

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

**Система управления сигналом на основе связанных спин-волновых
интерферометров Маха-Цендера**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2241 группы

Направления 09.04.02. «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления

Института физики

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 2022

Характеристика работы

Работа посвящена изучению магнитных свойств ферромагнитных структур на основе ЖИГ-интерферометров Маха-Цендера.

Цели настоящей магистерской работы: исследование динамики спиновых волн в ферромагнитных структурах, описание принципа управления сигналом в интерферометрах с зоной локального изменения магнитного поля, моделирование возможности использования описанных структур в качестве логических элементов.

В работе было использовано 18 литературных источников.

Содержание работы

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

Спиновая волна – это коллективные колебания спинов вокруг направления постоянной намагниченности, волнообразно распространяющиеся в магнитных материалах¹.

Среди всех ферромагнетиков выделяются монокристаллы железо-иттриевого граната (ЖИГ). Этот материал обладает рекордно низкими магнитными потерями (затуханием волн) на сверхвысоких частотах².

В данной работе рассмотрен один из возможных элементов магнонной логики – система связанных интерферометров Маха-Цендера. Известна реализация управления сигналом в интерферометре Маха-Цендера за счет заключения между плечами интерферометра проводника с током³. Из-за протекания тока по проводу, в плечах интерферометра меняется распределение поля, что приводит к локальному изменению длин волн и деструктивной

¹ Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994.

² Садовников А.В., Грачев А.А., Одинцов С.А., Мартышкин А.А., Губанов В.А., Шешукова С.Е., Никитов С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т.108. Вып. 5. С 332–338.

³ Lee, K.S.; Kim, S.K. Conceptual design of spin wave logic gates based on a Mach–Zehnder-type spin wave interferometer for universal logic functions // J. Appl. Phys. 2008, 104, 053909.

интерференции на выходе при определенной величине тока в проводнике. В отличие от данной работы, проведено моделирование структуры с изменением магнитного поля методом локального нагрева. Преимущество данного метода заключается в возможности менять поле отдельно в каждом плече интерферометра.

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

В данной работе изучаются магнитные свойства ферромагнитных структур. Основным методом решения данной задачи – компьютерное микромагнитное моделирование путем численного решения уравнения 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, α – параметр затухания,

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

F – свободная энергия ферромагнетика, γ – гиромагнитное отношение, H_{eff} – эффективное магнитное поле⁴.

Численное решение уравнения было получено методом конечных разностей, который реализован 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 алгоритмов⁵.

В разделе 2 работы рассматривается распространение спиновых волн в ЖИГ-интерферометре с управляющим элементом и описывается принцип управления сигналом.

⁴ 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.

⁵ А.А. Дегтярев Метод конечных разностей. Самара: Изд-во СГАУ, 2011.

