

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Численное моделирование системы «микрорезонатор –
тонкая пленка железо-иттриевого граната»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ


Студента 2 курса 2231 группы
направления (специальности) 03.04.03«Радиофизика»

института физики

Сотникова Романа Дмитриевича

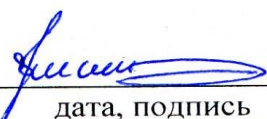
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн, к.ф.-м.н
должность, уч. степень, уч. звание

 04.06.26
дата, подпись

А.В. Титов
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн
к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание


дата, подпись
04.06.26 г.

С.В. Гришин
инициалы, фамилия

Саратов 2026 год

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Выбранная для научного исследования тема «Численное моделирование системы «микрорезонатор - тонкая пленка железо-иттриевого граната» в настоящее время является актуальной в области электроники сверх высоких частот, являясь актуальным направлением резонаторной магноники.

В настоящее время более перспективными считаются планарные системы, а именно, система микрорезонатора — тонкая или супертонкая (толщиной 100 нм) пленка ЖИГ в отличие от классической платформы, используемой в резонаторной магноники для наблюдения эффектов гибридизации, где использовались объемные диэлектрические резонаторы с монокристаллом ЖИГ. Они обеспечивают технологическую совместимость с современными интегральными схемами, позволяет наблюдать эффект сильной магнон-фотонной гибридизации (антикроссинг) при комнатной температуре и демонстрируют низкие пороги нелинейных эффектов. Микрорезонаторы с пленкой ЖИГ находят применение в различных областях: для фильтрации сигналов (используются в радиочастотных фильтрах для выделения определенных частот); для генерации сигналов: (применяются в качестве генераторов для создания стабильных радиочастотных сигналов); в системах связи (включаются в устройства для обработки сигналов в беспроводных коммуникациях). Однако разработка таких устройств требует верифицированных численных моделей, учитывающих как электродинамику резонатора, так и ферромагнитные свойства пленки.

Цель научного исследования заключается в создании численной модели микрорезонатора с пленкой ЖИГ и без нее в программном обеспечении ANSYS в среде моделирования HFSS и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными как с пленкой ЖИГ, так и без нее.

Задачи исследования:

- изучить и систематизировать отдельные вопросы резонансной магноники, резонансные и нелинейные явления при распространении магнитостатических волн в ферромагнитных пленках;

- рассмотреть результаты исследований системы микрополосковый резонатор – ферромагнитная пленка;

- описать экспериментальный макет микрополоскового резонатора;

- построить численную модель микрополоскового резонатора как без пленки ЖИГ, так и с пленкой в ANSYS HFSS и сделать сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Характеристика материалов исследования. В работе использованы экспериментальные данные, полученные на анализаторе цепей PNA Network Analyzer E8362C. Объект исследования - микрополосковый полуволновой резонатор (длина 31,84 мм, ширина полоска 0,5 мм) на подложке Al_2O_3 ($\epsilon=10,3$) с трёхслойной металлизацией In/Au/Cu. Пленка ЖИГ имела размеры $10 \times 4 \times 0,01$ мм, намагниченность насыщения 1750 Гс, направление намагниченности - вдоль оси X (перпендикулярно проводнику). Численное моделирование выполнено в ANSYS HFSS (метод конечных элементов, решатель Driven Terminal, частотный диапазон 1,5-2 ГГц).

Структура ВКР. Работа состоит из введения, двух разделов, заключения и списка использованных источников (38 источников). Первый раздел посвящен теоретическим аспектам резонаторной магноники. Во втором разделе описан экспериментальный макет, построение численных моделей и сравнительный анализ результатов.

Научная новизна:

Построена и верифицирована численная модель системы «микрополосковый полуволновой резонатор - тонкая пленка ЖИГ» в ANSYS HFSS с прямым сравнением экспериментальных и расчётных S_{21} . Получено численное подтверждение эффекта антикроссинга (расщепление резонансного провала на две частоты) для данной планарной структуры. Количественно определён

коэффициент связи между МПР и пленкой ЖИГ ($k=0,09$), совпадающий с теоретическими оценками двухконтурной модели.

