

На правах рукописи

Литвиненко Артем Николаевич

**СПИН-ВОЛНОВЫЕ И МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В
МНОГОСЛОЙНЫХ ФЕРРИТ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» на кафедре физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Тихонов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Директор НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» МГТУ МИРЭА
Фетисов Юрий Константинович

доктор физико-математических наук,
доцент кафедры физической электроники и
технологии Санкт-Петербургского
государственного электротехнического
университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова
Устинов Алексей Борисович

Ведущая организация: Фрязинский Филиал Института Радиотехники и
Электроники им. В.А. Котельникова

Защита состоится «__» _____ 2015 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корпус 3, Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», по адресу: г. Саратов, ул. Университетская, 42

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современный этап развития твердотельной СВЧ электроники основывается на использовании коротковолновых типов возбуждений в искусственно созданных метаматериалах. В данной работе исследовались спин-волновые и магнитоакустические возбуждения в многослойных феррит-ферритовых и феррит-диэлектрических структурах. В частности исследовались обменные спиновые волны (ОСВ), которые эффективно возбуждались в многослойных пленках железоиттриевого граната (ЖИГ) [1,2]. Интерес к этому типу волн был обусловлен исключительно высоким замедлением и относительно слабым затуханием. Практическое освоение ОСВ открывало реальные перспективы создания нового класса спин-волновых устройств, но для этого необходимо было выяснить механизмы преобразования ОСВ. Этому вопросу был посвящен первый раздел диссертационной работы, в котором исследовались процессы возбуждения обменных волн при нормальном намагничивании пленки ЖИГ. Другое, не менее важное, направление диссертационной работы было связано с практическим освоением высокочастотных магнитоакустических резонансов. Важным преимуществом магнитоакустических резонаторов являлось то, что в результате магнитоупругого взаимодействия в пленке возбуждались сдвиговые упругие волны, которые были не чувствительны к аморфной нагрузке. При этом накопление акустической энергии возникало в диэлектрической подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) [3,4]. Магнитоакустические резонаторы представляли значительный интерес в плане разработки опорных генераторов СВЧ с низким уровнем фазовых шумов. Однако для устойчивой работы генератора необходимо было решить проблему выборочного возбуждения отдельных мод магнитоакустического резонанса. В данной работе эта проблема решалась за счет селективного возбуждения звука в полосе частот пленочных ЖИГ резонаторов. В результате были разработаны макеты высокочастотных дискретно перестраиваемых магнитоакустических ЖИГ резонаторов, которые использовались в качестве частотно-задающих элементов автогенераторов СВЧ. Главным недостатком магнитоакустических резонаторов было отсутствие стабильности из-за температурного дрейфа частоты пленочного ЖИГ резонатора. Этой проблеме был посвящен третий раздел диссертационной работы. Исследовались возможности автокомпенсации дрейфа частоты ЖИГ резонатора за счет температурного размагничивания постоянных магнитов. Параллельно с этим решались проблемы миниатюризации намагничивающих систем, защиты от внешних полей и электрической перестройки частоты резонатора. Исследовались возможности размещения схемы ЖИГ генератора внутри экрана портативной магнитной системы. В результате выполнения диссертационной работы была показана возможность создания сверхминиатюрных управляемых линий задержки на ОСВ и термостабильных дискретно перестраиваемых магнитоакустических ЖИГ генераторов с низким уровнем фазовых шумов.

Целью диссертационной работы являлось: исследование механизмов высокоэффективного возбуждения коротковолновых обменных спиновых и акустических волн в слоистых феррит-диэлектрических структурах.

В задачу диссертационной работы входило:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование механизмов возбуждения коротковолновых обменных спиновых волн в нормально намагниченных пленках ЖИГ, содержащих тонкий легированный слой с пониженной намагниченностью.

2. Разработка методов селективного возбуждения заданных частот магнитоакустического резонанса в пленочной структуре ЖИГ-ГТГ.

3. Разработка, изготовление и испытание макетов одночастотного магнитоакустического резонатора СВЧ.

4. Компьютерное моделирование твердотельного генератора СВЧ с магнитоакустическим резонатором в цепи обратной связи. Расчеты амплитудных, временных, спектральных и шумовых характеристик генерируемого сигнала.

5. Разработка, изготовление и испытание портативной экранированной магнитной системы со встроенной системой термостабилизации и электрической перестройки частоты пленочного ЖИГ резонатора.

Научная новизна:

1. Впервые построена теоретическая модель двухслойной ферритовой структуры при нормальном намагничивании. Показано, что при нормальном намагничивании пленки ЖИГ тонкий слой с пониженной намагниченностью на границе пленка-подложка является условием интенсивного возбуждения обменных спиновых волн.

2. Предложен способ селективного возбуждения отдельных мод магнитоакустического резонанса в полосе частот пленочного ЖИГ резонатора и варианты конструкции одночастотных дискретно перестраиваемых магнитоакустических ЖИГ резонаторов СВЧ.

3. Предложена компьютерная модель высокостабильного дискретно перестраиваемого магнитоакустического генератора СВЧ. Показано, что использование магнитоакустического резонатора в цепи обратной связи снижает уровень фазовых шумов генерируемого сигнала до -136 дБн/Гц при отстройке частоты на 10 кГц.

4. Предложена конструкция портативной экранированной магнитной системы со встроенной системой термостабилизации и электрической перестройки частоты пленочного ЖИГ резонатора.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим соответствием результатов теоретического анализа и компьютерного моделирования с экспериментальными результатами. Достоверность экспериментальных результатов была обеспечена применением современной измерительной аппаратуры и обработкой результатов измерений с использованием проверенных методов.

Практическая значимость результатов исследований.

1. Предложено комплексное решение проблем намагничивания, термостабилизации, электрической регулировки, защиты от внешних полей и шунтирующего действия окружающих стальных предметов для целого ряда спинволновых устройств.

2. Показано, что при нормальном намагничивании пленки ЖИГ открывается возможность использования коротковолновых обменных спиновых волн для диагностики тонкого переходного слоя на границе пленка ЖИГ-подложка ГГГ, а также для создания сверхминиатюрных управляемых линий задержки и целого ряда других устройств аналоговой обработки СВЧ сигнала.

3. Показана возможность создания высокостабильных термостабилизированных магнитоакустических ЖИГ генераторов СВЧ с низким уровнем фазовых шумов. Снижение фазовых шумов способствует повышению разрешающей способности радарных систем.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

Положение 1. Существование тонкого (субмикронного) легированного слоя с пониженной намагниченностью на границе ферритовой пленки и диэлектрика в нормально намагниченной структуре ЖИГ-ГГГ при наличии переменного магнитного поля приводит к возбуждению в тонком слое коротких спиновых волн, которые распространяются вглубь пленки ЖИГ.

Положение 2. Пленочный ЖИГ резонатор, сформированный на поверхности плоскопараллельной подложки ГГГ, является селективным магнито-стрикционным возбудителем высокодобротных акустических резонансов по толщине структуры ЖИГ-ГГГ. При этом наиболее интенсивно возбуждается только та акустическая мода, частота которой совпадает с частотой пленочного ЖИГ резонатора.

Результат 1. Применение метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии обеспечивает отдельную визуализацию распределения интенсивности магнитных и акустических колебаний в двухслойной феррит-диэлектрической структуре ЖИГ-ГГГ.

Результат 2. На частотах возбуждения магнитоакустических резонансов в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ, уровень фазовых шумов транзисторного ЖИГ генератора снижается на величину порядка 30дБ при частоте несущей 870МГц и отстройке от несущей 10кГц.

