



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук**

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

ИНН 7802072267/КПП 780201001
ОКПО 02698463
ОГРН 1037804006998

ОТЗЫВ

официального оппонента **Калашниковой Александры Михайловны**

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

Исследование спин-волновых явлений в тонкоплёночных ферромагнитных структурах представляет фундаментальный интерес для понимания процессов распространения и преобразования волн в средах с распределенными неоднородностями – в периодических, модулированных и дискретных средах. Одной из важных задач, как фундаментальных, так и технологических, является разработка одиночных и связанных массивов волноводов для спиновых волн, характеризующихся значительными длинами распространения волн и возможностью управления их свойствами. Диссертационная работа Грачева А.А. посвящена поиску и рассмотрению ряда методов управления спин-волновой динамикой в одиночных и латеральных мультиферроидных гетероструктур на основе микроразмерных волноводов из железо-иттриевого граната (ЖИГ). В качестве методов упарвеления автором были выбраны сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические нагрузки.

Диссертационная работа характеризуется хорошо понятной внутренней логикой и вертикальной интеграцией, а исследования, включенные в нее, связаны друг с другом и включают последовательное усложнение исследуемых структур и расширение их функциональности. Для решения поставленных задач используется комбинация радиофизических измерений, методики мандельштам-бриллюэновской спектроскопии и численных методов моделирования механических, электромагнитных и спин-волновых свойств гетероструктур. Такая комбинация позволила соискателю получить достоверные результаты и на их основе сделать обоснованные выводы и сформулировать научно-значимые положения.

В диссертационной работе соискателем рассмотрено несколько конфигураций синтетических магнитоэлектрических и мультиферроидных структур. В одиночном магнетонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем и двух параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них, соискатель продемонстрировал возможность индуцированного внешним электрическим полем управления пространственными и передаточными характеристиками дипольных спиновых волн. Также соискателем проведено исследование процессов распространения гибридных электромагнитных спиновых волн в латеральной системе параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. Экспериментально продемонстрировано управление спектром дипольных спиновых волн, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ волноводов. Показано управление характеристиками этой связи за счет изменения угла относительно главных осей геометрии структуры, под которым приложено статическое внешнее магнитное поле.

Следует отметить, что рассмотренные в работе синтетические магнитоэлектрические и мультиферроидные гетероструктуры имеют потенциал для разработки на их основе класса устройств обработки информации - направленных СВЧ ответвителей и делителей сигнала, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем. Таким образом, тема диссертационной работы Грачева А.А., поставленные задачи и полученные результаты 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.

Во **введении** приведена детальная информация о современном состоянии в области магноники, цели диссертационной работы, актуальности, научной и практической значимости работы, личном вкладе автора, апробации и достоверности полученных результатов.

Первая глава посвящена выявлению закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в одиночной гетероструктуре из магнетонного кристалла с пьезоэлектрическим слоем, размещенном на нем, а также в латеральной структуре и двух таких кристаллов с пьезоэлектрическим слоем, размещенном на одном из них. Выявлены закономерности управления спектром дипольных спиновых волн в гетероструктуре, образованной из магнетонного кристалла с пьезоэлектрическим слоем. Радиофизическим методом исследования выявлена 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 кристаллов. Показано частотное смещение полос непропускания и изменение их ширины для спиновых волн при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою. Данные явления связаны с деформациями в пьезоэлектрическом слое и индуцированными ими изменениями внутреннего магнитного поля в ферритовом волноводе за счет явления обратной магнитострикции.

Во второй главе экспериментально продемонстрировано эффективное управление связью и периодом пространственной перекачки гибридных электромагнитно-спиновых волн в системе латеральных синтетических мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. Расчеты характеристик распространения гибридных электромагнитно-спиновых волн в латеральной мультиферроидной структуре конечной ширины показывают, что энергетический обмен между пленками обусловлен особенностями межмодовой связи волн. Исследованы механизмы гибридизации поперечных мод и трансформация спектров электромагнитных спиновых волн в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика.

Третья глава посвящена демонстрации управления спектром дипольных спиновых волн, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ-микроволноводов с помощью изменения ориентации угла внешнего магнитного поля и влияния распределённых упругих деформаций. Экспериментально продемонстрировано управление спектром дипольных спиновых волн, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ-микроволноводов. Показано управление характеристиками этой связи, за счет изменения угла приложения статического внешнего магнитного поля относительно главных осей геометрии. С помощью микромагнитного моделирования получены спектры прохождения спиновых волн в латеральной структуре. Анализ этих спектров показал, что латеральные микроволноводы могут использоваться как функциональный элемент в планарных магнетонных сетях - как направленный ответвитель, спин-волновой мультиплексор или микроволновый делитель мощности. Также предложен и продемонстрирован метод управления дипольной спин-волновой связью в латеральном массиве ферромагнитных полосок с помощью распределённых упругих деформаций. В качестве экспериментальной демонстрации исследованных физических процессов предложена конфигурация магнетонной структуры с пьезоэлектрическим

слоем. Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленная деформацией пьезослоя и эффектом обратной магнитострикции в ЖИГ-микроволноводах.

В заключении перечислены основные выводы диссертационной работы.

Наиболее важные результаты диссертационной работы на мой взгляд можно обобщить следующим образом:

1. Выявлены закономерности распространения дипольных спиновых волн в гетероструктурах, образованных однородными и структурированными (магнетонными кристаллами) волноводами на основе пленок ЖИГ и пьезоэлектрических или сегнетоэлектрических слоёв. Численно и экспериментально показана трансформация свойств распространения и амплитудно-частотных характеристик дипольных спиновых волн при изменении величины внешнего электрического поля.
2. Предложены методы управления спин-волновыми свойствами таких структур на основе явления деформации пьезоэлектрика и обратной магнитострикции изменения внутреннего магнитного поля, явления изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, а также изменения направления внешнего магнитного поля.
3. Построены модели и проведено экспериментальное исследование явлений образования связанных мод и пространственной перекачки между связанными волноводами, и показана возможность управления перекачкой за счет селективного управления свойствами отдельных волноводов электрическим полем.

