

ОТЗЫВ

официального оппонента Устинова Алексея Борисовича
на диссертационную работу **Грачева Андрея Андреевича**

«Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.4. – Радиофизика

В настоящее время исследование коллективной динамики спиновых волн в магнитных микро- и наноразмерных структурах привлекает внимание из-за большого потенциала в разработке элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне частот. Рассмотренные в работе волноведущие микроструктуры на основе плёнок железо-иттриевого граната являются оптимальными средами, демонстрирующие рекордно низкие величины затухания спиновых волн. Диссертационная работа Грачева А.А. посвящена решению актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в латеральных гетероструктурах, образованных из массивов ферритовых микроволноводов и магнетонных кристаллов, нагруженных пьезоэлектрическими или сегнетоэлектрическими слоями. Поставленные задачи диссертационного исследования являются чёткими, целенаправленными, логически и последовательно сформулированными. В диссертационной работе рассмотрен ряд магнитных микроструктур на основе массивов ферритовых волноводов и магнетонных кристаллов. С помощью экспериментальных и численных методов выявлены механизмы управления электрическим полем пространственных и передаточных характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем и двух параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них. С помощью радиофизических измерений и метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии проведено исследование процессов распространения гибридных электромагнитных спиновых волн в латеральной системе параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах с сегнетоэлектрическим слоем. Экспериментально продемонстрировано управление спектром дипольных спиновых, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ волноводов. Показано управление характеристиками этой связи, изменяя угол статического внешнего магнитного поля, относительно главных осей геометрии. Совокупность рассмотренных в работе магнетонно-кристаллических и латеральных гетероструктур может найти применение в

создании класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-сигнала, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем. Таким образом, тема диссертационной работы Грачева А.А. и поставленные задачи, безусловно, являются актуальными и практически значимыми.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 117 страниц, включая 47 рисунков, список литературы из 147 наименований. Диссертационная работа имеет последовательное изложение полученных результатов, чётко организованную структуру, ясное и доступное графическое оформление.

Во **введении** обоснована актуальность и новизна темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи. На основании полученных результатов приведена достоверность, описана их практическая значимость и сформулированы четыре положения, выносимые на защиту. Приведён список опубликованных по итогам диссертации работ и показаны сведения об апробации полученных результатов.

В **первой главе** рассматриваются особенности влияния распределённых упругих деформаций на спектр дипольных спиновых волн в одиночных и латеральных магнетонно-кристаллических структурах с пьезоэлектрическим слоем. С помощью численных и экспериментальных исследований выявлены закономерности управления спектром дипольных спиновых волн в гетероструктуре, образованной из магнетонного кристалла с пьезоэлектрическим слоем. Продемонстрирована трансформация амплитудно-частотных характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем при изменении величины внешнего электрического поля. Проведено экспериментальное исследование методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии спин-волновой связи в латеральной системе параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, расположенным над одним из них. Полученные результаты демонстрируют частотное смещение полос непропускания для спиновых волн при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою, что в свою очередь позволяет использовать рассмотренные магнетонно-кристаллические структуры, как управляемые устройства фильтрации информационных сигналов.

Вторая глава посвящена рассмотрению эффектов гибридизации спиновых и электромагнитных волн в системе латеральных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. С помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии показано

изменение периода пространственной перекачки гибридных электромагнитно-спиновых волн в латеральной гетероструктуре, прикладывая внешнее электрическое поле. В этом же разделе приводятся численные исследования механизмов гибридизации поперечных мод и трансформация спектров электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика.

В третьей главе автором рассмотрена многоканальная ферритовая структура, представляющая собой три параллельно ориентированных ЖИГ волновода и предложено несколько методов управления спектром дипольных спиновых волн в такой структуре, как с помощью изменения ориентации угла внешнего магнитного поля, так и использования распределённых упругих деформаций. С помощью численных и экспериментальных методов показана трансформация спектра спиновых волн в массиве ферритовых волноводов, изменяя угол статического внешнего магнитного поля. Во второй части главы предложена новая конфигурация синтетической мультиферроидной структуры, реализующая процессы распределённых упругих деформаций. Выявлены механизмы управления дипольной связью спиновых волн путем создания упругих деформаций, локализованных в области максимумов напряженности электрического поля.

В заключении были отмечены основные выводы диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертационной работы на мой взгляд являются следующие.

1. Показана возможность управления запрещенными зонами в слоистых структурах магнетонный кристалл – пьезоэлектрик и изучены волноведущие свойства таких структур.
2. Показана возможность управления коэффициентом связи волн в связанных магнитных волноводах при приложении электрического поля к пьезоэлектрическому слою.
3. Разработаны методы микромагнитного моделирования распространения спиновых волн в волноводах феррит-пьезоэлектрик.

Хочется отметить, что изученные физические эффекты расширяют функциональную возможность использования рассмотренных структур в качестве базовых элементов для устройств обработки, передачи и хранения информационных сигналов, демонстрирую научную и практическую значимость диссертационной работы. Основные результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных высокорейтинговых журналах, что подтверждает новизну и достоверность полученных результатов.

В качестве вопросов и замечаний можно отметить следующие:

1. В работе автором было проведено численное моделирование трансформации спектра спин-волновых возбуждений на основе метода конечных элементов и метода конечных разностей для сравнения с полученными результатами экспериментального исследования рассмотренных структур, однако для полноты картины было бы полезно провести аналитический анализ трансформации дисперсионных соотношений для рассмотренных магнитных микроструктур.
2. В экспериментальных исследованиях по управлению спин-волновой динамикой в магнитных структурах с пьезоэлектрическим слоем, автором указано, что пьезоэлектрический слой фиксируется на магнитных волноводах при помощи клея. Как это учитывается в численном моделировании и были ли проведён анализ потерь при передаче упругих деформаций от слоя пьезоэлектрика к магнитным волноводам.
3. При рассмотрении латеральных магнитных структур, автором выбрано одно значения параметра воздушного зазора между волноводами, чем оно определено?

Указанные замечания ни в коем случае не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

В итоге считаю, что диссертационная работа Грачева Андрея Андреевича представляет собой решение актуальной и новой радиофизической задачи по поиску методов управления спектром спиновых волн в поперечно-ограниченных магнитных волноводах и магнитных кристаллах. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика. Автореферат правильно отражает её содержание.

Основные результаты по теме диссертации изложены в статьях, в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus: Physical Review Letters, Physical Review Applied, Applied Physics Letters, Журнал Теоретической и Экспериментальной физики и т.д. Результаты исследований апробированы на международных и всероссийских научных конференциях.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научно-исследовательских и производственных организациях, образовательных учреждениях, сферой деятельности которых являются исследования спиновых волн в различных структурах, а также производство устройств, работающих с их использованием.

С учётом вышесказанного считаю, что диссертационная работа Грачева Андрея Андреевича вносит вклад в развитие современных представлений о динамике спин-волновых взаимодействий в массивах поперечно-ограниченных волноводящих магнитных

структур. Работа в полной мере удовлетворяет всем требованиям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Грачев Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук (01.04.03 - Радиофизика),
профессор кафедры физической электроники и технологии
Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета
им. В.И. Ульянова (Ленина),



Устинов А.Б.

03.12.2021

Подпись Устинова А.Б. удостоверяю:
Ученый секретарь совета СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Устинов Алексей Борисович

адрес: 197376, С.-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5, СПбГЭТУ

телефон: 8(812)2349983

e-mail: ustinov-rus@mail.ru

