



УТВЕРЖДАЮ

Директор

Фирсова В.А. Котельникова РАН

доктор физ.-мат. наук

Литвиненко А.И.

13» июля 2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук на диссертацию Литвиненко Артема Николаевича «Спин-волновые и магнитоакустические возбуждения в многослойных феррит-диэлектрических структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Исследование характеристик спин-волновых и магнитоакустических возбуждений в многослойных структурах на основе ферритовых пленок представляет в настоящее время одно из важных развивающихся направлений на стыке радиофизики, физики магнитных явлений и твердотельной электроники сверхвысоких частот (СВЧ). Актуальность этих исследований связана, прежде всего, с созданием новых устройств и элементной базы для твердотельной электроники СВЧ, поскольку, как известно, устройства, использующие спин-волновые и магнитоакустические возбуждения обладают рядом замечательных свойств: невзаимностью, легкостью возбуждения, небольшим затуханием, и, кроме того, характеристиками и параметрами волн в этих устройствах можно управлять с помощью внешнего магнитного поля и различных нагрузок.

Хотя спиновым волнам и связанным с ними различным возбуждениям посвящено множество исследований, многие вопросы, связанные с возбуждением обменных спиновых волн (ОСВ), разработкой различных спин-волновых устройств и их термостабилизацией, до сих пор остались нерешенными. Практическое решение каждого из этих вопросов представляет собой очередной шаг вперед в нелегком деле создания элементной базы для твердотельной электроники СВЧ. Именно поэтому диссертационная работа Литвиненко А.Н., посвященная исследованиям характеристик спиновых и магнитоакустических волн в многослойных ферритовых структурах, является **актуальной** как в фундаментальном, так и в прикладном плане. В этой работе экспериментально доказана возможность использования высокочастотных магнитоакустических резонаторов для создания высокостабильных генераторов СВЧ, предложен способ решения проблемы термостабилизации таких устройств, а также теоретически обоснован и реализован в эксперименте способ эффективного возбуждения в СВЧ диапазоне ОСВ с длиной волны меньше 1 мкм.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 120 страницах, содержит 67 рисунков и список литературы из 116 наименований. Диссертация аккуратно оформлена, грамотно написана и хорошо проиллюстрирована. Использование большого количества рисунков позволило Литвиненко А.Н. в ясной и доступной форме изложить полученные результаты, представляющие несомненный интерес для специалистов в области радиофизики, радиолокации, навигации и связи. В работе представлен подробный обзор предшествующих и близких по тематике исследований, показано место диссертации в спин-волновой электронике СВЧ и

радиофизике, четко сформулированы выводы к главам. В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе. Среди наиболее значимых **новых результатов**, полученных в работе, можно выделить следующие:

1. Показано, что в пленках железиттриевого граната (ЖИГ) возникает эффективное возбуждение ОСВ, если пленка содержит тонкий (сравнимый по толщине с длиной ОСВ) слой с пониженной намагниченностью (то есть, фактически пленка должна быть двуслойной). Это положение в работе обосновано теоретически и доказано в экспериментах на пленках ЖИГ, в которых такой слой неизбежно возникает на границе пленка-подложка при эпитаксиальном росте пленок ЖИГ. В таких двухслойных пленках обнаружено эффективное возбуждение и распространение ОСВ, сравнимое с тем, что наблюдалось ранее в имплантированных пленках ЖИГ при касательном намагничивании. Факт наблюдения в экспериментах обменных волн подтвержден тем, что в непрерывном режиме в спектре прямых объемных магнитостатических волн наблюдались серии дипольно-обменных пиков. При этом, чтобы исключить возможность возбуждения ОСВ другими способами, диссертантом экспериментально была доказана однородность пленки ЖИГ по толщине, а также была выполнена предварительная полировка пленки ЖИГ (с целью предотвращения возникновения тонкого легированного слоя на внешней поверхности пленки).

2. Показана возможность создания высокостабильных опорных генераторов СВЧ на основе высокодобротных магнитоакустических ЖИГ резонаторов, что является важным шагом в направлении применения устройств спин-волновой электроники на практике. Магнитоакустические резонаторы были разработаны на основе эффекта гибридизации магнитостатических волн с акустическими модами Лэмба («быстрые» магнитоупругие волны). Поскольку для стабильной работы автогенератора требовалось выделить одну частоту из сетки частот магнитоакустического резонанса, автором был предложен способ селективного возбуждения магнитоакустических резонансов в полосе частот пленочного ЖИГ резонатора, причем плавная перестройка ЖИГ резонатора обеспечивала возможность дискретной перестройки частоты магнитоакустического резонатора. С помощью метода бриллюэновского рассеяния света (БРС) исследовано пространственное распределение связанных магнитных и упругих колебаний в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ при ее касательном намагничивании. На основе измерений S_{11} -параметров рассчитаны нагруженные и собственные добротности магнитных и акустических резонансов, а также коэффициенты связи магнитного и акустического резонаторов.

