

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

Кафедра физики открытых систем

**УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ СПИНОВЫХ ВОЛН
В АНСАМБЛЕ ВЕРТИКАЛЬНО И ЛАТЕРАЛЬНО
СВЯЗАННЫХ ФЕРРИТОВЫХ МИКРОПОЛОСОК**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4041 группы
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

института физики

Акимовой Варвары Романовны

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

дата, подпись

А.В. Садовников

Заведующий кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

дата, подпись

А.А. Короновский

Саратов 2023 год

Введение

Исследование, проведенное в настоящей работе, посвящено изучению распространения спиновых волн в двухслойном массиве микроволноводов, состоящем из параллельно расположенных микрополосок из железо-иттриевого граната. Целью данной работы является выявление эффективных методов управления распространением спиновых волн в ансамбле латерально и вертикально связанных ферритовых микрополосок, путем изменения зазоров между волноведущими каналами, разности фаз и угла отклонения управляющего магнитного поля относительно структуры. С помощью микромагнитного моделирования были исследованы режимы распространения спиновых волн в рассматриваемых массивах микроволноводов в конфигурации, соответствующей возбуждению синфазно и противофазно в одном и в двух центральных каналах нижнего из слоев поверхностных магнитостатических спиновых волн под разными углами отклонения внешнего магнитного поля.

Содержание работы:

1. Введение
2. Исследуемая структура
3. Численные методы расчета на основе микромагнитного моделирования в MuMax3
 - 3.1 Построение и операции с объектами
 - 3.2 Задание материальных параметров магнитных сред и статических магнитных полей
 - 3.3 Решение статической задачи
 - 3.4 Решение динамической задачи
 - 3.5 Вывод результатов
 - 3.6 Обработка результатов
4. Численное моделирование
5. Результаты эксперимента

- 5.1 Определение рабочего диапазона частот
- 5.2 Референсная однослойная структура
- 5.3 Сплошная двуслойная вариация структуры
- 5.4 Сравнение структуры с латеральным зазором в 10 мкм и референсной
- 5.5 Сравнение структур с вертикальными зазорами в 20 и 40 мкм
- 6. Заключение

Основное содержание работы

Планарные ферритовые волноведущие микроструктуры конечной ширины на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как базовые элементы “магنونных сетей”, для создания различных устройств обработки сигналов: линий задержки, фильтров, интерферометров, переключателей, мультиплексоров и др., в которых информация передаётся посредством спиновых волн, а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции [1-4].

Подавляющее большинство современных цифровых микросхем основаны на технологии комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, а разработка методов передачи информации, основанных на идее магنونного взаимодействия, является весьма актуальной задачей, так как развитие полупроводниковых технологий в настоящий момент не позволяет увеличивать рост скорости быстрогодействия вычислительных устройств на их основе [5-10].

Для обработки информационных сигналов, основанных на полупроводниковых технологиях переноса зарядов, в настоящее время активно развиваются исследования по созданию аналогичных систем с переносом магнитных моментов или спинов электронов без переноса заряда, объединенных общим названием – магنونика [1–3]. В магнитоупорядоченных материалах и структурах на их основе можно

использовать спиновые волны (СВ) для обработки информации в пространственно-распределенной системе с высокой степенью временного параллелизма. Данные системы используют спин-волновую интерференцию для реализации волновых методов обработки информации [11-12], а также для создания булевых и небулевых вычислительных устройств, которые позволяют проводить логически обратимые и параллельные вычисления [4]. В настоящее время, для реализации таких систем, важной задачей является разработка топологий планарных связанных магнитных микроразмерных структур, таких как магنونные сети, которые играют ключевую роль в создании функциональных устройств нового поколения [5].

В рамках настоящей дипломной работы систему, образованную из параллельных волноводов СВ, будем называть ансамблем вертикально и латерально связанных ферритовых микрополосок. При этом под «вертикальной связью» будем понимать диполь-дипольную связь между микроволноводами, возникающую ввиду полей динамического размагничивания на поверхности слоя. В случае дипольных полей, имеющих поперечное распределение в направлении боковых стенок микроволноводов, будем рассматривать случай «латеральной» связи.

