

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Одинцова Сергея Александровича**  
**на тему «Распространение спиновых волн в ферритовых волноводах**  
**с распределенной связью и магнонных кристаллах»**  
**по специальностям 1.3.4 — «Радиофизика» и**  
**1.3.5 — «Физическая электроника»**

Диссертационная работа Одинцова С.А. посвящена исследованию передачи мощности и методов управления режимами распространения спиновых волн в волноводных структурах с распределенной связью и магнонных кристаллах на основе микроразмерных волноводов из железо-иттриевого граната (ЖИГ). Исследование спин-волновых явлений в тонкоплёночных структурах представляет фундаментальный интерес для понимания процессов распространения и преобразования волн в средах с распределенными неоднородностями – в периодических, модулированных непрерывно и дискретно. Одной из важных задач, как фундаментальных, так и технологических, является проектирование связанных массивов волноводов для спиновых волн, характеризующихся значительными длинами распространения, возможностью управления свойствами волн. Это связано с активной реализацией новых стратегий развития технологий по увеличению скорости передачи цифровой информации с понижением энергозатрат. С этой точки зрения одной из наиболее перспективных и активно развивающихся концепций является именно магنونика. Замена зарядового тока спиновыми волнами (током магнонов) является перспективной альтернативой для решения целого ряда проблем, связанных с миниатюризацией цифровых устройств и уменьшением энергетической диссипации в них. Для достижения наилучшего контроля над спиновыми волнами необходимо научиться максимально эффективно управлять такими основными характеристиками спиновых волн, как амплитуда, фаза и др. Возможными кандидатами для решения этой задачи являются планарные структуры на основе микроволноводов из железо-иттриевого граната, на что указывают недавние публикации в авторитетных научных изданиях, например [Nature Physics 11, 453 (2015)]. Поэтому считаю важным подчеркнуть, что рассмотренные в работе Одинцова С.А. планарные структуры на основе микроволноводов, кольцевых резонаторов и магнонно-кристаллических структур важны для создания 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 можно заключить, что проведенные Одинцовым С.А. исследования, содержание которых изложено в диссертации, соответствуют уровню и направленности мировых исследований в области СВЧ электроники, магнетизма и магноники. Актуальность и научная значимость диссертационной работы не вызывают сомнений.

Полученные Одинцовым С.А. результаты и выводы обоснованы, достоверны, новы и значимы для широкого круга специалистов в области СВЧ электроники, магнетизма и магноники как в России, так и за рубежом. В частности, особо хочется отметить проведенный в работе комплексный анализ механизмов формирования спин-волновых свойств двумерного магнетонного кристалла, изложенный в главе 4. Также к наиболее ярким результатам работы следует отнести исследование режимов работы системы микроволноводов, связанных через кольцевой резонатор, и демонстрация работы такой системы в режиме демультимплексора, изложенные в главе 3. Вообще, диссертационная работа характеризуется хорошо понятной внутренней логикой, а исследования, включенные в нее, демонстрируют последовательное усложнение исследуемых структур и расширение их функциональности.

В целом, представленная к защите диссертационная работа выполнена на высоком, современном научном уровне. Текст диссертации изложен логически и ясен для понимания. Выводы диссертации и научные положения, выносимые диссертантом на защиту, обоснованы, являются новыми и оригинальными. Для решения поставленных задач используется комбинация радиофизических измерений, методики мандельштам-бриллюэновской спектроскопии и численных методов моделирования электромагнитных и спин-волновых свойств исследуемых структур. Поэтому достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Результаты диссертации опубликованы в престижных международных научных журналах, входящих в базы цитирования Scopus и WoS, в том числе Physical Review B, Applied Physics Letters, Письма в ЖЭТФ, Journal of Magnetism and Magnetic Materials и др., а также многократно представлялись в виде докладов на всероссийских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

Несмотря на положительную оценку диссертационной работы в целом, считаю необходимым задать некоторые вопросы и сделать замечания к тексту диссертации, а именно:

