

На правах рукописи



ТУН ТУН ЛИН

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ МАГНИТНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЁНКАХ  
ОТНОСИТЕЛЬНО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Шагаев Владимир Васильевич**

**Официальные оппоненты:** **Головнев Юрий Филиппович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»,  
профессор кафедры общей и теоретической физики

**Никифоров Дмитрий Константинович,**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, Калужский филиал  
ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», заместитель директора по научной работе

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

Защита состоится « 19 » июня 2019 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент



Лоскутов Сергей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из наиболее востребованных направлений современной физики твердого тела является физика ферритов. Ферритовые устройства давно и успешно используются в радиолокации и в радиоэлектронике. Важным этапом в развитии ферритовых технологий стало создание технологии выращивания ферритовых пленок на монокристаллических парамагнитных подложках (1960-е, 1970-е годы). Накопленные результаты теоретических, технологических и конструкторских исследований привели к появлению научно-технического направления, получившего название «спин-волновая электроника» (в англоязычной литературе «magnetostatic wave technology»). Было выяснено, что функциональные возможности спин-волновых устройств такие же, как и у предшествующих им устройств акустоэлектроники, но, в отличие от последних, ферритовые устройства могут применяться на частотах диапазонов СВЧ и КВЧ. Наиболее подходящими материалами для изготовления пленочных элементов могут быть ферриты, обладающие следующими свойствами: слабым затуханием магнитных возбуждений и достаточно высокой температурой магнитного упорядочения (температурой Кюри). Кроме того, ферриты, используемые в устройствах верхней части диапазона СВЧ и диапазона КВЧ, должны обладать большими намагниченностями и полями кристаллографической магнитной анизотропии. В настоящее время перспективными для разработок пленочных устройств считаются три группы материалов: ферриты-гранаты, ферриты-шпинели и гексаферриты. Однако наибольшее практическое применение нашли лишь феррогранаты.

Ферритам присуща сильная зависимость их магнитных параметров от температуры и от химического состава. Из-за этого ферритовые приборы не имеют стабильных эксплуатационных характеристик, что особенно важно для частотно-избирательных устройств. Предлагаемые способы борьбы с данным недостатком, как правило, связаны с усложнением конструкции устройств, например, с использованием термостатов и термокомпенсирующих намагничивающих систем. В диссертации развит другой подход к решению проблемы стабилизации. Подход основан на выборе таких условий формирования колебаний и волн, при которых их частоты слабо реагируют на изменения намагниченности и поля анизотропии феррита. Именно эти параметры наиболее сильно зависят от температуры и от химического состава, и, следовательно, указанный выбор дает возможность повысить стабильность частотных характеристик устройств. Известны работы, в которых данный подход позволил повысить термостабильность устройств на поверхностных МСВ (ПМСВ). Однако к началу проведения диссертационных исследований не было публикаций, решающих проблему стабилизации частот магнитных колебаний при влиянии сразу двух дестабилизирующих факторов – температуры и химического состава.

Таким образом, разрабатываемые в диссертации вопросы представляют общефизический интерес, так как способствуют более глубокому пониманию связи между материальными параметрами пленочного феррита и характеристиками магнитных возбуждений. Вместе с тем тема диссертации направлена на поиск новых возможностей в решении задачи по повышению стабильности спин-волновых устройств.

**Целью диссертационной работы** является исследование влияния размагничивающего поля и поля кристаллографической магнитной анизотропии ферритовой пленки на частоты собственных магнитных колебаний и волн и поиск условий для стабилизации этих частот.

В соответствии с поставленной целью **основными задачами** диссертационного исследования являются:

1. Построение математических моделей ферритовых пленок, позволяющих оценивать влияние кристаллографической ориентации пленки и ориентации намагничивающего поля на законы дисперсии МСВ.

2. Вывод расчетных соотношений, связывающих изменение частот магнитных колебаний и волн в пленках с изменениями их материальных магнитных параметров.

3. Анализ условий термостабилизации частот ПМСВ в пленках кубических ферритов, основанный на взаимной компенсации температурных изменений намагниченности и поля магнитной анизотропии.

4. Анализ условий стабилизации частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) в пленках кубических ферритов с возможностью отдельной стабилизации относительно изменения намагниченности и поля анизотропии и основанный на выборе кристаллографической ориентации пленки и ориентации намагничивающего поля.

5. Опробование метода двойной стабилизации в пленках галлий-замещенного железиттриевого граната (ЖИГ) путем расчета оптимальной кристаллографической ориентации пленки и ориентации намагничивающего поля относительно пленки. Критерием оптимальности является стабильность частоты ФМР при изменении температуры пленки и концентрации галлия в линейном по данным параметрам приближении.

6. Расчет компонент тензора эффективных размагничивающих факторов кубической анизотропии с учетом второй константы анизотропии, и уточнение уравнений радиоспектроскопического метода определения магнитных параметров ферритовых пленок – метода частотно-полевых зависимостей.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Выполнен анализ температурного коэффициента частоты поверхностной МСВ для пленок кубического феррита, ориентированных вдоль кристаллографических плоскостей симметрии. Определены условия достижения нулевого значения коэффициента.

2. Определены принципы выбора кристаллографической ориентации пленок кубического феррита с возможностью повысить стабильность частот

магнитных колебаний и волн относительно изменения сразу двух магнитных параметров – намагниченности и поля кристаллографической магнитной анизотропии.

3. Уточнены расчетные соотношения радиоспектроскопического метода определения магнитных параметров ферритовых пленок, основанного на зависимости частот спектра ПМСВ от напряженности намагничивающего поля.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель плёнки кубического феррита, ориентированной вдоль плоскости кристаллографической симметрии и намагниченной касательно; соотношения между материальными параметрами феррита, определяющие возможность термостабилизации частот поверхностной магнитостатической волны в таких плёнках.