Система латерально и вертикально связанных ферритовых микрополосок (см. рисунок 1) представляет собой структуру в виде решётки микроволноводов из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), расположенную на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). Микрополоски выполнены в виде удлинённых полосок, в длину составляющих 4000 мкм, в ширину 300 мкм и толщиной 10 мкм, образующих решётку из двух горизонтальных слоёв, каждый из которых содержит по шесть микроволноводов, расположенных с зазорами в горизонтальной и вертикальной плоскостях так, что полоски в вертикальной плоскости расположены друг над другом. Намагниченность насыщения пленок железо-иттриевого граната составляет $M=139$ Гс, а величина внешнего магнитного

поля составляет $H_0 = 1200$ Э.

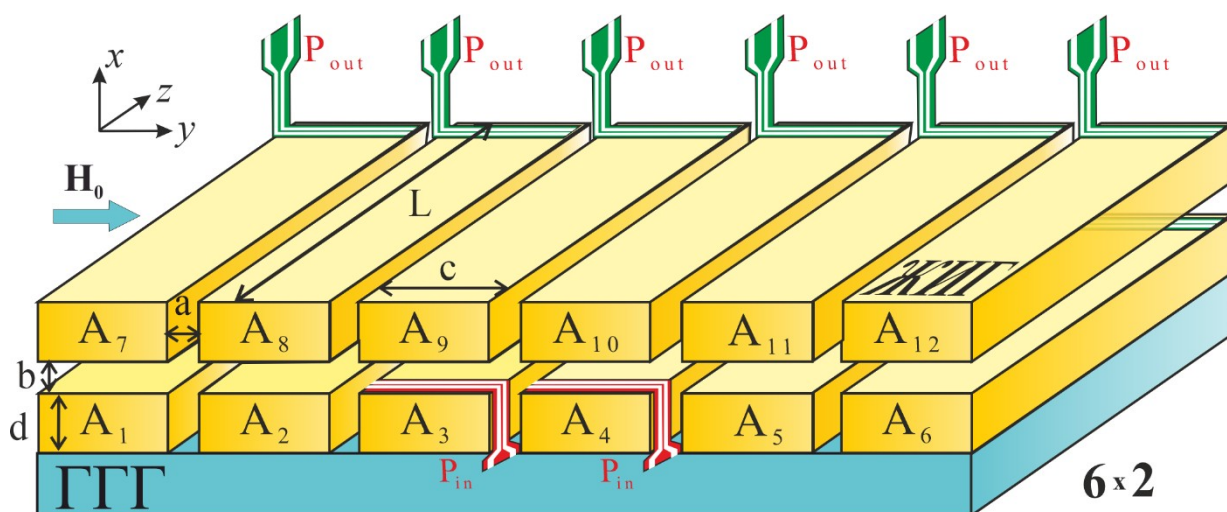


Рисунок 1 -- Схема рассматриваемого массива микроволноводов; $a = 10$ мкм – горизонтальный зазор, $b = 10$ мкм – вертикальный зазор, $c = 300$ мкм – ширина, $d = 10$ мкм – высота, $L = 4000$ мкм – длина каждой микрополоски, H_0 – управляющее внешнее магнитное поле, P_{in} и P_{out} – вход и выход сигнала соответственно

Принцип работы исследуемой структуры заключается том, что на входную микрополосковую антенну P_{in} подается микроволновой сигнал, частотный диапазон которого зависит от величины постоянного внешнего магнитного поля. Далее происходит трансформация микроволнового сигнала в поверхностную магнитостатическую волну (ПМСВ) или обратную объемную магнитостатическую волну (ООМСВ) в зависимости от направления управляющего постоянного внешнего магнитного поля относительно структуры. По мере распространения, будет происходить перекачка спин-волнового сигнала во все микроволноводы в разной степени, в зависимости от угла отклонения внешнего магнитного поля, частоты и разности фаз подаваемого микроволнового сигнала на микрополосковые антенны.

