

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Магнийный интерферометр на основе цилиндрических никелевых и пермаллоевых нановолокон для спин-волновых нейроморфных систем**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 431 группы

Направления 09.03.02. «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления

Факультета нелинейных процессов

наименование факультета

Водолагина Олега Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А. В. Садовников

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2020

## Характеристика работы

Работа посвящена изучению магнитных свойств цилиндрических нановолокон, интерферометров на основе тонких ферромагнитных пленок.

Цели настоящей бакалаврской работы: исследование динамики спиновых волн в ферромагнитных структурах, изучение физических свойств никелевых нановолокон средствами микромагнитного моделирования, получение раствора никелевых нановолокон и подбор параметров его обработки.

В работе было использовано 12 литературных источников.

## Содержание работы

**Во Введении** показана актуальность работы, дается общее представление о преимуществах ферромагнитных материалов и исследуемых структурах.

СВЧ-приборы широко применяются во многих областях для передачи, обработки и генерации сигналов. Одним из перспективных вариантов технологии реализации данных устройств является применение ферромагнитных материалов. Ферромагнетики, из-за особенностей своей структуры, позволяют возбуждать в них волны намагниченности, которые называют спиновыми волнами.

Интерферометры – это один из классов устройств, которые могут использоваться в будущем для создания спин-волновой логики. В первой части данной работы проведено исследование интерферометра на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ).

Еще один тип структур, исследованных в данной работе – магнитные нановолокна. Такие структуры проявляют уникальные магнитные свойства, сильно отличающиеся от сплошных ферромагнитных материалов, сферических частиц и тонких пленок. Магнитная память, логические устройства и устройства обработки сигналов, - возможные области применения данных

материалов<sup>1</sup>. На основе магнитных нановолокон возможно создание спиновых волновых интерферометров.

В разделе 1 работы описывается метод численного моделирования, используемых в исследованиях и некоторые особенности его реализации.

Одна из основных задач данной работы – изучение магнитных свойств ферромагнитных структур с помощью численного компьютерного моделирования. Для решения данной задачи численно решалось уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \gamma [H_{eff} \times M] + \frac{\alpha}{M_0} [M \times \frac{\partial M}{\partial t}], \quad (1)$$

где  $M$  – вектор намагниченности,  $\alpha$  – параметр затухания,

$$H_{eff} = - \frac{\partial F}{\partial M}, \quad (2)$$

(2) – эффективное магнитное поле,  $F$  – свободная энергия ферромагнетика,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение<sup>2</sup>.

Решение получено методом конечных разностей в программном пакете MuMax3. Метод конечных разностей заключается в замене исходной (непрерывной) задачи разностной схемой (дискретным аналогом) и последующим решением дискретной задачи путем применения специальных алгоритмов<sup>3</sup>.

В разделе 2 работы рассматривается распространение спиновых волн в интерферометрах.

---

<sup>1</sup> S. N. Kozlov, O. V. Skryabina, S. V. Egorov, I. A. Golovchanskiy, A. A. Klimenko, K. S. Napolskii, and V. S. Stolyarov. Magnetoresistance of a single polycrystalline nickel nanowire. Journal of Applied Physics, 2019, Volume 125, Issue 6..

<sup>2</sup> S. N. Kozlov, O. V. Skryabina, S. V. Egorov, I. A. Golovchanskiy, A. A. Klimenko, K. S. Napolskii, and V. S. Stolyarov. Magnetoresistance of a single polycrystalline nickel nanowire. Journal of Applied Physics, 2019, Volume 125, Issue 6.

<sup>3</sup> А.А. Дегтярев Метод конечных разностей. Самара: Изд-во СГАУ, 2011.

Постановка задачи численного моделирования включает в себя задание геометрии, материальных параметров структуры и параметров численной схемы в коде расчетной программы.

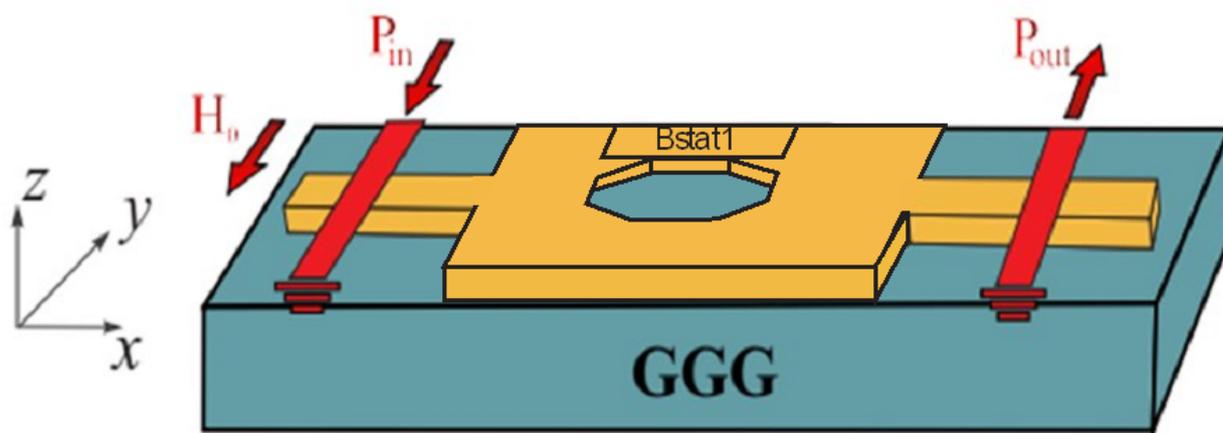


Рисунок 1 - Схема интерферометра

Объектом исследования является интерферометр на основе плёнки ЖИГ, изображенный на рисунке 1, с параметрами: Общая длина – 3.5 мм; Общая ширина - 1.5 мм; Ширина волновода – 0.5 мм; Длина левого и правого плеча - 675 мкм; Толщина пленки - 10 мкм; Намагниченность насыщения -  $1,39e-5$  А/м; Величина постоянного внешнего магнитного поля – 0,12 Тл; Затухание  $\alpha = 10e-5$ . GGG - Галлий-гадолиниевый гранат, используется как подложка при изготовлении устройств на основе тонких пленок ЖИГ.