2. Методы стабилизации частот магнитно-дипольных колебаний и волн в плёнке кубического феррита относительно изменений намагниченности и поля кристаллографической магнитной анизотропии; вывод о возможности использования двух подходов – либо с взаимной компенсацией вкладов в изменение частоты, связанных с изменениями магнитных параметров, либо с обращением в ноль каждого из вкладов.

3. Результаты моделирования пленок галлий-замещенного железоиттриевого граната, обладающих повышенной стабильностью частоты ферромагнитного резонанса относительно изменений температуры и концентрации замещающей примеси.

4. Метод определения магнитных параметров плёнок кубических ферритов, основанный на зависимости частот поверхностных МСВ от напряженности намагничивающего поля и учитывающий в законах дисперсии МСВ две константы кубической магнитной анизотропии.

### **Методология и методы исследования.**

Теоретические исследования основаны

– на математических моделях МСВ, в которых учтено влияние на законы дисперсии кристаллографической магнитной анизотропии феррита;

– на расчете поправок к законам дисперсии МСВ и к частотам ФМР, обусловленных изменением материальных магнитных параметров феррита и напряженности намагничивающего поля.

Учет влияния кристаллографической магнитной анизотропии феррита на частоты магнитных колебаний и волн в разработанных моделях осуществлялся с помощью компонент тензора эффективных размагничивающих факторов.

Экспериментальные измерения законов дисперсии МСВ были выполнены с помощью интерферометра спиновых волн. Амплитудно-частотная характеристика интерферометра состоит из чередующихся максимумов и минимумов, в которых были определены значения волнового числа и соответствующие им значения частоты МСВ.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы** состоит в том, что в процессе ее выполнения:

1. Построены математические модели ферритовых пленок, позволяющие прогнозировать влияние кристаллографической магнитной анизотропии на частотные характеристики магнитных колебаний и волн.

2. Предложен и обоснован метод стабилизации частотных характеристик магнитных колебаний и волн в ферритовых пленках относительно изменения значений их магнитных параметров. Установлена высокая эффективность метода при его применении к пленкам галлий-замещенного ЖИГ, в которых частотная нестабильность связана с зависимостью параметров от температуры и от концентрации галлия.

3. Уточнены уравнения метода определения магнитных параметров ферритовых пленок с кубической магнитной анизотропией. Рассчитаны поправки к соотношениям метода частотно-полевых зависимостей, учитывающие вторую константу анизотропии.

Научные выводы диссертации могут быть использованы в спин-волновой электронике при проектировании устройств с повышенной стабильностью частотных характеристик.

**Степень достоверности полученных результатов.** Постановка задач отражает современные представления о природе ферритов и магнитных явлений в них. Построенные в диссертации математические модели основаны на использовании признанных в научном сообществе физических закономерностей и выполнении корректных математических расчетов. Полученные в диссертации результаты согласуются с результатами известных и часто цитируемых экспериментальных исследований. Основные результаты диссертации были изложены в статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, а также были доложены и обсуждены на научно-технических конференциях.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на ряде конференций: 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> International Scientific Conference on radiation-thermal effects and processes in inorganic materials, RTER 2014 (Tomsk, 2014 г.) и RTER 2015 (Tomsk, 2015 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (Калуга, 2015 г., 2016 г.; 2017 г.); Региональных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (Калуга, 2016 г.; 2017 г.; 2018 г.); XXVI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 14 печатных работ, в том числе 7 статей в научных журналах из перечня ВАК РФ и 7 тезисов к докладам на научно-технических конференциях. Три статьи индексируются в базах данных SCOPUS и WoS.

**Личный вклад.** Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Соискателем лично проанализировано влияние магнитной кристаллографической анизотропии ферритовой пленки на спектры магнитостатических волн. В опубликованных работах, выполненных с соавторами, диссертант участвовал в проведении расчетов и оформлении рисунков, обсуждении и редактировании текстов.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования. Общий объем работы составляет 131 страницу машинописного текста, включая 44 рисунка и 4 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность избранной темы, степень ее разработанности; сформулированы основные цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту; изложены методология и методы диссертационного исследования, степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе** изложены основные сведения, использованные для разработки темы диссертации. Приведен краткий обзор состояния теории МСВ и применений МСВ в электронике. Обсуждены физические свойства ферритов, наиболее пригодных в качестве среды распространения МСВ. Сделан вывод о том, что основными факторами нестабильности является зависимость параметров феррита от температуры и от химического состава. Оба фактора проявляются в процессе производства и эксплуатации устройств. Причем основные усилия разработчиков были направлены на повышение термостабильности, а способы преодоления нестабильности, обусловленной отклонением химического состава ферритовых пленок от предполагаемого, вообще не рассматривались.

Сделан вывод о перспективности развития методов повышения стабильности, основанных на анизотропных свойствах феррита, и поставлена задача повышения стабильности характеристик МСВ при влиянии сразу двух дестабилизирующих факторов.

**Во второй главе** представлены результаты исследований влияния кристаллографической магнитной анизотропии на характеристики МСВ. Построена теория спектров МСВ в пленках с магнитной анизотропией и выполнен анализ температурных коэффициентов частот МСВ.

Учет влияния кристаллографической магнитной анизотропии на динамику намагниченности осуществлялся с помощью тензора эффективных размагничивающих факторов. Выведены и проанализированы законы дисперсии МСВ в геометрии перпендикулярного и касательного намагничивания ферритовой пленки. Пример спектра, рассчитанного по

выведенным соотношениям, приведен на Рис. 1, где  $f$  – частота МСВ,  $k$  – волновое число,  $d$  – толщина пленки. Объемные типы волн характеризуются многомодовостью (номера первых нескольких мод обозначены буквой  $n$ ), причем дисперсионная зависимость главной моды прямой объемной МСВ ( $n = 0$ ) плавно переходит в дисперсионную зависимость ПМСВ.

