

На правах рукописи



Осокин Сергей Александрович

**Распространение спиновых волн в дискретных
ограниченных ферромагнитных структурах**

Специальность 01.04.07 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Белотелов Владимир Игоревич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доцент кафедры фотоники и физики микроволн

Розанов Константин Николаевич,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

Защита состоится 4 декабря 2020 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (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://cplire.ru/rus/dissertations/Osokin/index.html>.

Автореферат разослан " __ " _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
физико-математических наук, доцент



Кузнецова
Ирэн Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последнее время исследования периодических ферромагнитных структур, особенно на микро- и наноуровне, стали занимать одну из ключевых позиций для развития современных технологий микро- и нанoeлектроники. Возникла новая область микроэлектроники — спинтроника, благодаря важным научным результатам, имеющим потенциал для создания элементной базы на новых физических принципах. В настоящее время спинтроника является активно развивающейся областью электроники, в которой, в частности, изучаются процессы переноса магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих магнитные материалы. Перенос магнитного момента может осуществляться также с помощью магнонов или спиновых волн в магнитных металлах и диэлектриках. В связи с этим, возникло такое научное направление, как магноника — область спинтроники, изучающая физические свойства спиновых волн в магнитных микро- и наноструктурах [1; 2]. Исследования в областях спинтроники и магноники по применению различных магнитных микро- и нано-структур в устройствах для обработки информации и магнонной логики в последние годы стали крайне актуальной темой [3–6]. Задачи из этих направлений требуют изучения важных физических явлений, связанных с динамикой спиновых волн в магнитных материалах и особенно в структурированных магнитных пленках [7]. Магнитные периодические структуры, в которых распространяются спиновые волны, и с помощью которых возможно производить обработку информации и осуществлять логические операции, получили название – магнонные кристаллы [8]. Магнонными кристаллами могут выступать ограниченные магнитные структуры, такие как - массивы магнитных точек, полосок и т.д. [9]. Основным свойством периодически структурированных магнитных пленок является возможность создавать в частотном спектре спиновых волн запрещенные и разрешенные зоны или создавать выделенные направления распространения волн. Свойства запрещенных зон как инструмента для управления характеристиками магнонных кристаллов могут иметь сложную зависимость от внешних параметров. Например, управлять запрещенными зонами и их свойствами можно с помощью внешних магнитных полей, спин-поляризованного тока или металлизации структуры.

Однако во многих цитируемых работах исследования взаимодействия волн с ограниченными периодическими структурами обычно оставляют без внимания. Зачастую, учитывается только коллективное влияние бесконечной магнитной структуры на свойства распространяющейся волны [10]. С другой стороны, исследования краевых и дефектных мод спиновых волн стали очень популярной темой из-за их необычных топологических свойств и предсказания их существования в различных магнитных

наноструктурах, таких как ферромагнитные островки и/или круглые магнитные тонкие кольца или диски, а также полубесконечные массивы магнитных столбиков с дипольной связью [11]. Теоретические исследования распространения спиновых волн в магнитных кристаллах или других периодических магнитных структурах проводились в случае, когда эти структуры рассматривались как бесконечный набор периодических возмущений. Кроме того, необходимо учитывать особенности распространения спиновых волн в пространственно-ограниченных магнитных кристаллах. В частности, наиболее подходящие теоретические методы были применены для описания свойств электромагнитных волн в видимом диапазоне частот [12]. Было показано, что ограниченные кластеры диэлектрических частиц малого размера могут обладать выделенным групповым резонансом, и упорядоченный массив похожих частиц может являться средой для резонансного распространения связанных мод электромагнитных волн с достаточно высоким показателем добротности. Отсюда следует, что для применения магнитных кристаллов в качестве устройств обработки информации и магнитной логики необходимо применять теоретические методы для исследования свойств спиновых волн в конечномерных магнитных кристаллах. Результаты исследований в этом направлении представлены в данной диссертационной работе.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является исследование резонансных и краевых эффектов при распространении спиновых волн в ограниченных ферромагнитных структурах, образованных дискретными включениями в ферромагнитной пленке и ферромагнитными микро-частичками.

Для этого необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель, описывающую распространение спиновых волн в ферромагнитных пленках, содержащих ограниченные массивы ферромагнитных включений с другой намагниченностью.
2. Исследовать распространение спиновых волн в ограниченных массивах ферромагнитных включений в ферромагнитных пленках. Исследовать резонансные и краевые состояния при рассеянии спиновых волн на кольцевых и линейных массивах ферромагнитных включений в ферромагнитной пленке с другой намагниченностью.
3. Разработать математическую модель, описывающую распространение спиновых волн в ограниченном массиве ферромагнитных столбиков, связанных диполь-дипольным взаимодействием. Исследовать влияние краевых эффектов и эффектов формы на резонансные состояния спиновых волн в линейном массиве ферромагнитных столбиков.

