

На правах рукописи



**Калябин Дмитрий Владимирович**

**НЕВЗАИМНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СПИНОВЫХ И  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ  
СТРУКТУРАХ**

Специальность 01.04.07 —  
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г. Москва.

Научный руководитель: **Никитов Сергей Аполлонович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Устинов Алексей Борисович**,  
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры физической электроники и технологии факультета электроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург

**Фраерман Андрей Александрович**,  
доктор физико-математических наук, зав. Отделом магнитных наноструктур ФГБУН Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Защита состоится 15 сентября 2017 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Kalyabin/index.html>

Автореферат разослан "\_\_"июля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, доцент

 **Кузнецова**  
Ирен Евгеньевна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Интенсивные исследования в области магнитных материалов и, в особенности, микро- и наноманитных структур в последние годы позволили получить интересные и важные научные результаты, которые легли в основу такого научного направления, как спинтроника. Спинтроника - это бурно развивающаяся область электроники, в которой, в частности, используются процессы переноса магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих магнитные материалы. Перенос спина также может осуществляться с помощью магнонов, или спиновых волн в магнитных металлах и диэлектриках. В связи с этим выросло новое научное направление - магноника. Магноника - это область спинтроники или в более общем смысле электроники, изучающее физические свойства магнитных микро- и наноструктур, свойства распространяющихся спиновых волн, а также возможностей применения спиновых волн для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации на новых физических принципах [1–6].

Бурному росту числа исследований свойств магнонов в последнее десятилетие способствовало несколько причин: появление новых технологий, обеспечивающих возможность взаимодействия с магнонами на наномасштабах; открытие ряда физических явлений, таких как эффект спиновой накачки (Spin Pumping) [7] и эффект переноса спинового момента (Spin Transfer Torque) [8]; необходимость создания альтернативы КМОП технологии, достигшей на данный момент фундаментальных ограничений. Использование магнонного подхода (передача и обработка данных с помощью магнонов) [2] в спинтронике (которая изучает переносимые электронами спиновые токи) создало новую область физики — магнонная спинтроника [1]. Это создало следующие преимущества:

- Магноны позволяют передавать и обрабатывать спиновую информацию без движения каких либо действительных частиц, таких как электроны, и следовательно без джоулевых потерь.
- Длина свободного пробега магнонов обычно на несколько порядков больше чем длина диффузии спинов.
- Волновая природа спиновых волн и их нелинейные свойства обеспечивают возможность применения более эффективных подходов к обработке данных.

В данной диссертации представлены результаты исследования, которые можно сгруппировать следующим образом:

1. Распространение магнитостатических спиновых волн в периодических магнитных структурах
2. Распространение акустических и магнитостатических спиновых волн в неоднородных неперидических волноведущих структурах

Исследование спиновых волн, распространяющихся в магннных кристаллах (МК) [9; 10], которые являются магнитными аналогами фотонных кристаллов [11], стало в последние десятилетия одной из наиболее динамично развивающейся областей магнетизма. В качестве простейшего примера МК можно представить структуру состоящую из множества слоев двух ферромагнитных материалов, чередующихся в пространстве. В дисперсионной картине волны, распространяющейся в такой структуре, появятся запрещенные зоны, определяемые условием Брэгга  $k = \pi n/\Lambda$ , где  $k$  это волновое число, а  $\Lambda$  это период структуры. Эти запрещенные зоны, аналогичны фотонным в фотонных кристаллах, зависят от материалов и геометрии конкретного образца, однако, в отличие от фотонных аналогов, магннные запрещенные зоны могут управляться внешним магнитным полем [12; 13], обеспечивая возможность отстройки по частоте в таких перестраиваемых устройствах, как линии задержки или частотные фильтры [2]. Экспериментальные данные также подтверждают образование запрещенных зон в различных одномерных МК: образованных микроструктурированием ферромагнитной пленки [14]; состоящих из отстоящих друг от друга ферромагнитных полосок [15]; состоящих из двух различных ферромагнитных полосок, чередующихся в пространстве, также называемыми бикомпонентными МК [16; 17]. Эти свойства магннных кристаллов привели к интенсивному исследованию МК различных конфигураций. В ранних работах рассматривались спиновые волны в одномерных МК с маленьким магнитным контрастом, то есть  $|M_{s1} - M_{s2}|/M_{s1} \ll 1$ , где  $M_{s1}$ ,  $M_{s2}$  это намагниченности насыщения материалов. Решение было получено для обратных объемных магнитостатических волн с периодическими обменными граничными условиями [10]. В дисперсионной картине проявлялись ярко выраженные запрещенные зоны, что привело к продолжению исследования МК различных видов с разнообразной конфигурацией разными методами [12].

Важной особенностью спиновых волн является их невзаимность. Например, поверхностные магнитостатические спиновые волны распространяющиеся в касательно намагниченной ферромагнитной пленке в противоположных направлениях локализованы вблизи противоположных поверхностей этой пленки. Благодаря этому, введение асимметричных граничных условий (например добавление металлизации) приводит к асимметричности дисперсионных картин спиновых волн в таких структурах [18]. Другим проявлением свойства невзаимности, являются выделенные направления при рассеивании спиновых волн на включениях, что в свою очередь приводит к возникновению краевых вращательных состояний в периодических структурах. Причем, направление вращения меняется на противоположное при смене направления внешнего магнитного поля.

Другим направлением представленного исследования является изучение распространения спиновых волн в узких нерегулярных волноводящих структурах. Последние успехи в области изучения устройств магннной

логики [1–3; 6; 19; 20] продемонстрировали возможность их развития в качестве потенциального конкурента привычным электронным устройствам с КМОП схемотехникой. Использование магновов вместо электронов существенно снижает потери и обеспечивает перестраиваемость устройств. На данный момент прототипы магнонных логических вентилях представляют собой соединения интерферометров спиновых волн [2; 4; 5; 21–24]. Управление интерференцией спиновых волн открывает новые перспективы спинволновой архитектуры логических устройств. Однако на данный момент не существует подробной теории, описывающей распространение спиновых волн в таких структурах, особенно на наномасштабах, где существенную роль играют размерные эффекты. А именно, для описания таких структур и дальнейшего их использования в наноразмерных устройствах магнонной логики, важно решить две основные проблемы: учесть многомодовое распространение спиновых волн и нерегулярность волноводов. Результаты исследований в этом направлении также представлены в данной диссертации.

