

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

Кафедра физики открытых систем

**Методы обработки информационных сигналов на основе магнитных и
спинтронных структур**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2241 группы
направления 09.04.02. «Информационные системы и технологии»
код и наименование направления (специальности)
института физики
наименование факультета, института, колледжа
Ключниковой Ирины Михайловны
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.В. Садовников
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики открытых систем

профессор, д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А. А. Короновский
инициалы, фамилия

Саратов 2021 год

Введение. В течение многих лет закон Мура сопровождался исследованиями альтернативных вычислительных парадигм за пределами горизонта КМОП-технологий для дальнейшего улучшения вычислительных устройств. [1–3] Среди всех подходов, выходящих за рамки КМОП-технологий, спинтроника и магноника, в которых для кодирования информации используются магнитные степени свободы вместо заряда электрона, [4-6] были определены как особенно многообещающие технологии из-за низкой собственной энергии магнитных возбуждений. [7, 8]

Пришло время определить нетрадиционные подходы, которые могут извлечь выгоду из технологии, которая предлагает такие преимущества, как сокращение времени работы и / или энергопотребления, и все же может быть интегрирована с КМОП-технологиями, создавая, таким образом, гибридную КМОП-систему. Спинтроника, которая использует степень свободы вращения электрона вместе с его зарядом, может помочь реализовать новые функциональные возможности на уровне устройства, которые могут быть интегрированы на системном уровне с коммерческой КМОП-технологией.

Спинтроника предлагает многообещающую основу для разработки эффективных устройств по крайней мере по трем основным причинам: требования к низкому энергопотреблению устройств, то есть не требующие резервного питания для работы и возможность записи информации с малой динамической диссипацией энергии; сильная нелинейность, временная нелокальность и / или стохастичность, которые могут проявлять спинтронные устройства. В то же время высокая долговечность и скорость работы спинтронных устройств означают, что информацию в них можно часто переписывать или изменять в течение срока службы схемы, что является существенным для многих новых компьютерных концепций.

Из изложенного выше очевидна актуальность исследования различных эффектов, явлений и характеристик волновых процессов в системах на основе спинтронных и магنونных структур.

Целью работы является обзор доступных на данный момент методов обработки информационных сигналов на основе спинтронных и магنونных структур, проведение исследования системы, состоящей из двух ферромагнитных микроволноводов, которая может применяться в системах обработки информационных сигналов.

Работа состоит из трех глав. В первой главе был произведен разбор методов обработки информационных сигналов на основе магноники и спинтроники, были рассмотрены различные интерферометры, а также произведено моделирование и описание свойств 2 латеральных микроволноводов. Во второй главе были проанализированы свойства магنونных и спинтронных структур в качестве перспективы их использования для создания искусственных нейронных сетей. В третьей главе были исследованы наиболее перспективные области, в которых можно применить свойства магноники и спинтроники.

Основные методы для обработки сигнала на основе спинтроники и магноники. Цель магноники состоит в том, чтобы контролировать и манипулировать свойствами спиновых волн (СВ), чтобы они могли быть использованы в будущих технологиях спинтроники. Помимо более низкого энергопотребления, еще одним преимуществом СВ является то, что они могут иметь широкий спектр длин волн в диапазоне от нескольких десятков микрон до нескольких десятков нанометров с соответствующей частотой в диапазоне от нескольких Гигагерц до нескольких Терагерц, которые можно даже контролировать путем настройки различных внутренних и внешних параметров, таких как намагниченность насыщения, различные магнитные анизотропии, магнитостатические взаимодействия, обменные взаимодействия, магнитное поле и электрическое поле [9].

Основная концепция магнонной спинтроники заключается в преобразовании информации в магнонные токи (спиновые волны), которые могут распространяться без необходимости переноса заряда, что снижает рассеиваемую мощность [10]. В дополнение к обычным вычислениям фон Неймана магноники предлагает интересные возможности для расчета с фазой и может служить схемой взаимосвязи для резервуарных вычислений на основе связанных осцилляторов [11].

Развивающаяся область магноники использует спиновые волны и их кванты, магны, для реализации волновых вычислений на микро-и наноуровне. Многочастотные сети магнов позволяют бы параллельную обработку данных в рамках отдельных логических элементов, в то время как это не относится к обычной электронной логике на основе транзисторов. Концепция параллельной обработки данных в отдельных элементах очень перспективна, поскольку она может значительно увеличить пропускную способность будущих логических сетей.