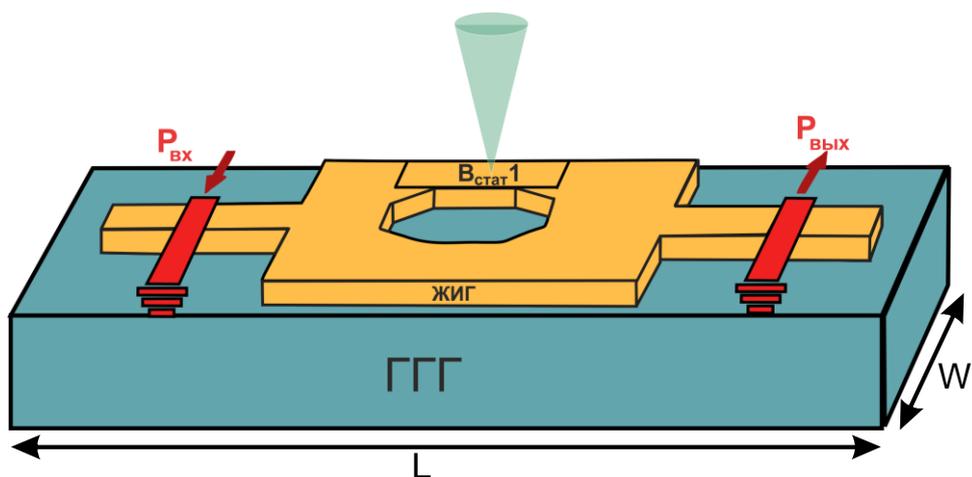


Рисунок 1 - Схема интерферометра

Объектом исследования является интерферометр на основе плёнки ЖИГ, изображенный на рисунке 1, с параметрами: Общая длина L – 10 мм; Общая ширина W - 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 – 1490 Э; Затухание $\alpha = 10e-5$. ГГГ - Галлий-гадолиниевый гранат, используется как подложка при изготовлении устройств на основе тонких пленок ЖИГ. $B_{стат 1}$ – зона локального изменения магнитного поля. Служит управляющим параметром сигнала.

Было проведено моделирование структуры с одним интерферометром с управляющим элементом в одном из плеч. Видно, как при малом изменении управляющего параметра сильно меняется сигнал на выходе структуры.

В результате получены карты распределения z -компоненты намагниченности при частоте гармонического сигнала 6.17 ГГц, возбуждаемого на входе $P_{вх}$. Подобраны оптимальные параметры геометрии, определен диапазон управляющего параметра и его значения для получения деструктивной интерференции волн на выходе.

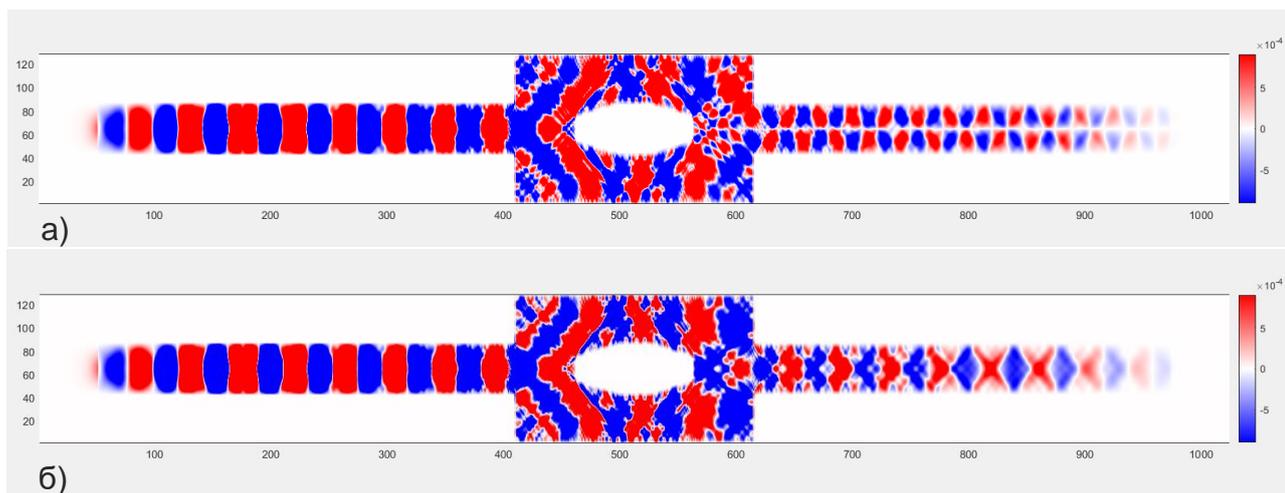


Рисунок 2 - карты распределения z-компоненты намагниченности а) без изменения поля в верхнем плече устройства, б) при изменении $B_{\text{стат}1}$ на 10 Э.

Принцип управления сигналом в данной системе заключается в небольшом изменении магнитного поля в верхнем плече интерферометра, приводящему к изменению длины спиновой волны в зоне управляющего элемента. Это приводит к возникновению разности фаз между волнами, выходящими из двух плеч интерферометра, и, как следствие, конструктивной или деструктивной интерференции этих волн. Из-за этого явления меняется амплитуда сигнала на выходе системы. В физическом экспериментальном макете этому процессу соответствовало бы нагревание управляющей области лазером.