**Целью** данной работы является исследование невязанных и резонансных эффектов при распространении спиновых волн в неоднородных ферромагнитных структурах, а также резонансных эффектов при распространении поверхностных акустических волн в неоднородных структурах с акустическими метаматериалами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать распространение прямых объемных магнитостатических спиновых волн в нормально намагниченных двумерных магнонных кристаллах
2. Исследовать распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в касательно намагниченных магнонных кристаллах
3. Исследовать свойства поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерных магнонных кристаллах конечной длины
4. Исследовать распространение поверхностных акустических волн Лява в нерегулярных слоистых структурах, содержащих акустические метаматериалы
5. Исследовать распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в пространственно ограниченных ферромагнитных волноводах переменной ширины

**Научная новизна** работы заключается в получении следующих новых научных результатов:

1. С помощью разработанной математической модели, описывающей распространение прямых объемных магнитостатических спиновых волн в нормально намагниченных двумерных магнонных кристал-

- лах, обнаружено возникновение краевых вращательных состояний в таких структурах
2. Исследован процесс распространения поверхностных магнитостатических спиновых волн в касательно намагниченных магнетонных кристаллах разных видов с учетом полного спектра спиновых волн в магнетонном кристалле, что позволило точно решить задачу о рассеянии спиновых волн на неоднородности волновода
  3. Разработана методика аналитического исследования характеристик распространения поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерных магнетонных кристаллах конечной длины, с помощью которой было показано, что зонная структура дисперсии спиновых волн проявляется уже на нескольких периодах
  4. Разработана математическая модель, описывающая распространение поверхностных акустических волн Лява в слоистой структуре, содержащей верхний упругий слой переменной толщины и подложку из акустического метаматериала, на основе которой была продемонстрирована возможность эффективного пространственного разделения по частоте волн в таких структурах
  5. Исследовано распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в пространственно ограниченных неоднородных ферромагнитных волноводах, что показало, что режим распространения волн является существенно многомодовым, причем перекачка энергии между модами может существенно влиять на характер распространения волн в таких структурах (перекачка более половины энергии моды)

**Теоретическая и практическая значимость работы** В ходе выполнения работ, результаты которых представлены в данной диссертации, были исследованы периодические магнитные структуры, как “бесконечные”, так и конечной длины. При исследовании свойств спиновых волн, распространяющихся в таких структурах, было показано, что на этой базе можно создать ряд устройств обработки сигналов на принципах магнетонной логики, которые будут существенно отличаться от устройств привычной электроники, в частности, низким энергопотреблением, перестраиваемостью по внешнему магнитному полю, наличием эффекта невзаимности, более высоким рабочим диапазоном частот и др. Но с другой стороны, для создания полноценной компонентной базы на принципах магнетоники, нужно описать и принцип соединения простейших логических вентилей в целые логические устройства. На данный момент предполагается делать это с помощью узких нерегулярных ферромагнитных волноводов, которые также были исследованы в представленной работе. Таким образом, разработанная теория и полученные с её помощью результаты находятся на передовом крае магнетоники.

**Методология и методы исследования.** В ходе представленной работы была разработана комплексная математическая модель, описывающая распространение магнитостатических спиновых и акустических волн в неоднородных структурах на базе уже существующих аналитических методов (метод многократного рассеяния, метод разложения по плоским волнам, метод матриц передачи, метод сечений) и микромагнитного моделирования (пакет Nmag на основе метода конечных элементов), с существенной их переработкой для учета особенностей гиротропных сред, которыми являются все рассматриваемые магнетики, конкретных геометрических параметров структур и граничных условий. Численные результаты получены с помощью специально созданных автором пакета программ, написанных на языках *C*, *Python* с использованием библиотек для работы с линейной алгеброй, решения систем дифференциальных уравнений и др.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В нормально намагниченных двумерных магнетонных кристаллах при распространении в них спиновых волн возникают краевые вращательные состояния - краевые магны
2. В одномерных касательно намагниченных магнетонных кристаллах распространение поверхностных магнитостатических волн является невязанным, а именно: дисперсионные характеристики волн, распространяющихся в противоположных направлениях, различны
3. В одномерных касательно намагниченных магнетонных кристаллах ограниченной длины зонная структура дисперсии поверхностных магнитостатических спиновых волн проявляется уже на нескольких периодах кристалла
4. В слоистой структуре, содержащей верхний упругий слой переменной толщины и подложку из акустического метаматериала, поверхностные акустические волны Лява, излучающиеся в объем подложки вследствие неоднородности волновода, оказываются пространственно разделенными по частотам
5. Многомодовость распространения поверхностных магнитостатических спиновых волн в ограниченных ферромагнитных волноводах приводит к перекачке мощности переносимой модами волны, а именно: к перекачке более половины мощности волны между низшими модами волны

**Достоверность** полученных результатов подтверждается

- использованием в качестве основы, уже примененных в другой области аналитических и численных методов
- сравнением и совпадением отдельных результатов, полученных разными методами (аналитическими, численными и экспериментальными) между собой

- подтверждением полученных автором результатов другими научными группами и ссылками на работы автора

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на 23 российских и международных конференциях:

IEEE International Ultrasonics Symposium (Dresden, Germany, 2012), Days on Diffraction (Санкт-Петербург, 2012), 9-ый, 10-ый, 11-ый и 12-ый Молодежный конкурс имени Ивана Анисимкина (Москва, 2012, 2013, 2014, 2015), International Symposium on Spin Waves 2013, 2015 (Санкт-Петербург 2013, 2015), 57-ая, 58-ая и 59-ая научная конференция МФТИ (Долгорудный, 2014, 2015, 2016), Нанозифика и Нанозлектроника XVIII, XIX и XXI международный симпозиум (Нижний Новгород, 2014, 2015, 2017), Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials MMM (Honolulu, USA, 2014), Moscow International Symposium on Magnetism MISM (Москва, 2014), IEEE International magnetic conference INTERMAG (Dresden, Germany, 2014), IEEE International Conference on Microwave Magnetics ICMM (Sendai, Japan, 2014), International Workshop "Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures – BrilMics" (Саратов, 2014), Joint Magnetism and Magnetic Materials - INTERMAG Conference (San Diego, USA, 2016), Sol-SkyMag International Conference on Magnetism and Spintronics (San -Sebastian, Spain, 2016), IUMRS-ICEM International Conference on Electronic Materials (Singapore, 2016), EASTMAG-2016.VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (Красноярск, 2016).