На рисунке 2 цветом показана шкала значений амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности. Построенные распределения амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности для ЖИГ волновода при различных частотах входного сигнала изображены на рисунке 3.



Рисунок 2 – Шкала значений амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности

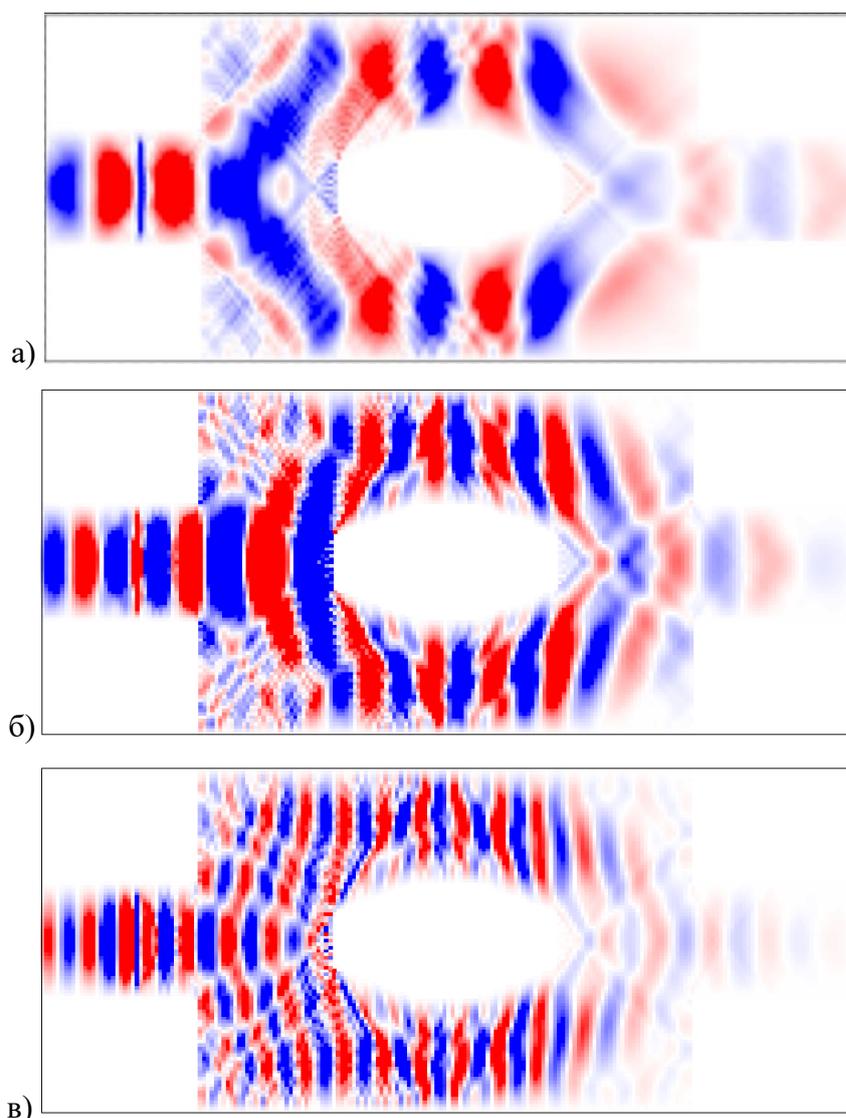


Рисунок 3 — Распределение амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности для ЖИГ интерферометра для частоты сигнала а) 5.3 ГГц б) 5.4 ГГц в) 5.5 ГГц

Методом микромагнитного моделирования проведен расчет распространения магнитостатической спиновой волны при различных частотах возбуждающего гармонического сигнала. Расчет произведен в программе Mux3, визуализация результатов – в программе OOMMF. Видно, что при распространении гармонического сигнала в интерферометре, на выходе получаем сигнал с одной модой с сохранившейся длиной волны, практически без искажений, по сравнению со входным сигналом.

Далее, для управления амплитудой выходного сигнала, в структуру был добавлен управляющий элемент, который представляет собой прямоугольную

зону с другой величиной магнитного поля  $B_{stat1}$ . Повышая или понижая  $B_{stat1}$ , относительно поля во всем интерферометре, с шагом 5 Гаусс, получим следующие распределения амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности для ЖИГ волновода