Научная новизна работы. В диссертации были получены следующие научные результаты:

- Впервые предложена и разработана математическая модель, описывающая распространение прямых объемных магнитостатических спиновых волн в ограниченных массивах ферромагнитных включений в ферромагнитной пленке, на основе которой было показано, что одномерные периодические массивы могут выполнять роль волноводов для спиновых волн.
- Впервые исследованы резонансные состояния спиновой системы при распространения спиновых волн в одномерных ограниченных массивах ферромагнитных включений в ферромагнитной пленке, и были определены геометрические параметры массива и включений, при которых возможно распространение спиновых волн с малыми потерями на рассеяние.
- С помощью разработанной математической модели, описывающей распространение спиновых волн в ограниченных массивах ферромагнитных столбиков, обнаружены краевые моды спиновых волн, с резонансной частотой отличной от остальных мод спиновых волн и локализованных на границах массива.
- Методами численного моделирования было показано что для массивов столбиков конечной высоты существует несколько резонансных частот для колебаний намагниченности, одна из которых является резонансной для краевых состояний с амплитудой колебаний, локализованной на краю массива. Так же из-за проявления краевых эффектов существует дополнительная резонансная частота колебаний намагниченности локализованных на краю столбика.

Теоретическая и практическая значимость работы

В данной работе представлены результаты теоретических и численных исследований свойств спиновых волн в ограниченных периодических магнитных структурах. Для таких типов структур было показано, что массивы дискретных элементов могут выполнять роль волноводов и резонаторов. Такие структуры могут служить элементами для компонентной базы устройств обработки информации. При этом, многокомпонентные устройства обработки сигналов с использованием спиновых волн в качестве носителя информации могут состоять из нескольких отдельных элементов, таких как волноводы, резонаторы, логические вентили, разветвители и селекторы. Исходя из этого важной задачей для магноники и спинтроники является учет эффектов возникающих при соединении отдельных элементов в одно устройство, в таком случае необходимо учитывать эффекты, возникающие на краях таких структур, а именно эффекты невзаимности в связанных магнитных структурах и изменения в частотных характеристиках, появляющихся в силу ограниченного размера структур.

Методология и методы исследования

Для получения результатов диссертационной работы была предложена и разработана математическая модель, в магнитостатическом приближении описывающая распространение спиновых волн в бесконечных ферромагнитных пленках, содержащих конечноразмерные массивы включений. Данная модель была создана на основе метода многократного рассеяния спиновых волн. С помощью которого также была предложена другая модель, описывающая свойства спиновых волн в ограниченных массивах столбиков в свободном пространстве, при этом использовалось приближение макроспина для каждого столбика. Численные расчеты дисперсионных характеристик и других параметров спиновых волн были проделаны с помощью программ, созданных на языках программирования MATLAB и Python. Микромагнитное моделирование спин-волновых процессов было выполнено с помощью программного пакета MuMax3.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Диаграмма рассеяния изотропных прямых объемных спиновых волн, распространяющихся в ферромагнитной пленке с ограниченным массивом ферромагнитных цилиндрических включений с другой намагниченностью насыщения, является анизотропной и неоднородной по направлению, вследствие чего возникает фазово-пространственная модуляция потенциала рассеянной спиновой волны.
2. Существуют различные режимы распространения спиновых волн, распространяющихся в ферромагнитной пленке с линейными массивами ферромагнитных цилиндрических включений с другой намагниченностью насыщения, обусловленные резонансными свойствами рассеяния спиновых волн. Резонансные частоты режимов распространения, определяемые малыми потерями при рассеянии, зависят от совокупности геометрических характеристик линейного массива, таких как радиус включений и расстояние между ними.
3. В ограниченном линейном массиве ферромагнитных столбиков существуют краевые моды колебаний намагниченности, частотные характеристики которых зависят от конфигурации намагниченности насыщения отдельных столбиков в массиве. В случае ферромагнитной конфигурации намагниченности столбиков при этом существует одна резонансная частота для собственной моды колебаний намагниченности цепочки, для антиферромагнитной — две резонансные частоты для двух собственных мод колебаний намагниченности.
4. Собственные частоты колебаний намагниченности в массивах ферромагнитных наноцилиндров зависят от геометрического отношения высоты и радиуса наноцилиндра, и в случае, когда

величина этого отношения меньше $1/4$, амплитуда колебаний намагниченности краевых собственных мод сравнима с амплитудой мод колебаний намагниченности локализованных в центре столбиков.

5. Импульсным переменным внешним магнитном полем или спин-поляризованным током могут возбуждаться собственные и краевые моды колебаний намагниченности на резонансных частотах в ограниченных массивах ферромагнитных столбиков. Возбуждение колебаний намагниченности спин-поляризованным током, направленным коллинеарно усредненной намагниченности насыщения, обусловлено эффектом формы, который приводит к уменьшению усредненной намагниченности насыщения на краях столбиков.

Достоверность результатов, полученных в ходе решения поставленных задач подтверждается использованием проверенных инструментов, аналитических и численных методов, которые ранее применялись в работах, относящихся к данной научной области. Также проводилось сопоставление результатов, полученных теоретическими и численными методами с результатами, полученными в других научных работах.