Результат 3. Предложенная конструкция экранированной магнитной системы со встроенной системой термостабилизации и электрической перестройки частоты обеспечивает высокую стабильность частоты магнитоакустического ЖИГ генератора во всем диапазоне положительных температур (до 80°C), отличается малыми габаритами и простотой настройки. При этом электрическая перестройка частоты не нарушает условия термостабилизации.

Личный вклад автора. Автору принадлежит: разработка методик и проведение экспериментов, включая математическую обработку результатов измерений; проведение численных расчетов по теме диссертации; компьютер-

ное моделирование устройств, представленных в диссертационной работе. Постановка теоретических и экспериментальных задач диссертационной работы, выбор методов их решения и интерпретация полученных результатов были проведены совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

- XV Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, 6-11 февраля, Саратов, 2012
- Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 4-7 июня, Санкт-Петербург, 2012
- XXII Международная конференция Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах, 17-21 сентября, Астрахань, 2012
- II Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 3-6 июня, Санкт-Петербург, 2013
- International Symposium on Spin Waves, Saint Petersburg, Russia. June 9-15, 2013
- VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 3-5 сентября, Саратов, 2013
- XXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы», 15-17 ноября, Москва, 2013
- Scientific Workshop -Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures, 3-6 August, Saratov, 2014
- International Scientific Conference "Science of Future", 17-20 September, Saint Peterburg, 2014
- XVII Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, 2-7 февраля, Саратов, 2015

Исследования выполнялись в рамках гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования ГК № 11.G34.31.0030 и научного гранта Committee for International Research and Education (CIRE) of the Acoustical Society of America (ASA) по теме «High-Q magnetoacoustic resonator», CRDF Award № RUX1-33064-RU-12.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 1 патент на изобретение, 4 статьи в трудах конференций и 8 тезисов в трудах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 120 страниц. Основной текст занимает 105 страницы, включая 67 рисунков. Список литературы содержит 116 наименований и изложен на 12 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цели, задачи и методы проведения исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура и объем диссертации.

В **первой главе** представлены результаты теоретического и экспериментального исследования процессов возбуждения и распространения спиновых волн в двухслойных феррит-ферритовых структурах, содержащих тонкий легированный слой с пониженной намагниченностью. Исходными уравнениями являлись уравнение Ландау-Лифшица и система уравнений Максвелла. Решения искались с учетом неоднородного обмена и электромагнитного запаздывания. Для построения математической модели применялся магнитомеханический подход, при котором решение искалось в виде монохроматических волн прецессии намагниченности $\vec{m} = \vec{m}_0 \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$, а сопутствующие электрические и магнитные поля выражались через вектор прецессии

$$\vec{e} = 4\pi \frac{k_0 (\vec{k} \times \vec{m})}{k^2 - \varepsilon k_0^2}, \quad \vec{h} = 4\pi \frac{\varepsilon k_0^2 \vec{m} - \vec{k} (\vec{k} \cdot \vec{m})}{k^2 - \varepsilon k_0^2}. \quad (1)$$

Было получено уравнение баланса энергии

$$\nabla \cdot (\vec{P} + \vec{P}^e) + \frac{1}{8\pi} \frac{\partial}{\partial t} (|\vec{h}|^2 + \varepsilon |\vec{e}|^2) + \omega_H (\vec{z} \times \vec{m}) \cdot \vec{h} = 0, \quad (2)$$

где $\vec{P} = \frac{c}{4\pi} (\vec{e} \times \vec{h})$ и $\vec{P}^e = \eta \nabla \vec{m} \cdot (\vec{z} \times \vec{h})$ - соответственно, потоки электромагнитной и обменной мощности в феррите. Для решения краевых задач использовались граничные условия для векторов прецессии намагниченности

$$\alpha_1 M_{01} \frac{\partial \vec{m}_1}{\partial n} \times \vec{z} \Big|_S = \alpha_2 M_{02} \frac{\partial \vec{m}_2}{\partial n} \times \vec{z} \Big|_S, \quad \frac{\vec{m}_1}{M_{01}} \Big|_S = \frac{\vec{m}_2}{M_{02}} \Big|_S, \quad (3)$$

где α_j и M_{0j} - константа неоднородного обмена и намагниченность насыщения в обменно-связанных слоях феррита. Эффективность применения магнитомеханического подхода проявилась уже на этапе рассмотрения однослойных пленок ЖИГ. В частности было показано сильное влияние неоднородного обмена на дисперсию магнитостатических волн (МСВ) в субмикронных пленках ЖИГ. Это проявлялось в сдвигах частот отсечки высших мод прямых объемных МСВ (ПОМСВ), как показано на рис.1. Учет запаздывания позволил выявить эффекты гибридизации электромагнитной волны в феррите с нулевой модой ПОМСВ. Эти эффекты возникали в области малых волновых чисел и проявлялись в образовании широкой щели на законе дисперсии нулевой моды, как показано на рис.2.

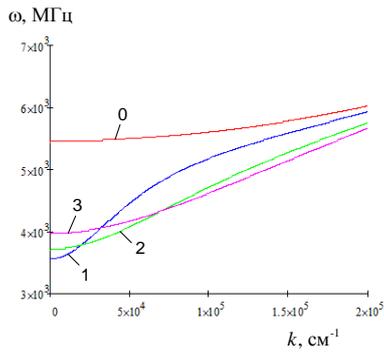


Рис.1. Дисперсия ПОМСВ в пленке ЖИГ толщиной 0.5мкм. Цифрами обозначены номера мод ПОМСВ.

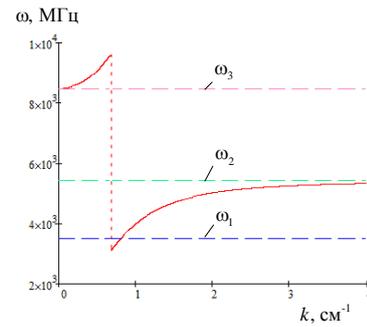


Рис.2. Дисперсия нулевой моды ПОМСВ с учетом электромагнитного запаздывания. Частоты ω_1 , ω_2 - нижняя и верхняя границы спектра мод ПОМСВ, $\omega_3 = \gamma H_0$

Для выявления механизмов возбуждения бегущих ОСВ рассматривалась нормально намагниченная двухслойная структура, состоящая из массивного слоя феррита, содержащего на поверхности тонкий легированный слой с пониженной намагниченностью. В такой структуре исследовались процессы возбуждения ОСВ нормально падающей электромагнитной волной (ЭМВ). Проведенные расчеты потоков мощности показали, что эффекты преобразования ОСВ имеют ярко выраженный резонансный характер, как показано на рис.3.

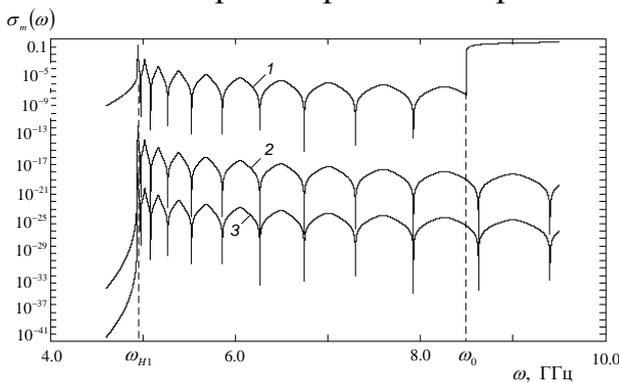


Рис.3. Частотные зависимости коэффициента преобразования мощности падающей электромагнитной волны. Кривая 1 характеризует суммарное поглощение электромагнитной мощности. Кривые 2, 3 характеризуют интенсивность возбуждения потоков электромагнитной и обменной мощности

Существенно, на частотах максимального возбуждения ОСВ в легированном слое возбуждались несимметричные (четвертьволновые) резонансы прецессии намагниченности, амплитуды которых достигали максимумов на внешней границе легированного слоя и обращались в ноль на внутренней границе слоя (см. рис.4). Образование узла прецессии на границе ферритовых слоев можно было интерпретировать, как резонансное закрепление спинов.