Сравнительная оценка интервалов частот, занимаемых объемными волнами и поверхностной волной, выглядит следующим образом:

$$\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_\infty^2 - f_0^2} = \frac{16\pi\sqrt{(N_{xx}^a - N_{yy}^a)^2 + (2N_{xy}^a)^2}}{(4\pi + N_{xx}^a - N_{yy}^a)^2 + (2N_{xy}^a)^2},$$

где  $N_{ij}^a$  – компоненты тензора эффективных размагничивающих факторов в системе координат  $xuz$  с осью  $z$ , направленной вдоль вектора равновесной намагниченности,  $z \parallel \mathbf{M}_0$ , и осью  $y$ , направленной вдоль волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Из данного выражения следует, что в пленках слабоанизотропных ферритов, когда  $|N_{ij}^a| \ll 1$ , большую часть спектра будет занимать волна поверхностного типа. Объемных типов волн с  $\mathbf{k} \perp \mathbf{M}_0$  в изотропной модели нет.

Изложены результаты детальных исследований характеристик ПМСВ в пленках кубических ферритов. Геометрические аспекты модели пленки приведены на Рис. 2, а пример результатов расчета – на Рис. 3.

В расчетах зависимостей, представленных на Рис. 3, использованы значения магнитных параметров кристаллов железоиттриевого граната при  $T = 293 \text{ К}$ :  $4\pi M_0 = 1750 \text{ Гс}$ ,  $H_c = -43 \text{ Э}$ ,  $g = 2.8 \text{ МГц/Э}$  (гиромагнитное отношение). Поле кубической анизотропии задано формулой  $H_c = K_{c1}/M_0$ , где  $K_{c1}$  – первая и наиболее существенная константа, определяющая плотность энергии кубической магнитной анизотропии. Проекция вектора напряженности намагничивающего поля  $\mathbf{H}_e$  на вектор равновесной намагниченности была

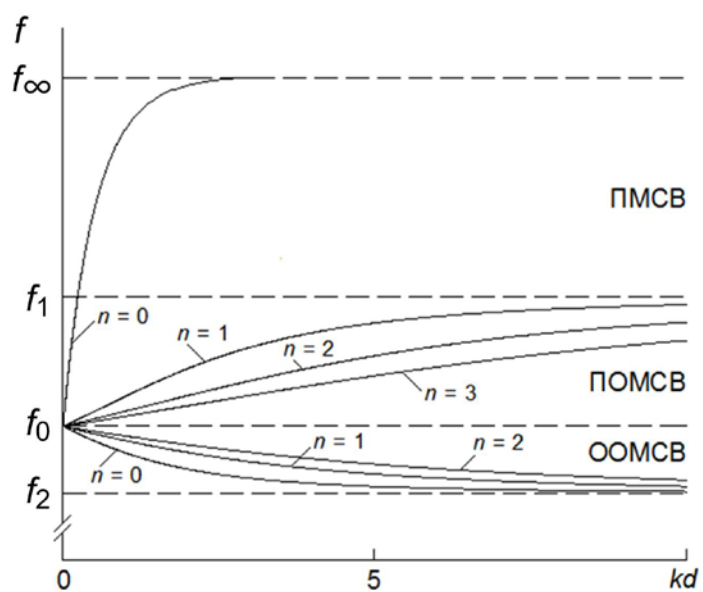


Рис. 1. Дисперсионные зависимости МСВ с волновым вектором перпендикулярным вектору равновесной намагниченности в касательно намагниченной пленке.

ПМСВ, ПОМСВ и ООМСВ – соответственно поверхностная, прямые объёмные и обратные объёмные МСВ



$H_{ez}/4\pi M_0 = 1/3$ . Кристаллографическую ориентацию пленки в модели определяет угол  $\delta$ . Анализ зависимостей частот от углов  $\delta$  и  $\psi$  показал, что в пленках кубических ферритов анизотропия спектра ПМСВ сильнее всего проявляется в пленках с ориентациями типа  $\{100\}$  и  $\{110\}$ .

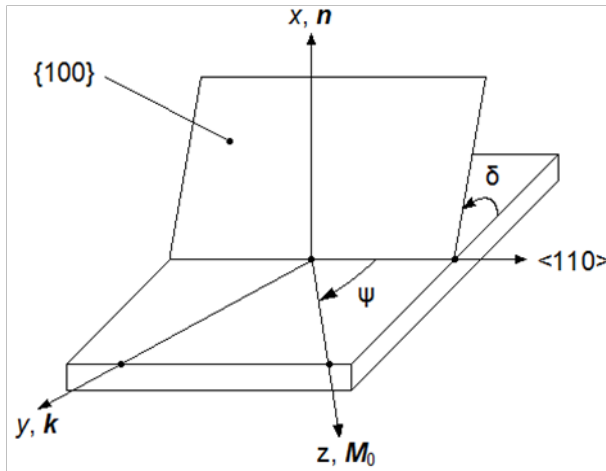


Рис. 2. Модель касательно намагниченной пленки кубического феррита

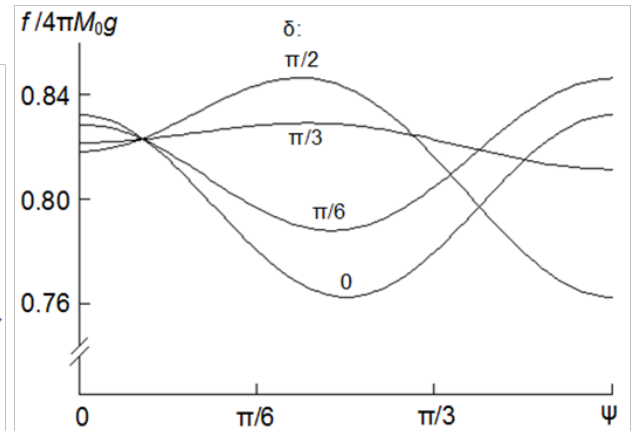


Рис. 3. Угловые зависимости частот ПМСВ с  $kd = 1$  в пленках кубического феррита. Углы  $\delta = 0$  и  $\delta = \pi/2$  соответствуют пленкам с кристаллографическими ориентациями типа  $\{100\}$  и  $\{110\}$