Интерференционные эффекты для спиновых волн в структурах на основе тонких магнитных пленок представляют интерес в связи с возможным применением для энергоэффективных логических устройств и обработки сигналов [12]. Основным элементом таких устройств является спиновый интерферометр, в котором конструктивная или деструктивная интерференция СВ может использоваться в качестве логической “ 1 ” или “0”. Волновую интерференцию можно использовать для вычисления основных логических операций с использованием различных схем кодирования. Например, используя кодирование уровня амплитуды, легко увидеть, что конструктивная интерференция двух волн генерирует результат операции ИЛИ, тогда как их деструктивная интерференция (со сдвигом фазы π между волнами) дает результат операции исключающее ИЛИ.

Предложены различные конструкции интерферометров типа Маха—Цендера [13]. Они могут быть основаны на Y-, T - и Ψ-образных волноводах, а также на двух (крестовинах) или более (решетках) ортогональных волноводах, в которых для возбуждения и приема СВ используются индуктивные антенны. Результаты микромагнитного моделирования распространения СВ в таких структурах показывают, что размеры интерферометра могут достигать микрон при использовании СВ с длиной волны $\lambda < 100$ нм. Интерферометры СВ могут быть основаны на пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), выращенных методом жидкофазной эпитаксии, или на ферромагнитных металлических пленках, полученных методом магнетронного распыления. Благодаря достижениям в области технологий изготовления и наноструктурирования ферромагнитных пленок можно создавать интерферометры с размерами от нескольких сотен до десятков микрометров.

Основные принципы спин-волновой интерференции были описаны выше, и было показано, что они могут быть использованы для логических операций. Однако в вычислительной системе данные необходимо передавать на входы логической схемы, обмениваться между ними, и, наконец, выходные данные необходимо передавать, например, в память. Это задача межсоединения, которое может также передавать тактовые сигналы, а также мощность.

Естественный подход к соединению спин-волновых логических элементов – это использование волноводов, в которых спиновые волны распространяются, например, от выхода логического элемента на вход следующего логического элемента.

При конструировании спинтронных устройств очень важно знать дисперсионную зависимость среды распространения магнито-статических волн (МСВ). Этим объясняется большое количество работ, посвященных исследованию спектра и закона дисперсии МСВ в многослойных магнитных

материалах. В качестве примера рассмотрена следующая латеральная структура, смоделированная в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Исследуемая структура (рис.1) состоит из двух микроволноводов со скосом, состоящих из пленок железоиттриевого граната (ЖИГ), толщина каждого микроволновода 10 мкм, ширина – 200 мкм, которые находятся на подложке из галлий гадолиниевого граната (ГГГ), толщина которого 200 мкм, ширина – 800 мкм. Пространство между пленками заполняет воздух.

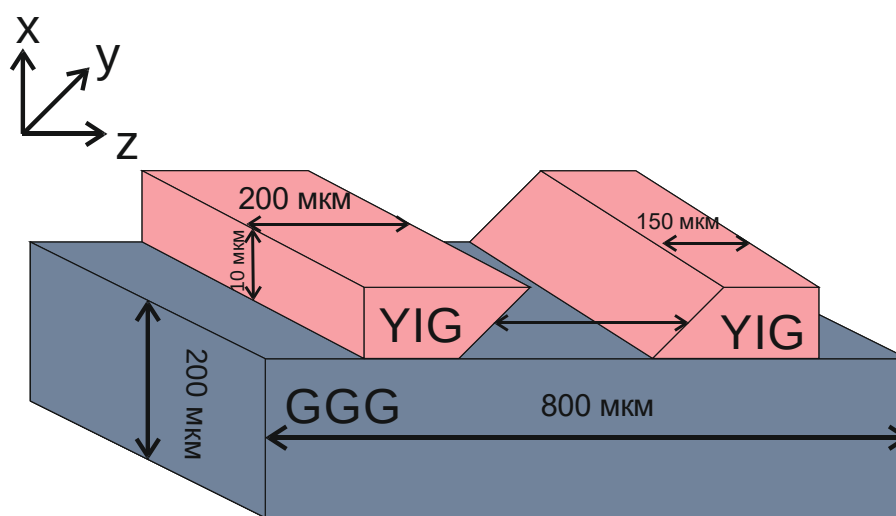


Рисунок 1. Волноводы со скосом.