Личный вклад автора

Все работы по теме доклада были выполнены Осокиным С. А. в соавторстве с Никитовым С.А., Барабаненковым Ю.Н., Калябиным Д.В., Сафиным А.Р. Автор принимал участие в постановке задач, создании и применении теоретических методов. Также автор проводил обработку полученных результатов и предлагал подходы для численного решения поставленных задач. На основе созданных автором теорий, математических моделей и методов численного решения и моделирования, было проведено всестороннее исследование свойств спиновых волн, распространяющихся в конечноразмерных магнитных кристаллах, а именно, исследование модового состава спиновых волн, определение резонансных условий и условий существования краевых мод спиновых волн.

Апробация работы и публикации.

Автор диссертации выступал с результатами работы на конференциях:

- Spin Waves 2015 (Санкт-Петербург, 3-8 июня 2015)
- EASTMAG-2016 VI "Trends in MAGnetism"(15-19 августа 2016, Красноярск),
- Sol-SkyMag 2017 (San Sebastian, Spain, 19-23 июня, 2017),
- Moscow International Symposium on Magnetism MISM 2017 (Москва, 1-5 июля 2017),
- Spin Waves 2018 (Санкт-Петербург, 3-8 июня 2018),
- Sol-SkyMag 2018 (San-Sebastian, Spain, 18-22 июня 2018),
- ICMNE-2018 (Звенигород, 1-5 Октября 2018)

Материалы работ были опубликованы в 14 печатных изданиях, в научных журналах «Успехи физических наук», «Physicsl Review B», «Journal of Magnetism and Magnetic materials», «Нелинейный мир», «Письма в ЖЭТФ», а так же в 6 трудах международных конференции, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 108 страниц, включая 35 рисунков. Список литературы содержит 119 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность проведенных исследований, формулируются цели и задачи исследований, излагается практическая значимость и научная новизна результатов, полученных в ходе выполнения работы. В последующих главах приводится обзор научной литературы по изучаемым темам в области магноники и спинтроники. Далее описываются теоретические подходы к описанию свойств спиновых волн в ограниченных магнитных кристаллах с аналитическими подходами и численными решениями для конкретных задач. Также описываются результаты численных экспериментов, проведенных с помощью микромагнитного компьютерного моделирования.

В **Главе 1** приводятся основные определения, используемые в диссертации, и обсуждается основная терминология. Так же производится обзор основной литературы и главных научных публикаций по теме диссертационного исследования. Излагаются основные математические определения и базовые уравнения, связанные с магнитостатическими спиновыми волнами, распространяющимися в ферромагнитных пленках. Проводится обзор теоретических методов для исследования спиновых волн в периодических магнитных структурах. Далее излагается обзор основных аспектов топологической магноники, касающихся свойств спиновых волн в структурах с выраженными краевыми эффектами. В конце **Главы 1** приводится обзор методов численного моделирования, применяемых для исследования свойств спиновых волн в магнитных кристаллах.

В **Главе 2** проводится исследование свойств спиновых волн в ограниченных магнитных структурах. В качестве среды для распространения спиновых волн рассматриваются ферромагнитные пленки с ограниченным массивом ферромагнитных цилиндрических включений, взаимодействие которых учитывается с помощью метода многократного рассеяния.

В **Разделе 2.1** приводится общая постановка задачи определения свойств распространения спиновых волн в ферромагнитных пленках, магнитостатический потенциал которых определяется уравнением Уокера [A1, A2], [13; 14].

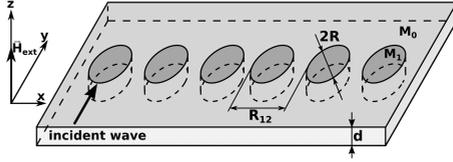


Рис. 1 — Ферромагнитная пленка с линейной цепочкой из цилиндрических ферромагнитных включений во внешнем магнитном поле \mathbf{H}_{ext} .

$$(\partial_x^2 + \partial_y^2)\Psi + \frac{1}{\mu_0^0}\partial_z^2\Psi - U\Psi = j(x, y, z), \quad (1)$$

где Ψ — магнитостатический потенциал, определенный через магнитное поле \mathbf{h} выражением $\mathbf{h} = -\Delta\Psi$, μ — высокочастотный тензор магнитной восприимчивости, U — оператор рассеяния спиновых волн, j — слагаемое, определяющее внешнее возбуждение, μ_0^0 — диагональная компонента высокочастотного тензора магнитной восприимчивости для среды с индексом 0.

$$\mu_0(\omega) = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2} \quad (2)$$

В **Разделе 2.2** описывается метод решения уравнений Уокера с помощью Т-оператора рассеяния спиновых волн с использованием функции Грина [A3], который позволяет учитывать особенности рассеяния спиновых волн на ферромагнитных включениях в ферромагнитной пленке (Рис. 1) с разными намагниченностями насыщения M_0 и M_1 для пленки и включений соответственно [15].

Решение уравнения Уокера (1), записывается в интегральной форме

$$\Psi(\mathbf{r}) = \Psi_0(\mathbf{r}) + \int G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')U(\mathbf{r}')\Psi(\mathbf{r}')d\mathbf{r}', \quad (3)$$

где статическая часть $\Psi(\mathbf{r})$ магнитостатического потенциала $\Psi(\mathbf{r}, t) = \Psi(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$ представляется в виде суммы потенциалов падающей спиновой волны $\Psi_0(\mathbf{r})$ и рассеянной спиновой волны, $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ — функция Грина для спиновой волны.