Предложен способ расчета температурного коэффициента частоты ПМСВ для пленок с ориентациями типа  $\{100\}$  и  $\{110\}$ . Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) задан формулой:

$$\alpha_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT},$$

причем частота соответствует фиксированному значению волнового числа. Волновое число задано конструкцией полоскового преобразователя и практически от температуры не зависит. Методика расчета ТКЧ основана на дифференцировании по температуре закона дисперсии ПМСВ, и поэтому результатом расчета будет дисперсионная зависимость  $\alpha_f(kd)$ . Особенностью методики расчета является отсутствие ограничений на значения материальных параметров пленки. Такими параметрами являются намагниченность насыщения ( $4\pi M_0$ ) и поле кубической анизотропии ( $H_c$ ) феррита, а также присущее пленкам и формируемое в процессе их роста поле одноосной анизотропии ( $H_u = 2K_{u1}/M_0$ , где  $K_{u1}$  – первая константа, определяющая плотность энергии одноосной магнитной анизотропии). В расчетах была учтена температурная зависимость всех параметров, входящих в закон дисперсии, включая угловые переменные, определяющие статическую ориентацию вектора намагниченности. Температурные производные от углов были рассчитаны на основе уравнений

магнитостатики. Примеры зависимостей  $\alpha_f(kd)$ , полученных по предложенной методике, приведены на Рис. 4. Полагалось  $f/4\pi M_0 g = 0.5$  для любого  $k$ .

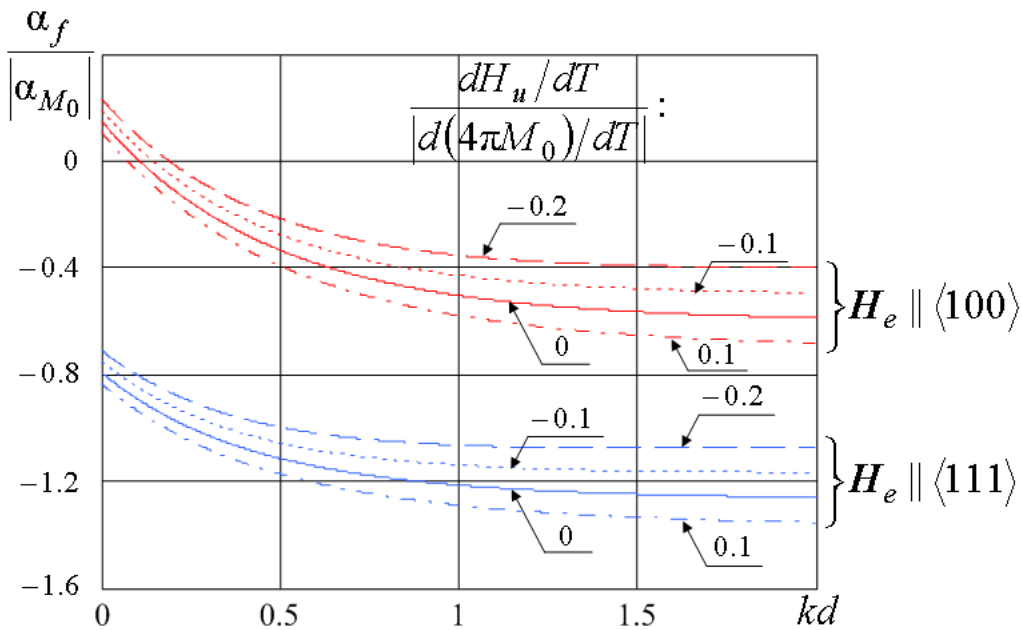


Рис. 4. Дисперсионные зависимости ТКЧ ПМСВ в плёнке кубического феррита с ориентацией типа  $\{110\}$

Для выяснения влияния на ТКЧ температурных изменений полей анизотропии полагалось  $H_c = 0$ ,  $H_u = 0$ , но  $dH_c/dT \neq 0$  и  $dH_u/dT \neq 0$ :  $dH_c/dT = 0.1|d(4\pi M_0)/dT|$ , а значения  $dH_u/dT$  (также в единицах  $|d(4\pi M_0)/dT|$ ) приведены на графиках. Нормировочный коэффициент задан формулой:

$$|\alpha_{M_0}| = \frac{1}{4\pi M_0} \left| \frac{d(4\pi M_0)}{dT} \right|.$$

Из графиков следует, что вблизи длинноволновой границы имеется интервал  $kd$ , в котором ТКЧ инвертирует знак при изменении ориентации намагничивающего поля от оси типа  $\langle 100 \rangle$  к оси  $\langle 111 \rangle$ . Следовательно, для термостабилизации частоты из этого интервала спектра нужно выбрать промежуточную ориентацию  $\mathbf{H}_e$ , для которой  $\alpha_f = 0$ .

Выполнен анализ выражений ТКЧ, направленный на поиск в спектре ПМСВ термостабильных частот. Приведены условия существования таких частот. Условия представлены в виде неравенств, выраженных через материальные параметры феррита (Таблица 1). Ограничения на параметры и их температурные производные не вводились, и поэтому результаты такого анализа могут быть применены как к существующим, так и к новым материалам.

В заключительном разделе главы выполнено сопоставление выводов разработанной теории с результатами экспериментальных исследований. Отмечено согласие выводов с опубликованных в научной литературе данными по пленкам чистого и замещенного железоиттриевого граната.