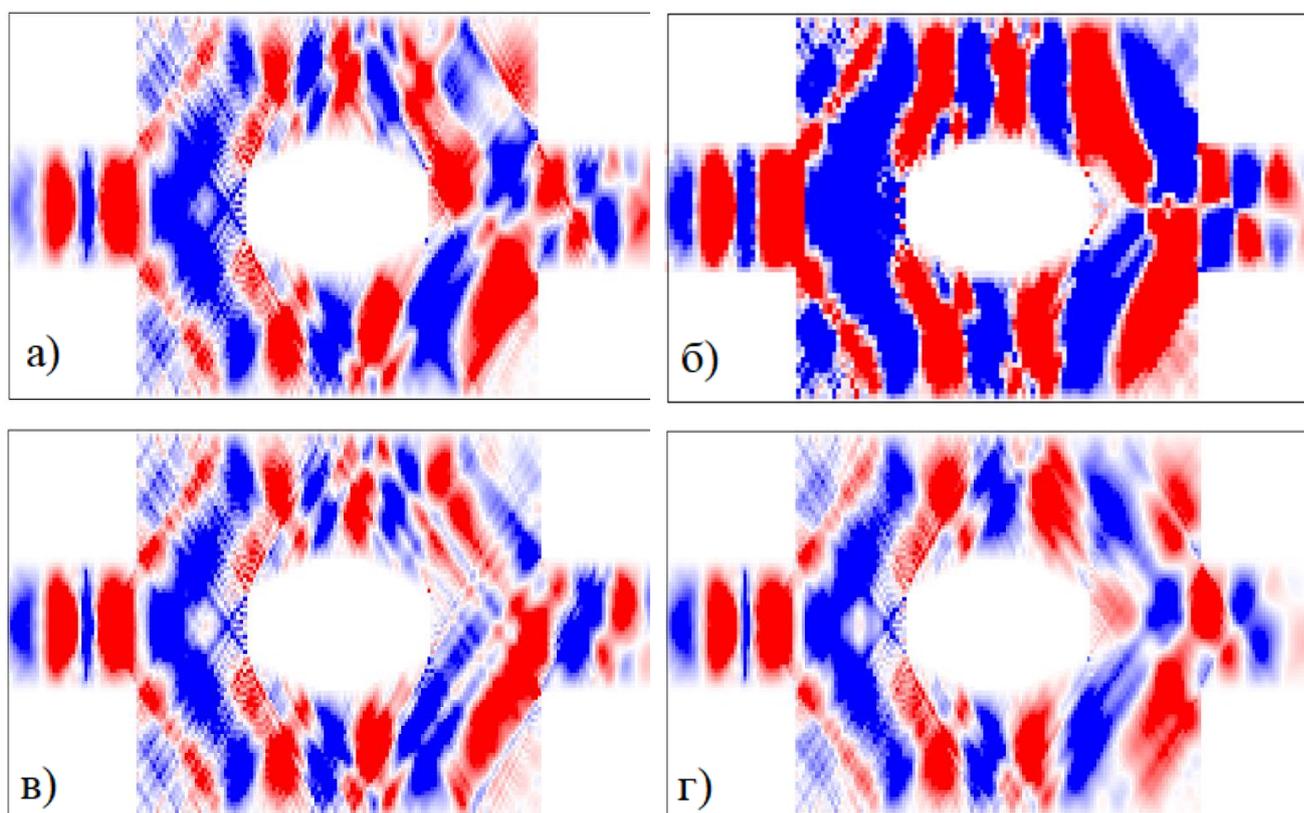


Рисунок 4 — Распределение амплитуды  $z$ -компоненты намагниченности для ЖИГ интерферометра с управляющим элементом. Частота сигнала 5.3 ГГц,  $B_{stat1} =$  а) 1185 Гс, б) 1190 Гс, в) 1195 Гс, г) 1205 Э

Видно, что при изменении величины магнитного поля в локальной зоне в этой же области изменяется длина волны сигнала, что приводит к изменению разности фаз волн в момент их интерференции. Из-за этого на выходе получаем двухмодовый сигнал с меньшей общей амплитудой при считывании. Таким образом, медленное изменение магнитного поля в локальной зоне приводит к быстрому изменению амплитуды выходного сигнала.

Дальнейший интерес представляет схема из двух интерферометров с воздушным зазором между ними. В данной схеме волна возбуждается только в

нижнем интерферометре, но возникают волны и в верхнем слое. Это происходит из-за так называемого провисающего поля, - поля, которое создает динамическая намагниченность в нижнем слое рядом с поверхностью пленки.