Для проведения численного моделирования процессов

распространения СВ в ансамбле ЖИГ микроволноводов был использован программный пакет MuMax3, позволяющий провести микромагнитное моделирование.

Для того, чтобы приступить к изучению режимов эффективной пространственно-частотной селекции сигнала, было необходимо изучить влияние толщины пленки на потенциальный диапазон частот, так как эксперимент проводился в два этапа: для одно- и двуслойного массива ферритовых микрополосок. Для этого были построены дисперсионные характеристики для сплошных пленок ЖИГ, толщиной 10 и 20 мкм, которые являются аналогами однослойной и двуслойной структур соответственно (см. рисунок 3). Каждая из них приводится в сравнении с дисперсией Деймона–Эшбаха, которая отражает зависимость частоты от волнового числа в бесконечной среде [13,14]. Оба графика были построены для упомянутых в главе «Исследуемая структура» параметров железо–иттриевого граната и поля.

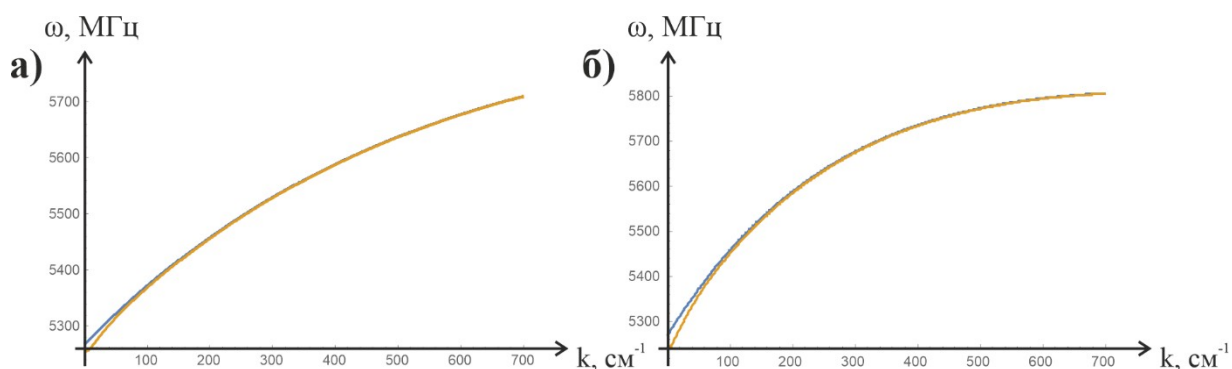


Рисунок 3 – а) Дисперсионные характеристики однослойной структуры; б) дисперсионные характеристики двуслойной структуры. На обоих графиках синим цветом отмечена дисперсия Деймона–Эшбаха, желтым – дисперсия в пленке шириной, равной сумме ширин всех волноводов одного слоя, то есть 1800 мкм.

Поскольку реальные пленки ЖИГ ограничены в размерах, нельзя пренебречь факторами размагничивания на краях рассматриваемой области, из-за которых внутреннее поле среды отличается от прикладываемого поля.

Этим объясняется отставание дисперсии в конечной структуре по частоте от дисперсии Деймона–Эшбаха.

Как видно по рисунку 3а, в случае пленки в 10 мкм, графики дисперсий перестают отличаться при малых волновых числах $\approx 60 \text{ см}^{-1}$. В случае же утолщенного ЖИГ (рисунок 3б), изменения наблюдаются также при малых волновых числах, но уже равных примерно 80 см^{-1} . Так же, согласно рисункам 3а и 3б, интересующие нас частоты лежат в диапазоне 5.2 – 5.7 ГГц, для которого были построены изочастотные кривые для одно- и двуслойной пленок ЖИГ.

На карты изочастотных кривых нанесены векторы V_{gp} и V_{ϕ} , которые показывают направления групповой и фазовой скоростей СВ на частоте резонанса 5.2681 ГГц. Как известно, фазовая скорость будет сонаправлена волновому вектору, а групповая располагается по нормали, проведенной к изочастотной кривой. То есть, предполагается, что в данном случае, направления фазовой и групповой скоростей в сплошном волноведущем канале, при отсутствии поворота поля подмагничивания, будут перпендикулярны друг другу.

