

# Управляемые устройства пространственно-частотной селекции спиновых волн

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

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

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

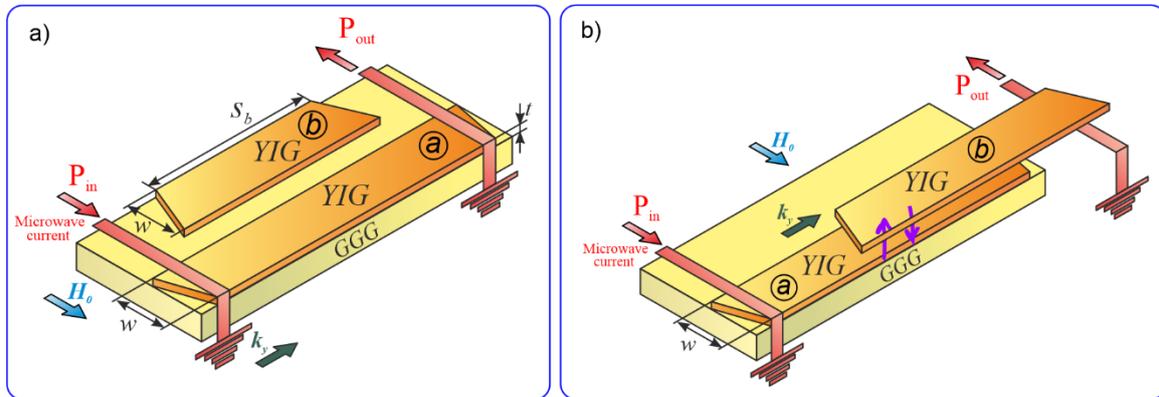
**Аннотация:** в данной работе проведено исследование спектров спиновых волн в трехмерных наноструктурах на основе меандровых маггонных микроволноводов. Приведены результаты исследования методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии, широкополосного ферромагнитного резонанса и микромагнитного моделирования. Рассмотрены вопросы применения трехмерных маггонных кристаллов и структур на их основе для создания искусственных нейроморфных процессоров. Такие процессоры могут быть выполнены на основе взаимосвязанных спинтронных и маггонных осцилляторов гигагерцового и терагерцового диапазонов частот, а также магнитных волноведущих структур. Основной целью настоящего проекта является проведение фундаментальных исследований и разработка физических основ создания нейроморфных процессоров с нечеткой логикой на базе спинтронной и маггонной элементной базы. В частности, в работе исследованы физические принципы работы искусственных нейронов и синапсов, выполненных на основе спинтронных осцилляторов, в свою очередь созданных на базе трехмерных маггонных структур и кристаллов, различные механизмы внешней и взаимной синхронизации таких осцилляторов, а также динамические свойства ансамблей нейроморфных осцилляторов различной топологии применительно к решению задач: распознавания образов, моделирования когнитивных процессов, процессов обучения. Спинтронные и маггонные технологии демонстрируют масштабирование единичных элементов к уровню 10 нм и ниже, а применение спин-орбитальных эффектов на интерфейсах слоев магнитных гетероструктур способствуют значительному снижению энергопотребления. Исследованы свойства маггонных трехмерных структур, содержащих управляемые электрическим током и/или полем пьезоэлектрические слои.

**Ключевые слова:** спиновые волны, маггоны, маггонные кристаллы

## 1. Введение

Переход от двумерной архитектуры маггонных 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.



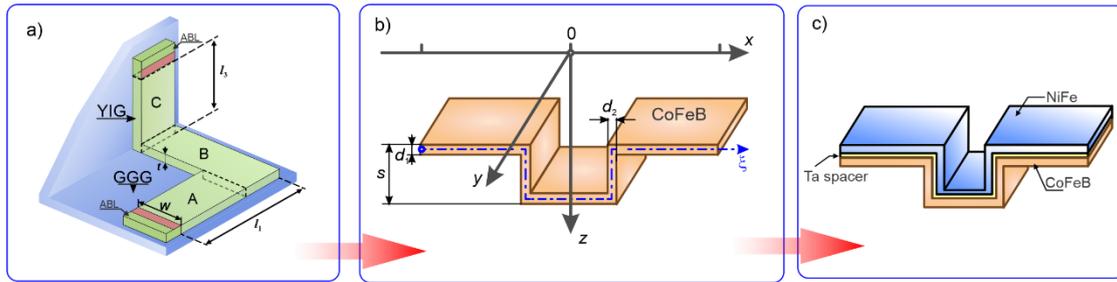
**Рисунок 1.** Варианты использования эффектов спин-волновой связи для создания элементов межсоединения в плоскостной (латеральной) геометрии (а) и с вертикальной ориентацией микроволноводов (б).

## 2. Исследование магнитных структур методами широкополосного ферромагнитного резонанса и методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии

Ферромагнитные пленки и многослойные пленки меандрового типа, выращенные на поверхности периодически структурированных подложек, можно рассматривать как трехмерную магнитно-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.

Исследованы свойства магнитных трехмерных структур, содержащих управляемые электрическим током и/или полем пьезоэлектрические слои. Такие структуры за счет магнитоупругой связи между отдельными слоями позволяют управлять их свойствами без применения внешнего магнитного поля, что также может привести к существенному энергетическому выигрышу при создании разрабатываемых нейроморфных процессоров и магнитных структур.

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 1.** Структуры с нарушением трансляционной симметрии для передачи и обработки спин-волнового сигнала в виде сочленений магнонных микроволноводов (а) меандровых магнонных структур, выполненных в виде одного слоя ферромагнетика (б) или в виде двуслой 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 №23-79-30027)**.

#### 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  $\text{CoFeB}/\text{Ta}/\text{NiFe}$  meander-shaped magnetic bilayers // Appl. Phys. Lett. – 2021. – Т. 118. – С. 162405.
7. Sadovnikov A.V. et. al. Reconfigurable 3D magnonic crystal: Tunable and localized spin-wave excitations in  $\text{CoFeB}$  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.