Таблица 1.  
Условия существования термостабильных частот поверхностной МСВ

Тип пленки	№	Неравенства, определяющие возможность термостабилизации частот
{110}	1	$\frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} < \frac{8}{3} \frac{dH_c}{dT} < 0, H_e < \frac{4}{3} \left[ \frac{4\pi M_{eff}  dH_c/dT }{ d(4\pi M_{eff})/dT  - (8/3)dH_c/dT} + H_c \right]$
	2	$\frac{8}{3} \frac{dH_c}{dT} < \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} < 0$
{100}	3	$\frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} < \frac{dH_c}{dT} < 0, H_e < \frac{2(4\pi M_{eff} + 3H_c)  dH_c/dT }{ d(4\pi M_{eff})/dT  +  dH_c/dT } + 2H_c$
	4	$\frac{dH_c}{dT} < \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} < 0$
{110}, {100}	5	$0 < \frac{dH_c}{dT} < \frac{1}{4} \left  \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} \right , H_e < 2 \left[ \frac{4\pi M_{eff} (dH_c/dT)}{ d(4\pi M_{eff})/dT  - 4(dH_c/dT)} - H_c \right]$
	6	$\frac{1}{4} \left  \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} \right  < \frac{dH_c}{dT}$

**В третьей главе** изложены результаты исследований, направленных на достижение стабильности частот магнитных колебаний в пленке при влиянии нескольких дестабилизирующих факторов.

Смещение частот собственных колебаний намагниченности в линейном по изменениям магнитных параметров приближении можно рассчитать по уравнению

$$\Delta f = a \cdot \Delta(4\pi M_{eff}) + b \cdot \Delta H_c, \quad (1)$$

где  $4\pi M_{eff} = (4\pi M_0 - H_u)$  – эффективная намагниченность ферритовой пленки (комбинированный магнитный параметр),  $a = df/d(4\pi M_{eff})$  и  $b = df/dH_c$ . Условие стабильности частоты выражается уравнением  $\Delta f = 0$ . Возможны два варианта достижения стабильности. Первый основан на поиске условий, обеспечивающих разные знаки слагаемых в правой части равенства (1), и тогда слагаемые частично или полностью компенсируют друг друга. Во втором, выбирают такие условия, для которых  $a = 0$  и  $b = 0$ . Тогда, в отличие от первого варианта, равенство  $\Delta f = 0$  будет выполнено

независимо от значений  $\Delta(4\pi M_{eff})$  и  $\Delta H_c$ .

Первый вариант был подробно исследован и изложен в ряде работ для случая ослабления температурной нестабильности частот магнитных колебаний. Второй вариант до начала проведения диссертационных исследований в научной литературе не был описан. С практической точки зрения данный вариант интересен тем, что позволяет стабилизировать частоту независимо от природы изменения магнитных параметров феррита. Иными словами, во втором варианте, в отличие от первого, появляется возможность ослабить влияние на ферритовый элемент сразу нескольких дестабилизирующих факторов.

В рамках диссертационного исследования найдены условия стабилизации частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) в пленке кубического феррита с наклонным намагничиванием (Рис. 5.). Частота ФМР задана формулой

$$(f_0/g)^2 = (H_{ez} + H_c p_x + 4\pi M_{eff} \cos 2\theta)(H_{ez} + H_c p_y - 4\pi M_{eff} \sin^2 \theta), \quad (2)$$

$$p_x = \frac{1}{2} [\cos 2(\theta - \delta) + 3 \cos 4(\theta - \delta)], \quad p_y = \frac{1}{8} [-3 + 16 \cos 2(\theta - \delta) + 3 \cos 4(\theta - \delta)].$$

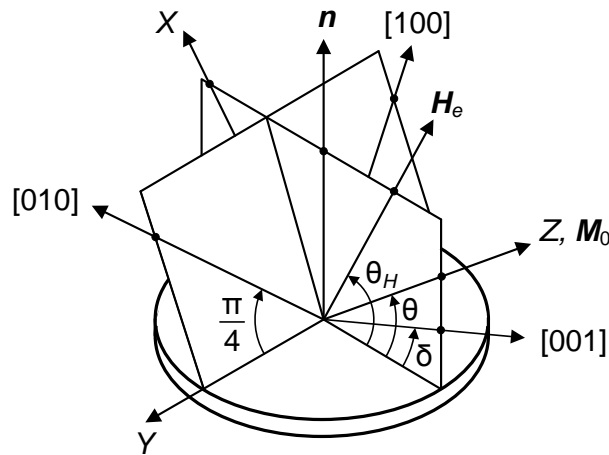


Рис. 5. Модель наклонно намагниченной плёнки кубического феррита

Нестабильность частоты связана с изменением значений параметров  $4\pi M_{eff}$  и  $H_c$ , так что для малых отклонений от исходных значений следует:

$$\Delta(f_0/g)^2 = 4\pi M_{eff} [A \cdot \Delta(4\pi M_{eff}) + B \cdot \Delta H_c].$$

Конечная цель расчётов заключалась в том, чтобы из уравнений  $A=0$ ,  $B=0$  и (2) найти значения параметров  $\delta$ ,  $\theta$  и  $H_{ez}$ , причем уравнение (2) должно быть взято со значением стабилизируемой частоты  $f_0$  и с исходными значениями  $4\pi M_{eff}$  и  $H_c$ . Искомые параметры  $\theta$  и  $H_{ez}$  связаны с экспериментально контролируруемыми параметрами  $\theta_H$  и  $H_e$  уравнениями магнитостатики, так что возможен переход к значениям  $\theta_H$  и  $H_e$ . Пример результатов расчета приведен на Рис. 6.

