

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра физика открытых систем  
наименование кафедры

**«Распространение спиновых волн в двухслойных**

наименование темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

**пленках железо-иттриевого граната»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2211 группы

направления 09.04.02 Информационные системы и технологии  
код и наименование направления

Институт физики

наименование факультета

Пташенко Андрей Сергеевич

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
доцент кафедры физики  
открытых систем, к.ф.-м.н.  
должность, ученая степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.В. Садовников

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой физика открытых систем  
полное наименование кафедры

Проректор по научной работе  
и цифровому развитию,  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, ученая степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.А. Короновский

Инициалы Фамилия

Саратов 2024 г.

## **Введение**

Традиционный подход к генерации, передаче и обработке информационных сигналов основывается на использовании транзистороподобных элементов, где носителем информационного сигнала является ток. Однако уменьшение топологических норм и увеличение количества транзисторов в интегральных схемах не решает проблемы тепловыделения и организации межэлементных соединений [1]. Магноника предлагает новые возможности для создания устройств обработки, передачи и хранения данных с использованием спиновых волн (СВ), что позволяет преодолеть ограничения полупроводниковых технологий [2]. Изучение спиновых волн в микро- и наноразмерных ферромагнетиках является важной задачей для понимания процессов распространения волн в структурах уменьшенных размерностей [3].

**Цель и задачи исследования** Целью данной работы является исследование и систематизация нелинейных эффектов в маггонных кристаллах (МК) и многослойных гетероструктурах, а также разработка методов управления свойствами спиновых волн для создания устройств на основе маггонных кристаллов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Изучить особенности распространения спиновых волн в многослойных ферромагнитных структурах.
2. Исследовать условия формирования запрещенных зон (ЗЗ) в маггонных кристаллах.
3. Разработать модель волновода на основе МК и провести численные исследования.
4. Провести экспериментальные исследования для подтверждения теоретических результатов.

**Краткая характеристика материалов** Основными материалами для исследования являются ферритовые пленки на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) [4]. ЖИГ используется из-за низких значений затухания и высокой

устойчивости к магнитным потерям, что делает его основным объектом для изучения спиновых волн [5].

**Структура работы** Работа состоит из восьми глав:

1. Введение.
2. Обоснование выбора методов.
3. Особенности СВ в двухслойных пленках ЖИГ.
4. Численные исследования МК.
5. Численные исследования металлизированного МК.
6. Проектирование модели волновода с МК в HFSS.
7. Экспериментальное исследование.
8. Заключение.

**Научная новизна и значимость работы** Научная новизна работы заключается в разработке и исследовании многослойных магнетонных кристаллов и волноводов, которые могут эффективно управлять распространением спиновых волн. В работе предложены новые подходы к формированию ЗЗ и управлению свойствами спиновых волн с использованием ферромагнитных и металлизированных структур.

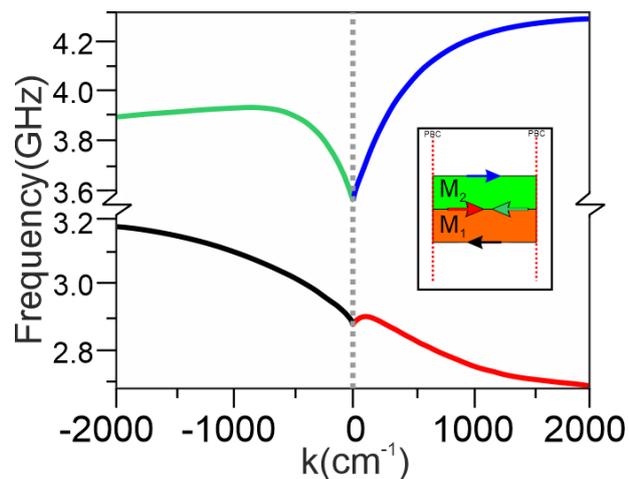
Научная значимость работы состоит в создании теоретической базы и практических рекомендаций для разработки новых устройств на основе магнетонных кристаллов, что открывает перспективы для интеграции магноники с существующими полупроводниковыми технологиями и создания новых элементов для обработки и передачи данных в микроволновом и терагерцевом диапазонах [6-10].

**Основное содержание работы**

**Обоснование выбора методов.** В первой главе рассматриваются различные методы моделирования волноводных структур и магнетонных кристаллов. Приведены преимущества и недостатки аналитических и численных методов, таких как метод

конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей во временной области. Для моделирования волноводных структур с магнетонными кристаллами выбраны программные продукты HFSS и COMSOL Multiphysics, основанные на МКЭ, что обусловлено их высокой точностью и возможностью учета сложных физических эффектов [11].