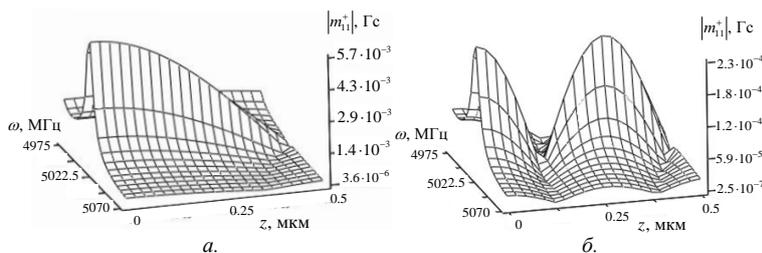


Рис.4. Частотно-пространственное распределение амплитуд прецессии первой (а) и второй (б) резонансной моды легированного слоя

Однако такой механизм преобразования оказался достаточно слабым из-за огромного скачка волновых чисел падающих ЭМВ и возбуждаемых ОСВ.

Другой механизм преобразования ОСВ был основан на вытекании обменных мод на внутренней границе легированного слоя. Как и в предыдущем случае, эффекты преобразования имели резонансный характер с максимумами излучения ОСВ на частотах возбуждения несимметричных резонансов, как на рис.4. Отличие состояло в том, что в максимумах излучения эффективность возбуждения ОСВ достигала 100%, как показано на рис.5.a. При этом потоки излучаемой мощности были строго ортогональны границе слоя. На промежуточных частотах угол излучения уменьшался до нуля, как показано на рис.5.b. Излучение волны полностью прекращалось на частотах возбуждения симметричных резонансов.

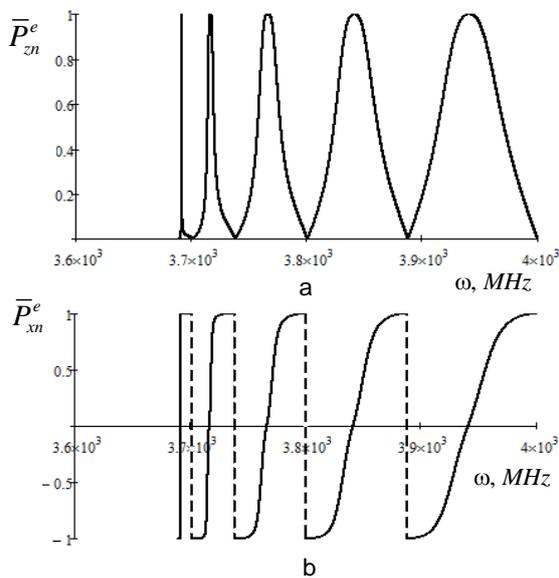


Рис.5. Нормированные потоки излучаемой мощности ОСВ на границе ферритовых слоев: а – нормальная, б – касательная составляющие потока мощности

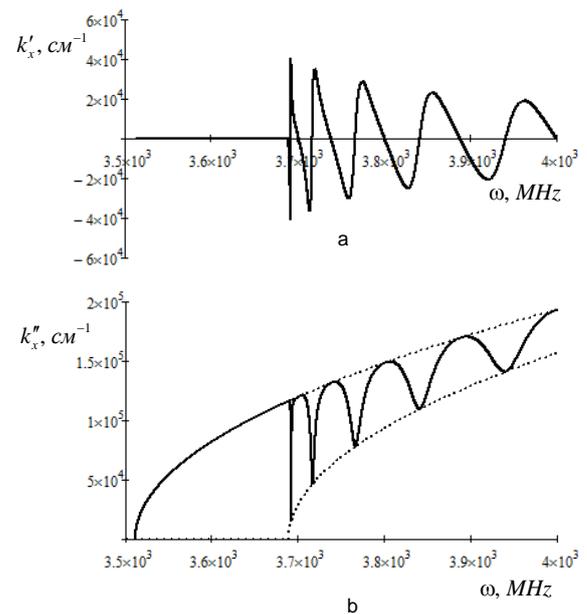


Рис.6. Дисперсия (а) и затухание (б) обменной моды в тонком легированном слое ЖИГ.

Закон дисперсии вытекающих мод ОСВ представлен на рис.6. Из сравнения рис.5 и рис.6 следует, что частоты резонансов имплантированного слоя соответствуют нулевым значениям волновых чисел. При этом, как видно на рис.6.b, затухание мод ОСВ достаточно велико, но на этом фоне можно наблюдать пики ослабления затухания, которые возникают на частотах несимметричных резонансов. Сильное затухание симметричных мод ОСВ можно было объяснить поглощением волны в массивном слое феррита. Этому весьма способствовало образование пучности прецессии на границе ферритовых слоев. В случае несимметричных мод, при образовании узла прецессии на границе слоев, эффекты поглощения прекращались, но вместо этого возникали потери на излучение обменных волн.

В обоих случаях моды ОСВ не являлись собственными. Они могли возбуждаться только вместе с другими типами волн, например, с магнитостатиче-

ской волной в относительно толстом слое феррита. При этом на частотах возбуждения вытекающих мод энергия МСВ будет частично расходоваться на излучения обменных волн. Можно ожидать, что при неограниченной длине пробега МСВ вся ее энергия может быть преобразована в энергию ОСВ.

Для проверки этого предположения был поставлен эксперимент, в котором эффекты возбуждения обменных волн наблюдались в спектре возбуждения стоячих МСВ. Для этого использовался пленочный ЖИГ резонатор диаметром 2мм, выполненный из эпитаксиальной пленки ЖИГ толщиной 13мкм. В качестве легированного слоя использовался тонкий переходный слой на границе пленка-подложка. Возбуждение резонатора осуществлялось микрополосковым преобразователем, как показано на вставке рис.7. Эксперименты проводились при нормальном намагничивании пленки ЖИГ на частоте 3ГГц.

В непрерывном режиме измерялись амплитудно-полевые характеристики (АПХ) отраженного сигнала резонатора (рис.7). В импульсном режиме наблюдались эхоимпульсы ОСВ отраженные от противоположной поверхности пленки ЖИГ (рис.8).

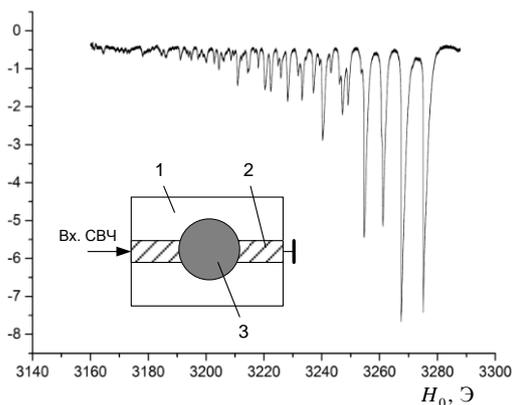


Рис.7. АПХ пленочного ЖИГ резонатора.
На вставке: Экспериментальный макет.
1 – диэлектрическая подложка, 2 – микрополосковая линия, 3 – пленочный резонатор.



Рис.8. Осциллограмма эхоимпульсов ОСВ в пленочном ЖИГ резонаторе.

В наших экспериментах относительная задержка эхоимпульсов составляла примерно 50нс. С учетом этого нетрудно было посчитать групповую скорость ОСВ $v_g \approx 5.2 \cdot 10^4$ см/с. По результатам измерения амплитуд эхоимпульсов рассчитывались временные декременты $\omega'' \approx 12$ дБ/мкс и эффективность преобразования ОСВ $k \approx 70\%$.