Значимость исследования заключается в сравнительном анализе полученных результатов численных моделей с экспериментальными исследованиями поведения системы микрополосковый резонатор как с пленкой ЖИГ, так и без тонкой пленки ЖИГ по S-параметрам АЧХ. Сделанные выводы имеет научную ценность для проведения дальнейших фундаментальных исследований в области резонаторной магноники и практическую значимость для использования в СВЧ приборах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Теоретические аспекты резонаторной магноники» рассмотрены физические основы магноники. Показано, что магноны - квазичастицы, соответствующие элементарным спиновым возбуждениям в магнитных средах. Для СВЧ-устройств наиболее широко применяется железо-иттриевый гранат (ЖИГ) - синтетический ферритмагнетик со структурой граната, обладающий низкими потерями (ширина линии ФМР мала, константа затухания Гильберта $\alpha = 10^{-5} - 10^{-3}$), высокой плотностью спинов ($4 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$) и температурой Кюри 559 К.

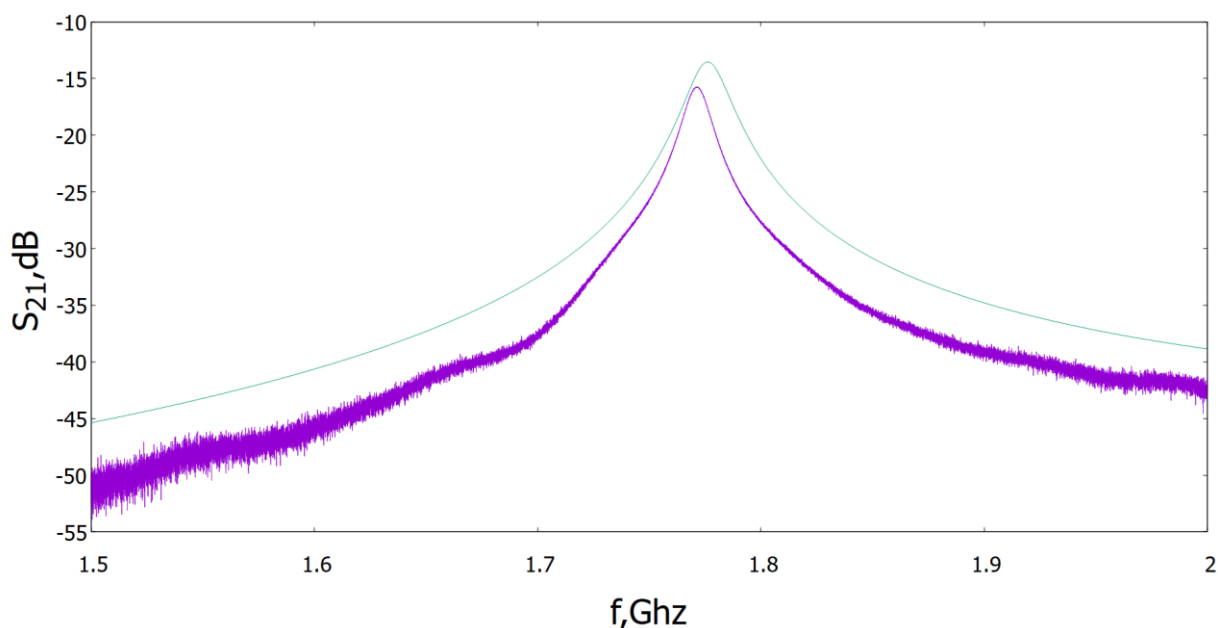
Особое внимание уделено системе «микрополосковый резонатор - тонкая пленка ЖИГ». В отличие от объёмных диэлектрических резонаторов, планарная конфигурация обеспечивает сильную связь при помещении пленки в пучность переменного магнитного поля стоячей волны МПР. При совпадении частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) пленки с собственной частотой МПР возникает гибридизация магнонных и фотонных мод, что проявляется в расщеплении резонансных частот (антикроссинг). На основе анализа работ С.В. Гришина, В.С. Гришина, Ю.П. Шараевского показано, что такая система эквивалентна двум связанным колебательным контурам с перестраиваемой собственной частотой (ЖИГ) и постоянной частотой (МПР). В нелинейном режиме при повышении мощности СВЧ-сигнала наблюдаются