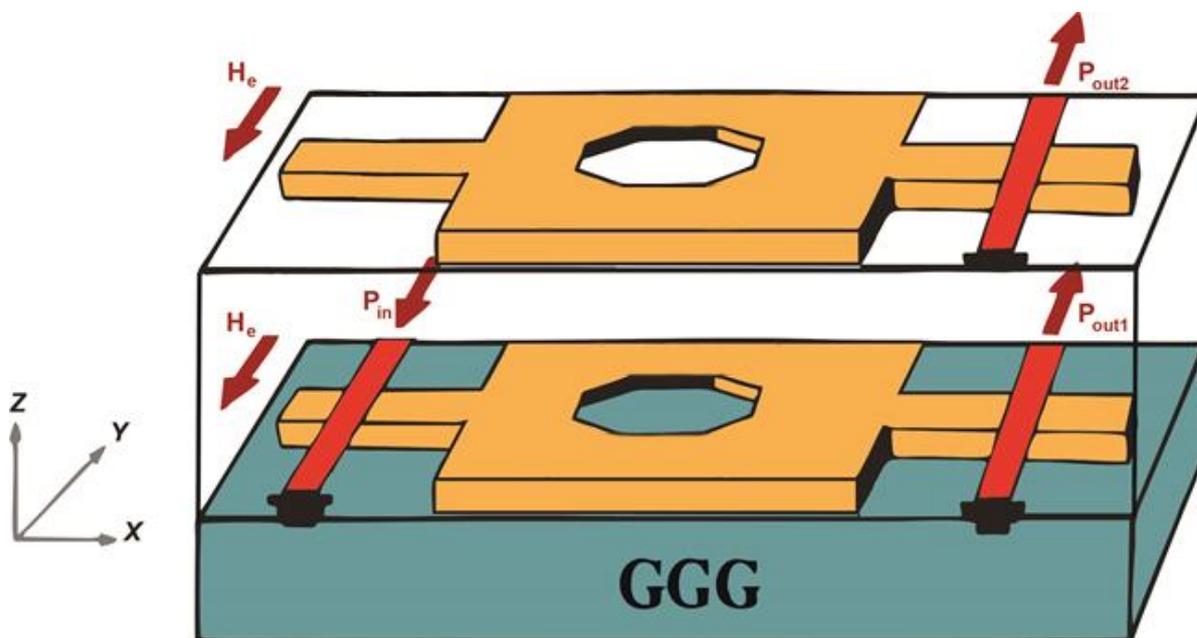


Рисунок 5 — Схема парных интерферометров с зонами переменного магнитного поля.  $H_e$  — вектор внешнего магнитного поля;

Общая длина структуры — 3.5 мм; общая ширина - 1.5 мм; ширина волновода — 0.5 мм;

Длина левого и правого плеча - 675 мкм; Толщина каждого интерферометра - 10 мкм

Получена амплитудно-частотная характеристика данной системы. Оптимальный диапазон частот входного сигнала — от 5.2 до 5.7 ГГц. Далее были построены карты распределения амплитуды векторов z-компоненты намагниченности для исследуемой структуры. Были проведены расчеты при разных расстояниях между интерферометрами.

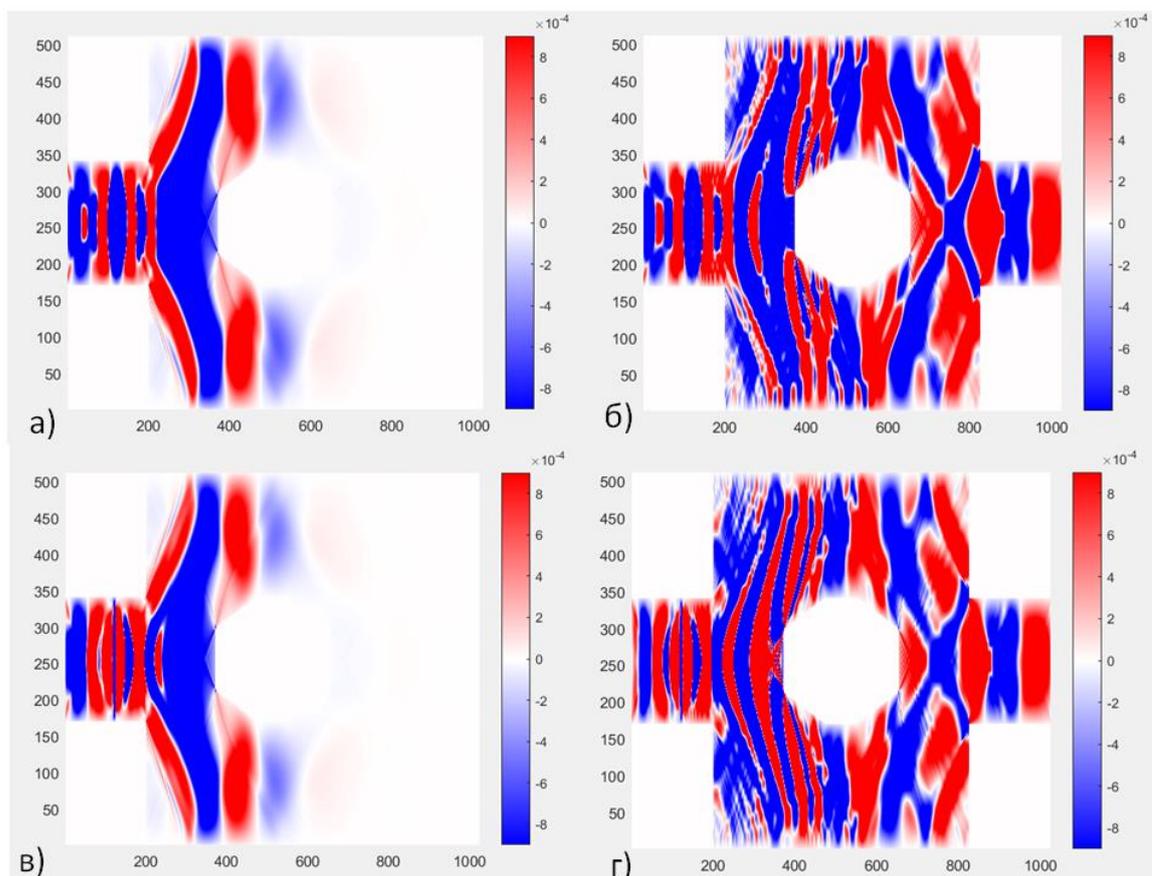


Рисунок 6 – Карты распределения амплитуды векторов намагниченности в схеме из двух интерферометров. Частота 5.3 ГГц. Зазор между слоями 10 мкм. а) Верхний слой, 10 нс; б) Верхний слой, 30 нс; в) Нижний слой, 10 нс; г) Нижний слой, 30 нс.