Таким образом, была показана возможность эффективного возбуждения слабо затухающих обменных спиновых волн в тонком переходном слое эпитаксиальной пленки ЖИГ.

Во **второй** главе представлены результаты разработки и тестирования высокочастотных магнитоакустических ЖИГ резонаторов, а также результаты

моделирования на их основе автогенераторов СВЧ с низким уровнем фазовых шумов.

Для изготовления магнитоакустических ЖИГ резонаторов использовались пленочные структуры ЖИГ-ГГГ, которые подвергались дополнительной оптической полировке. В результате клиновидность отобранных образцов не превышала 2". Изготовленные резонаторы имели размеры 1x1мм, толщина пленки ЖИГ составляла $d = 13\text{мкм}$, толщина структуры ЖИГ-ГГГ $D = 371\text{мкм}$, намагниченность насыщения пленки ЖИГ составляла $4\pi M_0 = 1750\text{ Гс}$. Габариты подложки ГГГ составляли $2 \times 2\text{мм}$. Для возбуждения пленочных резонаторов использовался микрополосковый преобразователь шириной 0.5мм, выполненный на поликоровой подложке толщиной 0.5мм. Преобразователь располагался осесимметрично на поверхности резонатора, как показано на вставке рис.9.а. Измерялись S-параметры макета резонатора. Измерения проводились в диапазоне частот 0.5-3ГГц при нормальном и касательном намагничивании пленки ЖИГ.

Магнитоакустические резонансы возбуждались в полосе частот первой резонансной моды пленочного ЖИГ резонатора. Эти возбуждения наблюдались в виде узкополосных искажений амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ), как показано на рис.9.а и рис.9.б. Те же возбуждения наблюдались на амплитудно-фазовых характеристиках (АФХ) в виде дополнительных петель внутри петли пленочного ЖИГ резонатора, как показано на диаграмме Смита, представленной на рис.9.с.

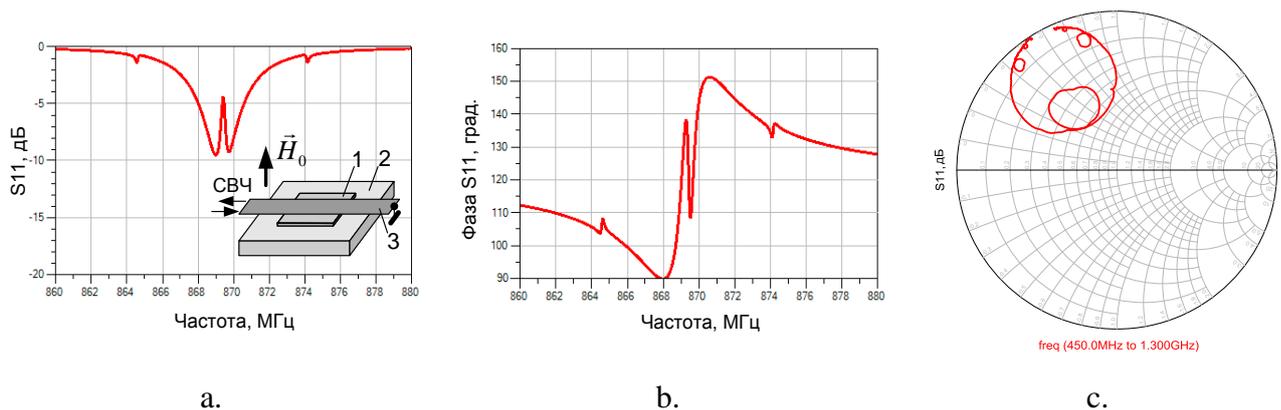


Рис.9. АЧХ (а), ФЧХ (б) и АФХ (с) макета магнитоакустического ЖИГ резонатора.

На вставке: экспериментальный макет резонатора. 1 – пленка ЖИГ;
2 – подложка ГГГ; 3 – микрополосковый преобразователь.

Для визуализации пространственной структуры магнитоакустических резонансов использовались оптические методы мандельштам-бриллюэновского рассеяния [6]. Измерения проводились при касательном намагничивании плен-

ки ЖИГ на центральной частоте магнитоакустического резонанса $f_n = 2398$ МГц. На АЧХ рис.10 частота f_n отмечена стрелкой.

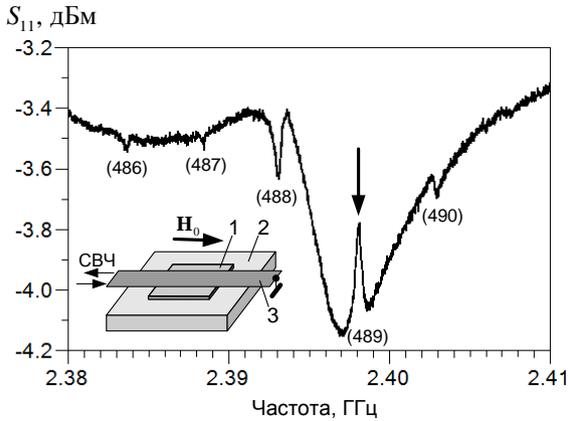


Рис.10. АЧХ магнитоакустического ЖИГ резонатора при касательном намагничивании пленки ЖИГ. В скобках указаны номера акустических мод. На вставке: экспериментальный макет резонатора.

Измерялись интенсивности рассеянного излучения I^2 в точках фокусировки лазерного луча. По 100 точкам в плоскости резонатора строился трехмерный график распределения интенсивности колебаний. На рис.11 представлены результаты отдельной визуализации магнитных и упругих колебаний в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ. Для измерения магнитных колебаний луч фокусировался на поверхности пленки ЖИГ, как показано на вставке рис.11.а. Для измерения упругих колебаний – на поверхности подложки ГГГ, как показано на вставке рис.11.б.

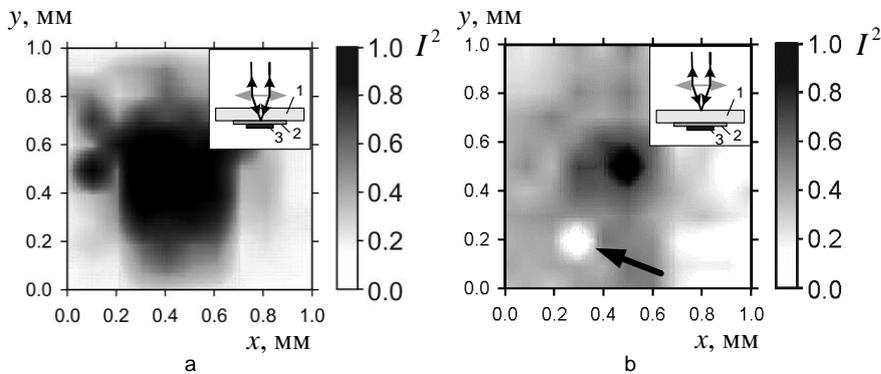


Рис.11. Распределение интенсивностей магнитных (а) и упругих (б) колебаний в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ. На вставках: иллюстрация методики измерения. 1 – подложка ГГГ, 2 – пленка ЖИГ, 3 – микрополосковый преобразователь.

Обнаруженное сужение области наблюдения упругих колебаний на рис.11.б можно было объяснить пороговыми условиями возбуждения акустических резонансов, которые выполнялись только в максимуме интенсивности магнитных колебаний. Появление пятна отсутствия упругих колебаний на рис.11.б (отмечено стрелкой) объяснялось внутренним дефектом подложки ГГГ.

Особенность магнитоакустических резонансов проявлялась в том, что с ростом номера акустической моды интенсивность их возбуждения изменялась немонотонно. На фоне общего спада наблюдалось чередование максимумов и минимумов возбуждения. Те же колебания проявлялись на частотной зависи-

мости коэффициента магнитоупругой связи и нагруженной добротности магнитоакустических резонансов, как показано на рис.12.