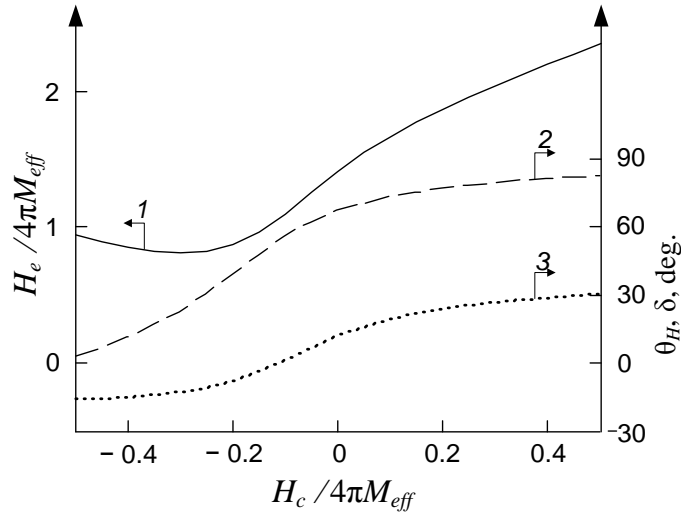


Рис. 6. Зависимости оптимальных значений  $H_e / 4\pi M_{eff}$  (1),  $\theta_H$  (2) и  $\delta$  (3) от  $H_c / 4\pi M_{eff}$  для  $f_0 = 4\pi M_{eff} g$

Рассмотренный метод стабилизации можно развить, связывая изменения  $\Delta(4\pi M_{eff})$  и  $\Delta H_c$  с конкретными дестабилизирующими факторами, например с изменением температуры и химического состава:

$$\Delta(4\pi M_{eff}) = \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} \Delta T + \frac{d(4\pi M_{eff})}{dt} \Delta t, \quad \Delta H_c = \frac{dH_c}{dT} \Delta T + \frac{dH_c}{dt} \Delta t. \quad (3)$$

Такая детализация расчета была применена к пленкам галлий-замещенного железоиттриевого граната ( $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$ ), используемым в спин-волновых устройствах нижней части СВЧ диапазона (Рис. 7, поверхность 1 слева и справа). Значения производных в равенствах (3) были определены из экспериментальных зависимостей магнитных параметров от температуры и от концентрации замещающей примеси.

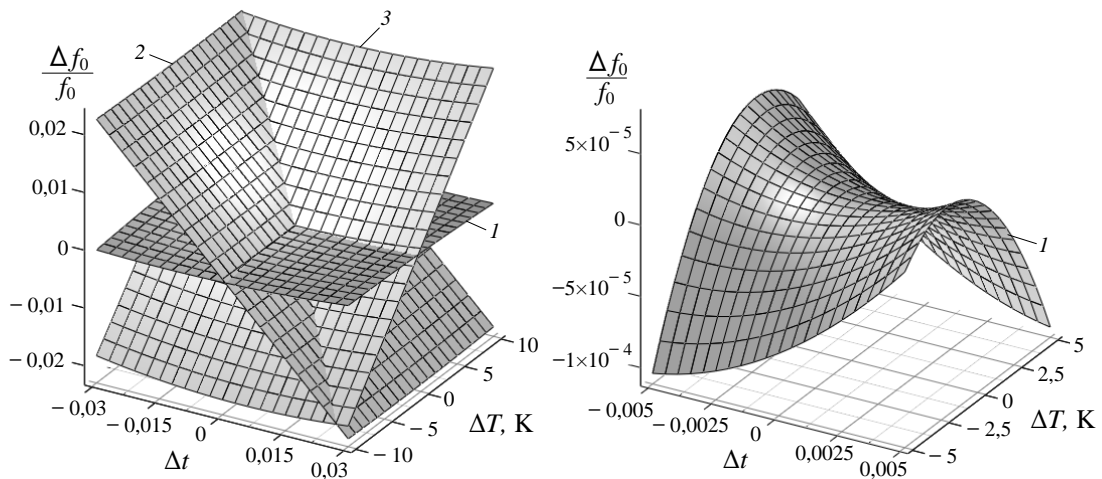


Рис. 7. Смещение частоты ФМР в пленке  $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$  с исходными значениями  $t = 0.67$  и  $T = 295$  К для трех вариантов стабилизации: 1 – относительно изменения обоих параметров  $T$  и  $t$ ; 2 – только относительно  $T$ ; 3 – только относительно  $t$

Смещение частоты вблизи исходного значения на поверхности с номером  $l$  квадратично относительно изменения обоих параметров  $T$  и  $t$ . Для сравнения выполнены расчеты, в которых стабилизация частоты осуществлялась только относительно изменения одного параметра. В этих вариантах искомыми были только значения  $\theta$  и  $H_{ez}$ , а значение угла  $\delta$  было фиксировано и соответствовало пленке с кристаллографической ориентацией типа  $\{111\}$  ( $\delta = \arcsin(1/\sqrt{3})$ ). Основу данных расчетов составили системы из уравнения  $f_0 = 4\pi M_0 g$  и одного из уравнений:

$$\frac{df_0}{d(4\pi M_{eff})} \frac{d(4\pi M_{eff})}{dT} + \frac{df_0}{dH_c} \frac{dH_c}{dT} = 0, \quad \frac{df_0}{d(4\pi M_{eff})} \frac{d(4\pi M_{eff})}{dt} + \frac{df_0}{dH_c} \frac{dH_c}{dt} = 0.$$

В этих случаях смещение частоты будет квадратичным относительно одного параметра и линейным относительно другого.

В выводах главы даны рекомендации по использованию разработанного метода для стабилизации частот МСВ.

**В четвертой главе** изложен метод определения магнитных параметров ферритовых пленок. С точки зрения темы диссертации, контроль магнитных параметров необходим для установления их зависимости от температуры и от химического состава.