В **Разделе 2.3** производится аналитический вывод для магнитостатического потенциала собственных мод спиновых волн в ферромагнитной пленке в общем виде с помощью функции Грина для учета рассеяния спиновых волн. Далее, на основе этого в **Разделе 2.4** приводится вывод амплитуд магнитостатического потенциала спиновых волн, рассеянных на произвольном ограниченном массиве цилиндрических включений в ферромагнитной пленке. Для потенциала рассеянной спиновой волны выводятся выражения для сечений рассеяния и возбуждения, где в качестве источника возбуждения рассматривается прямая объемная спиновая волна, распространяющаяся в ферромагнитной пленке.

В **Разделах 2.5-2.6** описываются результаты исследования особенностей рассеяния спиновых волн аналитическими методами. Общий вид аналитических выражений для тензора рассеяния спиновой волны записываются для случая, когда возбуждение производится с помощью спиновой волны с плоским фронтом.

В **Разделе 2.7** приводится вывод основных уравнений метода многократного рассеяния спиновых волн на конечной системе включений в общем виде (Рис. 2), которое позволяет записать уравнение для амплитуд волн B_{jm} , рассеянных на произвольной системе цилиндрических включений в ферромагнитной пленке с индексами $j = 1, \dots, N$

$$B_{jm} = B_m^{(1)} + \frac{B_m^{(1)}}{\hat{A}_{jm}} \sum_{j \neq j'=1}^N \sum_{l=-\infty}^{\infty} G_{m-l}^{jj'} B_{j'l}, \quad (4)$$

с ядром системы уравнений, которое определяет взаимодействие между N включениями с произвольным расположением в координатах R_i через функцию Ганкеля H_i

$$G_{m-l}^{jj'} = H_{l-m}(k_r^0 R_{jj'}) e^{i(l-m)\arg \mathbf{R}_{jj'}}. \quad (5)$$

Таким образом в системе уравнений (4) учитываются амплитудные и фазовые особенности перерассеяния спиновых волн между включениями в ферромагнитной пленке.

В **Разделе 2.8** приводится аналитическое описание хиральных краевых мод спиновых волн, существование которых является проявлением эффекта невязимности при рассеянии спиновых волн на цилиндрических включениях (Рис. 3). Диаграмма рассеяния спиновой волны, в таком случае, имеет ненулевую компоненту направленную ортогонально направлению распространения рассеиваемой спиновой волны, из-за несимметричности тензора рассеяния $T_m \neq T_{-m}$. Потенциал хиральной спиновой волны записан в терминах пространственно-фазовой модуляции

$$Re\Psi_1^{sca}(r, \phi) = |Re\Psi_1^{sca}(r)| \cos[\phi - \Delta\phi(r)], \quad (6)$$

где фаза $\phi - \Delta\phi(r)$ магнитостатического потенциала рассеянной спиновой волны Ψ^{sca} зависит от расстояния от центра включения. Так же в данном разделе проводится исследование резонансных свойств собственных мод спиновых волн в кольцевом массиве ферромагнитных включений в ферромагнитной пленке (Рис. 4).

В **Разделе 2.9** исследуются частотные характеристики спиновых волн, распространяющихся в линейных цепочках цилиндрических включений в ферромагнитной пленке и показывается, что массив дискретных рассеивающих элементов является волноводом для спиновых волн с собственными частотами, на которых спиновые волны распространяются

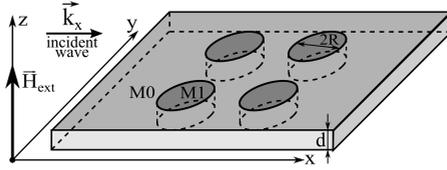


Рис. 2 — Схема металлизированной ферромагнитной пленки с 4 ферромагнитными включениями, центры которых расположены периодически по кругу.

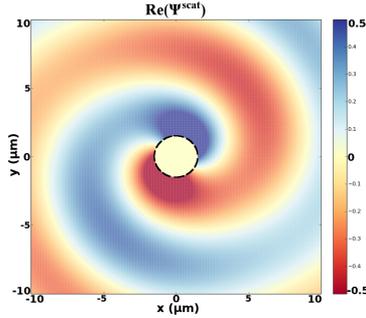


Рис. 3 — Распределение действительной части потенциала спиновой волны, рассеянной одиночным включением.

вдоль цепочки с малым затуханием. Показано, что резонансные частоты имеют сложную зависимость от совокупности геометрических параметров каждого из включений и линейной цепочки.