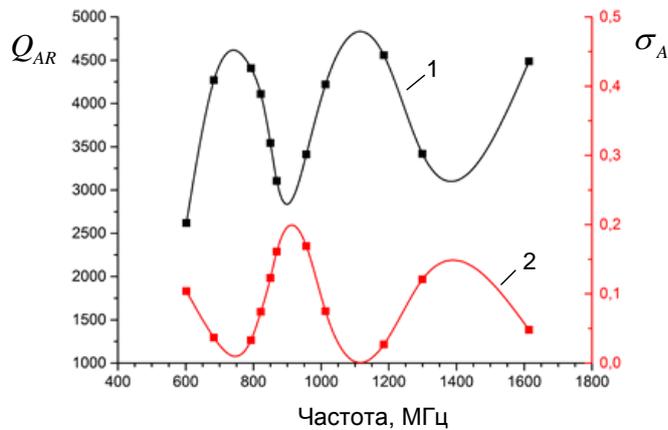


Рис.12. Нагруженная добротность (кривая 1) и коэффициент магнитоупругой связи (кривая 2) макета магнитоакустического ЖИГ резонатора.

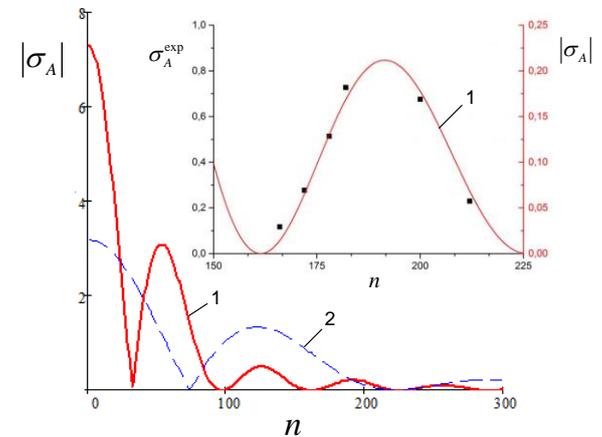


Рис.13. Зависимость коэффициента магнитоупругой связи от номера акустической моды. На вставке: фрагмент кривой. Точками отмечены экспериментальные результаты.

Осциллирующий характер коэффициента связи подтверждался расчетом интеграла перекрытия магнитных и упругих колебаний в пределах толщины пленки ЖИГ. Результаты расчета коэффициента связи для различных толщин пленки ЖИГ представлены на рис.13: кривая 1 – для пленки 11.5мкм; кривая 2 – для пленки 5мкм. В наших экспериментах можно было наблюдать возбуждение магнитоакустических резонансов с номерами 122...326. Длина акустической волны изменялась в пределах 6.0...2.3 мкм. При этом по толщине пленки могло укладываться от 4 до 11 акустических полуволен.

Высокая добротность магнитоакустических резонансов представляла интерес в плане разработки высокостабильных генераторов СВЧ с низким уровнем фазовых шумов. Для оценки перспектив таких разработок было проведено компьютерное моделирование автогенератора с магнитоакустическим резонатором в цепи обратной связи. Моделирование магнитоакустического ЖИГ генератора проходило в два этапа. На первом этапе строилась электрическая модель магнитоакустического резонатора, на втором этапе моделировались колебательные процессы в схеме генератора, рассчитывались характеристики выходного сигнала.

В задачу моделирования магнитоакустического резонатора входило определение номиналов сосредоточенных элементов и коэффициентов индуктивной связи колебательных контуров и расчета S-параметров, совпадающих с

измеренными S-параметрами макета резонатора. Электрическая модель резонатора включалась в цепь обратной связи широкополосного усилителя MGA-13116, как показано на блок-схеме рис.14.

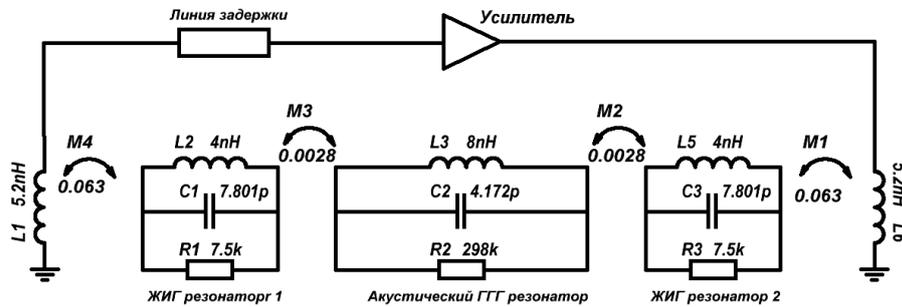


Рис.14. Блок-схема магнитоакустического ЖИГ генератора СВЧ.

На рис.15 представлена временная реализация выходного сигнала магнитоакустического автогенератора, построенного по схеме рис.14.

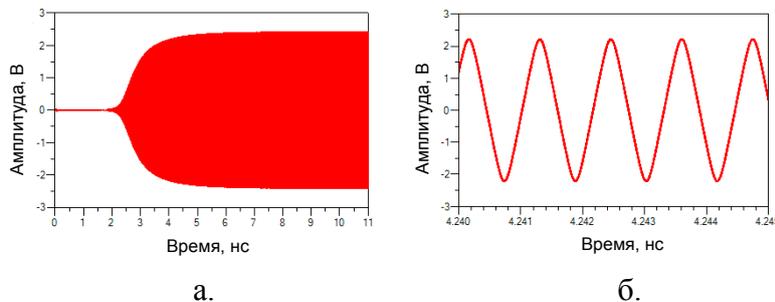


Рис.15. Временная реализация выходного сигнала магнитоакустического ЖИГ генератора. а – переходные процессы с момента запуска, б – фрагмент временной реализации в установившемся режиме генерации.

Наибольший интерес представляли спектр (рис.16) и фазовые шумы выходного сигнала магнитоакустического ЖИГ генератора (рис.17).

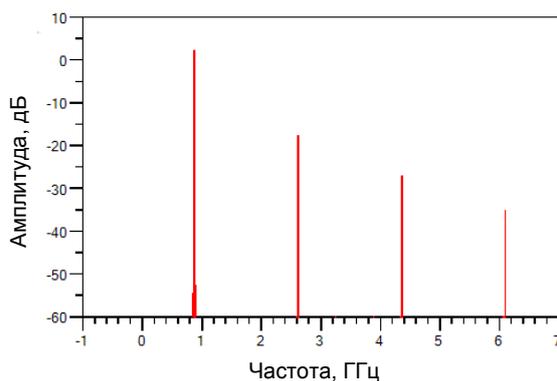


Рис.16. Спектр выходного сигнала магнитоакустического ЖИГ генератора.

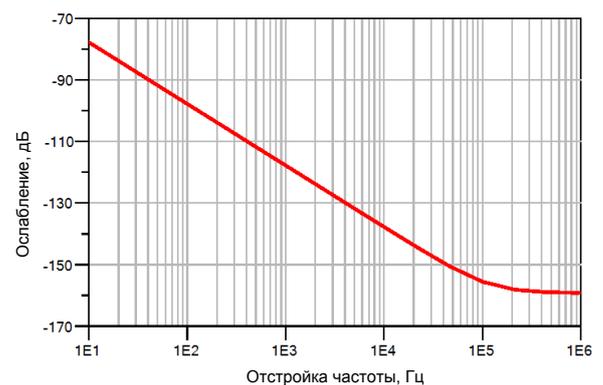


Рис.17. Фазовые шумы магнитоакустического ЖИГ генератора.