Для данной структуры будут изменяться следующие параметры: расстояние между пленками – n и частота – f . Результатом расчета являются дисперсионные характеристики. Расчет дисперсии производился для частот в пределах от 5,3 ГГц до 5,7 ГГц. Были получены волновые числа для первой (рис.2), второй (рис.3) и третьей (рис.4) моды.

Также были получены дисперсионные характеристики. При увеличении расстояния между пленками до 30 и 40 мкм видно, что профили распределения трансформируются при учете неоднородности внутреннего магнитного поля, а именно, происходит «расталкивание» в распределении полей, при увеличении расстояния между волноводами. Также стоит заметить, что при увеличении

частоты поле становится более локализованным в центральной области магнитных микроволноводов.

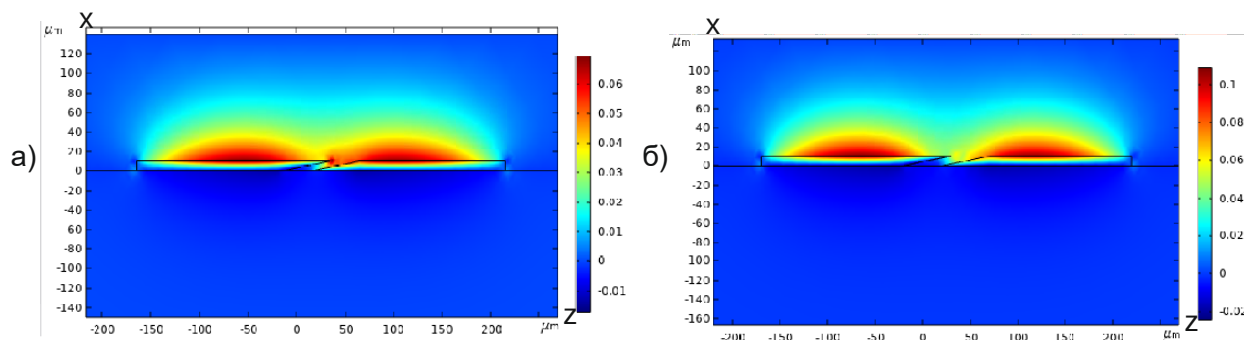


Рисунок 2. 1-я мода МСВ: а) расстояние между пленками 30 мкм, б) расстояние между пленками 40 мкм.

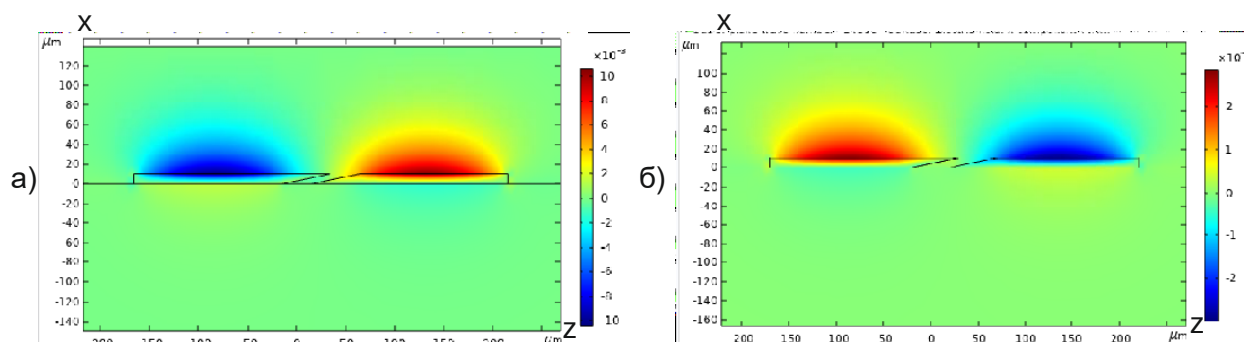


Рисунок 3. 2-я мода МСВ: а) расстояние между пленками 30 мкм, б) расстояние между пленками 40 мкм.