В **Главе 3** приводится решение задачи определения собственных частот в цепочке ферромагнитных столбиков в свободном пространстве. В **Разделе 3.1** формулируется математическая модель взаимодействия конечной системы ферромагнитной цепочки столбиков, связанных диполь-дипольным взаимодействием (Рис. 5). Связанные уравнения Ландау-Лифшица для макроспинов каждого из столбиков выводятся с помощью метода многократного рассеяния спиновых волн [A4, A5]

$$\begin{aligned}
 i\omega \mathbf{m}_i + \gamma \mathbf{m}_i \times \mathbf{H}^{ext} - i\alpha \hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{m}_i \\
 + \gamma \mathbf{F}_{dd} = -\gamma \boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{h}^{ext},
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

для намагниченности каждого столбика $\mathbf{M}_i(t) = \mathbf{m}_i(t) + \boldsymbol{\mu}_i$ ($\boldsymbol{\mu}$ – постоянная часть вектора намагниченности) $\boldsymbol{\mu}_i \gg \mathbf{m}_i$ под воздействием внешнего

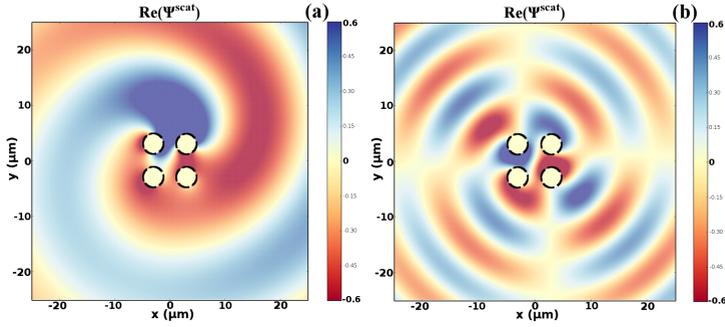


Рис. 4 — Спиральная форма распределения суммы потенциалов спиновых волн, рассеянных четырьмя включениями: с волновым числом $k_r^0 R_{12} = 1.2$ для распределения (a) и $k_r^0 R_{12} = 3.2$ для распределения (b).

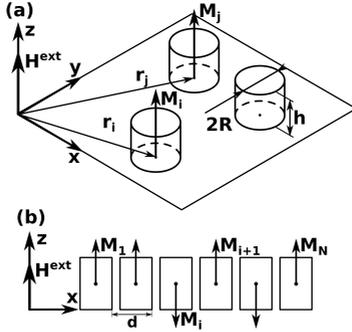


Рис. 5 — Цилиндрические магнитные столбики расположенные произвольно на плоскости (x,y) (a) и периодически вдоль оси x (b). магнитного поля $\mathbf{H}^{ext} + \mathbf{h}^{ext}$, связь между которыми \mathbf{F}_{dd} в линеаризованном виде имеет форму

$$\mathbf{F}_{dd} = \sum_{j=1, i \neq j}^N \frac{V^*}{r_{ij}^3} \left[\begin{aligned} & \boldsymbol{\mu}_i \times \frac{3(\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{r}_{ij})\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \\ & - \boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i \times \boldsymbol{\mu}_j \\ & + \mathbf{m}_i \times \frac{3(\boldsymbol{\mu}_j \cdot \mathbf{r}_{ij})\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \end{aligned} \right], \quad (8)$$

где \mathbf{r}_{ij} — расстояние между столбиками с индексами i и j с эффективным объемом V^* . В Разделе 3.2 исследуются резонансные свойства собственных мод спиновых волн в цепочке наноразмерных ферромагнитных столбиков с радиусом $R = 25$ нм и высотой $h = 100$ нм при расстоянии

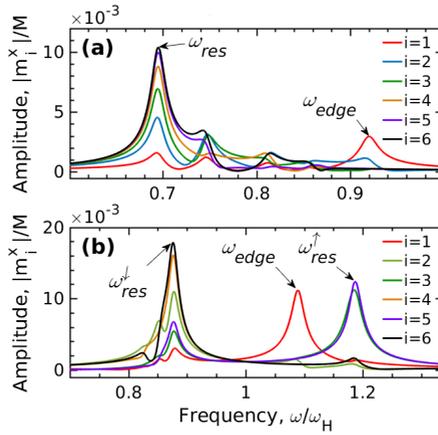


Рис. 6 — Частотный спектр колебаний намагниченности \mathbf{m}_i для каждого столбика с номером i в (a) ФМ и (b) АФМ-конфигурациях намагниченности в цепочке ($N = 11$).

между ними порядка $d = 10R$. С помощью численных методов решения уравнений движения демонстрируется, что из-за конечных размеров магнитного кристалла существует краевая мода спиновой волны, локализованная вблизи границ цепочки столбиков (Рис. 6).

Так же в рамках полученной математической модели проводится исследование двух конфигурации намагниченности столбиков в цепочке: ферромагнитной (ФМ), при которой все столбики имеют однонаправленную намагниченность, и антиферромагнитную (АФМ), при которой существуют две подрешетки противоположно намагниченных столбиков. Показано, что для АФМ конфигурации существуют две резонансные частоты спиновых волн для каждой из подрешеток (Рис. 6b) с отрицательным и положительным смещением резонансной частоты ниже относительно резонансной частоты колебаний намагниченности изолированного столбика, что является следствием особенности диполь-дипольного взаимодействия между отдельными элементами массива столбиков. Кроме того, резонансная частота краевых мод спиновых волн так же имеет зависимость от конфигурации намагниченности столбиков на краю цепочки.

В Разделе 3.3 приводится аналитический вывод для резонансных частот мод колебаний намагниченности и приводится сравнение с резонансными частотами для спиновых волн в бесконечной цепочке столбиков. Показано, что смещение резонансных частот относительно резонансных частот для СВ и их количество зависит от общего количества столбиков в цепочке. Для краевых мод колебаний намагниченности численными методами выведена аналитическая формула для резонансной частоты.