3. На основе программ компьютерного проектирования выполнено моделирование магнитоакустического ЖИГ генератора. Для этого автором построена эквивалентная модель магнитоакустического ЖИГ резонатора на сосредоточенных элементах электрической цепи, причем адекватность указанной модели подтверждена на основе хорошего совпадения экспериментальных и расчетных S -параметров. Кроме того диссертантом смоделирована работа двухпортового магнитоакустического ЖИГ резонатора, включенного в кольцевую схему автогенератора с активным широкополосным усилителем. В результате моделирования получены временные и спектральные характеристики генерируемого сигнала и рассчитаны фазовые шумы, уровень которых был достаточно низким (менее -136 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц).

4. Решена проблема температурной стабильности магнитоакустического ЖИГ генератора. Поскольку наиболее нестабильным элементом этого генератора является пленочный ЖИГ резонатор (частота которого сильно зависит от температуры окружающей среды), в работе исследована возможность термокомпенсации дрейфа частоты ЖИГ резонатора за счет теплового размагничивания постоянных магнитов. В итоге автором предложена конструкция портативной экранированной магнитной системы со встроенной системой термостабилизации и электрической перестройкой частоты. При

испытаниях данной магнитной системы стабилизация частоты резонатора составила $0.07\text{МГц}/^\circ\text{С}$, что эквивалентно поддержанию температуры с точностью $\sim 0.01^\circ\text{С}$. Следует отметить, что предложенная система термостабилизации отличается простотой настройки, не усложняет конструкцию магнитной системы и не увеличивает ее габариты, причем электрическая перестройка частоты резонатора не нарушает условия термостабилизации. Аналогичные результаты термостабилизации частоты были получены при испытании транзисторного ЖИГ генератора, размещенного внутри экрана магнитной системы.

Достоверность научных результатов диссертационной работы основана на использовании современных экспериментальных методов с известным уровнем точности, а также согласием экспериментальных результатов с теоретическими моделями и данными, которые получены надежными методами, неоднократно применявшимися в науке и технике.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что исследованные в диссертации явления могут быть использованы для создания новых устройств твердотельной электроники СВЧ. В частности, принципиально важным достижением данной работы является разработка высокостабильного генератора СВЧ на основе высокочастотных магнитоакустических ЖИГ резонаторов. Данное устройство характеризуется низким уровнем фазовых шумов, хорошей термостабилизацией и по совокупности параметров вполне может не только конкурировать с известными аналогами, но и превзойти их. Эффективное возбуждение обменных спиновых волн, исследованное в работе, также может быть полезным как для разработки устройств наноэлектроники, работающих на длинах волн меньше 1 мкм , так и для диагностики структуры и параметров эпитаксиальных пленок ЖИГ и различных слоев в их составе.

По работе имеются следующие **замечания**.

1. Из текста и выводов первой главы работы не ясно, получил ли какие-нибудь новые теоретические результаты автор с помощью магнитомеханического подхода и можно ли из теоретического описания обменных волн сделать вывод, подтверждающий высокую эффективность преобразования энергии магнитостатических волн в обменные.
2. Во второй главе не объясняются наблюдаемые в эксперименте различия в пространственном распределении магнитных и упругих колебаний.
3. Некоторые выводы в конце глав диссертации практически не несут смысловой нагрузки и их можно было бы без ущерба изъять из текста работы или же объединить с другими выводами (см., например, первый вывод из раздела 1.8).
4. В работе встречаются некорректные, неудачные и не являющиеся общепринятыми научные термины. Например: «вектор прецессии» (с. 5, 14), «...смещение нижних частот отсечки закона дисперсии...» (с. 22), «...квадратичного уравнения Ландау-Лившица...» (с. 19), «магнитомеханический подход» (с. 14, 48).
5. В работе встречаются стилистические и орфографические ошибки, неудачные фразы и обороты. Например: «Современные тенденции развития систем радиолокации, навигации и связи проявляются в продвижение в область более высоких частот» (с. 3), «механизм закрепления спинов оставался не до конца невыясненным» (с. 5), «дисперсия нулевой моды приобретала положительным наклоном» (с. 23) и др.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают высокой оценки диссертации.

Работа в представленном виде представляет собой законченное исследование, имеющее важное прикладное значение. В процессе выполнения работы диссертант продемонстрировал свободное владение методами экспериментальных исследований, современными методами компьютерного моделирования и численных расчетов, что свидетельствует о высокой квалификации автора.

В целом диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, из них 3

статьи в научных журналах рекомендованных ВАК, 12 работ в трудах международных и всероссийских конференциях, получен 1 патент Российской Федерации на изобретение. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях. Автореферат и опубликованные работы адекватно отражают содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования на предприятиях электронной промышленности, включая ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазатрон», г. Саратов, ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино Московской области, ОАО «НПО «НИИДАР» г. Москва, ОАО «ЦНИИИА» г. Саратов и др.

На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа Литвиненко А.Н. «Спин-волновые и магнитоакустические возбуждения в многослойных феррит-диэлектрических структурах» соответствует критериям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Отзыв составили:

Заведующий лаборатории
исследования СВЧ свойств
ферромагнитных материалов,
доктор физ.-мат. наук

 Э.Г. Локк

Ведущий научный сотрудник лаборатории
исследования СВЧ свойств
ферромагнитных материалов,
доктор физ.-мат. наук

 С.В. Герус

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-квалификационного семинара по направлениям «Физика магнитных явлений и магнитоэлектроника» ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (протокол № 17 от «13» июля 2015 года).

адрес: 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского д.1
Телефон: +7(496)5652685
e-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru