

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Исследование твердотельных магнитоэлектронных устройств  
активного типа**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса  
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»  
физического факультета

Васильева Александра Васильевича

Научный руководитель  
зав. кафедрой общей физики,  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ А.А. Игнатьев

Саратов 2019

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** обусловлена направленностью на создание новой компонентной базы твердотельной СВЧ электроники.

### **Цель и задачи исследований.**

Целью диссертационной работы является разработка новых принципов построения активных СВЧ устройств на основе ферритовых структур.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- Теоретическое и экспериментальное исследование свойств пленочных ЖИГ резонаторов для использования их в качестве частотозадающего элемента генератора и усилителя.

- Теоретические и экспериментальные исследования свойств генераторных и усилительных магнитоэлектронных устройств на базе пленочных ЖИГ резонаторов.

- Компьютерное моделирование твердотельных генераторов и усилителей с ЖИГ резонаторами. Расчеты амплитудных, временных, спектральных и шумовых характеристик сигналов.

- Исследование возможности снижения порога чувствительности датчика индукции магнитного поля, использующего ЖИГ резонатор в качестве магниточувствительного элемента.

- Разработка, изготовление и испытание макетов исследуемых устройств.

### **Объект и предмет исследования.**

Объектом исследования являются феррит-транзисторные структуры, которые позволяют реализовать на своей основе устройства фильтрации, фазовращения, усиления и генерации сигналов в диапазоне частот от 0,4 ГГц до 40 ГГц. Реализованные таким образом устройства обладают характеристиками управляемыми постоянным магнитным полем, либо магнитное поле является объектом анализа с помощью таких структур.

Предметом исследований является моделирование, нелинейные свойства и пороговые характеристики исследуемых устройств (уровень шумов, погрешность измерений).

#### **Методология и методы исследования:**

Информационную базу составляют монографические работы, материалы научно-технических конференций, объекты интеллектуальной собственности, статьи в периодических изданиях и научных сборниках по исследуемой проблеме.

При проведении исследований использовались:

- методы математической теории эксперимента (математической статистики, планирования активного эксперимента), реализованные в специализированном программном обеспечении;
- методы обработки сигналов (анализ во временной и частотной областях), реализованные программном и аппаратном обеспечении.

#### **Материалы исследования.**

Материалом исследований являются сферические и пленочные резонаторы из железо-иттриевого граната (ЖИГ) и устройства использующие такие резонаторы в сочетании с активным элементом (транзистор или транзисторный каскад).

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

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработка и исследование нелинейных моделей ЖИГ резонаторов.
2. Исследование нелинейных моделей твердотельных магнитоэлектронных устройств активного типа на основе тонкопленочных и сферических структур ферритов.

3. Исследование свойств магнитоэлектронных устройств в генераторном, усилительном и магниточувствительном режимах работы.

4. Определены пути снижения коэффициента шума в усилительном режиме, снижения уровня фазового шума в генераторном режиме, повышения пороговой магнитной чувствительности в магниточувствительном режиме.

5. Исследования проводятся посредством компьютерного моделирования и экспериментальных исследований в широком диапазоне частот от 500 МГц до 100 ГГц и мощностей от 1 нВт до 100 мВт.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- Нелинейные модели резонаторов для использования в САПР.
- Более точные модели магнитоэлектронных устройств за счет использования нелинейных моделей резонаторов ЖИГ.
- Предложена модификация способа измерения индукции магнитного поля с помощью дифференциального магнитоэлектронного датчика с ЖИГ резонатором, позволяющий достичь термокомпенсации до уровней порядка 0,01 нТл.
- Предложен способ снижения коэффициента шума магнитоэлектронного усилителя за счет замены входных согласующих цепей элементом связи на основе ЖИГ резонатора.

#### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 115 страниц. Основной текст занимает 103 страницах, включая 76 рисунков. Список литературы содержит 78 наименований и изложен на 9 страницах.

## II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- Предложенная модель ЖИГ резонатора позволяет описать такие нелинейные эффекты, как насыщение основного (нелинейный резонанс) и возникновение дополнительного резонанса.
- Использование разработанной нелинейной модели ЖИГ резонатора позволяет более достоверно производить моделирование генераторных и усилительных устройств с ЖИГ резонаторами.
- Для датчика индукции магнитного поля построенного по дифференциальной схеме измерений, использование не только разностного, но и суммарного выходного сигнала, позволяет повысить точность измерений, а также проводить термокомпенсацию показаний.
- Использование магнитоэлектронного элемента связи с ЖИГ резонатором во входной цепи усилительного устройства взамен входных согласующих цепей позволяет снизить коэффициент шума.