Построены карты распределения  $z$ -компоненты намагниченности для системы из двух интерферометров при разных частотах. На рисунках 9 и 10 можно наблюдать распространение спиновых волн в разные моменты времени при разных величинах зазора между интерферометрами. При зазоре, по толщине равному одному интерферометру, сигнал почти одинаково распространяется в обоих слоях. При зазоре в 80 мкм заметно небольшое «отставание» волны в верхнем слое и искажение сигнала в зоне выхода верхнего интерферометра.

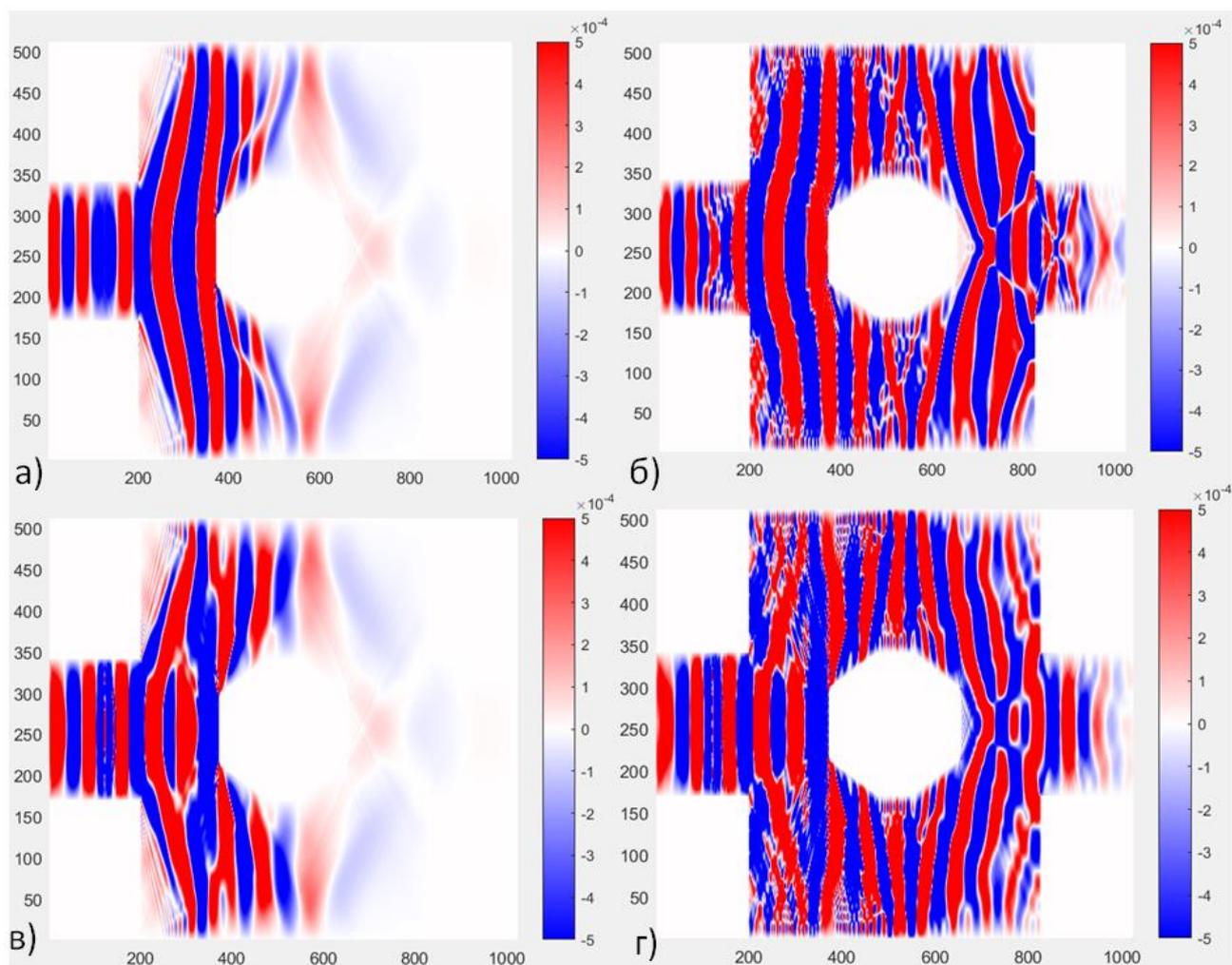


Рисунок 7 – Карты распределения амплитуды векторов намагниченности в схеме из двух интерферометров Частота 5.4 ГГц. Зазор между слоями 80 мкм. а) Верхний слой, 20 нс; б) Верхний слой, 50 нс; в) Нижний слой, 20 нс; г) Нижний слой, 50 нс

**Раздел 3** работы посвящен процессу получения раствора никелевых нановолокон.

Процесс получения раствора, содержащего нановолокна, включает в себя несколько этапов: напыление металла в электрическом поле на нетканую полимерную подложку, растворение полимера в диметилформамиде, перевод раствора в изопропиловый спирт и обработка полученного раствора ультразвуковым методом. Проведение всех этапов создания материала и определение оптимального режима и времени обработки ультразвуком экспериментальным путем – одна из задач данной работы.