Согласно расчетам, высшие гармоники генерируемого сигнала были подавлены более чем на 20 дБ, а фазовые шумы магнитоакустического генератора на частоте $f_0 = 869.5 \text{ МГц}$ составляли -116 дБн/Гц при отстройке частоты на 1кГц и

–136дБн/Гц при отстройке 10кГц. Дополнительным преимуществом магнитоакустических ЖИГ генераторов является возможность дискретной перестройки частоты и отсутствие принципиальных ограничений продвижения в область более высоких частот.

В третьей главе решались вопросы температурной стабилизации частоты пленочных ЖИГ резонаторов, что было необходимо для устойчивой работы магнитоакустического ЖИГ генератора. Исследовались возможности автокомпенсации температурного дрейфа частоты ЖИГ резонаторов за счет обратного эффекта теплового размагничивания постоянных магнитов. Параллельно с этим решались вопросы намагничивания, защиты от внешних полей и электрической перестройки частоты, как самого ЖИГ резонатора, так и транзисторного генератора СВЧ на его основе.

При нормальном намагничивании пленки ЖИГ частота основной моды пленочного резонатора $f(T)$ практически совпадает с частотой нижней границы спектра МСВ $f(T) \approx \gamma[H_0(T) - 4\pi M_0(T)]$. С учетом этого условие температурной стабилизации частоты резонатора $\partial f(T)/\partial T = 0$ можно было представить в виде

$$\frac{\partial H_0(T)}{\partial T} = 4\pi M_0 \alpha_F, \quad (4)$$

где M_0 - намагниченность насыщения при комнатной температуре, α_F - температурный коэффициент размагничивания феррита (для ЖИГ: $M_0=140$ кГс; $\alpha_F = -0.23\%/^{\circ}\text{C}$). Условие (4) предъявляло жесткие требования температурной зависимости намагничивающего поля $H_0(T)$, которые, однако, можно было удовлетворить, используя специально подобранную комбинацию разнородных магнитов. Для этого в конструкцию магнитной системы необходимо было ввести, как минимум, два постоянных магнита с различными коэффициентами теплового размагничивания. Помимо этого в ней должны быть предусмотрены возможности механической и электрической регулировки поля в рабочем зазоре. Этим требованиям удовлетворяла магнитная система, эквивалентная схема которой представлена на рис.18.

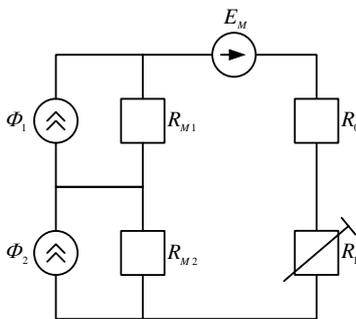


Рис.18. Эквивалентная схема магнитной цепи.

Обозначения: Φ_1 , Φ_2 и R_{M1} , R_{M2} - магнитные потоки и внутренние сопротивления постоянных магнитов; E_M - магнитное напряжение создаваемое катушкой управления; R_0 и R_1 - магнитное сопротивление рабочего и регулировочного зазоров.

Расчет магнитной цепи рис.18 проводился по правилам Кирхгофа в приближении прямоугольности петли гистерезиса и без учета полей рассеяния. В результате было получено требуемое соотношение толщин разнородных магнитов, которое в случае равенства площадей магнитов и зазоров имело простой вид

$$\frac{l_{M1}}{l_{M2}} = \frac{B_{r2}}{B_{r1}} \cdot \frac{4\pi M_0 \alpha_F - H_{0M} \alpha_{M2}}{H_{0M} \alpha_{M1} - 4\pi M_0 \alpha_F}, \quad (5)$$

где H_{0M} - напряженность поля в рабочем зазоре, B_{r1} , B_{r2} и α_{M1} , α_{M2} - остаточные индукции и температурные коэффициенты постоянных магнитов. Однако это соотношение имело смысл только при положительной правой части, что накладывало ограничение на выбор температурных коэффициентов постоянных магнитов

$$\alpha_{M1} \leq \frac{4\pi M_0}{H_{0M}} \alpha_F \leq \alpha_{M2}. \quad (6)$$

Помимо этого, было получено выражение для частоты стабилизации пленочного резонатора

$$f_{st} = 4\pi\gamma M_0 \frac{(\alpha_F - \alpha_{M1})B_{r1}l_{M1} + (\alpha_F - \alpha_{M2})B_{r2}l_{M2}}{\alpha_{M1}B_{r1}l_{M1} + \alpha_{M2}B_{r2}l_{M2}}. \quad (7)$$

Это выражение также имело смысл только в ограниченной полосе частот $f_{st}^{\min} \leq f_{st} \leq f_{st}^{\max}$, где граничные частоты

$$f_{st}^{\min} = 4\pi\gamma M_0 \frac{(\alpha_F - \alpha_{M2})}{\alpha_{M2}}, \quad f_{st}^{\max} = 4\pi\gamma M_0 \frac{(\alpha_F - \alpha_{M1})}{\alpha_{M1}}$$

были получены из выражения (7) при подстановке нулевой толщины одного из магнитов. Настройка резонатора на частоту стабилизации осуществлялась механической регулировкой поля в рабочем зазоре. При этом технологические разбросы параметров пленок и постоянных магнитов могли повлиять только на значение частоты стабилизации.

Испытания системы термостабилизации проводилось на макете магнитной системы, представленной на рис.19.

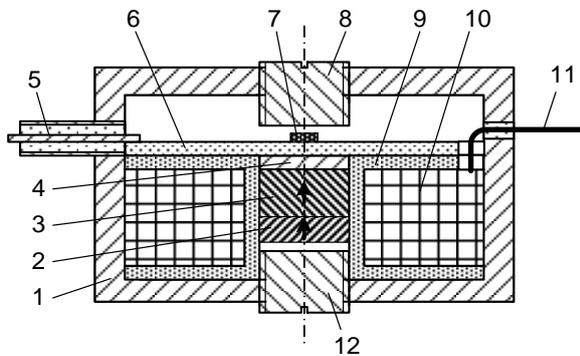


Рис.19. Конструкция макета магнитной системы со встроенной системой термостабилизации. 1- стальной экран; 2 – самарий-кобальтовый магнит; 3 – неодим-железо-боровый магнит; 4 – полюсный наконечник; 5 – ввод-вывод СВЧ сигнала; 6 – микрополосковая схема возбуждения ЖИГ резонатора; 7 – пленочный ЖИГ резонатор; 8 – первый регулировочный винт; 9 – каркас катушки электрического управления; 10 – витки катушки электрического управления; 11 – ввод электропитания катушки управления; 12 – второй регулировочный винт.

Частоты стабилизации частоты резонатора определялись экспериментальным путем. Вначале по формуле (7) рассчитывалось нулевое приближение частоты стабилизации $f_{st}^{(0)}$. Затем проводилась пара температурных измерений на соседних частотах $f_1 = f_{st}^{(0)} - \delta f$ и $f_2 = f_{st}^{(0)} + \delta f$. На этих частотах температурные зависимости $f_1(T)$ и $f_2(T)$ имели противоположный наклон, как показано на рис.20.a,b (см. кривые 1 и 2).