### III. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработана компьютерная модель пленочного ЖИГ резонатора.
2. Разработана компьютерная модель ЖИГ генератора, включающую модель ЖИГ резонатора.
3. Исследовано поведение модели ЖИГ генератора при вариациях параметров схемы и определены оптимальные режимы работы генератора.
4. Проведены экспериментальные исследования макета генератора и сопоставление с поведением модели.
5. Описана схема и конструкция магнитоэлектронных генераторов.
6. Проведена оценка погрешности, возникающей при измерениях слабых магнитных полей (на примере поля Земли).

#### IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ) И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

##### Публикации из перечня ВАК

1. Хвалин А.Л., Васильев А.В., Самолданов В.Н., Моделирование магнитоуправляемых генераторов с использованием Microwave Office. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. №11. С.15- 18.
2. Хвалин А.Л., Васильев А.В. Оптимальный синтез характеристик транзисторного усилителя УВЧ диапазона в интегральном исполнении. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. №10. С.29-33.
3. Сотов Л.С., Хвалин А.Л., Васильев А.В. Расчёт характеристик интегрального магнитоуправляемого генератора в диапазоне частот 26,0- 37,5 ГГц. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. №11. С.47-49.
4. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Исследование интегральных магнитоуправляемых генераторов в СВЧ диапазоне частот. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 114. № 1. С. 51-55.
5. Хвалин А.Л., Васильев А.В. Оптимизация характеристик транзисторного усилителя УВЧ диапазона в интегральном исполнении. // Гетеромагнитная микроэлектроника: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. Вып. 8: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 10-16.
6. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В. Исследования микрополосковых преобразователей энергии с эпитаксиальными структурами ЖИГ с пониженной намагниченностью насыщения. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 2. С. 90–93.
7. Васильев А.В., Игнатьев А.А. Нелинейная модель сферического ЖИГ-резонатора. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во

Сарат. ун-та, 2014. Вып. 17: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4-12. ISSN 1810-9594.

8. Васильев А.В., Игнатьев А.А. Расчёт характеристик магнитоэлектронного генератора с использованием нелинейной модели ЖИГ-резонатора. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 19: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 37-42. ISSN 1810-9594.

9. Игнатьев А.А., Васильев А.В., Овчинников С.В., Ретунский А.С., Спиридонов Д.М. Анализ теплового режима гетеромагнитного электронного модуля. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 15: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 110-115. ISSN 1810-9594.

10. Васильев А.В., Игнатьев А.А., Куликов М.Н., Прозоркевич А.В. Ортогонализация магнитных осей 3D-гетеромагнитного магнитометра. // Гетеромагнитная микроэлектроника: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2012. Вып. 13: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 10-15.

11. Игнатьев А. А., Кудрявцева С. П., Маслов А. А., Васильев А. В. Высокочувствительные сенсоры слабых магнитных поле (обзор патентов). // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. Вып. 20: Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 38-41. ISSN 1810-9594.

12. Страхова Л. Л., Игнатьев А. А., Гунстин А. В., Васильев А. В. Методика экспериментального исследования параметров микроэлементов магниточувствительных микросхем в диапазоне частот. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. Вып. 20: Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии.

Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 72-80. ISSN 1810-9594.

13. Игнатьев А.А., Проскуряков Г.М., Васильев А.В. Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 78-91. ISSN 1810-9594.

14. Игнатьев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В., Маслов А. А. Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (хронометрический способ автономной ориентации). // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 53-62. ISSN 1810-9594.

### **Публикации в других изданиях**

1. Ляшенко А.В., Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Электродинамическое моделирование СВЧ усилителей с гетеромагнитным управлением. // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1: Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов С. 99-105. ISSN 1810-9594.

2. Солопов А.А., Ляшенко А.В., Игнатьев А.А., Прозоркевич А.В., Хвалин А.Л., Сотов Л.С., Васильев А.В. Использование САПР MWO 2002 для подготовки специалистов-разработчиков СВЧ-устройств для защиты информации. // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1: Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов С. 118-125. ISSN 1810-9594.

3. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В. Программа расчёта мощных полевых магнитоэлектронных транзисторов в диапазоне частот до 30

ГГЦ // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2: Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 23-29. ISSN 1810-9594.

4. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В. Разработка полевых магнитоэлектронных транзисторов в усилительном и генераторном режимах регулярных сигналов на низком уровне мощности в УВЧ диапазоне// Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2: Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 59-62. ISSN 1810-9594.

5. Хвалин А.Л., Самолданов В.Н., Васильев А.В. Использование САПР MWO-2007 в задачах моделирования магнитоуправляемых усилителей для студентов, обучающихся по специальности «Физика». // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 3: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 44-51. ISSN 1810-9594.

6. Хвалин А.Л., Васильев А.В. Разработка магнитоэлектронных элементов связи для сигналов на низком и высоком уровнях мощности // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2: Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 54-58. ISSN 1810-9594.

7. Игнатьев А.А., Куликов М.Н., Васильев А.В., Митин И.В. Экспериментальные исследования возбуждения СВЧ-колебаний в магнитных углеродных нанотрубках на микрополосковых устройствах. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 3: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 83-87. ISSN 1810-9594.

8. Васильев А.В. Экспериментальные исследования нелинейных характеристик плёнки железоиттриевого граната. // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 5: Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники. С. 51-55. ISSN 1810-9594.

9. Овчинников С.В., Васильев А.В. Результаты испытаний твердотельных гетеромагнитных СВЧ-генераторов на устойчивость к механическим и температурным внешним воздействиям. // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. Вып. 6: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. С. 28-33. ISSN 1810-9594.

### **Конференции**

1. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Электродинамическое проектирование селективных усилителей с гетеромагнитным взаимодействием// Проблемы защиты информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам: Мат. Всерос. науч.-практ. конф. Саратов, РАЦ «Тантал». 2003. С. 129- 135.

2. Игнатьев А.А., Хвалин А.Л., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Электродинамический расчет при проектировании гетеромагнитных усилителей // Перспективные направления развития электронного приборостроения: Мат. науч.-техн. конф. (г. Саратов 18–19 февраля 2003 г.) Саратов: Изд-во СГУ. 2003. С. 45-48.

3. Игнатьев А.А., Гергель В.А., Павловский В.В., Маслов А.А., Васильев А.В.. Исследование характеристик импульсных твердотельных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs. // «Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2016» Материалы 4-го Международного симпозиума и 20-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2016. Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2016. С. 119-120. ISBN 978-5-98116-214-5.

4. Васильев А.В. Разработка эквивалентной схемы сферического ЖИГ-резонатора с учётом нелинейных эффектов. //Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 17-й Всероссийской молодёжной научной школы-семинара (г. Ульяновск, 2-4 декабря 2014 года). – Ульяновск: УлГТУ, 2014. С. 138-139. ISSN 978 5 9795 1317 1.

5. Васильев А.В., Игнатьев А.А. Нелинейная модель ЖИГ-резонатора. // «Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2015» Материалы 3-го Международного симпозиума и 19-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2015. Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2015. С. 112-115. ISBN 978-5-98116-191-9.

6. Игнатьев А.А., Васильев А.В.. Особенности нелинейных процессов в ферромагнитных материалах. // «Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2016» Материалы 4-го Международного симпозиума и 20-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2016. Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2016. С. 121-123. ISBN 978-5-98116-214-5.

### **Патенты**

Патент на полезную модель № 159151, МПК H03B27/00. Управляемый гетеромагнитный автогенератор. / Авторы: Ляшенко А.В., Солопов А.А., Игнатьев А.А., Васильев А.В. Патентообладатель: ПАО «Тантал», ОАО «Институт критических технологий». Заявл.: 2015136906/28, 31.08.2015. Оpubл.: 10.02.2016, Бюл. № 4.

Пат. 2449303 Российская Федерация, МПК G01R 33/00, B82B 1/00. Способ измерения магнитных параметров наноматериалов. / Авторы: Игнатьев А.А., Куликов М.Н., Ляшенко А.В., Васильев А.В., Маслов А.А. Патентообладатель: ОАО «Научно-Исследовательский Институт-Тантал», ГОУ ВПО «Саратовский Государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». Заявл.: 2010138031/28, 13.09.2010. Оpubл.: 27.04.2012, Бюл. № 12.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610985. Программа расчёта нестационарного температурного поля полупроводниковой структуры мощного магнитоэлектронного транзистора в импульсном режиме. Овчинников С.В., Васильев А.В., Ляшенко А.В., Солопов А.А. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 21.04.2004.