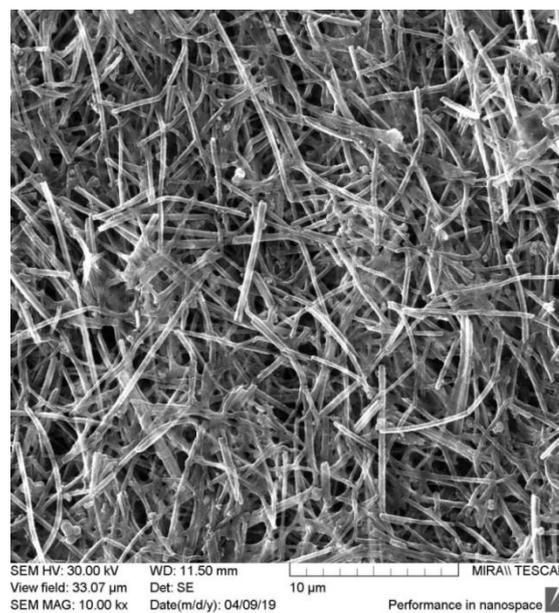


Рисунок 8 – Образец никелевых нановолокон. Изображение с электронного микроскопа. D1 – диаметр репрезентативного волокна. Средняя длина волокна ~ 9 микрон.

С помощью полученных снимков каждой пробы образца установлена средняя длина волокон для разных режимов обработки ультразвуком. Работа ультразвуковой установки на максимальной мощности приводила к сильному нагреву образца с раствором, но не давала ощутимой разницы в средней длине волокна. Поэтому оптимальным оказался режим 50% мощности установки и временем обработки образца 10 минут. Размеры и геометрические параметры волокон, полученные с помощью электронной и оптической микроскопии, использовались в создании модели для численного микромагнитного моделирования.

В 4 разделе работы проводится изучение магнитных свойств нановолокон путем численного моделирования.

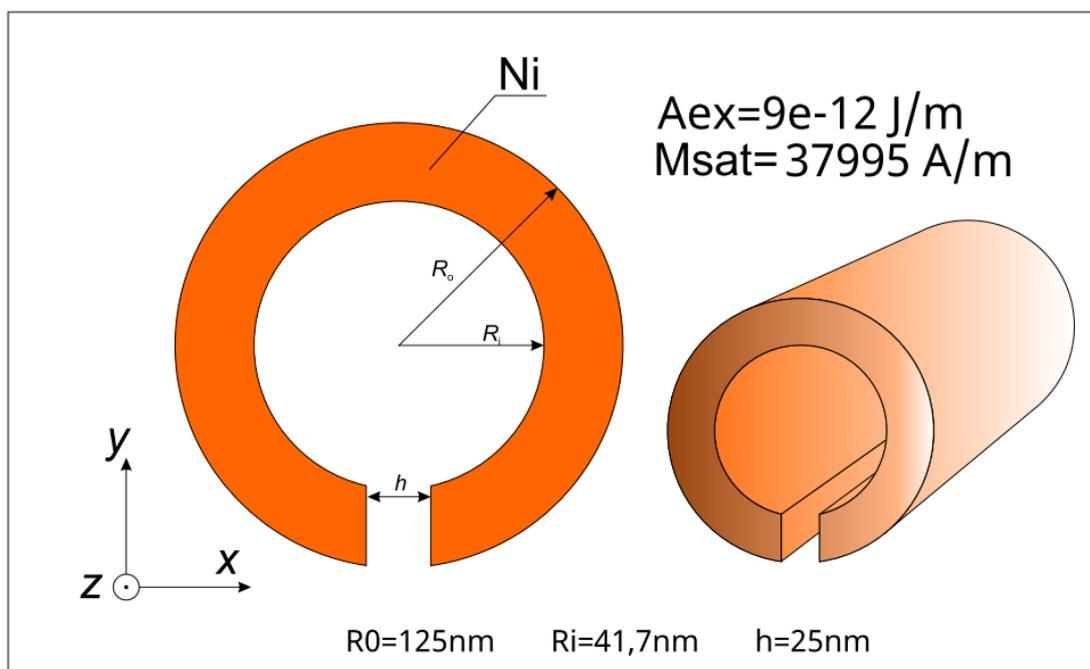
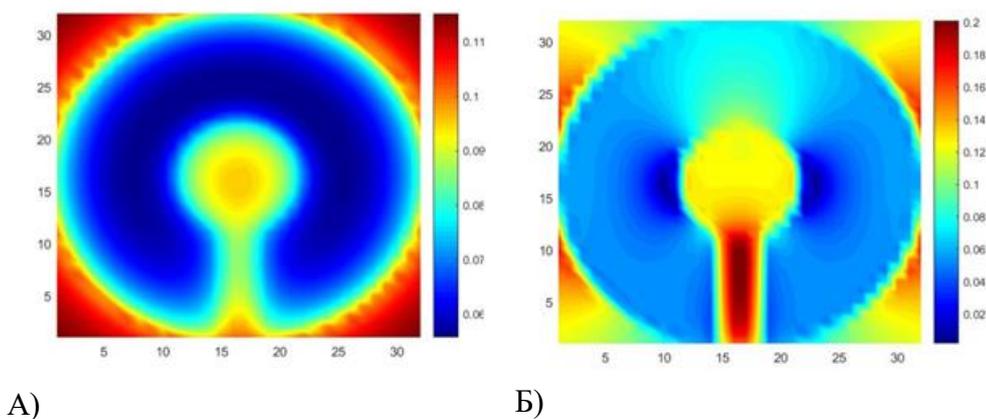


Рисунок 9 – Модель волокна для численного магнитного моделирования.  $A_{ex}$  – константа обменного взаимодействия,  $M_{sat}$  – намагниченность насыщения для никеля.