Для определения более точного рабочего диапазона частот были построены амплитудно–частотные характеристики для каждого из микроволноводов ансамбля при нулевом отклонении и при отклонении внешнего управляющего магнитного поля на -15 и $+15$ градусов от перпендикулярного положения относительно продольных волноведущих каналов.

Анализ дисперсионных и амплитудно-частотных характеристик показал, что исследование многоканальных режимов спин-волнового транспорта в ансамбле связанных ферритовых микрополосок целесообразно проводить в частотных границах 5.2 – 5.3 ГГц. Именно в нем располагается аналитически найденная частота резонанса, которая составляет 5.2681 ГГц.

Отталкиваясь от вышеизложенных заключений, методом перебора между частот от 5.24 ГГц до 5.28 ГГц, была выбрана частота 5.25 ГГц,

которой соответствует наилучшая перекачка волны по структуре при любой конфигурации. Все дальнейшие расчеты в работе были проведены именно на частоте 5.25 ГГц.

Далее была смоделирована и рассмотрена референсная однослойная вариация структуры, совпадающая по строению с нижним слоем вышеописанного ансамбля вертикально и латерально связанных микроволноводов, при горизонтальных зазорах, равных 0 и 20 мкм.

На рисунке 4 представлена дифракционная картина в сплошной пленке железо-иттриевого граната без поворота управляющего внешнего магнитного поля, при синфазном возбуждении источников СВ. На ней отмечена групповая скорость двух пучков перекачки энергии спиновой волны. Как и предполагалось выше, угол между направлениями фазовой и групповой скоростями примерно равен 90° . Ожидается, что появление связанных латеральным зазором волноведущих микрополосок в структуре разобьет дифракционную картину, что даст возможность управления сигналом на выходе.

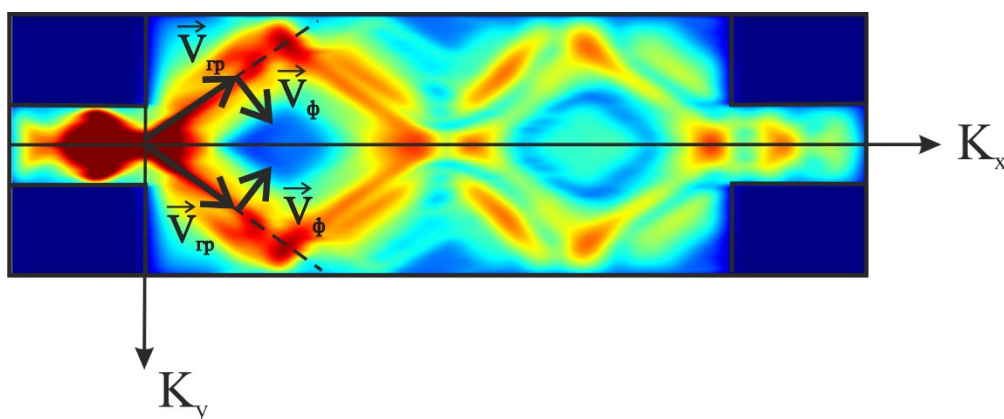


Рисунок 4 – Дифракция СВ при синфазном сигнале и отсутствии поворота поля подмагничивания.

Результаты исследования однослойной конфигурации при латеральном зазоре в 20 мкм подтвердили гипотезу об изменении направления фазовой и групповой скоростей. были очень похожими на результаты при зазоре так же равном 20 мкм, а вертикальном равен 40 мкм.

Чтобы понять, как ведет себя спиновая волна в двуслойной структуре, было рассмотрено опорную конфигурацию, когда существует только вертикальный зазор между микроволноводами. То есть в данном случае латеральные микрополоски были «склеены» для образования двух сплошных горизонтальных пластин ЖИГ, расположенных одна над другой.