эффекты избирательного подавления сигналов разного уровня, что перспективно для создания шумоподавителей и ограничителей мощности.

Во втором разделе «Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования в ANSYS HFSS» выполнено практическое исследование.

Экспериментальный макет. Использован анализатор цепей PNA E8362C. Микрополосковый резонатор изготовлен на подложке Al_2O_3 толщиной 0,5 мм, с металлизацией: медь (4 мкм) и золото (2 мкм). Длина резонатора - 31,84 мм, ширина микрополосковой линии - 0,5 мм. Для системы с пленкой ЖИГ: пленка размером $10 \times 4 \times 0,01$ мм² расположена на проводнике в области пучности поля; ширина зазора - 0,625 мм, длина связи - 7 мм.

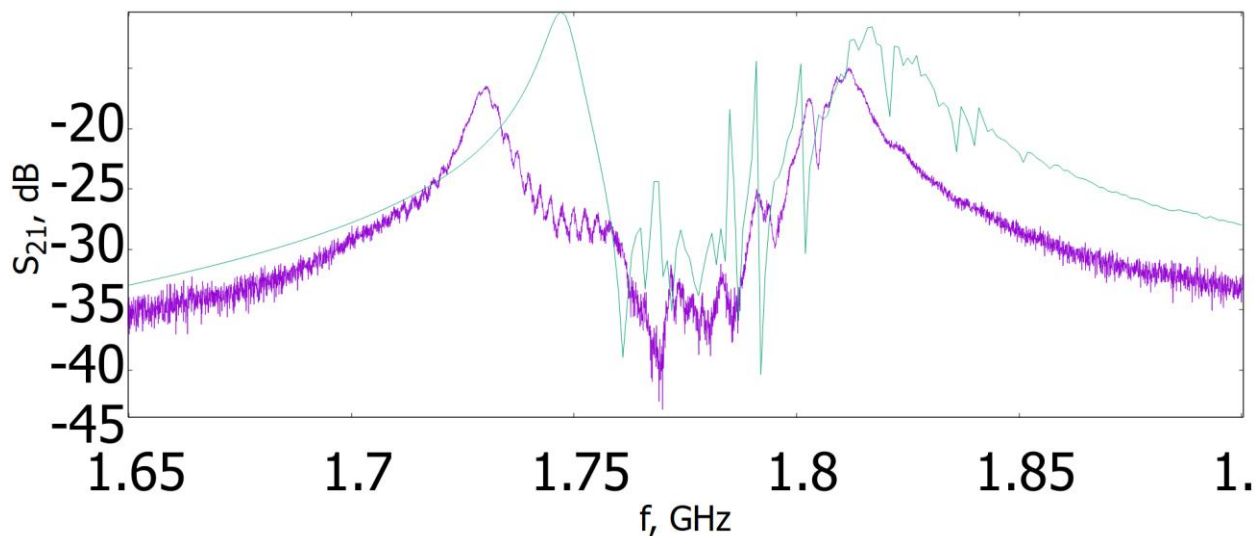
Моделирование без пленки ЖИГ. В ANSYS HFSS построена трёхмерная модель: диэлектрическая подложка ($15 \times 47 \times 0,5$ мм), экран (0,4 мм), микрополосковый резонатор (два слоя - Au 2 мкм, Cu 4 мкм). Заданы волновые порты с интегрирующей линией от проводника к экрану, решатель Driven Terminal. Частотный диапазон 1,5-2 ГГц, шаг 0,01 ГГц. Получена зависимость $|S_{21}|$ с резонансным провалом на частоте $f_0 \approx 1,79$ ГГц. Сравнение с экспериментом показало высокую степень совпадения



. Распределение электрического и магнитного полей соответствует стоячей

волне - минимум Е-поля и максимум Н-поля в центре резонатора, что подтверждает корректность модели.