Все представленные в диссертационной работе численные и экспериментальные результаты являются оригинальными и опубликованы в зарубежных высокорейтинговых журналах, включая журналы, входящие в первый квартиль, также имеются две публикации в отечественных журналах хорошего уровня, что подтверждает новизну и актуальность полученных результатов. Этот факт также подтверждает и достоверность полученных результатов и сделанных на их основе выводов.

В качестве вопросов и замечаний к работе необходимо отметить следующие:

1. Хотя научная значимость и новизна выносимых на защиту положений не вызывает у оппонента сомнений, возникает вопрос о границах применимости положений 3 и 4. Так, для какого диапазона толщин и других геометрических параметров рассматриваемых систем сделанные выводы справедливы?

2. Из данных, приведенных на Рис. 1.2 (б) следует, что компонента тензора механических напряжения S_{yy} имеет несколько разное распределение при приложении положительного и отрицательного электрического поля. С чем это может быть связано?
3. С чем связан тот факт, что в структуре, рассматриваемой в Главе 1, механическое напряжение S_{yy} в пленке ЖИГ оказывается выше, чем напряжение в пьезоэлектрике ЦТС? Следует заметить, что обратная ситуация наблюдается в структуре, рассматриваемой в главе 3 (Рис. 3.14(б)), а именно в неоднородном волноводе, рассматриваемом в этой главе, механическое напряжение выше в ЦТС. По мнению оппонента, в тексте диссертации следовало бы уделить внимание этим моментам и дать соответствующее пояснение.
4. По мнению оппонента, в работе недостаточно четко сформулировано, какова магнитная анизотропия исследуемых слоев, а для полноты картины в работе следовало обсуждать не только модуль внутреннего магнитного поля, но и его отдельные компоненты. Это, например, позволило бы упростить понимание того, чем вызвано антисимметричное влияние деформаций на внутреннее поле, т.е. то, что положительное/отрицательное электрическое поле приводит к уменьшению/увеличению внутреннего магнитного поля. Кроме того, в тексте не обосновывается справедливость того, что в моделировании изменяющееся под воздействием деформаций внутреннее поле в магнетном кристалле, рассматриваемом в Главе 1, задается как функция синуса от расстояния вдоль направления x .
5. На Рис. 11(а), вопреки утверждению соискателя, видно существенное рассогласование результатов расчета и эксперимента. Изменение ширины зоны непропускания с полем в эксперименте оказывается существенно меньше, чем в расчетах. С чем может быть связано такое расхождение?
6. Для увеличения эффективности функционирования структуры, рассматриваемой в Разделе 3.5, было проведено структурирование поверхности ЦТС, граничащей с волноводами ЖИГ. Однако из текста не вполне понятно, что за структура создавалась на поверхности ЦТС, ее параметры и за счет чего она влияла на свойства всей системы.
7. В структуре, рассматриваемой в Разделе 3.5, выявлена немонотонная зависимость длины пространственной перекачки от приложенного поля. Следует пояснить, с чем связана немонотонность.

8. В тексте работы недостаточно четко сформулировано, проводились ли расчеты распределения механических напряжений с использованием программы, разработанной соискателем, или использовались готовые программные пакеты?
9. К сожалению, текст диссертации не свободен от технических огрехов и грамматических ошибок. Так, на Рис. 2.5(б) отсутствует черный треугольник, о котором говорится в тексте на стр. 47; на стр. 84 не пропечатаны номера рисунков, на которые даются ссылки. Также следует заметить, что, согласно правилам русского языка, при написании названия методики «мандельштам-бриллюэновской спектроскопия» используются строчные буквы.

Перечисленные выше вопросы и замечания не снижают высокой оценки оппонентом научной ценности данной диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность приведенных в работе результатов и выводов.

Все результаты прошли апробацию и были представлены соискателем на российских и международных конференциях. По результатам исследований соискателем опубликовано 12 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и/или в международную базу Web of Science.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к использованию в работе научных и учебных учреждений, в которых ведутся исследования по направлению магноники, в том числе в Национальный исследовательский университет МЭИ», ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Фрязино), СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Саратов), Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург) и другие.

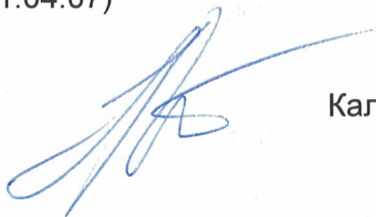
Учитывая все вышесказанное, можно заключить, что диссертационная работа Грачева Андрея Андреевича включает результаты, способствующие решению актуальной и новой радиофизической задачи по поиску методов управления спектром спиновых волн в поперечно-ограниченных магнитных волноводах и маггонных кристаллах. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика. Автореферат адекватно и в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Грачева Андрея Андреевича 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

Исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника – заведующий лабораторией физики ферроиков Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, кандидат физико-математических наук (Doctor, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands; специальность – 01.04.07)



Калашникова Александра Михайловна

Дата 03.12.2021

Почтовый адрес: 194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

Телефон: +7 812 2927963

E-mail: Kalashnikova@mail.ioffe.ru

Подпись Калашниковой А. М. заверяю

Ученый секретарь,
канд. физ.-мат. наук



М. И. Патров