Метод основан на зависимости частот МСВ от напряженности намагничивающего поля. Дан вывод расчетных соотношений метода для основных типов МСВ. Наибольший интерес представляет соотношение для поверхностной МСВ, поскольку только для этого типа волны соответствующее соотношение не зависит от волнового числа:

$$\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_{ez}^2)}{dH_{ez}} = M_0 (N_{xx}^a + N_{yy}^a - 2N_{zz}^a + 4\pi).$$

Метод был применен к пленкам кубических ферритов. Отличительной особенностью диссертационного подхода является расчет компонент тензора эффективных размагничивающих факторов  $N_{ij}^a$  с учетом как первой, так и второй констант кубической магнитной анизотропии. Расчетные соотношения были получены для пленок с кристаллографическими ориентациями типа  $\{100\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{111\}$ . Например, в  $\{110\}$ -пленках, намагниченных вдоль осей  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ , соотношения имеют вид:

$$\left[ \frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 100 \rangle} = 4\pi M_{eff} + 4H_{c1},$$

$$\left[ \frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 110 \rangle} = 4\pi M_{eff} - H_{c1} + \frac{1}{2} H_{c2},$$

$$\left[ \frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 111 \rangle} = 4\pi M_{eff} - \frac{8}{3} H_{c1} - \frac{8}{9} H_{c2}.$$

Левые части уравнений могут быть определены из экспериментальных зависимостей  $f(H_e)$ , полученных при любом значении волнового числа ПМСВ. После этого параметры  $4\pi M_{eff}$ ,  $H_{c1}$ ,  $H_{c2}$  могут быть найдены решением системы линейных уравнений.

Обсуждены экспериментальные аспекты метода: приведена схема измерительной установки (Рис. 8) и полученные с ее помощью температурные зависимости магнитных параметров пленок ЖИГ.

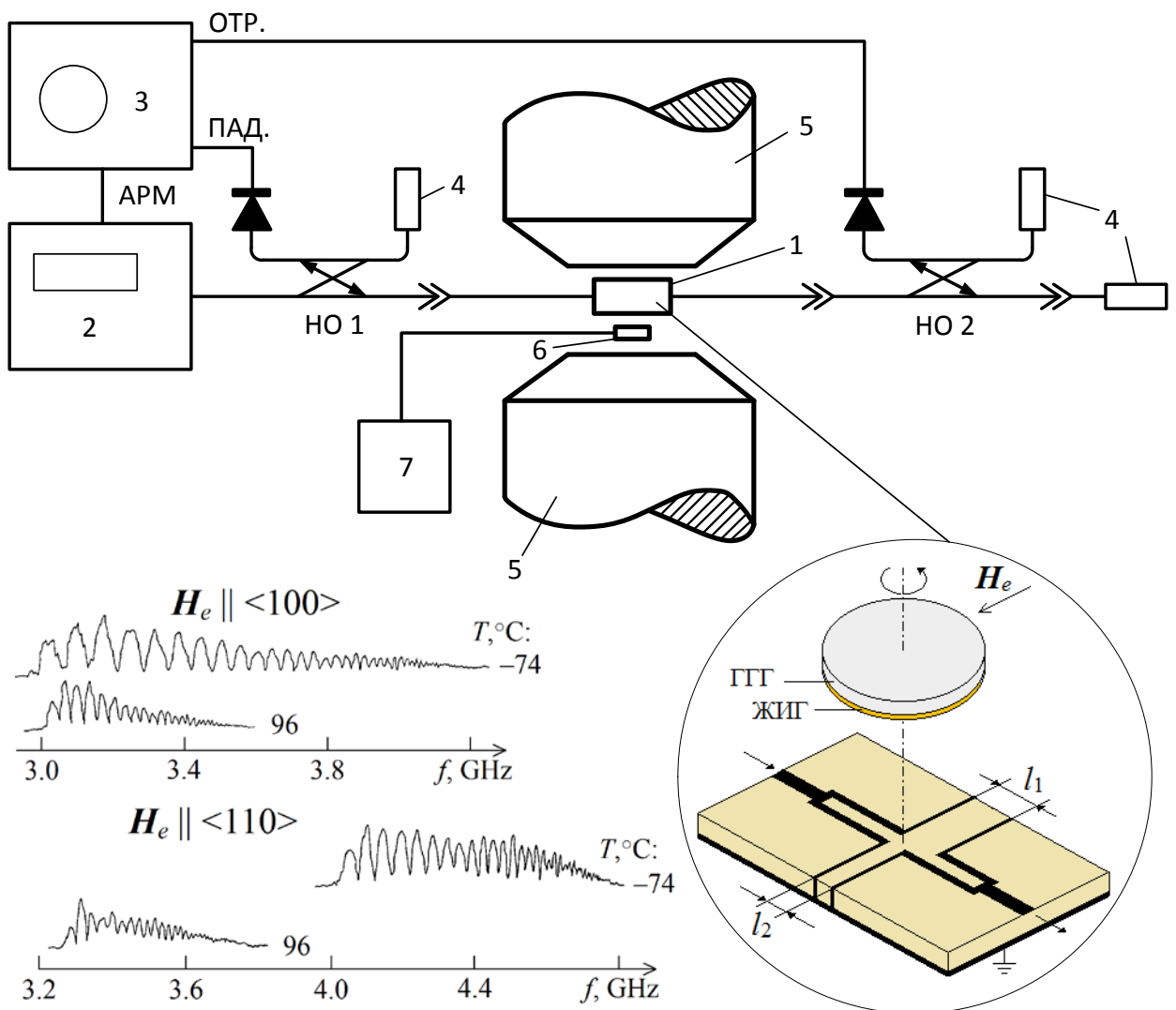


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: 1 – интерферометр спиновых волн, 2 – генераторный блок, 3 – индикаторный блок, 4 – согласованные нагрузки, 5 – электромагнит, 6 – датчик Холла, 7 – измеритель магнитной индукции. НО1, НО2 – направленные ответвители; АРМ – цепь автоматической регулировки мощности. На вставках: измерительный модуль и его АЧХ с плёнкой в ориентации  $\{100\}$ ,  $d = 9.8$  мкм,  $H_e = 593$  Э

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. Построена спин-волновая модель пленки кубического феррита, ориентированной вдоль кристаллографической плоскости симметрии. На основе этой модели определены условия, позволяющие осуществить термостабильность частот ПМСВ путем взаимной компенсации температурного изменения намагниченности насыщения и поля магнитной анизотропии феррита. Условия сформулированы в виде неравенств, выраженных через материальные магнитные параметры феррита и напряженность намагничивающего поля. Особенность модели состоит в том, что она построена без ограничений на значения параметров пленки.