**Личный вклад.** Все работы по теме диссертации выполнены Калябиным Д.В. в соавторстве с Никитовым С.А., Лисенковым И.В., Осокиным С.А., Урманчевым Р.В., Садовниковым А.В., Бегининым Е.Н., Шаравским Ю.П.

Автор, совместно с вышеперечисленными коллегами, разработал аналитическую теорию и создал программы численного счета для описания распространения магнитостатических спиновых и акустических волн в разного рода периодических и нерегулярных структурах. А именно, были рассмотрены магнитные кристаллы, акустические метаматериалы, ферромагнитные и акустические волноведущие структуры с плавно меняющимися параметрами. На основании созданных автором теорий и математических моделей, а с также с помощью предложенных подходов, было проведено всестороннее исследование распространения волн в таких периодических и нерегулярных волноводах (исследование модового состава, получение дисперсионной картины, построение распределения поля волны, оценка коэффициента пропускания и величины связи мод).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 публикациях в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованный ВАК, в 5 публикациях в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цити-

рования Scopus и Web of Science, в 9 публикаций в трудах международных конференций и в патенте РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка рисунков. Полный объем диссертации составляет **114** страниц текста с **38** рисунками. Список литературы содержит **149** наименований.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, раскрыта структура и содержание диссертации по главам.

В **Главе 1** даны основные определения, используемые в диссертации, и обсуждены вопросы терминологии. Также в главе приведен обзор современной научной литературы, посвященной исследованиям в области магнитостатических спиновых волн, магнетонных кристаллов, акустических метаматериалов и устройств магнетонной логики. Кратко обсуждены основные методы математического моделирования распространения спиновых и акустических волн как в периодических, так и в непериодических неоднородных структурах.

**Глава 2** посвящена исследованию свойств спиновых волн, распространяющихся в периодических магнитных структурах, а именно в нормально намагниченных двумерных магнетонных кристаллах и касательно намагниченных одномерных магнетонных кристаллах (в том числе и ограниченной длины).

В **Разделе 2.1** решена задача о распространении прямых объемных магнитостатических спиновых волн, распространяющихся в нормально намагниченном двумерном магнетонном кристалле, состоящем из ферромагнитной пленки и набором цилиндрических включений из другого ферромагнетика, расположенных в узлах квадратной решетки [A2, A6, A11-13, A15, A17].

Постановка задачи о распространении прямых объемных магнитостатических спиновых волн, распространяющихся в нормально намагниченном двумерном магнетонном кристалле приведена в разделе 2.1.1. Пример рассматриваемого магнетонного кристалла показан на Рис. 1a. Рассмотрена ферромагнитная пленка (матрица) толщины  $d = 100nm$  и намагниченностью насыщения  $M_s^0 = 1620Oe$  с набором цилиндрических включений другого ферромагнитного материала той же толщины с  $M_s^1 = 1750Oe$ , радиус включений  $R = 1\mu m$ , период решетки  $L = 5\mu m$ . Внешнее однородное магнитное поле  $\vec{H}_{ext} = 5kOe$  приложено нормально к поверхности пленки вдоль оси  $Oz$ , обеспечивая возможность распространения пря-

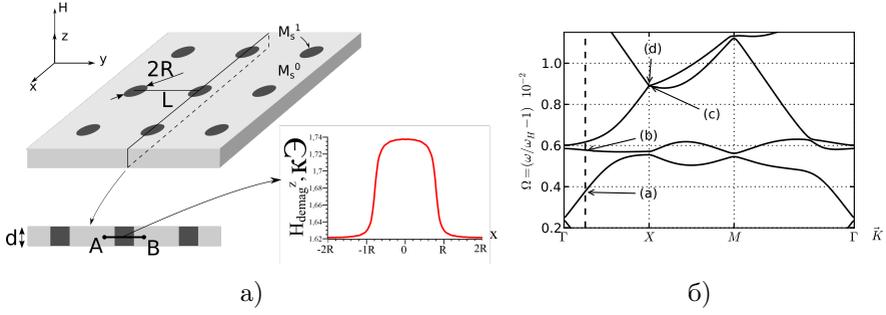


Рис. 1 — а) Рассматриваемый двумерный магнонный кристалл и неоднородность поля размагничивания вблизи включений, б) Дисперсия прямых объемных магнитостатических спиновых волн в двумерном магнонном кристалле

мых объемных магнитостатических спиновых волн. Поле размагничивания  $\vec{H}_{eff}(\vec{r})$  [25] данной структуре получается неоднородным (см Рис. 1а).

Начиная с уравнений Максвелла в магнитостатическом приближении [26]:

$$(\nabla, \vec{b}) = 0, \quad \nabla \times \vec{h} = 0 \quad (1)$$

и вводя скалярный магнитостатический потенциал  $\vec{h} = -\nabla\Psi$ , который мы подставляем в (1) мы приходим к скалярному уравнению Уокера, описывающему распространение прямых объемных магнитостатических спиновых волн в двумерно магнонном кристалле:

$$\mu_0(\partial_x^2 + \partial_y^2)\Psi + \partial_z^2\Psi = 0, \quad (2)$$

В разделе 2.1.2 описано применение микромагнитного моделирования для расчета неоднородности поля размагничивания вблизи включений в магнонном кристалле.

В разделе 2.1.3 описано применение метода многократного рассеяния в данной задаче, которое разбивается на две проблемы: учет рассеяния прямых объемных спиновых волн на единичном включении и суммирование волн, рассеянных на каждом из включений. Нахождение собственных мод спиновых волн в рассматриваемом двумерном магнонном кристалле сводится к решению секулярного уравнения [27]:

$$\det |I - T_{lm} \times G_{l-m}| = 0, \quad (3)$$

где  $I$  это единичная матрица,  $T_{lm}$  это матрица рассеяния спиновой волны на единичном включении, связывающая поле падающей и рассеянной волны,  $G_{l-m}$  это квазипериодическая функция Грина решетки [27; 28], описывающая перерассеяние волн на включениях.