1) В диссертации применяются два численных подхода для расчета характеристик спиновых волн: метод конечных элементов и микромагнитное

моделирование. В первом методе рассчитываются все компоненты электромагнитного поля волны, во втором – только магнитная составляющая. Однако в диссертации четко не указаны границы применимости каждого из методов и случаи предельного перехода от одного к другому, если такой имеется. В результате сложными для понимания становятся фразы, вроде «Далее рассмотрим случаи возбуждения электромагнитных волн, которые в приближении могут считаться ... магнитоэлектростатическими ...» (глава 2 на стр. 36). Какое именно приближение имеется в виду? Почему в главах 2 и 4 используются оба метода, а в главе 3 только микромагнитное моделирование? Какую новую информацию дает применение метода конечных элементов?

2) В главе 2 исследуется зависимость длины связи волноводов от безразмерного параметра  $w/d$  отношения ширины одного волновода к расстоянию между волноводами (рис. 2.2, стр. 32). При этом сам автор далее пишет (стр. 36) «Стоит отметить, что изменение ширины  $w$  оказывает большее влияние на изменение значения  $L$ , чем изменение  $d$ ». Насколько правомерно варьировать одновременно и расстояние между волноводами, и ширину, что, очевидно, меняет сам спектр спиновых волн? На это указано и во введении (стр. 6) «...уменьшение ширины волноводов приводит к расширению полосы существования МСВ...».

3) На стр. 24. автор пишет «Жёлтым регионом показана рабочая область режимов распространения спиновых волн, на базе которых возможно создание устройств спинтроники.» Чем определяются границы этой области?

4) Автор пишет (глава 2, стр. 33) «На рисунках 2.4 (а) и (б) показано распределение  $E_x$ -компоненты электромагнитного поля...» и далее «...амплитуды магнитных потенциалов в магнитных волноводах имеют одинаковую фазу...». Как соотносятся амплитуды и фазы электрического поля и магнитного потенциала волны?

5) В тексте диссертации часто встречается выражение «в ферромагнитной пленке ЖИГ» и ему подобные. Железо-иттриевый гранат является, все-таки, ферримагнетиком. Следовало бы указать в тексте, почему в представленном исследовании можно рассматривать ЖИГ как ферромагнетик. Проявлялась ли ферримагнитная природа ЖИГ в экспериментах?

6) В разделе «научная новизна», пункт 10 (стр. 12), видимо, допущен ряд опечаток в фразе « $k_x = n\pi w_m$ , где  $n$  - натуральное число, трансформируется в волны с поперечным волновым числом  $k_x = n\pi$ , где  $w_d$  - ширина канала.». Скорее всего должно быть « $k_x = n\pi/w_m$ » и « $k_x = n\pi/w_d$ », иначе появляется вопрос о размерностях представленных величин.



7) В целом, в тексте диссертации присутствуют опечатки и жаргонизмы, наряду с прямыми заимствованиями из англоязычной литературы: «Жёлтым регионом показана...», «Коэффициент демпфирования», «Подсчитанная дисперсионная характеристика», «методом микромагнитного моделирования<sup>32</sup>», аббревиатура «МБС» чередуется с «БЛС», и др.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы и не умаляют значимости полученных научных результатов.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и ценности полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Считаю, что соискатель Одинцов Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.4. – «Радиофизика» и 1.3.5. – «Физическая электроника».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Физики ферроиков ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Хохлов Николай Евгеньевич



Контактные данные:

тел.: +7 (981) 123-5771, e-mail: n.e.khokhlov@mail.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.03 – Радиофизика

Адрес места работы: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, <http://www.ioffe.ru>

Тел.: 8 (812) 292-79-63; e-mail: post@mail.ioffe.ru

Подпись сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Хохлова Н.Е. удостоверение

ученый секретарь,

канд. физ.-мат. наук



М. И. Патров