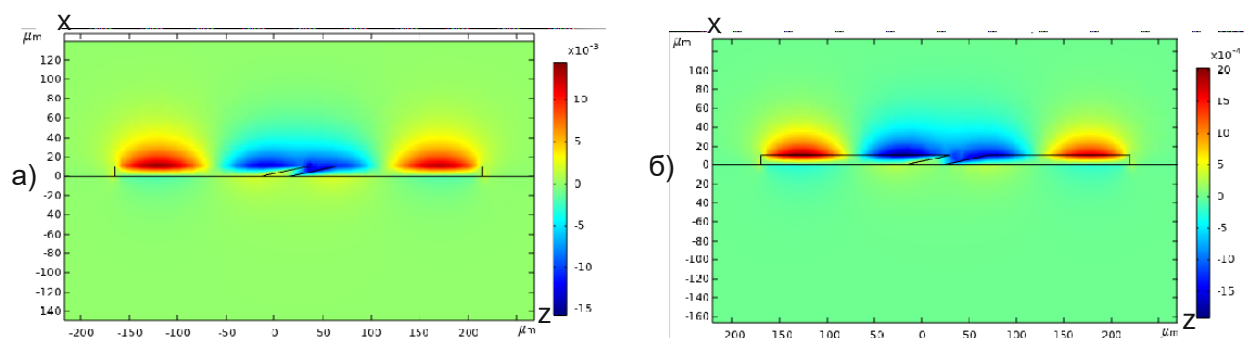


Рисунок 4. 3-я мода МСВ: а) расстояние между пленками 30 мкм, б) расстояние между пленками 40 мкм.

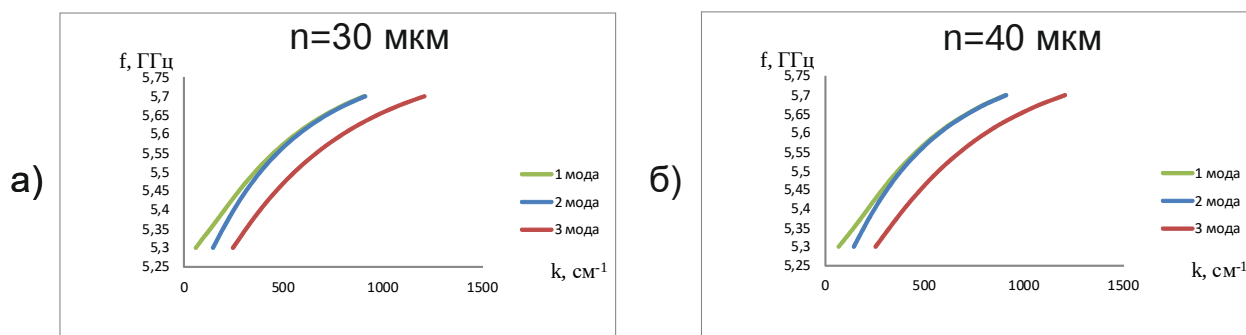


Рисунок 5. Дисперсионные характеристики: а) расстояние между пленками 30 мкм, б) расстояние между пленками 40 мкм.