В разделе 2.1.4 приведены результаты моделирования. На Рис. 16 показана дисперсионная зависимость прямых объемных магнитостатических волн в двумерном магнетонном кристалле. Характерной особенностью данной картины является возникновение пологой дисперсионной кривой (кривая  $b$ ), что характерно для дисперсионных кривых вблизи резонансов.

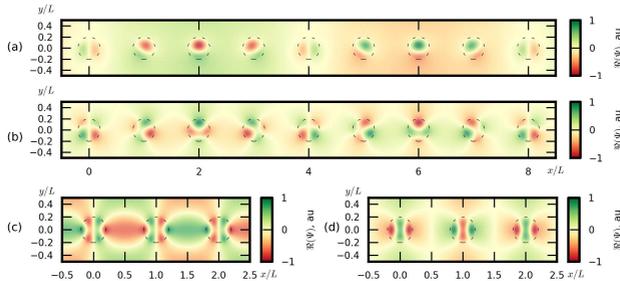


Рис. 2 — Распределение действительной компоненты магнитостатического потенциала спиновой волны, распространяющейся вдоль магнетонного кристалла, с волновым числом и частотой соответствующим точкам  $a, b, c$  и  $d$  дисперсии на Рис. 16

На Рис. 2 приведен распределения поля в характерных точках  $a, b, c$  и  $d$ . Случай  $a$  соответствует нормальному режиму распространения спиновых волн в периодической структуре. Видно, что вблизи цилиндрических включений возникают локальные состояния (локализация энергии спиновой волны), а распределение поля этих состояний вращается вокруг оси цилиндров. Случай  $b$  соответствует квадрупольному локальному резонансу, что выражается в эффективной локализации энергии всей спиновой волны вблизи включений. И, наконец, точки  $c$  и  $d$  соответствуют нижней и верхней границей брэгговской запрещенной зоны. При приближении к этим точкам в магнетонном кристалле образуется стоячая волна, а групповая скорость распространения спиновых волн приближается к нулю.

В Разделе 2.2 решена задача о распространении поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерных магнетонных кристаллах [A4,A7,A9,A15,A17].

В разделе 2.2.1 описаны рассмотренные типы магнетонных кристаллов. Они представляют из себя касательно намагниченные периодические магнитные структуры на диэлектрической подложке, в которых перпендикулярно направлению намагничивания распространяются поверхностные магнитостатические спиновые волны (см Рис. 3). А именно, в случае  $a$  рассмотрен бикомпонетный магнетонный кристалл, состоящий из чередующихся ферромагнитных полосок железо-иттриевого граната (YIG) равной ширины и толщины с намагниченностью насыщения  $M_{s1} = 1750Oe$  и

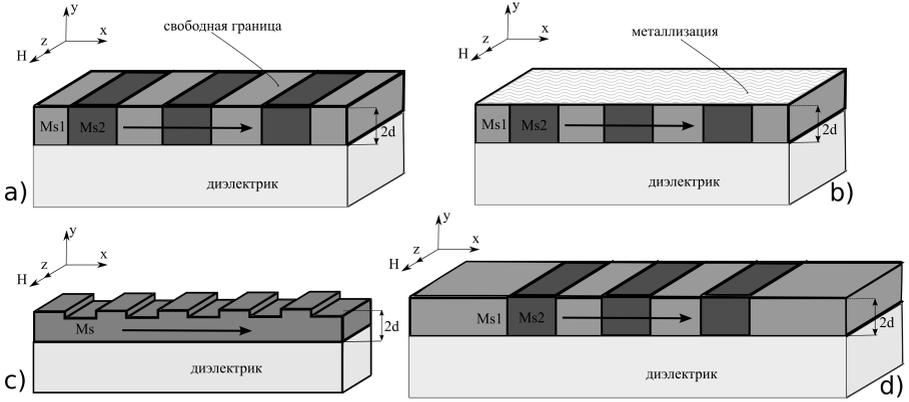


Рис. 3 — Рассматриваемые виды 1D магннных кристаллов: а) бикомпонентный, б) бикомпонентный с металлизацией верхней поверхности, с) образованный микроструктурированием верхней поверхности, д) бикомпонентный магннный кристалл ограниченной длины

$M_{s2} = 1650Oe$ . В случае *b* рассматривался такой же магннный кристалл, но с металлизацией верхней поверхности, что как подробно расписано в тексте диссертации, создает асимметрию граничных условий при распространении поверхностных волн, распространяющихся в противоположных направлениях, так как они локализованы вблизи разных поверхностей магннного кристалла. Случай *c* соответствует пленке YIG с  $M_s = 1750Oe$  и микроструктурированной поверхностью (глубина канавок составляет 10%).

В разделе 2.2.2 описано применение метода плоских волн для случая распространения поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерном магннном кристалле. В геометрии поверхностных волн уравнение Уокера получается более сложным чем в случае (2):

$$\mu(\partial_{xx}^2 + \partial_{yy}^2)\varphi(x,y) + \partial_x\mu\partial_x\varphi(x,y) + i\partial_x\eta\partial_y\varphi(x,y) = 0 \quad (4)$$

где  $\mu$  и  $\eta$  это компоненты тензора магнитной проницаемости  $\hat{\mu}$ :

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & i\eta & 0 \\ -i\eta & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Так как намагниченность насыщения является периодической функцией, то решение уравнения (4) согласно теореме Блоха-Флоке [29] может быть найдено в следующей форме:

$$\varphi(x,y) = \sum_p \Phi_p(y) e^{i(k+b_p)x} = \sum_p \Phi_p(y) e^{i(k_p)x} \quad (6)$$

где  $k$  это блоховское волновое число  $b_p = \frac{2\pi p}{a}$  это  $p$ -ый вектор обратной решетки,  $a$  это длина периода структуры,  $k_p = k + b_p = k + \frac{2\pi p}{a}$ . Компоненты тензора проницаемости также разлагаются в ряд :

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \sum_p M_p e^{ib_p x} \\ \eta(x) &= \sum_p N_p e^{ib_p x} \end{aligned} \quad (7)$$

После ряда преобразований, уравнение (4) сводится к задаче на собственные значения:

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_1 & 0 \\ 0 & \hat{M}_2 \end{bmatrix} \cdot \vec{Y} = \lambda \begin{bmatrix} \pm \hat{M}_3 & \hat{M}_2 \\ \hat{M}_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{Y} \quad (8)$$

где  $\hat{M}_1$ ,  $\hat{M}_2$  и  $\hat{M}_3$  - матрицы размера  $2N + 1$ .