Моделирование с пленкой ЖИГ. В модель добавлен параллелепипед из феррита (размеры 10×4×0,01 мм). В свойствах материала активирована ферритовая модель: $\epsilon=12$, $\mu=1000$, намагниченность насыщения 1750 Гс, направление намагниченности - X. Вокруг модели создана воздушная коробка с граничным условием Radiation. Результат: исходный резонансный провал на S_{21} расщепляется на два минимума на частотах $f_1=1,74$ ГГц и $f_2=1,81$ ГГц. Это численно воспроизводит эффект антикроссинга - прямое подтверждение сильной связи между МПР и пленкой ЖИГ.



Сравнение с экспериментом показало хорошее согласие - положение пиков совпадает с погрешностью менее 0,02 ГГц.

Для количественной оценки связи использована формула для двух связанных колебательных контуров:

$$\Omega_{1,2} = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2 \pm \sqrt{(f_1^2 + f_2^2)^2 - 4(1 - k^2)f_1^2 f_2^2}}{2(1 - k^2)}}$$

Подбором коэффициента связи k получено наилучшее совпадение теоретических кривых с экспериментальными точками. Величина k

составила 0,09. Этот же коэффициент был воспроизведён при обработке результатов численного моделирования в HFSS.

Нелинейные эксперименты. В работе приведены зависимости АЧХ от уровня мощности СВЧ-сигнала при различных напряжённостях внешнего магнитного поля (197, 207, 213 Э). Обнаружены области, где отношение большого сигнала к малому (R) достигает положительных максимумов (режим шумоподавления) и отрицательных максимумов (режим ограничения мощности). Например, при $H=207$ Э частота положительного максимума составила 1,787 ГГц, а отрицательных - 1,725 и 1,818 ГГц. Эти результаты показывают, что созданная модель корректно описывает не только линейный, но и нелинейный режим работы системы (при задании соответствующей мощности в портах возбуждения).

Для обработки данных и расчёта теоретических кривых связи разработана программа на Python, использующая библиотеки NumPy и Matplotlib. Программа позволяет по заданным f_1 , f_2 и k вычислять нормированные частоты Ω_1/f_1 и Ω_2/f_1 , а также строить графики для сравнения с экспериментом и моделированием.

Верификация модели проводилась по нескольким параметрам: положение резонансных частот (совпадение с экспериментом в пределах 0,5 %), глубина провалов S_{21} (отличие не более 1 дБ), форма кривой антикроссинга, распределение полей. Все тесты подтвердили адекватность построенной численной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской работы достигнута поставленная цель и решены все задачи исследования.

Основные выводы:

- Построены верифицированные численные модели** микрополоскового полуволнового резонатора (без пленки и с пленкой ЖИГ) в программном комплексе ANSYS HFSS. Модели

учитывают реальную геометрию, многослойную металлизацию, диэлектрические и ферромагнитные свойства материалов.

2. **Подтверждён эффект антикроссинга:** при внесении тонкой пленки ЖИГ в пучность магнитного поля резонатора исходный резонансный провал на частоте 1,79 ГГц расщепляется на два минимума на частотах 1,74 и 1,81 ГГц. Этот результат, полученный численно, полностью соответствует экспериментальным данным и теоретическим представлениям о гибридизации магنونных и фотонных мод.
3. **Количественно оценён коэффициент связи** между микрополосковым резонатором и пленкой ЖИГ: $k = 0,09$. Значение получено как из сравнения экспериментальных частот с двухконтурной моделью, так и непосредственно из S-параметров численной модели. Это позволяет прогнозировать параметры разрабатываемых устройств на основе данной системы.
4. **Проведён анализ нелинейных режимов** (зависимость АЧХ от уровня входной мощности). Выявлены частотные области, соответствующие эффектам шумоподавления и ограничения мощности, что демонстрирует применимость модели для исследования нелинейных свойств резонаторной магноники.
5. **Созданная модель пригодна для практического использования** при проектировании перестраиваемых СВЧ-фильтров, магنونных ограничителей мощности, генераторов с низким фазовым шумом и других элементов радиофизического приборостроения.