Объектом исследования является часть никелевого нановолокна с параметрами: Длина – 3 мкм; Внешний радиус - 125 нм; Внутренний радиус - 41,7 нм; Величина зазора  $h$  – 25 нм; Намагниченность насыщения - 37995 А/м; Модуль вектора индукции постоянного внешнего магнитного поля - 0,12 Тл; Параметр затухания  $\alpha$  - 0,05; Константа обменного взаимодействия –  $9e-12$  Дж/м

Получены распределения модуля вектора индукции эффективного магнитного поля в структуре для заданных параметров при разных направлениях внешнего магнитного поля.



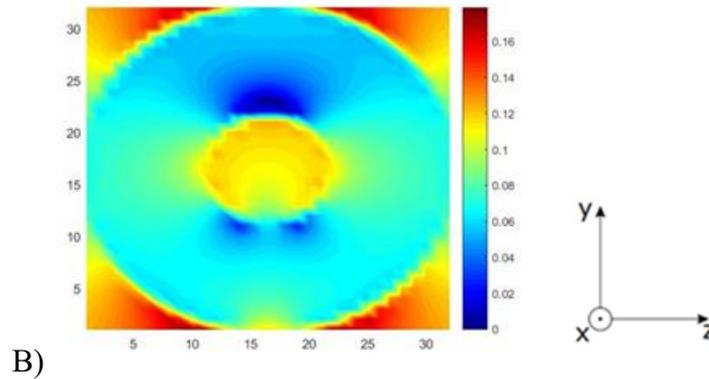


Рисунок 10 – карты распределения эффективного магнитного поля в нановолокне при направлении внешнего магнитного поля А) вдоль оси X, Б) вдоль оси Y, В) вдоль оси Z

При направлении внешнего поля по оси Z можем наблюдать неоднородное распределение поля с явным максимумом в области зазора. Внутри структуры поле имеет минимумы в областях слева и справа вдоль внутреннего радиуса. При направлении внешнего поля по оси Y максимум в области зазора не наблюдается так ярко, картина поля отличается от предыдущей, минимумы теперь расположены сверху и снизу в области около внутреннего радиуса структуры. В случае направления внешнего поля по X картина еще раз меняется. Поле внутри плавно изменяется вдоль границ структуры от максимума снаружи к минимуму внутри.

Далее была исследована динамика распространения спиновых волн в структуре. Для этого построены карты распределения амплитуды векторов намагниченности. В нашем случае, волны распространяются вдоль оси X, вдоль этой же оси приложено внешнее магнитное поле.

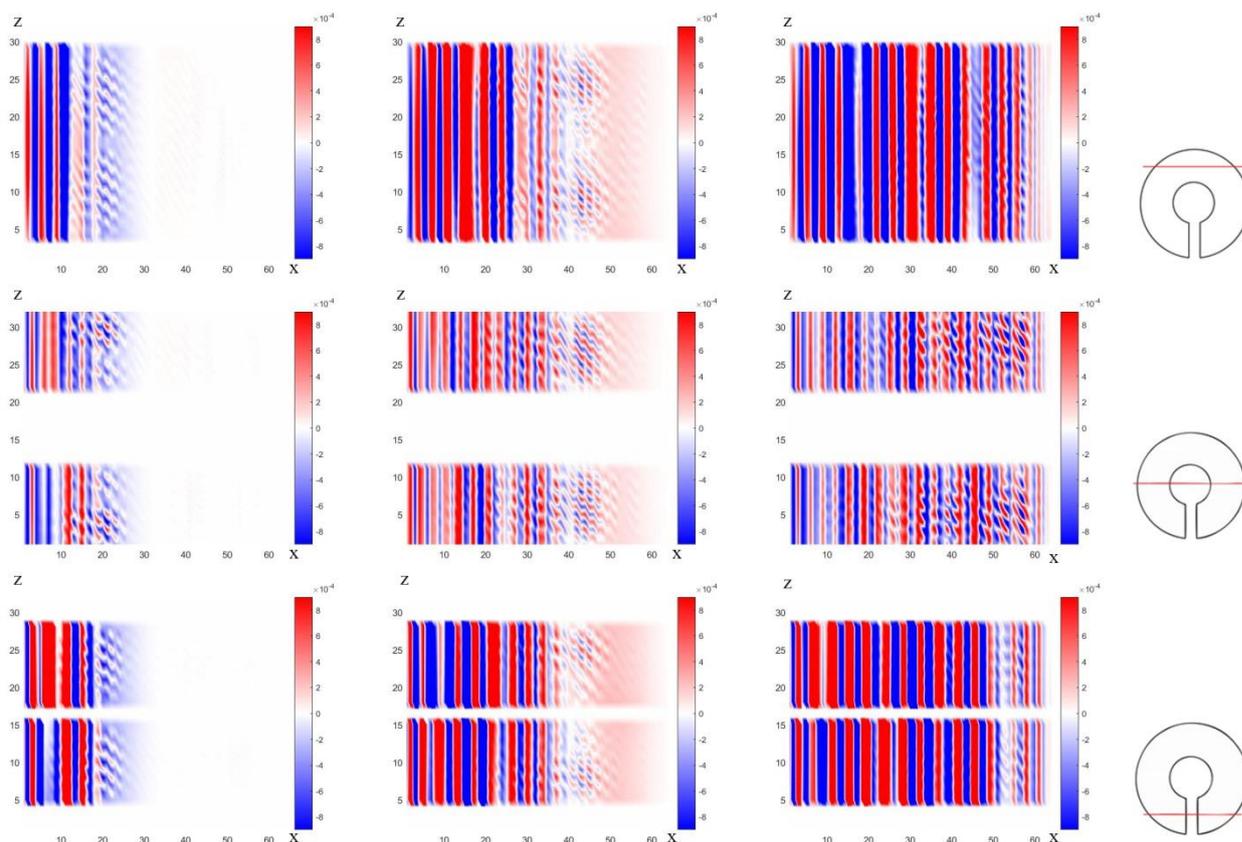


Рисунок 11 – Карты распределения амплитуды векторов намагниченности в волоконной структуре. Частота 5.5 ГГц. Внешнее поле приложено по оси X.