Чтобы найти дисперсионную зависимость для спиновых волн в такой структуре надо найти, при каких парах значений  $k$  и  $\omega$  существует решение (8).

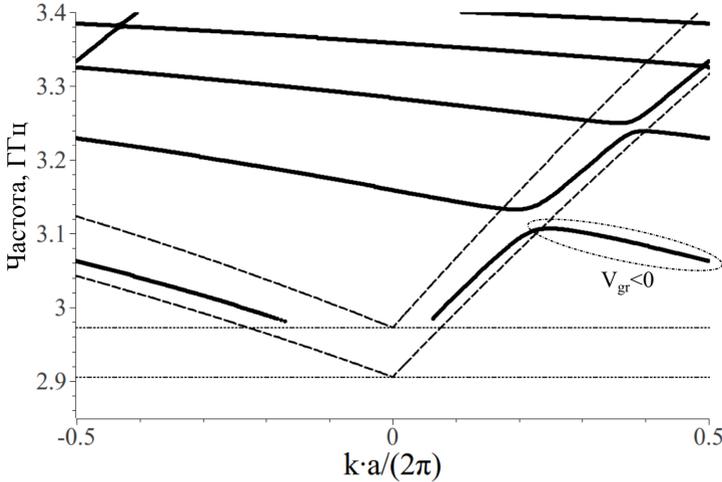


Рис. 4 — Дисперсия поверхностных магностатических спиновых волн в одномерном магнонном кристалле вида Рис. 3 (b)

В разделе 2.2.3 приведены результаты математического моделирования. Найдены дисперсионные зависимости для всех магнонных кристаллов

показанных на Рис. 3. На Рис. 4 показана дисперсионная зависимость для поверхностных магнитостатических спиновых волн в невзаимном одномерном бикомпонентном магнотонном кристалле (случай *b*). На рисунке видно, что привычная для волн в периодических структурах зонная структура дисперсии с зонами распространения и запрещенными зонами искажена, имеет ярко выраженную асимметрию, что вызвано асимметрией граничных условий для волн бегущих вдоль оси  $0x$  ( $k > 0$ ) и против оси  $0x$  ( $k < 0$ ). Также хорошо видно, что существует диапазон частот, где возможно строго однонаправленное распространение спиновых волн в такой структуре и есть ветвь дисперсии с отрицательной групповой скоростью.

В Разделе 2.3 решена задача о распространении магнитостатических спиновых волн в магнотонных кристаллах конечной длины [A10].

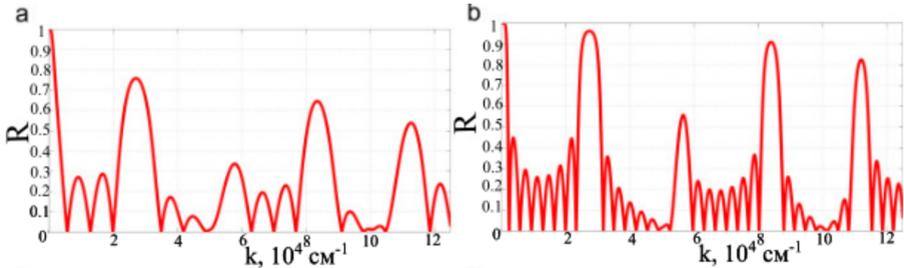


Рис. 5 — Коэффициент отражения поверхностной магнитостатической спиновой волны от структуры, содержащей : а) 4, б) 8 магнитных включения

В разделе 2.3.1 описаны рассматриваемые магнотонные кристаллы (см Рис. 3 d). Ключевым отличием от рассмотренных ранее бикомпонентных магнотонных кристаллов (см Рис. 3 a,b), является ограниченность по длине, то есть по числу периодов структуры. Благодаря этому, использованные ранее методы впрямую неприменимы и было необходимо разработать другой подход, описанный в разделе 2.3.2.

В разделе 2.3.3 описано применение разработанного подхода к магнотонным кристаллам конечной длины. В разделе 2.3.4 продемонстрированы результаты исследования распространении магнитостатических спиновых волн в магнотонных кристаллах конечной длины. Коэффициент отражения от структуры приведен на Рис. 5 для следующих параметров структуры:  $M_1 = 8500G$ ,  $M_2 = 7900G$ ,  $l = 0.5\mu m$ ,  $A = 1\mu m$ ,  $d = 20nm$ ,  $H_{ext} = 300Oe$  и для разного числа периодов структуры а)  $N = 4$ , б)  $N = 8$ . По рисунку четко видно, что зонная структура дисперсии поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерных касательно намагниченных магнотонных кристаллах конечной длины проявляется уже на нескольких периодах структуры.

**Глава 3** посвящена исследованию распространения акустических и магнитостатических спиновых волн в неоднородных волноведущих структурах.

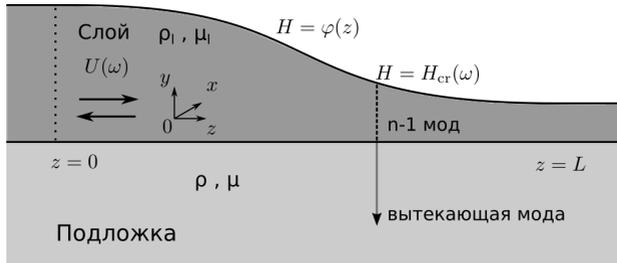


Рис. 6 — Неоднородная волноведущая структура и пространственное разделение по частоте мод поверхностных акустических волн Лява

В **Разделе 3.1** решена задача о распространении поверхностных акустических волн Лява в неоднородных слоистых волноведущих структурах, содержащих акустические метаматериалы [A1, A8, П1].

В разделе 3.1.1 описаны поверхностные акустические волны Лява. В разделе 3.1.2 проведена нормировка функций сечения этих волн. В разделе 3.1.3 построен полный спектр решений уравнения движения и проведена классификация типов собственных мод волновода. В разделе 3.1.4 описано распространение этих волн в неоднородных слоистых волноведущих структурах вида Рис. 6.