В Разделе 3.4 приводится численное решение задачи поиска частот дефектных мод колебаний в цепочке с единичным дефектом — одним столбиком, имеющим противоположную направленность намагниченности относительно остальной цепочки однородно намагниченных столбиков.

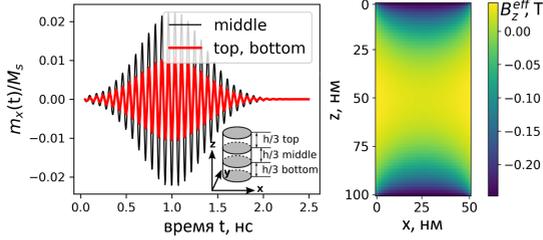


Рис. 7 — Временная реализация колебаний намагниченности $m_x(t)/M_s$, усредненной в разных областях столбика, под воздействием импульса переменного внешнего магнитного поля. Распределение эффективного магнитного поля B_z^{eff} внутри объема ферромагнитного столбика под действием постоянного внешнего магнитного поля.

В Главе 4 излагаются результаты численного эксперимента по исследованию возможности возбуждения спиновых волн в цепочке ферромагнитных столбиков из пермаллоя (Py) [16]. В Разделе 4.1 с помощью

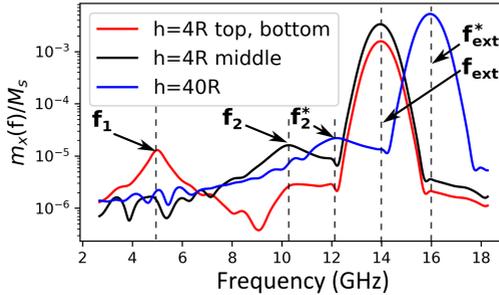


Рис. 8 — Частотный спектр колебаний намагниченности столбика $m_x(f)/M_s$. Намагниченность усреднена по различным областям столбика с высотой $h = 4R$ и $h = 40R$.

уравнения Ландау-Лифшица (Л-Л) выводится формула для описания динамики намагниченности в терминах пространства и времени, численное решение производится с помощью пакета микромагнитного моделирования MuMax3 [17–19]. В уравнении Л-Л учитываются магнитные поля размагничивания в структурах, обменное взаимодействие, анизотропия

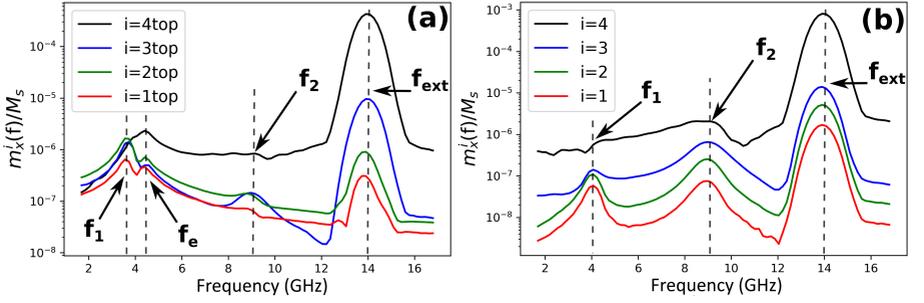


Рис. 9 — Частотный спектр колебаний намагниченности $m_x^i(f)/M_s$ для столбиков с номерами $i = 1, \dots, 4$ в цепочке. Намагниченность усреднена по верхней (а) и средней (б) части столбиков ферромагнитного материала и взаимодействие с током в форме Слончевского-Берже τ_{SL} .

$$\frac{\partial \mathbf{m}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \tau_{LL} + \tau_{SL}, \quad (9)$$

с крутящим моментом τ_{LL} в форме Ландау-Лифшица

$$\tau_{LL} = \gamma \frac{1}{1 + \alpha^2} (\mathbf{m} \times \mathbf{B}_{eff} + \alpha (\mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{B}_{eff}))). \quad (10)$$

Возбуждение спиновых волн моделируется в виде короткого импульса внешнего переменного магнитного поля. Отклик намагниченности усредняется по 3-м частям столбика для учета влияния эффекта формы на частотные характеристики (Рис. 7) [A6].

В Разделе 4.2 проводится исследование влияния эффектов формы внутри каждого из столбиков и эффектов размагничивания в цепочке столбиков на частотный спектр колебаний намагниченности. Результаты моделирования для одного столбика, приведенные на Рис. 8, показывают что для столбиков конечной высоты ($h=4R$) появляется собственная мода колебаний намагниченности с собственной частотой f_1 , локализованной на верхних и нижних (по оси z) краях столбиков. Для цепочки столбиков показано, что кроме собственных частот f_1 и f_2 существует резонансное состояние для краевой моды колебаний намагниченности, локализованной на столбиках на краю цепочки (Рис. 9).

В Разделе 4.3 численный эксперимент проводится для случая возбуждения спиновых волн импульсом спин-поляризованного тока, распространяющегося вдоль оси столбиков. Для такого метода возбуждения показано, что только на частоте f_1 спиновые волны возбуждаются эффективно.