При таком взаиморасположении микроволноводов видно, что только при синфазном возбуждении и отсутствии поворота поля относительно структуры, заметно отличие нижнего и верхнего слоев по фазе. В этом случае входной и выходной сигналы нижнего слоя находятся в противофазе. Четко прослеживается пучок переноса энергии в виде луча в различные участки структуры при добавлении угла поворота поля, а также при включении только одной из входных антенн. В связи с этим, поперечная структура пучка теряет классический структурированный волновой рисунок внутри каждой из пленок.

Предполагалось, что при разделении сплошной пленки на волноведущие каналы будет наблюдаться изменение длины волны и направления фазовой скорости. Для проверки гипотезы, была смоделирована исследуемая структура с вертикальным и латеральными зазорами 10 мкм.

При такой конфигурации удастся достичь передачи сигнала в один из нижних центральных микроволноводов. Особенно хорошо это прослеживается именно при повороте угла поля подмагничивания. Такое же явление наблюдается при противофазном включении источников при прямом поле. При одинаковых латеральном и вертикальном зазорах, равных 10 мкм достигается четкий фазовый рисунок на задних выступах структуры, что дает возможность получения сигнала в нужной фазе в любом из двух нижних центральных волноводов.

Структура с латеральным зазором в 10 мкм в сравнении со сплошной средой дает лишь небольшое отличие в общей картине перекачки спиновой

волны в случае отклонения поля на 0 и -15 градусов относительно перпендикулярного структуре, а именно убирает четкий луч энергии, укорачивает длину волны и увеличивает волновое число.

При увеличении латерального и вертикального зазоров в 2 раза, то есть до 20 мкм, волновой рисунок в каждом из каналов системы связанных микроволноводов становится более четким. Особенно это видно при синфазном и противофазном возбуждении источников спиновой волны.

Согласно результатам при зазорах в 20 мкм по всему ансамблю и управляющему внешнему магнитному полю, ориентированному перпендикулярно волноведущей структуре, спин-волновой сигнал «стекает» с концов верхних на выступы нижних срединных микрополосок. При этом, при синфазном возбуждении, в 3 и 4 микроволноводах нижнего ряда распространяется энергия одинаковой мощности, а при противофазном включении, либо при включении только одного источника, она переходит только в одну из микрополосок. Примечательно, что при повороте поля на -15 и $+15$ градусов, фронт волны распространяется на всю структуру, за исключением разве что боковых микрополосок.

Рассматривая фазовые рисунки данной вариации ансамбля, в каждом из микроволноводов прослеживается структурированная волна. Однако в случае одиночного сигнала и поворота поля, можно увидеть расщепление фазы внутри микрополоски.

Увеличивая вертикальный зазор еще в 2 раза, то есть до 40 мкм и таком же латеральном промежутке равном 20 мкм, полученные явления практически полностью дублируются, но заметно усилилась мощность передаваемого сигнала. В этом варианте конфигурации структуры, связь между слоями достаточно мала, что объясняет схожесть с однослойной версией ансамбля. Было выявлено, что при увеличении вертикального зазора, верхняя и нижняя части ансамбля становятся все менее симметричными, что

свидетельствует об уменьшении дипольной связи спиновых волн между слоями.

Таким образом, мы получаем 2 режима спин-волнового транспорта: режим концентрации СВ на концах срединных каналов, с возможностью их отдельного включения, а также, режим управления сигналом на концах микрополосок верхнего слоя ансамбля с возможностью изменения фазы выходного сигнала.

Заключение

Таким образом, с помощью микромагнитного моделирования были исследованы режимы распространения спиновых волн в массивах микроволноводов, образованных двумя слоями железо-иттриевого граната. Исследованы механизмы, приводящие к формированию различных «паттернов», образованных спин-волновым сигналом при его распространении в продольно-нерегулярном тонкопленочном магнитном микроволноводе. В качестве развития задачи было рассмотрено влияние второго идентичного слоя, расположенного над первым. На следующем этапе было проведено комплексное исследование влияния геометрических параметров на распространение спиновых волн. А именно, было рассмотрено влияние зазора между слоями (в вертикальном направлении) и зазоров между отдельными ферритовыми микрополосками на формирование асимметричных «паттернов» динамической намагниченности в каждом слое структуры. Выявлено влияние способа возбуждения массива микроволноводов на профили спин-волнового сигнала и получены диапазоны частот в полосе возбуждения поверхностных магнитостатических волн, в которых наблюдается эффективное перераспределение мощности спиновой волны в каждом из 12 каналов рассматриваемой структуры. В конфигурации, соответствующей синфазному и противофазному способу возбуждения двух центральных каналов нижнего слоя поверхностных магнитостатических спиновых волн, удастся наблюдать неидентичное