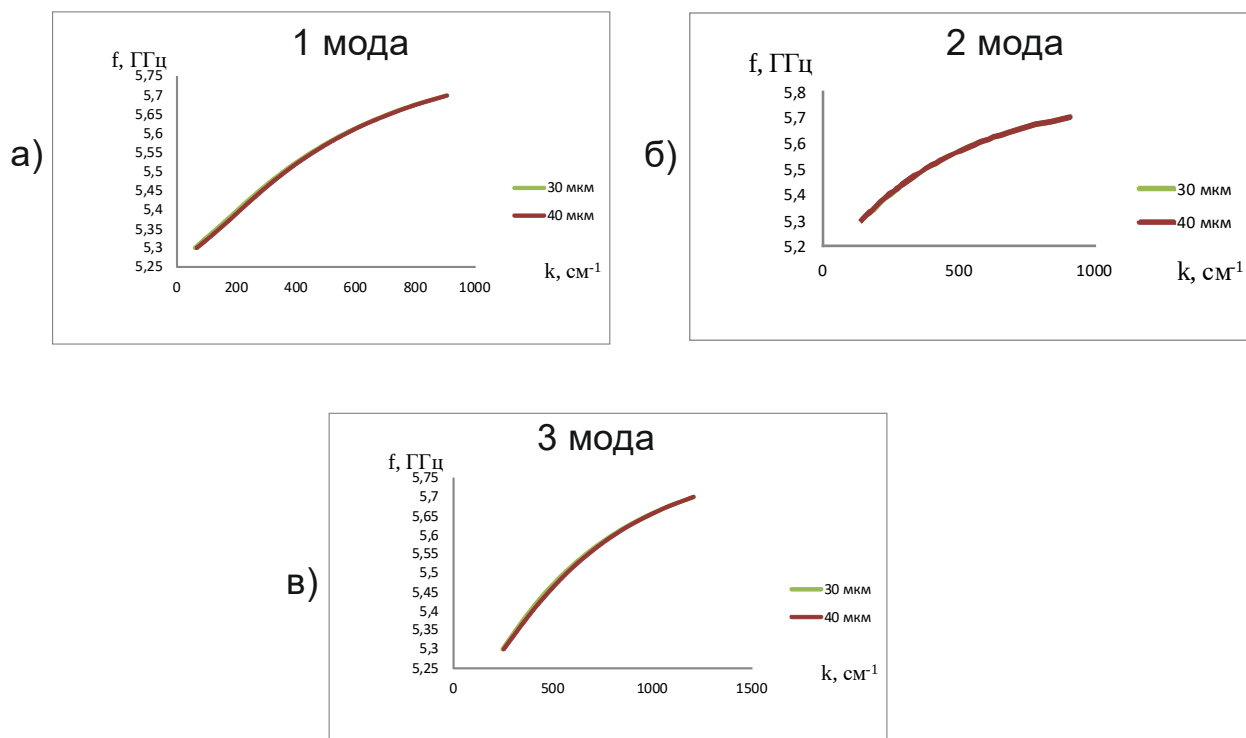


Рисунок 6. Дисперсионные характеристики: а) 1-я мода, б) 2-я мода, в) 3-я мода.

Использование магноники и спинтроники для реализации нейронных сетей. В некоторых задачах, таких как распознавание образов, мозг намного превосходит обычные вычислительные схемы на основе КМОП-технологий с точки зрения энергопотребления. Следовательно, нейроморфные вычислительные подходы направлены на имитацию функциональности нейронов в сети для повышения эффективности вычислений. В мозге стимулы передаются коротковолновыми пакетами от одного нейрона к другому, где они приводят к стимуляции, которая суммируется, а затем, в конечном счете, запускает нелинейную реакцию. Таким образом, естественно рассматривать волны в качестве носителей данных для искусственных нейронных сетей.

Динамика спиновых волн и их квантов, магнонов, управляется нелинейным уравнением движения, обеспечивающим легкий доступ к нелинейности. Они могут управляться через перепрограммируемые сети с использованием спинтроники и нелинейных эффектов, и их конечное время

жизни обеспечивает внутреннюю память для системы спиновых волн. Кроме того, их энергия возбуждения очень мала, а их нанометрические длины волн на частотах в диапазоне ГГц и ТГц обещают масштабируемую и энергоэффективную платформу для нейроморфных вычислений.

Спиновые волны являются ведущим кандидатом на неэлектрическую обработку информации, магنونные и спинтронные устройства были разработаны для многих различных целей, таких как логические элементы булевой логики и сигнальные процессоры. Большой интерес многих исследовательских групп к этой теме раскрывает возможности и проблемы, связанные с внедрением магнитных устройств во все более сложные реальные нейроморфные компьютеры.

Перспективные области исследования магноники и спинтроники.

Гибридные динамические системы в последнее время приобрели интерес как к фундаментальной физике, так и к приложениям устройств, особенно с их потенциалом для когерентной обработки информации. В этой перспективе стоит обратить внимание на недавние быстрые разработки гибридных систем на основе магнонов, которые стремятся объединить магنونные возбуждения с различными возбуждениями для преобразующих применений в устройствах, схемах и обработке информации. Ключом к их многообещающим потенциалам является то, что магноны являются высоко настраиваемыми возбуждениями и могут быть легко сконструированы для сопряжения с различными динамическими средами и платформами. Способность достигать сильной связи со многими различными возбуждениями хорошо расположила магноны для изучения когерентной динамики твердого тела и использования уникальной функциональности. В качестве перспективы на будущее будут рассмотрены возможности и проблемы магنونных гибридных систем для их применения в квантовой информации и магنونной логике.