В заклЮчении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе методов многократного рассеяния и Т-оператора рассеяния создана теория, описывающая распространение прямых объемных магнитоэлектрических спиновых волн в ферромагнитной пленке, содержащей ограниченный массив ферромагнитных включений. Показано, что круговой массив включений является резонатором для спиновых волн.
2. Проведено исследование частотных характеристик спиновых волн, возбужденных в одномерном массиве включений, и определены возможные режимы распространения спиновых волн. Определены геометрические параметры структуры и условия, при которых такая система включений является волноводом для спиновых волн.
3. На основе метода многократного рассеяния создана теория, описывающая распространение спиновых волн в дискретном ограниченном массиве ферромагнитных столбиков, связанных диполь-дипольным взаимодействием. Для мод колебаний намагниченности в таких структурах было показано, что частотные и модовые характеристики спиновых волн отличаются от аналогичных характеристик спиновых волн в бесконечных дискретных волноводах.
4. Аналитическими и численными методами решена задача о возбуждении спиновых волн переменным внешним магнитным полем в ограниченном одномерном массиве ферромагнитных столбиков. Исследованы резонансные свойства спиновых волн в таких системах для различных конфигураций намагниченности. Показано, что в ограниченном массиве ферромагнитных столбиков существуют краевые и дефектные моды спиновых волн.
5. Методами численного моделирования было исследовано влияние эффектов формы и краевых эффектов на моды колебаний намагниченности в конечно-размерных массивах ферромагнитных столбиков. Для столбиков цилиндрической формы с конечной высотой было показано, что существуют дополнительные резонансные частоты колебаний намагниченности из-за наличия эффекта формы. Для линейного периодического массива столбиков было продемонстрировано, что на краю массива локализована краевая мода спиновой волны. Возбуждение спиновых волн возможно с помощью импульса переменного внешнего магнитного поля или спин-поляризованного тока.

Публикации автора по теме диссертации

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

[A1] 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 // Успехи Физических Наук — (2015). — Т. 185 — Стр. 1099–1128.

[A2] Lisenkov I., Kalyabin D., **Osokin S.**, Klos J.W., Krawczyk M., Nikitov S. Nonreciprocity of edge modes in 1D magnonic crystal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2015. — Vol. 378. — Pp. 313 – 319.

[A3] Barabanenkov Y.N., **Osokin S.A.**, Kalyabin D.V., Nikitov S.A. Spin-wave bound modes in a circular array of magnetic inclusions embedded into a metallized ferromagnetic thin-film matrix // Phys. Rev. B. — 2015. — Jun. — Vol. 91. — P. 214419.

[A4] Barabanenkov Y.N., **Osokin S.A.**, Kalyabin D.V., Nikitov S.A. Radiation losses and dark mode for spin-wave propagation through a discrete magnetic micro-waveguide // Phys. Rev. B. — 2016. — Nov. — Vol. 94. — P. 184409.

[A5] **Osokin S.A.**, Safin A.R., Barabanenkov Y.N., Nikitov S.A. Spin waves in finite chain of dipolarly coupled ferromagnetic pillars // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2018. — Vol. 465. — Pp. 519 – 523.

[A6] **Osokin S.A.**, Safin A.R., Nikitov S.A. Influence of Shape Effects on the Spectrum of Spin Waves in Finite Array of Ferromagnetic Pillars // JETP Letters. — 2019. — Vol. 110 — Pp. 629 – 634.

Публикации в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК:

[A7] Калябин Д.В., Лисенков И.В., **Осокин С.А.**, Никитов С.А. Невзаимность спиновых волн в 1D магнетонном кристалле // Нелинейный мир — 2015. — Т. 13, Н. 2. — Стр. 16-17.

[A8] **Осокин С.А.**, Барабаненков Ю.Н. Калябин Д.В., Никитов С.А. Передача спиновых волн в линейном массиве включений в ферромагнитной пленке // Нелинейный мир — 2016. — Т. 14. — Н. 1. — Стр. 41-42.

Список статей автора, опубликованных в трудах международных конференций:

[A9] **Osokin S.**, Barabanenkov Y., Nikitov S. Spin wave bound modes in a circular array of magnetic inclusions embedded into ferromagnetic matrix // Book of Abstract Spin Waves 2015 International Symposium. — Ioffe Physical-Technical Institute Sn Petersburg, Russia. — 2015. — P. 110.

[A10] **Osokin S.**, Barabanenkov Y., Kalyabin D., Nikitov S. Resonant transfer of spin-waves in a finite array of magnetic inclusions embedded into a ferromagnetic film // VI Euro-Asian symposium trends in magnetism (EASTMAG-2016). Book of Abstracts. — 2016. — P. 359.

[A11] **Osokin S.A.**, Barabanenkov Y.N., Kalyabin D.V., Nikitov S.A. General theory of spin wave propagation in chains of discrete magnetic elements // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), 1 – 5 July 2017. Moscow. Book of Abstracts. — 2017. — P. 473.