2. Предложена методика расчета коэффициента нестабильности частот МСВ в ферритовых пленках, основанная на анализе зависимости законов дисперсии МСВ от намагниченности насыщения и поля кристаллографической магнитной анизотропии феррита. Особенность методики состоит в том, что в ней учтены не только изменения магнитных параметров, но и изменения углов, определяющих равновесную ориентацию вектора намагниченности. Последнее обстоятельство является важным для материалов с сильной зависимостью поля магнитной кристаллографической анизотропии от дестабилизирующих параметров.

3. Установлено, что согласованным выбором кристаллографической ориентации пленки феррита и ориентации намагничивающего поля можно существенно повысить стабильность частот магнитных колебаний и волн относительно изменения ключевых магнитных параметров феррита – намагниченности насыщения и поля кристаллографической магнитной анизотропии.

4. Для ФМР в пленках галлий-замещенного ЖИГ из условия стабильности частоты относительно изменения температуры и концентрации галлия рассчитаны оптимальные кристаллографические ориентации пленки и намагничивающего поля. В уравнении стабильности было использовано линейное приближение по изменениям температуры и концентрации. Показано, что в данном подходе изменение частоты связано с изменениями температуры и концентрации квадратичной зависимостью. Приведена методика расчета соответствующей квадратичной формы.

5. В ферритовых пленках с кубической кристаллической решеткой повышена точность определения магнитных параметров методом частотно-полевых зависимостей. Повышение достигнуто за счет учета в уравнениях метода второй константы кристаллографической магнитной анизотропии.

6. Построенные в диссертации модели ферритовых пленок имеют удобную для анализа характеристик МСВ геометрическую структуру.



Удобство заключается в возможности задавать ориентацию равновесного направления вектора намагниченности с помощью только одной угловой переменной. Вместе с тем модели охватывают широкий набор кристаллографических ориентаций пленок. Рассчитанные на основе моделей выражения для компонент тензора эффективных размагничивающих факторов могут быть использованы для инженерных расчетов МСВ-устройств, а также для прогнозирования свойств пленочных элементов этих устройств.

Предложенные в диссертации методы стабилизации частот и способы определения магнитных параметров пленочных ферритов могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих материалов спин-волновой электроники, а также для повышения стабильности частотных характеристик МСВ-устройств.

### **Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Температурные характеристики поверхностной магнитостатической волны в системе плёнка железиттриевого граната-редкоземельный магнит // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/12/text.pdf> (дата обращения 01.09.2018) (0,30 п.л./0,10 п.л.).

2. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Частотно-полевые зависимости в спектре поверхностной магнитостатической волны и их использование для определения магнитных параметров ферритовых пленок // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2015. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/16/text.pdf> (дата обращения 01.09.2018) (0,47 п.л./0,15 п.л.).

3. Shagaev V.V., Tun Tun Lin. Crystallographic features of magnetostatic waves spectra in ferrite films // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (electronic journal). 2015. Vol. 81. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/81/1/012045 (0,30 п.л./0,10 п.л.).

4. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Поверхностные магнитостатические волны в пленках кубических ферритов, ориентированных вдоль кристаллографических плоскостей симметрии // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (электронный журнал). 2015. № 5. С. 1-25. DOI: 10.7463/0515.0771109 (0,72 п.л./0,24 п.л.).

5. Shagaev V.V., Tun Tun Lin. Optimal orientations of the magnetizing field and crystal lattice of a ferrite film in spin-wave devices // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (electronic journal). 2016. Vol. 110. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012016 (0,16 п.л./0,05 п.л.).

6. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Ферритовые плёнки с повышенной стабильностью частоты ферромагнитного резонанса // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, вып. 3. С. 378-382 (англоязычная версия: Shagaev V.V., Lin T.T. Ferrite films with enhanced stability of ferromagnetic resonance

frequency // Technical physics. 2017. Vol. 62, No. 3. P. 401-405. DOI: 10.1134/S1063784217030185) (0,29 п.л./0,10 п.л.).

7. Шагаев В.В., Детюк В.И., Тун Тун Лин. Двойная стабилизация частот магнитных колебаний в ферритовых пленках // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2018. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/2/text.pdf> (дата обращения 01.09.2018) (0,49 п.л./0,16 п.л.).

8. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Поверхностные магнитостатические волны с термостабильными частотами // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции М., 2015. Т. 1. С. 156-161 (0,22 п.л./0,07 п.л.).

9. Тун Тун Лин. Метод определения магнитных параметров ферритовых плёнок по спин-волновым характеристикам // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции М., 2016. Т. 1. С. 92-96 (0,15 п.л.).

10. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Ферритовые плёнки с устойчивой к изменению магнитных параметров частотой ферромагнитного резонанса // Радиационная физика твердого тела: Труды XXVI Международной конференции М., 2016. С. 164-168 (0,13 п.л./0,04 п.л.).

11. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Метод повышения стабильности частот колебаний намагничённости в ферритовых плёнках // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции М., 2016. Т. 1. С. 162-166 (0,16 п.л./0,06 п.л.).

12. Тун Тун Лин. Кристаллографические особенности спектров магнитостатических волн // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции М., 2017. Т. 1. С. 92-97 (0,13 п.л.).

13. Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Стабилизация частоты ферромагнитного резонанса в галлий-замещённых плёнках железиттриевого граната относительно изменения химического состава и температуры // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции М., 2017. Т. 1. С. 120-123 (0,13 п.л./0,04 п.л.).

14. Тун Тун Лин. Тензор магнитной проницаемости ферритовых пленок с кристаллической структурой // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции М., 2018. Т. 1. С. 123-127 (0,19 п.л.).

Тун Тун Лин

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ  
МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЁНКАХ  
ОТНОСИТЕЛЬНО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И  
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 17.04.2019 г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1.0.  
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе  
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2.