

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор РТУ МИРЭА  
Н.И. Прокопов  
« 10 » ноября 2020 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию *Осокина Сергея Александровича* «Распространение спиновых волн в дискретных ограниченных ферромагнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»

Исследования спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках проводятся начиная с 1970-х годов, когда были впервые синтезированы пленки железоиттриевого граната (ЖИГ), обладающие рекордно малыми магнитными потерями в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Продолжающийся интерес к спиновым волнам вызван как разнообразием линейных и нелинейных волновых явлений, обнаруженных в ферромагнитных пленках, так и перспективами создания на их основе различных аналоговых устройств обработки СВЧ сигналов. В последние годы этот интерес существенно вырос благодаря совершенствованию технологий создания тонких, вплоть до нанометровых толщин, высококачественных пленок и появившимся возможностям формирования структурированных, т.е. неоднородных по толщине или в плоскости, ферромагнитных пленок. Использование структурированных пленок ЖИГ позволяет управлять дисперсией, затуханием и направлением распространения спиновых волн. Экспериментально и теоретически обнаружено существование областей запрещенных частот в спектрах спиновых

волн, продемонстрировано волновое распространение волн и множество других эффектов, позволивших рассматривать такие периодически структурированные пленки как «магнитные кристаллы». Поскольку в реальных условиях все пленки или структуры на их основе имеют конечные размеры, неизбежно встает вопрос об особенностях сверхвысокочастотных колебаний и спин-волновых явлений в ферромагнитных структурированных пленках ограниченных размеров. Теоретическим исследованиям этих вопросов и посвящена представленная диссертационная работа, *что и определяет ее актуальность и своевременность.*

*Диссертационная работа состоит* из введения, 4-х глав, заключения и списка использованных источников, изложена на 108 стр., включая 35 рисунков. Список литературы содержит 119 наименований. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость. В первой главе приведен обзор литературы по теме исследований, описаны используемые математические методы и подходы, дан обзор методов компьютерного моделирования характеристик спиновых волн. Во второй главе сформулирована и решена задача о распространении магнитостатических спиновых волн в пленке, содержащей ограниченный массив цилиндрических включений с другой намагниченностью. В третьей главе решена задача о собственных частотах в цепочке ферромагнитных столбиков, расположенных в свободном пространстве. Наконец, в четвертой главе приведены результаты численного моделирования возбуждения спиновых волн в цепочке ферромагнитных столбиков из пермаллоя. В заключении перечислены основные результаты и выводы работы.

*Научная новизна диссертационной работы* определяется совокупностью новых научных результатов, изложенных в диссертации:

1. 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.

2. Впервые исследованы резонансные состояния спиновой системы при распространении спиновых волн в одномерных ограниченных массивах ферромагнитных включений в ферромагнитной пленке и определены геометрические параметры массива и включений, при которых возможно распространение спиновых волн с малыми потерями на рассеяние.

3. 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.

4. Методами численного моделирования показано, что для массивов столбиков конечной высоты существует несколько резонансных частот 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.

5. Теоретически показана возможность возбуждения собственных и краевых мод колебаний намагниченности на резонансных частотах в ограниченных массивах ферромагнитных столбиков импульсным переменным внешним магнитном полем или спин-поляризованным током.

*Достоверность и обоснованность* научных положений и полученных результатов исследований определяется следующими обстоятельствами:

- Использованием при построении моделей общепризнанных физических законов и допущений, учетом максимального числа действующих факторов;
- Использованием при расчетах известных и хорошо себя зарекомендовавших методов математической физики;
- Использованием при численном моделировании параметров спиновых волн в периодических структурах программ, созданных на языках программиро-

вания MATLAB и Python. Микромагнитное моделирование спин-волновых процессов было выполнено с помощью программного пакета MuMax3.

*Практическая значимость* работы состоит в разработанных автором теоретических подходах, методиках расчета и различных компьютерных программах для нахождения характеристик высокочастотных колебаний и распространяющихся спиновых волн в дискретных структурах ограниченных размеров. Рассмотренные структуры являются прототипами, на основе которых могут быть реализованы различные аналоговые и цифровые устройства обработки сверхвысокочастотных сигналов.

*В качестве недостатков и замечаний* по диссертационной работе укажем следующие:

1. При расчете дисперсионных характеристик спиновых волн в дискретных структурах на основе тонких пленок железоиттриевого граната автор использовал магнитостатическое приближение. В тоже время показано теоретически и неоднократно подтверждено экспериментами, что учет энергии обменного взаимодействия соседних спинов и обменных граничных условий на поверхностях пленки и границах раздела приводит к существенному изменению характеристик спиновых волн. Какие-либо оценки обоснованности использованного магнитостатического приближения и условий его применимости для решения поставленных задач в работе не проведены.
2. Автор построил теорию, описывающую характеристики спиновых волн в дискретной ограниченной структуре с параметрами пленки железоиттриевого граната, решил задачу о нахождении собственных частот одномерной цепочки ферромагнитно- или антиферромагнитно-упорядоченных столбиков, выполнил численное моделирование характеристик возбуждения спиновых волн в цепочке ферромагнитных столбиков с помощью импульсов магнитного поля или спин-поляризованного тока. К сожалению, ни для одной и решенных задач не приведено сравнение результатов расчетов с данными экспериментальных исследований, что позволило бы подтвердить достоверность выводов и рекомендаций теории.

3. В тексте диссертационной работы и в автореферате присутствует ряд незначительных погрешностей и опечаток. Отмеченные недостатки в оформлении несколько ухудшают общее впечатление от работы, но не снижают в целом оригинальности и научной ценности проведенных исследований.

*Результаты диссертации опубликованы* в 8-ми статьях в ведущих международных и отечественных журналах, входящих в список ВАК РФ, и доложены на 6-ти российских и международных конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

*Результаты, выводы и рекомендации* диссертационной работы могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений и разработкой новых устройств обработки информации, использующих распространение спиновых волн, таких как Санкт-Петербургский электротехнический университет им. В.И. Ульянова, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, МИРЭА-Российский технологический университет и других.

*Учитывая изложенное, считаем, что* диссертационная работа Осокина С.А. представляет собой законченное научное исследование, посвященное актуальной тематике, содержащее целый ряд новых с научной точки зрения и важных для применений результатов. Работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Соискатель, Осокин С.А. за теоретическое исследование особенностей распространения спиновых волн в дискретных ограниченных ферромагнитных структурах, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Отзыв рассмотрен и одобрен после обсуждения диссертационной работы  
Осокина С.А. на научном семинаре кафедры наноэлектроники ФТИ РТУ  
МИРЭА 22 сентября 2020 г.

Отзыв составили:

Юрасов Алексей Николаевич

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры наноэлек-  
троники Физико-технологического института МИРЭА — Российского тех-  
нологического университета

119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78

Телефон: +79169141393, e-mail: [yurasov@mirea.ru](mailto:yurasov@mirea.ru)



Экономов Николай Андреевич, к.ф.-м.н., доцент,

доцент кафедры физики Физико-технологического института МИРЭА —  
Российского технологического университета

119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78

Тел. 8 916 206 9464, E-mail: [economov@list.ru](mailto:economov@list.ru) ;