В разделе 3.1.5 предложены слоистые структуры с акустическими метаматериалами в качестве подложки. В разделе 3.1.6 описано исследование с помощью приближения когерентного потенциала частотных свойств материальных параметров акустических метаматериалов, представляющих собой матрицу с набором цилиндрических включений другого упругого материала (см Рис. 7 а). Результаты вычислений представлены на Рис. 7 б), где видно что на фиксированной частоте, задаваемой материальными параметрами матрицы и включений, виден ярко выраженный резонанс. Причем видно, что в определенной области частот есть диапазон, где эффективная плотность акустического метаматериала становится отрицательной (для случая электромагнитных волн среды с отрицательными параметрами были предсказаны еще в [30]). В данной же работе используется лишь резонансная частотная зависимость в положительной области материальных параметров.

В разделе 3.1.7 в полученном полном базисе решений была проведена оценка связи мод, возникающей благодаря неоднородности. В разделе 3.1.8 наработки по неоднородным слоистым структурам и резонансным частотным зависимостям эффективных материальных параметров акусти-

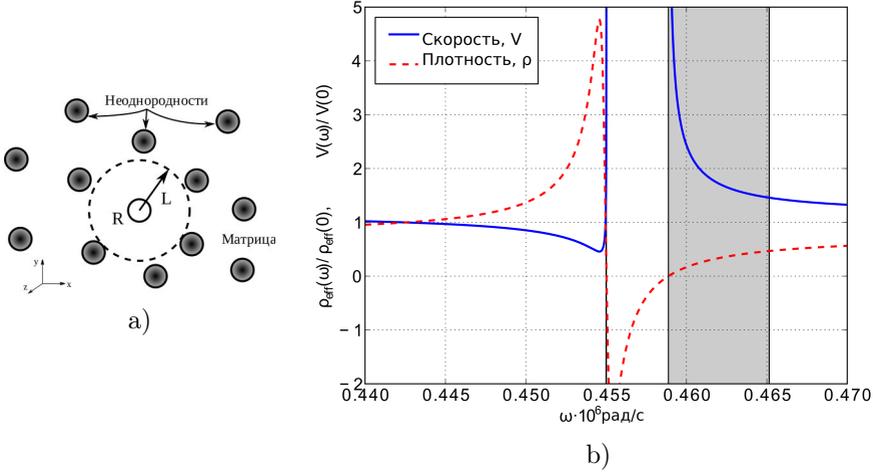


Рис. 7 — а) Схема акустического метаматериала и б) зависимость его материальных параметров от частоты вблизи локального резонанса

ческих метаматериалов соединяются воедино. Благодаря неоднородности слоистой волноведущей структуры, происходит высвечивание первой высшей моды поверхностной акустической волны Лява на разных участках волновода для разных частот, а резонансная зависимость параметров метаматериала от частоты существенно усиливает эффект этого пространственного разделения и делает его принципиально реализуемым на практике [A1].

В Разделе 3.2 решена задача о распространении поверхностных магнитостатических спиновых волн в латерально ограниченных неоднородных ферромагнитных волноводах [A5,A14-15,A17-18].

В разделе 3.2.1 описана модель рассматриваемого латерально неограниченного неоднородного волновода (см Рис. 8 а)), представляющего собой тонкопленочную латерально ограниченную волноведущую структуру из YIG на подложке из гадолиний-галлиевого граната (GGG). Из-за пространственной ограниченности, для спиновой волны существует целый спектр ширинных мод, которые могут распространяться одновременно. Для точного описания распространения поверхностной магнитостатической спиновой волны в неоднородном волноводе была создана теоретическая модель (см раздел 3.2.2), основанная на методе сечений.

В разделе 3.2.3 представлены результаты математического моделирования. В рамках созданной модели было показано, что для выбранных параметров структуры для описания процесса распространения достаточно учета лишь первой и третьей четных ширинных мод. Величина связи мод, вычисленной, с помощью данной модели, показана на Рис. 8 б). Зная

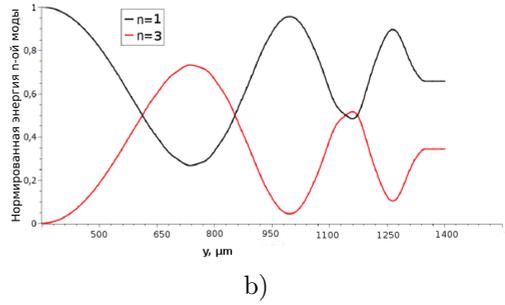
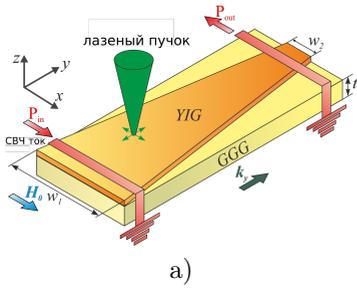


Рис. 8 — а) Латерально ограниченный ферромагнитный волновод поверхностных магнитостатических спиновых волн и б) связь ширинных мод спиновых волн в нем (черной линией показана энергия первой моды, красной - третьей моды)

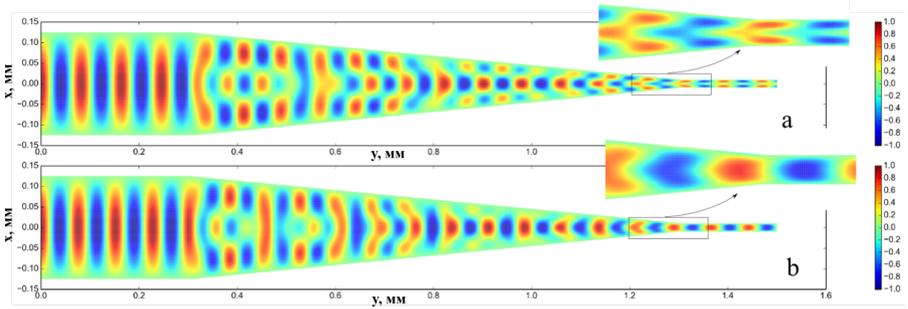


Рис. 9 — Распределение поля спиновых волн в неоднородном волноводе на частоте а)  $f_1 = 2.24$  ГГц, б)  $f_2 = 2.3$  ГГц

амплитудные коэффициенты ширинных мод, можно построить распределение поля спиновых волн вдоль неоднородного волновода (см Рис. 9). По рисунку видно, что неоднородность волновода и вызываемая ею связь мод, с последующей пространственной интерференцией ширинных мод, существенно влияют на характер распространения, могут при определенном подборе параметров изменить модовый состав на выходе волнодушной структуры.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе метода многократного рассеяния создана теория распространения прямых объемных магнитостатических спиновых волн в нормально намагниченном двумерном магнитном кристалле. Получены дисперсионные кривые и распределение поля спиновых волн. Обнаружено возникновение краевых вращательных состояний - краевых магнонов в таких структурах.