Гибридные системы обеспечивают новую парадигму для объединения платформ и устройств, которые могут выполнять различные задачи, такие как хранение, обработка и передача когерентных состояний. Кроме того, гибридные системы могут быть описаны, реализованы и измерены в классическом режиме с помощью четко определенных динамических формул и фазовой когерентности. Это значительно облегчает исследования фундаментальной физики сильной связи между различными возбуждениями, а также когерентную манипуляцию и проектирование гибридных систем, которые затем могут быть применены в квантовом режиме путем связи с квантовыми модулями.

Когерентная обработка информации с помощью гибридных систем стала новой научной задачей и вдохновила множество междисциплинарных исследований, особенно для их применения в квантовой информации. Введение магнонов в семейство предоставило новую свободу для реализации многих динамических явлений, благодаря удобству настройки ключевых свойств магнонов, таких как частота, демпфирование и связь.

Заключение. Новые свойства спинтронных устройств могут дать возможность создавать принципиально новые типы вычислительных систем, которые могут обеспечить беспрецедентные вычислительные возможности. Использование устройств с энергонезависимой памятью и вычислительными возможностями может обеспечить эффективную гибридную архитектуру. Следовательно, оптимизация и исследования на уровне физики устройства необходимы для обеспечения будущего применения подобных технологий.

В ходе работы был проведен обзор методов обработки сигналов на основе спинтронных и магнонных структур от уже давно изученных до перспективных в будущем направлениях.

В качестве примера была рассмотрена латеральная структура с прямоугольными волноводами и латеральная структура с формой краев в виде

скосов. Эти структуры могут быть использованы в вычислительных системах для передачи данных на входы логической схемы, помимо этого эти структуры могут быть использованы для реализации систем обработки сигналов.

Инновации имеют решающее значение не только для материалов и устройств, но также для схем и систем. Кроме того, спинтроника может способствовать дальнейшему развитию запоминающих компьютерных систем, вдохновленных работой мозга. Поэтому так необходимы дополнительные теоретические усилия для разработки набора материалов для полного понимания механизмов.

Список источников:

1. “International roadmap for devices and systems,” see <https://irds.ieee.org> (last accessed 25 May 2020).
2. D. G. Feitelson, *Optical Computing* (MIT Press, Cambridge, 1988).
3. N. Streibl, K.-H. Brenner, A. Huang, J. Jahns, J. Jewell, A. Lohmann, D. Miller, M. Murdocca, M. Prise, and T. Sizer, *Proc. IEEE* 77, 1954 (1989).
4. S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, and D. M. Treger, *Science* 294, 1488 (2001).
5. C. Felser and G. H. Fecher, *Spintronics: From Materials to Devices* (Springer, Dordrecht, Heidelberg, 2013).
6. S. Bandyopadhyay and M. Cahay, *Introduction to Spintronics*, 2nd ed. (CRC Press, Boca Raton, 2015).
7. *Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy-Efficient Memory and Computing*, edited by J. Atulasimha and S. Bandyopadhyay (Wiley, Chichester, 2016).
8. S. Manipatruni, D. E. Nikonov, and I. A. Young, *Nat. Phys.* 14, 338 (2018).
9. Barman, A. & Sinha, J. *Spin Dynamics and Damping in Ferromagnetic Thin Films and Nanostructures* (Springer, Cham, Switzerland, 2017).
10. Chumak, A. V., Karenowska, A. D., Serga, A. A. & Hillebrands, B. Magnon spintronics. *Nat Mater* 11, 1505–1549 (2015).
11. Brächer, T. & Pirro, P. An analog magnon adder for all-magnonic neurons. *J. Appl. Phys.* 124, 152119 (2018).
12. A. Papp, W. Porod, A. I. Csurgay, and G. Csaba, “Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference,” *Sci. Rep.* 7, 9245 (2017).
13. M. P. Kostylev, A. A. Serga, T. Schneider, B. Leven, and B. Hillebrands, “Spin-wave logical gates,” *Appl. Phys. Lett.* 87, 153501 (2005).