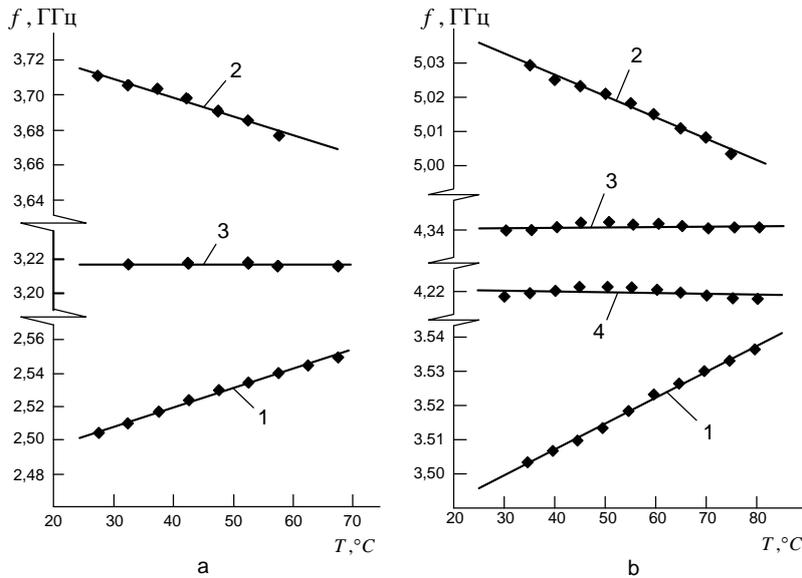


Рис.20. Настройка и испытание системы термостабилизации пленочного ЖИГ резонатора: (а) с одним Nd-Fe-B магнитом; (б) с двумя Nd-Fe-B и Sm-Co магнитами.

Далее по формуле

$$f_{st}^{(1)} = \frac{(\partial f_2 / \partial T) f_1 + (\partial f_1 / \partial T) f_2}{\partial f_1 / \partial T + \partial f_2 / \partial T}$$

рассчитывалось первое приближение частоты стабилизации. На эту частоту настраивался ЖИГ резонатор. Для проверки точности настройки проводились контрольные измерения температурной зависимости $f_{st}^{(1)}(T)$ (см. кривые 3 на рис.20.a,b). По окончании настройки положения регулировочных винтов фиксировалось. В дальнейшем использовалась только электрическая регулировка частоты резонатора. Эта регулировка не нарушала условие стабильности частоты резонатора, что подтверждалось температурными измерениями при электрической отстройке частоты (см. кривая 4 на рис.20.b).

По результатам измерений оценивалась температурная стабильность частоты резонатора $\Delta f / \Delta T \approx \pm 0.07 \text{ МГц} / ^\circ\text{C}$. Для сравнения, собственный дрейф частоты ЖИГ резонатора составлял $\Delta f / \Delta T \approx -4\pi\gamma M_0 \alpha_F \approx 11.5 \text{ МГц} / ^\circ\text{C}$. Это означало, что в результате применения системы термостабилизации стабильность частоты ЖИГ резонатора была повышена более чем на два порядка. Для достижения того же результата методом термостатирования потребовалась бы точность поддержания температуры порядка 0.01°C .

Конструкция магнитной системы (рис.19) допускала возможность размещения внутри экрана электрической схемы транзисторного ЖИГ

генератора. Это обстоятельство было использовано для испытания системы термостабилизации в составе законченного функционального устройства.

Принципиальная схема и топология печатной платы ЖИГ генератора представлены на рис.21.

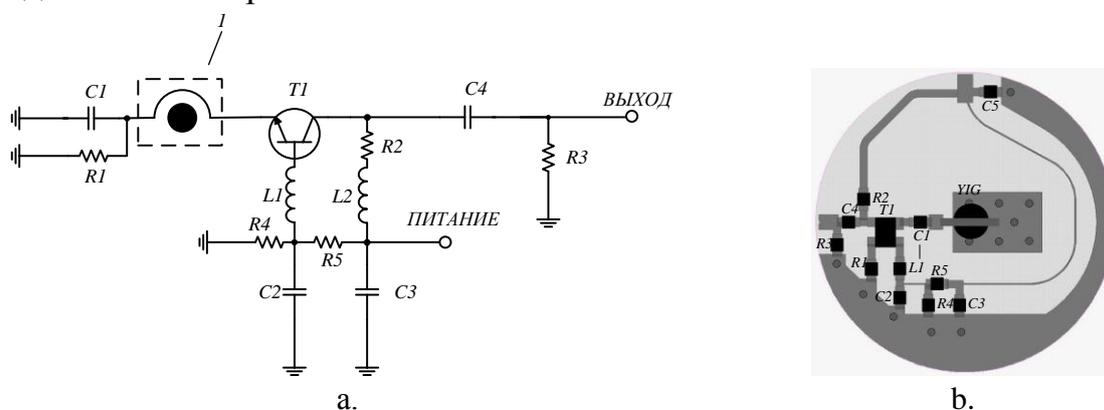


Рис.21. Принципиальная схема (а) и топология печатной платы (б) транзисторного ЖИГ генератора с общей базой.

1 – ЖИГ резонатор с микрополосковым преобразователем.

Геометрия и габариты печатной платы задавались внутренними размерами цилиндрической конструкции магнитной системы.

Как и в предыдущем случае, генератор настраивался на частоту стабилизации. В нашем случае $f_{st}^{(1)}(T_0) = 2.78$ ГГц. Процедура и результаты настройки системы термостабилизации представлены на рис. 22.

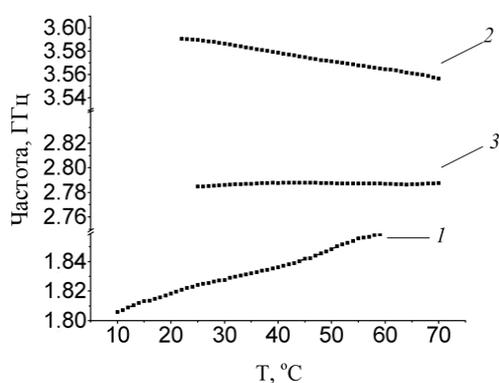


Рис.22. Результаты измерения температурной зависимости частоты ЖИГ генератора.

1 – $f_1 = 1.82$ ГГц; 2 – $f_2 = 3.59$ ГГц;

3 – $f_{st} = 2.78$ ГГц.

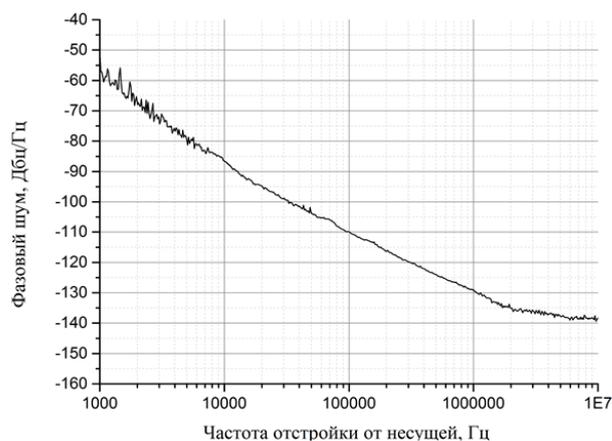


Рис.23. Фазовые шумы макета транзисторного ЖИГ генератора.