распределение величины динамической намагниченности в каждом из слоев при изменении ориентации направления внешнего магнитного поля. Для изучения режимов эффективной пространственно-частотной селекции сигнала в одно- и двуслойной конфигурации ансамбля волноведущих каналов, было исследовано влияние толщины пленки на диапазон рабочих частот. Для этого были построены дисперсионные характеристики для сплошных пленок ЖИГ, толщиной 10 и 20 мкм, аналогичные однослойной и двуслойной структурам соответственно. Каждая из них приводилась в сравнении с дисперсией Деймона–Эшбаха. Оба графика были построены для заранее обговоренных параметров железо-иттриевого граната и поля. Благодаря полученным дисперсионным характеристикам был определен промежуток частот между 5.2 и 5.7 ГГц, для которого представлены карты изочастотных кривых. Затем, для уточнения диапазона частот были построены амплитудно–частотные характеристики для каждого из микроводноводов ансамбля при отклонении поля подмагничивания на 0, –15 и +15 градусов от перпендикулярного положения относительно продольных волноведущих каналов. Данный эффект обнаружен впервые и представляет большой интерес для создания систем многоканального демультиплексирования информационного сигнала в полосе частот от 5 ГГц до 6 ГГц.

Список использованных источников

1. Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. – 1993.
2. Demidov V. E. et al. Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection //Scientific reports. – 2015. – Т. 5. – №. 1. – С. 1-5.
3. Одинцов С. А. и др. Пространственно-частотная селекция магнитостатических волн в двумерной магнито-кристаллической решетке //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 104. – №. 8. – С. 576-580.
4. Никитов С. А. и др. Диэлектрическая магноника—от гигагерцев к терагерцам //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 10. – С. 1009-1040.
5. Teplov V. S. et al. 150-Degree Nonlinear Magnetic Oscillations in YIG Films //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2022. – Т. 35. – №. 6. – С. 1389-1395.
6. Colinge J. P. et al. (ed.). FinFETs and other multi-gate transistors. – New York : Springer, 2008. – Т. 73.
7. Belmeguenai M. et al. Frequency-and time-domain investigation of the dynamic properties of interlayer-exchange-coupled Ni 81 Fe 19/ Ru/ Ni 81 Fe 19 thin films //Physical Review B. – 2007. – Т. 76. – №. 10. – С. 104414.
8. Li S. et al. Engineering optical mode ferromagnetic resonance in FeCoB films with ultrathin Ru insertion //Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 33349.
9. Vansteenkiste A., Van de Wiele B. MuMax: A new high-performance micromagnetic simulation tool //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2011. – Т. 323. – №. 21. – С. 2585-2591.

10. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Т. 450. – С. 34-39.
11. Sadovnikov A. V. et al. Spin-wave intermodal coupling in the interconnection of magnonic units //Applied Physics Letters. – 2018. – Т. 112. – №. 14. – С. 142402.
12. Crew D. C. et al. Optic and acoustic modes measured in a cobalt/Permalloy exchange spring bilayer using inductive magnetometry //Journal of applied physics. – 2005. – Т. 97. – №. 10. – С. 10A707.
13. Щеглов В. И. Влияние обменного взаимодействия и динамического размагничивания на дисперсию поверхностной волны Деймона-Эшбаха. Часть 1. Поперечное волновое число //Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №. 7. – С. 5-5.
14. Shcheglov V. I. The influence of exchange interaction and dynamic demagnetizing field on dispersion properties of Damon-Eshbach surface wave. Part 2. Transverse wave number //Zhurnal Radioelektroniki–Journal of Radio Electronics. – 2019. – №. 9. – С. 1684-1719.2019.