Практическая значимость заключается в сравнительном анализе полученных результатов численных моделей с экспериментальными исследованиями поведения системы микрополосковый резонатор как с пленкой ЖИГ, так и без тонкой пленки ЖИГ по S-параметрам АЧХ. Сделанные выводы имеет научную ценность для проведения дальнейших фундаментальных исследований в области резонаторной магноники и практическую значимость для использования в СВЧ приборах.

Список использованных источников (основные)

1. Bloch F. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Zeitschrift für Physik. – 1930. – Bd. 61. – S. 206–219.
2. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот / А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский – Саратов: СГУ, 1993. – 316 с.
3. Тимошенко А. Спиновая волна // За науку 16.08.2018 [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: <http://znanauku.mipt.ru/2018/08/16/blzost-so-strhproodnikom-pomenyala-soistva-ferromagnetika/> (дата обращения 20.05.2026) Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Лебедь Б.М., Яковлев С.В. Дисперсия поверхностных спиновых волн в слоистой структуре сверхпроводник – феррит / Б.М. Лебедь и С.В. Яковлев// Письма в ЖТФ, 1989, Т15 выпуск 19, С.27 – 29.
5. Гришин С.В., Гришин В.С., Гурзо В.В., Шараевский Ю.П. Взаимная связь микрополоскового резонатора с ферромагнитной пленкой при возбуждении магнитостатических волн / С.В. Гришин, В.С. Гришин, В.В. Гурзо, Ю.П. Шараевский // Радиотехника и электроника 2003, Т.48, № 6 С. 1-7.
6. Гришин С.В., Гришин В.С., Шараевский Ю.П. Определение нелинейных эквивалентных параметров резонансной системы с ферромагнитной пленкой при возбуждении магнитостатических волн / С.В. Гришин, В.С. Гришин, Ю.П. Шараевский // Радиотехника и электроника 2005, Т.50, № 8, С. 1-7.
7. Гришин С.В., Давоян Ю.Д., Шараевский Ю.П. Нелинейная модель взаимодействия сигналов разных уровней мощности в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах / С.В. Гришин, Ю.Д. Даваян, Ю.П. Шараевский // Изв. вузов «ПНД», 2005, Т. 13, № 5-6.
8. Гришин С.В., Шараевского Ю.П. Нелинейное подавление сверхвысокочастотных сигналов в резонансной линии передачи на

магнитостатических волнах / С.В. Гришина и Ю.П. Шараевского // Письма в ЖТФ 2005, Т. 31, вып. 2.

9. Ферримагнетики [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 05.06.2026) Загл. с экрана. – Яз. Рус.

10. Гришин С.В. Нелинейная система резонаторной магноники на основе супер тонкой пленки желез-иттриевого граната / С.В. Гришин // Письма в ЖТФ 2026, вып. 2. С.37.

11. Морозова М.А., Матвеева О.В. Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитостатических волн в мультиферроидных полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных пленок и магнонных кристаллов / М.А. Морозова, О.В. Матвеева // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 2022 Т. 30, №5.

12. Габриелян Д. , Никитов С. , Самойленко К. , Сафин А. Магнон-фотонная гибридизация мод в структуре электромагнитный резонатор/ферромагнитная пленка // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – Номер выпуска 9-10 С. 572-579 . URL: https://jetplettersras.ru/s3034576625110082-1/?version_id=126463. DOI: 10.7868/S3034576625110082