**Особенности спиновых волн (СВ) в двухслойных пленках ЖИГ.** В этой главе анализируются особенности распространения СВ в двухслойных ферромагнитных структурах. Показано, что СВ могут возбуждаться в обоих слоях с разной интенсивностью, что зависит от величины намагниченности слоев. Изучено поведение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в зависимости от параметров границы между слоями [12, 13].

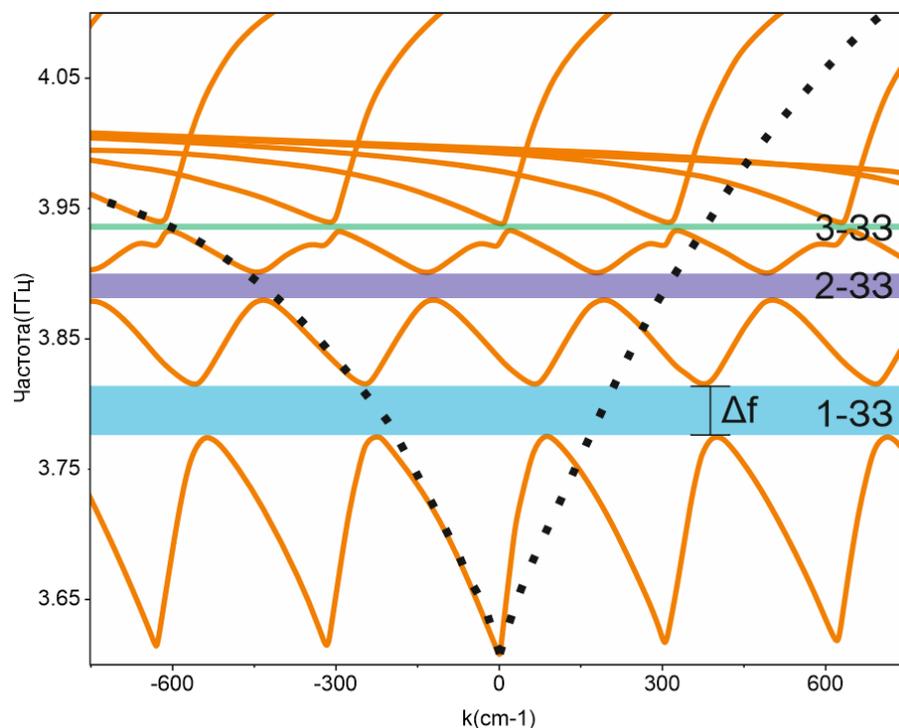


**Рис. 1.** Дисперсионная характеристика для структуры ФП-ФП.

В двухкомпонентных ЖИГ наблюдается уникальный эффект, что отличает их от однокомпонентных. Спиновые волны могут возбуждаться в обоих магнитных материалах с разной интенсивностью в каждом из них, что можно явно наблюдать в ситуациях, когда разница в намагниченностях насыщения материалов велика ( $M_1 = 904$  Гс,  $M_2 = 1738$  Гс), на дисперсионной характеристике (рис.1) отчетливо прослеживается низкочастотная (НЧ) и высокочастотная область (ВЧ) распространения сигнала.

**Численные исследования магнетонных кристаллов (МК).** В данной главе приведены результаты численного моделирования МК, образованных периодическими углублениями в слоях ферромагнетика. Исследованы условия формирования запрещенных зон (ЗЗ) и их параметры в спектре прохождения спиновых волн при изменении геометрии структуры. Показано, что ЗЗ формируются за счет брэгговского отражения спиновых волн, и их ширина и расположение зависят от конфигурации структуры [14, 15].

**Численные исследования металлизированного МК.** Эта глава посвящена исследованию особенностей распространения СВ в структурах с МК на основе металлической периодической накладке. Показано, что наличие металлизированного МК приводит к изменению угла наклона дисперсионной характеристики и формированию ЗЗ. Рассмотрены различные конфигурации металлизированного МК и их влияние на дисперсионные характеристики СВ [16, 17].