[A12] **Osokin S.**, Barabanenkov Y., Safin A., Kalyabin D., Nikitov S. Spin waves in finite arrays of discrete ferromagnetic pillars // Spin Waves 2018 International Symposium Program/ Abstracts. — Ioffe Physical-Technical Institute Saint Petersburg, Russia. — 2018. — P. 139.

[A13] **Осокин С.А.**, Никитов С.А., Калябин Д.В. Спиновые волны в конечноразмерной цепочке ферромагнитных столбиков // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Электроника, фотоника и молекулярная физика. — 2018. — Стр. 104-106.

[A14] **Osokin S.**, Safin A., Nikitov S., Kalyabin D. Edge and defect modes of spin waves in finite chains of ferromagnetic pillars // Micro- and Nanoelectronics – 2018: Proceedings of the International Conference (October 1–5, 2018, Zvenigorod, Russia): Book of Abstracts. — 2018. — P. 92.

Список литературы

1. The building blocks of magnonics / B. Lenk, H. Ulrichs, F. Garbs, M. Münzenberg // *Physics Reports*. — 2011. — Vol. 507, no. 4. — Pp. 107 – 136. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157311001694>.
2. Magnon spintronics / A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, B. Hillebrands // *Nature Physics*. — Vol. 11. — P. 453. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys3347>.

3. *Hoffmann Axel, Bader Sam D.* Opportunities at the Frontiers of Spintronics // *Phys. Rev. Applied.* — 2015. — Oct. — Vol. 4. — P. 047001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.4.047001>.
4. *Krawczyk M, Grundler D.* Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // *Journal of Physics: Condensed Matter.* — 2014. — mar. — Vol. 26, no. 12. — P. 123202. — URL: <https://doi.org/10.1088%2F0953-8984%2F26%2F12%2F123202>.
5. *Lee Ki-Suk, Kim Sang-Koog.* 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. — P. 053909. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.2975235>.
6. Cross Junction Spin Wave Logic Architecture / K. Nanayakkara, A. Anferov, A. P. Jacob et al. // *IEEE Transactions on Magnetics.* — 2014. — Nov. — Vol. 50, no. 11. — Pp. 1–4.
7. Magnonic band gaps in waveguides with a periodic variation of the saturation magnetization / F. Ciubotaru, A.V. Chumak, B. Obry et al. // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Vol. 88. — P. 134406. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.88.134406>.
8. Magnon-based logic in a multi-terminal YIGPt nanostructure / Kathrin Ganzhorn, Stefan Klingler, Tobias Wimmer et al. // *Applied Physics Letters.* — 2016. — Vol. 109, no. 2. — P. 022405. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4958893>.
9. Theoretical formalism for collective spin-wave edge excitations in arrays of dipolarly interacting magnetic nanodots / Ivan Lisenkov, Vasyl Tyberkevych, Sergey Nikitov, Andrei Slavin // *Phys. Rev. B.* — 2016. — Jun. — Vol. 93. — P. 214441. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.93.214441>.
10. Imaging Collective Magnonic Modes in 2D Arrays of Magnetic Nanoelements / V.V. Kruglyak, P.S. Keatley, A. Neudert et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Jan. — Vol. 104. — P. 027201.
11. Spin-wave edge modes in finite arrays of dipolarly coupled magnetic nanopillars / Ivan Lisenkov, Vasyl Tyberkevych, Andrei Slavin et al. // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Sep. — Vol. 90. — P. 104417. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.90.104417>.
12. *Burin A.* Bound whispering gallery modes in circular arrays of dielectric spherical particles // *Phys. Rev. E.* — 2006. — Jun. — Vol. 73. — P. 066614. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.73.066614>.

13. Spin-wave bound modes in a circular array of magnetic inclusions embedded into a metallized ferromagnetic thin-film matrix / Yuri Barabanenkov, Sergey Osokin, Dmitry Kalyabin, Sergey Nikitov // *Phys. Rev. B.* — 2015. — Jun. — Vol. 91. — P. 214419. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.91.214419>.
14. *Gurevich A. G., Melkov G. A.* Magnetization, Oscillations and Waves. — CRC Press New York, 1996.
15. *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. — Pp. 4590–4602. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.49.4590>.
16. Numerical Methods in Micromagnetics (Finite Element Method) / Thomas Schrefl, Gino Hrkac, Simon Bance et al. — American Cancer Society, 2007. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470022184.hmm203>.
17. The design and verification of MuMax3 / Arne Vansteenkiste, Jonathan Leliaert, Mykola Dvornik et al. // *AIP Advances.* — 2014. — Vol. 4, no. 10. — P. 107133. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4899186>.
18. *Choi Youn-Seok, Lee Ki-Suk, Kim Sang-Koog.* Quantitative understanding of magnetic vortex oscillations driven by spin-polarized out-of-plane dc current: Analytical and micromagnetic numerical study // *Phys. Rev. B.* — 2009. — May. — Vol. 79. — P. 184424. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.79.184424>.
19. *Vivek T., Sabareesa F.* Micromagnetic Study of Reducing Forbidden Bandgaps and its Width in a Triangular Antidot Array Waveguide With Different Orientations // *IEEE Transactions on Magnetics.* — 2019. — Feb. — Vol. 55, no. 2. — Pp. 1–6.