2. Исследованы различные виды касательно намагниченных одномерных магнетонных кристаллов (бикомпонентные магнетонные кристаллы, бикомпонентные магнетонные кристаллы с металлизацией, микроструктурированные ферромагнитные пленки). С помощью метода разложения по плоским волнам показано, что в одномерных магнетонных кристаллах распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн является невзаимным, то есть дисперсионные характеристики волн, распространяющихся в противоположных направлениях различны, что является проявлением гиротропности ферромагнитных сред.
3. Аналитически решена задача о распространении поверхностных магнитостатических спиновых волн в одномерных магнетонных кристаллах конечной длины. С помощью разработанной на базе метода матриц передачи теории показано, что зонная структура дисперсии волн в таких структурах формируется уже на нескольких периодах структуры.
4. Исследовано распространение поверхностных акустических волн Лява в неоднородных слоистых средах, содержащих акустические метаматериалы. С помощью созданной теории, основанной на методе сечений, показано, что в волноведущей структуре с переменной толщиной возникает пространственное разделение волн по частоте. Использование акустического метаматериала с резонансными характеристиками материальных параметров на частоте акустических волн позволяет существенно усилить и сделать практически реализуемым эффект разделения мод акустических волн.
5. Исследовано распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в ограниченных ферромагнитных волноводах переменной ширины. Вследствие неоднородности волновода возникает перекачка энергии между ширинными модами, что существенно влияет (перекачка более половины энергии моды) на характер распространения волн в таких структурах благодаря пространственной интерференции.

### **Публикации автора по теме диссертации**

#### **Публикации в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованный ВАК:**

- A1 Калябин Д. В., Лисенков И. В., Никитов С. А. Пространственное разделение по частоте поверхностных акустических волн в клиновидных структурах из метаматериалов // *Нелинейный мир*. — 2013. — Т. 2, № 11.
- A2 Лисенков И. В., Калябин Д. В., Никитов С. А. Краевые вращательные магныны в магнетонном кристалле // *Нелинейный мир*. — 2014. — Т. 2, № 12.

- A3 Никитов С А, Калябин Д В, Лисенков И В, Славин А Н, Барабаненков Ю Н, Осокин С А, Садовников А В, Бегинин Е Н, Морозова М А, Шараевский Ю П, Филимонов Ю А, Хивинцев Ю В, Высоцкий С Л, Сахаров В К, Павлов Е С "Магноника — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники" УФН 185 1099–1128 (2015)
- A4 Лисенков И. В., Калябин Д. В. Осокин С. А., Никитов С. А. Невзаимность спиновых волн в одномерном магнетном кристалле // Нелинейный мир. — 2015. — Т. 2, No 13.
- A5 Распространение спиновых волн в неоднородных наноразмерных волноводах из ферромагнитных материалов / Д. В. Калябин, А. В. Садовников, Е. Н. Бегинин, С. А. Никитов // Нелинейный мир. — 2016. — Т. 1, No 14.

**Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:**

- A6 Lisenkov I., Kalyabin D., Nikitov S. Edge rotational magnons in magnonic crystals // Applied Physics Letters. — 2013. — Vol. 103, no. 20.
- A7 M. Mruczkiewicz, M. Krawczyk, G. Gubbiotti, S. Tacchi, Y. A. Filimonov, D. V. Kalyabin, I. V. Lisenkov, S. A. Nikitov. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal // New Journal of Physics. — 2013. — Vol. 15, no. 11. — P. 113023. — URL:
- A8 D. Kalyabin, I. Lisenkov, Y. Lee, S. Nikitov. Frequency separation of surface acoustic waves in layered structures with acoustic metamaterials // Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications. — 2014. — Vol. 12, no. 3. — P. 239–251.
- A9 I. Lisenkov, D. Kalyabin, S. Osokin, J. Klos, M. Krawczyk, S. Nikitov. Nonreciprocity of edge modes in 1D magnonic crystal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2015. — Vol. 378. — P. 313–319.
- A10 Urmanceev R., Kalyabin D., Nikitov S. Propagation of a magnetostatic surface spin wave through a finite magnonic crystal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2016. — Vol. 401. — P. 50–55.

**Публикации в трудах международных конференций:**

- A11 Non-reciprocal local resonances in magnonic crystals / I. Lisenkov, D. Kalyabin, M. Krawczyk, S. Nikitov // Spin Waves 2013 Abstracts. — 2013.
- A12 Лисенков И. В., Калябин Д. В., Никитов С. А. Краевые вращательные магноны в магнетном кристалле // Нанопизика и Наноэлектроника. Труды XVIII Международного симпозиума. — 2014.

- A13 Lisenkov I., Kalyabin D., Nikitov S. Edge rotational magnons in magnonic crystals // Abstracts of IEEE International Magnetics Conference INTERMAG 2014. — 2014.
- A14 Kalyabin D., Nikitov S. Magnetostatic spin waves in irregular narrow ferromagnetic waveguides // Spin Waves 2015 Abstracts. — 2015.
- A15 С. А. Никитов, И. В. Лисенков, Д. В. Калябин, С. А. Осокин, Ю. Н. Барабаненков, А. Н. Славин. Краевые эффекты при распространении спиновых волн в ограниченных средах // Нанофизика и Нанoeлектроника. Труды XIX Международного симпозиума. — 2015.
- A16 Y. Barabanenkov, S. Osokin, D. Kalyabin, S. Nikitov. Resonant transfer of spin waves along linear array of magnetic inclusions embedded into a ferromagnetic thin-film matrix // Abstracts of MMM INTERMAG 2016 JOINT CONFERENCE. — 2016.
- A17 D. Kalyabin, Y. Barabanenkov, S. Osokin, S. Lisenkov, S. Nikitov. SPIN WAVE EDGE EFFECTS IN BOUNDED MEDIA // International Conference on Nanomagnetism and Spintronics Sol-SkyMag 2016. Abstracts. — 2016.
- A18 D. Kalyabin, A. Sadovnikov, Y. Sharaevskii, E. Beginin, S. Nikitov. Magnetostatic spin waves in irregular narrow ferromagnetic waveguides // Abstracts of VI Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism EastMag 2016. — 2016.
- A19 S. Nikitov, Y. Barabanenkov, S. Osokin, D. Kalyabin. SPIN-WAVE CONFINEMENT IN WAVEGUIDES FORMED BY DISCRETE MAGNETIC ELEMENTS // Нанофизика и Нанoeлектроника. Труды XXI Международного симпозиума. — 2017.