На рисунке представлено распределение амплитуды z-компоненты намагниченности в разные моменты времени от начала распространения волны. Источник сигнала точечный и расположен в верхней части структуры, но распространение волн можем наблюдать по всей площади сечения незамкнутого цилиндра. Распространяется одномодовый гармонический сигнал без особых искажений.

Проведено исследование ферромагнитного резонанса в структуре для нахождения собственных частот системы. Моделирование проводилось путем передачи сигнала через внешнее поле одновременно во всем объеме структуры, в отличие от прошлых исследований.

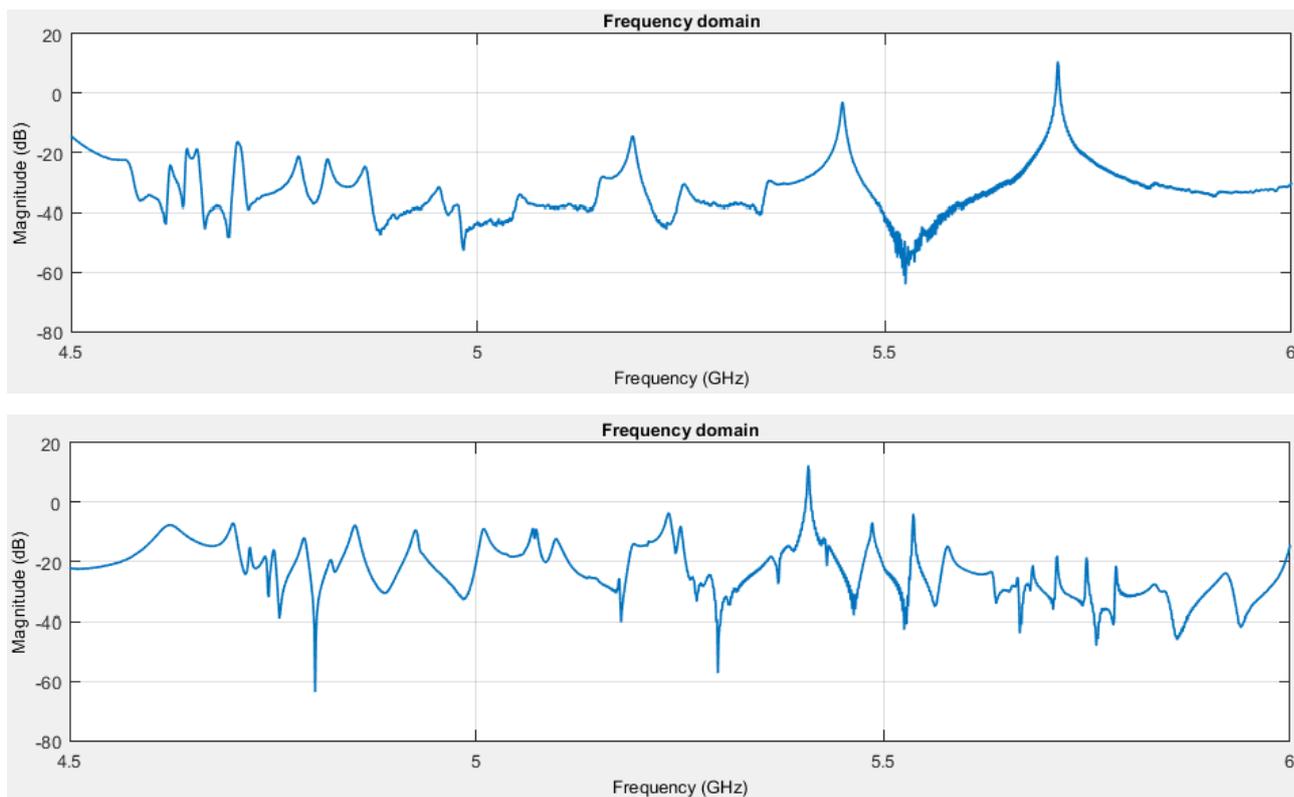


Рисунок 12 — Амплитудно-частотная характеристика, полученная моделированием ферромагнитного резонанса а) в тонкой пленке ЖИГ, б) в исследуемом волокне ЖИГ

Сравнивая графики, можем видеть разное положение пиков с наименьшим затуханием и разную частоту пиков на графиках. Наивысшие пики соответствуют собственным частотам исследуемых систем.

**В заключении** подводятся итоги исследования, излагаются его основные результаты.

Была рассмотрена динамика распространения спиновых волн в системах с ЖИГ-интерферометрами, в цилиндрической волоконной структуре. Построены карты распределения амплитуды векторов намагниченности для разных частот сигнала и для разных параметров каждой системы. Рассмотрены распределения эффективного магнитного поля в нановолокне, показывающие зависимость внутреннего поля ферромагнетиков от направления приложенного внешнего поля. Проведены и описаны все этапы получения раствора никелевых нановолокон. Экспериментальным путем установлены оптимальные параметры обработки образцов раствора ультразвуковой установкой.