Для сравнения были проведены измерения фазовых шумов макета пленочного ЖИГ генератора (см. рис.23). Шумы оказались на уровне известных моделей генераторов на сферах ЖИГ, что примерно на 30дБ выше ожидаемых фазовых шумов магнитоакустического ЖИГ генератора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Показано, что учет электромагнитного запаздывания оказывает сильное влияние на дисперсию нулевой моды МСВ в области малых волновых чисел, где возникают эффекты гибридизации с электромагнитной волной в феррите. В результате гибридизации дисперсия распадается на две ветви, между которыми образуется щель. При этом дисперсия нулевой моды МСВ приобретает положительный наклон, который обуславливает появление быстрой волны прецессии (электромагнитной наводки) на частотах возбуждения высших мод магнитостатических волн.
2. Показано, что в многослойных структурах на границе ферритовых сред могут возникать эффекты закрепления спинов, которые стимулируют эффективное возбуждение обменных спиновых волн. Эффекты закрепления возникают на частотах возбуждения несимметричных спин-волновых резонансов в тонком (субмикронном) легированном слое. Для возбуждения обменных волн в нормально намагниченной пленке ЖИГ легированный слой должен обладать пониженной намагниченностью.
3. Показана возможность селективного возбуждения магнитоакустического резонанса в полосе частот пленочного ЖИГ резонатора. Предложена конструкция одночастотного дискретно перестраиваемого магнитоакустического резонатора с добротностью до $\sim 10^4$ и выше. Показана возможность продвижения магнитоакустического резонатора в область более высоких частот.
4. Предложен способ отдельного измерения добротности связанных магнитных и акустических резонансов и коэффициента магнитоупругой связи в пределах толщины пленочного ЖИГ резонатора. Установлено, что частотная зависимость коэффициента магнитоупругой связи и нагруженной добротности магнитоакустических резонансов имеет немонотонный (осциллирующий) характер. Показано, что период осцилляций существенно зависит от соотношения толщин пленки ЖИГ и всей структуры ЖИГ-ГТГ.
5. Методами BLS установлено, что в пределах плоскости пленочного ЖИГ резонатора область возбуждения акустических резонансов значительно уже области магнитных резонансов. Это объясняется тем, что акустические резонансы наиболее эффективно возбуждаются в максимуме амплитуд магнитных колебаний, расположенного в центре пленочного ЖИГ резонатора.
6. Предложена модель генератора СВЧ с включением магнитоакустического ЖИГ резонатора в цепь обратной связи. Получены результаты компьютерного моделирования характеристик выходного сигнала генератора при использовании экспериментальных характеристик магнитоакустического резонатора. Установлено, что на уровень фазовых шумов выходного сигнала магнитоакустического ЖИГ-генератора не превышает -116 дБн/Гц при отстройке частоты на 1 кГц и -136 дБн/Гц при отстройке 10 кГц с несущей частотой 860 МГц.
7. Теоретически обоснована возможность автокомпенсации температурного дрейфа частоты пленочного ЖИГ резонатора за счет теплового размагничивания комбинации разнородных постоянных магнитов.

8. Предложена конструкция портативной экранированной магнитной системы со встроенной системой термостабилизации и электрической регулировки частоты. Применение предложенной конструкции позволило повысить температурную стабильность частоты пленочного ЖИГ резонатора более чем на два порядка.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных журналах из перечня ВАК:

- A1. **Тихонов, В.В.** Температурная стабилизация спин-волновых ферритовых устройств / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко, С.А. Никитов, С.Г. Сучков // Радиотехника и электроника 2013. [Том 58]; №1. - С. 83.
Tikhonov, V.V. Temperature stabilization of spin-wave ferrite devices. / V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko // Journal of Communications Technology and Electronics 2013. [Vol. 58]; №1, - P. 83. ISSN 1064–2269.
- A2. **Литвиненко А.Н.** Термостабильный перестраиваемый ЖИГ генератор / А.Н. Литвиненко, В.В. Тихонов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2014. [Том 14] №1. - С. 35.
- A3. **Тихонов В.В.** Резонансный механизм возбуждения обменных спиновых волн в двухслойной феррит-ферритовой структуре / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая 2014. [Том 78]; №2. - С. 192.

Патенты на изобретения:

- A4. **Патент 2492539 РФ. МКП H01F13/00.** Миниатюрное устройство намагничивания и термостабилизации ферритовых СВЧ резонаторов / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского" (RU) – заявл. 26.10.2011

В материалах международных и всероссийских конференциях:

- A5. **Тихонов В.В.** Магнитоакустический генератор с низким уровнем фазового шума / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике; 2-7 февраля; Саратов, 2015. - С.61 .
- A6. **Тихонов В.В.** Мандельштам-Бриллюэновская спектроскопия магнитоакустических резонансов в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике; 2-7 февраля; Саратов, 2015. - С.102.
- A7. **Tikhonov V.V.** Temperature Stabilization of the YIG Oscillator / V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko // International Scientific Conference "Science of Future", 17-20 September, Saint Peterburg, 2014. Abstracts.

- A8. **Tikhonov V.V.** Temperature stabilization of spin wave ferrite devices / V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko // Scientific Workshop -Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures, 3-6 August, Saratov, 2014. - P. 16. - ISBN 978-5-9999-2146-8.
- A9. **Tikhonov V.V.** Excitation of exchange spin waves at the border media ferrite / V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko // Scientific Workshop -Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures, 3-6 August, Saratov, 2014. - P.18. - ISBN 978-5-9999-2146-8.
- A10. **Литвиненко А.Н.** Термостабилизированный СВЧ генератор на ЖИГ резонаторе / А.Н. Литвиненко, В.В. Тихонов // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»; 3-5 сентября; Саратов, 2013. - С.94. ISSN 2218–2985
- A11. **Tikhonov V.V.** T Spin waves excitation in multilayered ferrite structures / V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko // International Symposium on Spin Waves 2013. Abstracts. Ioffe Physical-Technical Institute. Saint Petersburg, Russia. June 9-15, 2013. ISBN 978-5-91918-334-1.
- A12. **Литвиненко А.Н.** Высокостабильный перестраиваемый ЖИГ генератор СВЧ / А.Н. Литвиненко, В.В. Тихонов // Тезисы докладов II Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»; 3-6 июня; Санкт-Петербург, 2013.
- A13. **Тихонов В.В.** Спиновые волны в многослойных феррит-ферритовых структурах/ В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Материалы XXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы»; 15-17 ноября; Москва, 2013. – С.188-195
- A14. **Тихонов В.В.** Резонансный механизм преобразования энергии электромагнитных и обменных спиновых волн / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Сборник трудов XXII Международной конференции Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах; 17-21 сентября. Астрахань. 2012. - С. 263-265.
- A15. **Литвиненко А.Н.** Температурная стабилизация спин-волновых ферритовых устройств / А.Н. Литвиненко, В.В. Тихонов // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»; 4-7 июня; Санкт-Петербург, 2012.
- A16. **Тихонов В.В.** Миниатюрная система намагничивания и термостабилизации СВЧ-ферритовых устройств / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике; 6-11 февраля; Саратов, 2012. - С. 94.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гуляев Ю.В.** Линейное возбуждение импульсов обменных спиновых волн в пленках железо-иттриевого граната / Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Е.С.

- Санников, В.В. Тихонов, А.В. Толкачев // Письма в ЖТФ, 1988, [Том 14], №11, - С.884-888.
2. **Тихонов В.В.** Линейное возбуждение обменных спиновых волн в имплантированных пленках ЖИГ / В.В. Тихонов, А.В. Толкачев // ФТТ, 1994, [Том 36], №1, - С185-193.
 3. **Гуляев Ю.В.** Наблюдение быстрых магнитоупругих волн в тонких пластинах и эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната. / Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Г.Т. Казаков, В.Г. Сысоев, В.В. Тихонов, Ю.А. Филимонов, Б.П. Нам, А.С. Хе // Письма в ЖЭТФ.1981, [Том 39], №9, - С.500-504.
 4. **Казаков Г.Т.** Резонансное взаимодействие магнитодипольных и упругих волн в пластинах и пленках железо-иттриевого граната. / Г.Т. Казаков, В.В. Тихонов, П.Е. Зильберман // ФТТ. 1983, [Том 25], №8, - С.2307-2312.
 5. **Зильберман П.Е.** Раздельное измерение параметров полезного сигнала и наводки в линиях передачи магнитостатических волн./ Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Тихонов В.В. // РЭ. 1985. [Т.30], №6. – С.1164-1169.
 6. **Demokritov S.O.** Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement / S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A.N. Slavin // Physics Reports. 2001. [Vol. 348], №6. - P.441-489.