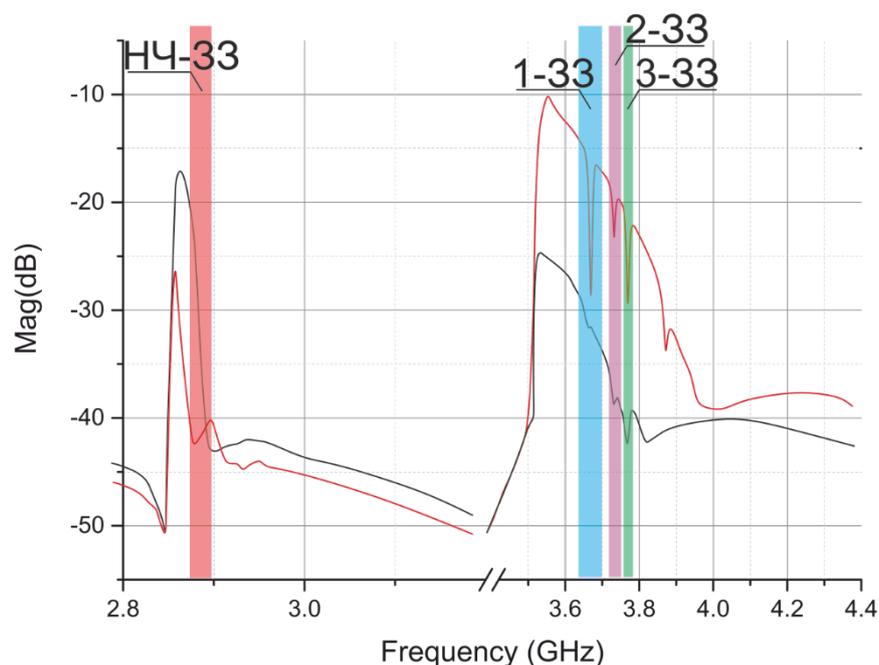


**Рис. 2.** Дисперсионные характеристики, полученные для структуры с шириной медной накладке  $w_c=60$  мкм (оранжевая линия) и дисперсионная характеристики

полученная в результате решения аналитического уравнения из работы [43] (черная пунктирная кривая).

Дисперсионные характеристики, подсчитанные с помощью аналитического метода и метода конечных элементов показаны на рис.2. Наблюдается хорошее соответствие одной из веток дисперсионных характеристик спиновых волн, а именно той, которая находится в диапазоне отрицательных волновых чисел. Противоположная ветка, однако, сильно отличается при наличии магнетонно кристаллической структуры. Таким образом, наличие в двуслойной пленке магнетонно кристаллической структуры не только добавляет запрещённые зоны в спектр волн, но и меняет угол наклона дисперсионной характеристики и как следствие групповую скорость волн при распространении СВ.

**Проектирование модели волновода с МК в HFSS.** В пятой главе описывается процесс проектирования волноводной структуры с медной решеткой на поверхности. Проведен анализ дисперсионных характеристик и ширины ЗЗ для определения оптимальных параметров структуры. Смоделированы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) исследуемой структуры в HFSS, что подтвердило наличие ЗЗ и их соответствие численным расчетам [18]. В результате моделирования в HFSS получены параметры рассеяния  $S_{12}$  и  $S_{21}$ , представляющие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) исследуемой структуры. Эти параметры показывают, как сигнал распространяется через структуру и какова его передаточная функция на различных частотах.



**Рис.3.** АЧХ для структуры с МК вблизи пленки с наибольшей намагниченности.  
(S12— красная кривая, S21— черная кривая)

На графиках АЧХ (рис.3) четко видны запрещенные зоны, которые предсказывались ранее при численном моделировании. Запрещенные зоны представляют собой диапазоны частот, в которых передача сигнала существенно подавлена, что указывает на эффективное формирование запрещенных зон в исследуемой структуре.

**Экспериментальное исследование.** В этой главе описываются экспериментальные исследования АЧХ двухслойной структуры с металлизированным МК. Проведены измерения с использованием векторного анализатора цепей, что позволило подтвердить наличие ЗЗ, предсказанных в численных моделях. Результаты экспериментов подтвердили теоретические предположения о возможности управления СВ с помощью металлизированных МК [19, 20].

## Заключение

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Проведено комплексное исследование характеристик магнонных кристаллов и многослойных ферромагнитных структур. Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований подтвердили возможность эффективного управления распространением спиновых волн.
2. Исследованы условия формирования запрещенных зон в магнонных кристаллах, образованных периодическими углублениями в слоях ферромагнетика. Показано, что ширина и расположение запрещенных зон зависят от конфигурации структуры и могут быть оптимизированы для достижения желаемых характеристик.
3. В структуре с металлизированным МК наблюдается значительное влияние металлической накладки на дисперсионные характеристики спиновых волн, что позволяет создавать структуры с изменяемыми параметрами распространения сигналов.
4. Разработана и смоделирована в HFSS волноводная структура с медной решеткой на поверхности. Результаты моделирования подтвердили наличие запрещенных зон и их соответствие теоретическим расчетам.
5. Экспериментальные исследования АЧХ двухслойной структуры с металлизированным МК показали наличие запрещенных зон, предсказанных в численных моделях, что подтверждает возможность управления спин-волновыми сигналами с помощью металлизированных структур.

