov V. et. al. Spin wave filtration by resonances in the sidewalls of corrugated yttrium-iron garnet films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 545. – P. 168786.
5. Gubbiotti G. et. al. Magnonic Band Structure in Vertical Meander-Shaped  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  Thin Films // Phys. Rev. Applied. – 2021. – Т. 15. – С. 014061.
6. Gubbiotti G. et. al. Magnonic band structure in CoFeB/Ta/NiFe meander-shaped magnetic bilayers // Appl. Phys. Lett. – 2021. – Т. 118. – С. 162405.
7. Sadvnikov A.V. et. al. Reconfigurable 3D magnonic crystal: Tunable and localized spin-wave excitations in CoFeB meander-shaped film // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 544. – С. 168670.
8. Beginin E.N. et. al. Three-Dimensional Magnonics. – CRC Press, 2019.