#### **Патенты автора:**

- III Частотно-избирательное устройство для обработки сигналов на поверхностных акустических волнах : патент на изобретение РФ 2507677 / С. А. Никитов, Д. В. Калябин, И. В. Лисенков. — Заявл. 16.11.2012., опубли. 20.02.2014.

#### **Список литературы**

1. Magnon spintronics / Chumak A. V. [et al.] // Nat Phys. — 2015. — June. — Vol. 11, no. 6. — P. 453–461.
2. *Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D.* Magnonics // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — Vol. 43, no. 26. — P. 264001.
3. *Zutic Igor, Fuhrer Michael* Spintronics: A path to spin logic // Nat Phys. — 2005. — Nov. — Vol. 1, no. 2. — P. 85–86. — 10.1038/nphys164.

4. *Neusser S., Grundler D.* Magnonics: Spin Waves on the Nanoscale // *Adv. Mater.* — 2009. — T. 21. — C. 2927.
5. The building blocks of magnonics / B. Lenk [et al.] // *Physics Reports.* — 2011. — Vol. 507, no. 4-5. — P. 107–136.
6. The 2014 Magnetism Roadmap / R. L. Stamps [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics.* — 2014. — Vol. 47, no. 33. — P. 333001.
7. *Tserkovnyak Y., Brataas A., Bauer G. E. W.* Enhanced Gilbert Damping in Thin Ferromagnetic Films // *Phys. Rev. Lett.* — 2002. — Feb. — Vol. 88, issue 11. — P. 117601.
8. *Ralph D., Stiles M.* Spin transfer torques // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* — 2008. — Vol. 320, no. 7. — P. 1190–1216.
9. Magnon band structure of periodic composites / J. O. Vasseur [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 1996. — July. — Vol. 54, issue 2. — P. 1043–1049.
10. *Nikitov S., Tailhades P., Tsai C.* Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* — 2001. — Vol. 236, no. 3. — P. 320–330.
11. *Yablonoivitch E.* Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // *Phys. Rev. Lett.* — 1987. — May. — Vol. 58, issue 20. — P. 2059–2062.
12. Propagation Characteristics of Magnetostatic Volume Waves in One-Dimensional Magnonic Crystals with Oblique Incidence / K. H. Chi [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics.* — 2011. — Oct. — Vol. 47, no. 10. — P. 3708–3711.
13. Tuning the band structures of a one-dimensional width-modulated magnonic crystal by a transverse magnetic field / K. Di [et al.] // *Journal of Applied Physics.* — 2014. — Vol. 115, no. 5. — P. 053904.
14. Spin-wave propagation in a microstructured magnonic crystal / A. V. Chumak [et al.] // *Applied Physics Letters.* — 2009. — Vol. 95, no. 26. — P. 262508.
15. Partial frequency band gap in one-dimensional magnonic crystals / M. Kostylev [et al.] // *Applied Physics Letters.* — 2008. — Vol. 92, no. 13. — P. 132504.
16. A micro-structured ion-implanted magnonic crystal / B. Obry [et al.] // *Applied Physics Letters.* — 2013. — Vol. 102, no. 20.
17. Magnonic band gaps in waveguides with a periodic variation of the saturation magnetization / F. Ciubotaru [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Oct. — Vol. 88, issue 13. — P. 134406.
18. *Seshadri S.* Surface magnetostatic modes of a ferrite slab // *Proceedings of the IEEE.* — 1970. — Vol. 58, no. 3. — P. 506–507.

19. *Khitun A., Bao M., Wang K.* Spin Wave Magnetic NanoFabric: A New Approach to Spin-Based Logic Circuitry // *Magnetics, IEEE Transactions on.* — 2008. — Sept. — Vol. 44, no. 9. — P. 2141–2152.
20. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry / *A. V. Sadovnikov [et al.]* // *Applied Physics Letters.* — 2015. — Vol. 106, no. 19.
21. Cross Junction Spin Wave Logic Architecture / *K. Nanayakkara [et al.]* // *Magnetics, IEEE Transactions on.* — 2014. — Nov. — Vol. 50, no. 11. — P. 1–4.
22. *Lee K.-S., Kim S.-K.* Conceptual design of spin wave logic gates based on a Mach–Zehnder-type spin wave interferometer for universal logic functions // *Journal of Applied Physics.* — 2008. — Vol. 104, no. 5. —
23. Pattern recognition with magnonic holographic memory device / *A. Kozhevnikov [et al.]* // *Applied Physics Letters.* — 2015. — Vol. 106, no. 14. — P. 142409.
24. *Demidov V., Demokritov S.* Magnonic Waveguides Studied by Microfocus Brillouin Light Scattering // *Magnetics, IEEE Transactions on.* — 2015. — Apr. — Vol. 51, no. 4. — P. 1–15.
25. *Kaczér J., Murtinová L.* On the demagnetizing energy of periodic magnetic distributions // *Physica Status Solidi (a).* — 1974. — May. — Vol. 23, no. 1. — P. 79–86.
26. *Gurevich A. G., Melkov G. A.* Magnetization, Oscillations and Waves. — CRC Press New York, 1996.
27. Rayleigh Multipole Methods for Photonic Crystal Calculations / *L. C. Botten [et al.]* // *Progress In Electromagnetics Research.* — 2003. — Vol. 41. — P. 21–60.
28. *Chin S. K., Nicorovici N. A., McPhedran R. C.* Green’s function and lattice sums for electromagnetic scattering by a square array of cylinders // *Phys. Rev. E.* — 1994. — May. — Vol. 49, no. 5. — P. 4590–4602.
29. *Kittel C.* Introduction to Solid State Physics. — New York: Wiley, 1996.
30. *Veselago V. G.* The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$  // *Soviet Physics Uspekhi.* — 1968. — Jan. — Vol. 10. — P. 509.