Представленные результаты открывают перспективы для разработки новых устройств на основе магнонных кристаллов, таких как фильтры, фазовращатели и спин-волновые диоды. Эти устройства могут найти применение в различных областях, включая телекоммуникации, радиофизику и информационные технологии, предоставляя новые возможности для создания энергоэффективных и высокопроизводительных систем передачи и обработки информации.

## Список используемой литературы

1. V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov, D. Grundler. Magnonics. Journal of Physics D: Applied Physics. 43 (26): 264001. (2010)
2. Р. Б. Моргунов, А. И. Дмитриев. Спиновая динамика в наноструктурах магнитных полупроводников. Физика твердого тела, том 51, вып. 10 (2009)
3. Nosov, С. Дубинин, Д. Стариченко, Д. Иванов, А. Kobelev, Е. Kravtsov, М. Makarova, N. Antropov, В. Бессонов, С. Наумов, V. Ustinov. Особенности магнитной анизотропии тонких пленок железоиттриевого граната, полученных методом импульсного лазерного осаждения. Fizika Metalliv i Metallovedenie. 119, 1121-1126. (2018)
4. S. Vance, T. Schrefl, G. Hrkač, A. Goncharov, D. A. Allwood, J. Dean. Micromagnetic calculation of spin wave propagation for magnetologic devices. J. Appl. Phys. 103 (7): 07E735. (2008)
5. Ю. Беспятых, В. И. Зубков. ЖТФ, Т. 45, Вып. 11, С. 2386-2394. (1975)
6. А. В. Вашковский, А. В. Стальмахов. РЭ, Т. 29, № 5, С. 901-907. (1984)
7. В. И. Зубков, В. Епапечников. Письма в ЖТФ, Т. 11, Вып. 23, С. 1419-1423. (1985)
8. Ю. А. Филимонов, И. В. Шеин. Внутренние магнитостатические волны в структуре с двумя анизотропными ферритовыми слоями. ЖТФ, 62:1, 187-196. (1992)
9. В. И. Зубков, Е. Н. Lock, А. С. Хе, В. И. Щеглов. Поверхностные магнитостатические волны и спин-волновые резонансы в двухслойных ферритовых пленках. Журнал технической физики, 63, 166-170. (1993)
10. Y. Peng, G. Zhao, F. Morvan, S. Wu, M. Yue. Dynamic micromagnetic simulation of the magnetic spectrum of permalloy nanodot array with vortex state. J. Magn. Magn. Mater. 422, 57-60. (2017)
11. S. K. Kim Micromagnetic computer simulations of spin waves in nanometre-scale patterned magnetic elements J. Phys. D: App. Phys. 43 (26) 264004. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264004>. (2010)

12. S. A. Odintsov A. С. Пташенко Е. Н. Lock Е. Н. Бегинин А. V. Sadovnikov. Распространение невзаимных спиновых волн в многослойном магнетонном кристалле. Физика твердого тела. 65. 1002. 10.21883/FTT.2023.06.55657.18Н. (2023)
13. Z. Li M. Wang Y. Nie D. Wang Q. Xia W. Tang Z. Zeng G. Guo Spin-wave propagation spectrum in magnetization-modulated cylindrical nanowires J. Magn. Mater 414 49 – 54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.04.057>. (2016)
14. R. Silvani M. Kostylev A. Adeyeye G. Gubbiotti Spin wave filtering and guiding in Permalloy/iron nanowires J. Magn. Mater (2017) – <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.03.046>.
15. G. Venkat D. Kumar M. Franchin O. Dmytriiev M. Mruczkiewicz H. Fangohr A. Barman M. Krawczyk A. Prabhakar Proposal for a standard micromagnetic problem: Spin wave dispersion in a magnonic waveguide IEEE Trans. Magn. 49 (1) (2013) 524–529. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2206820>.
16. M. A. Morozova S. V. Grishin A. V. Sadovnikov D. V. Romanenko Yu. P. Sharaevskii S. A. Nikitov. Appl. Phys. Lett. 107 242402 (2015)
17. A.V. Chumak P. Kabos M. Wu C. Abert C. Adelman A. Adeyeye J. Akerman F.G. Aliev A. Anane A. Awad. Roadmap on Spin-Wave Computing IEEE Transactions on Magnetics. DOI:10.1109/TMAG.2022.3149664 (2022)
18. Ю. А. Юсипова. Изв. вузов. Электроника. Т. 24. № 2. С. 160–173 (2019).
19. П. В. Купцов. ФТТ. Т. 65 № 6 С. 943-950 (2023)
20. H. Suhl. J. Phys. Chem. Solids 1 209 (1957).