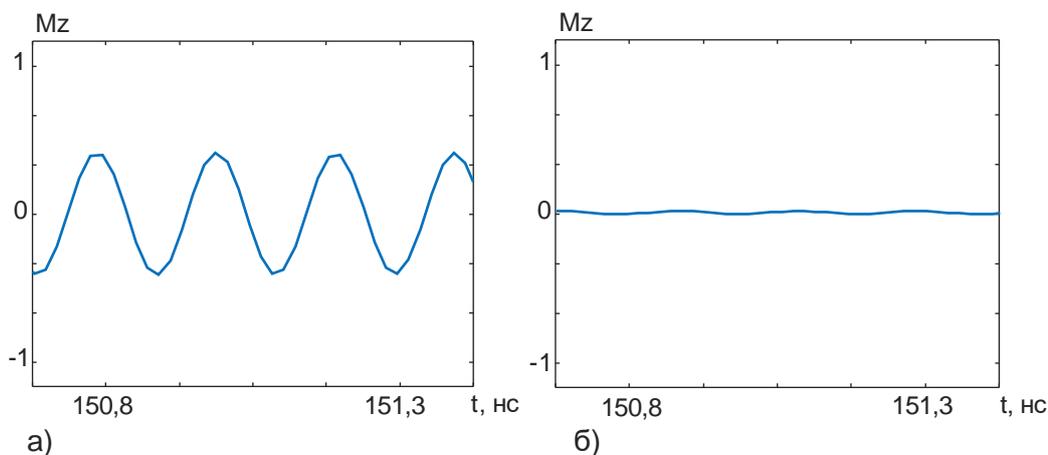


Рисунок 3 - амплитуда сигнала на выходе интерферометра с управляющим элементом а) $B_{\text{стат}1}$ равно по величине внешнему полю; б) $B_{\text{стат}1}$ больше внешнего поля на 10 Э.

Получена зависимость сигнала на выходе от величины управляющего параметра $B_{\text{стат}1}$. Для наименьшей амплитуды сигнала на выходе при текущих параметрах структуры и величине внешнего магнитного поля равной 1490 Э, наиболее подходящими значениями параметра в области локального изменения магнитного поля являются $B_{\text{стат}1} = 1480$ Э и $B_{\text{стат}1} = 1500$ Э.

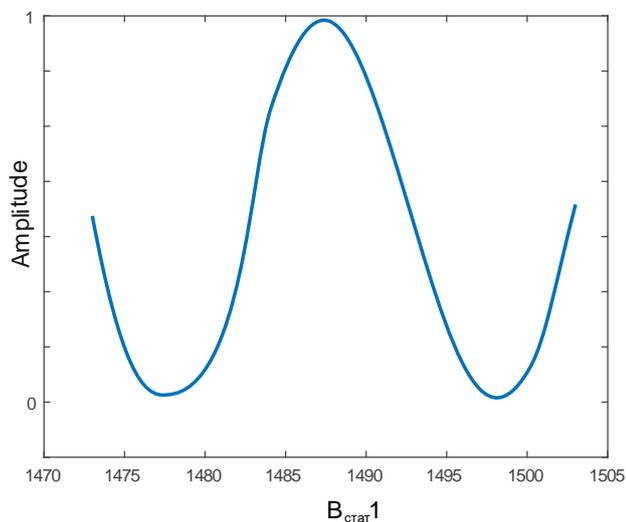


Рисунок 4 - зависимость сигнала на выходе от величины управляющего параметра $B_{\text{стат}1}$.

Если принять минимальное значение модуля полученной амплитуды сигнала за логический 0, а его максимальное значение – за логическую 1, на основе данной структуры при использовании рассмотренного принципа управления сигналом становится возможна реализация логических операций. Примем также за логические 1 наличие гармонического сигнала на входе и значение управляющего поля, на 10 Э отличающееся от величины внешнего поля, а за 0 – отсутствие сигнала на входе системы и значение поля в плече, равное внешнему полю. Тогда можем построить таблицу истинности для данной системы.

P_{in}	$B_{\text{стат}1}$	P_{out}
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Таблица 1 - таблица истинности интерферометра с одним управляющим элементом.

Раздел 3 работы посвящен исследованию систем связанных интерферометров. В подразделе 3.1 рассматривается система из двух вертикально связанных интерферометров.

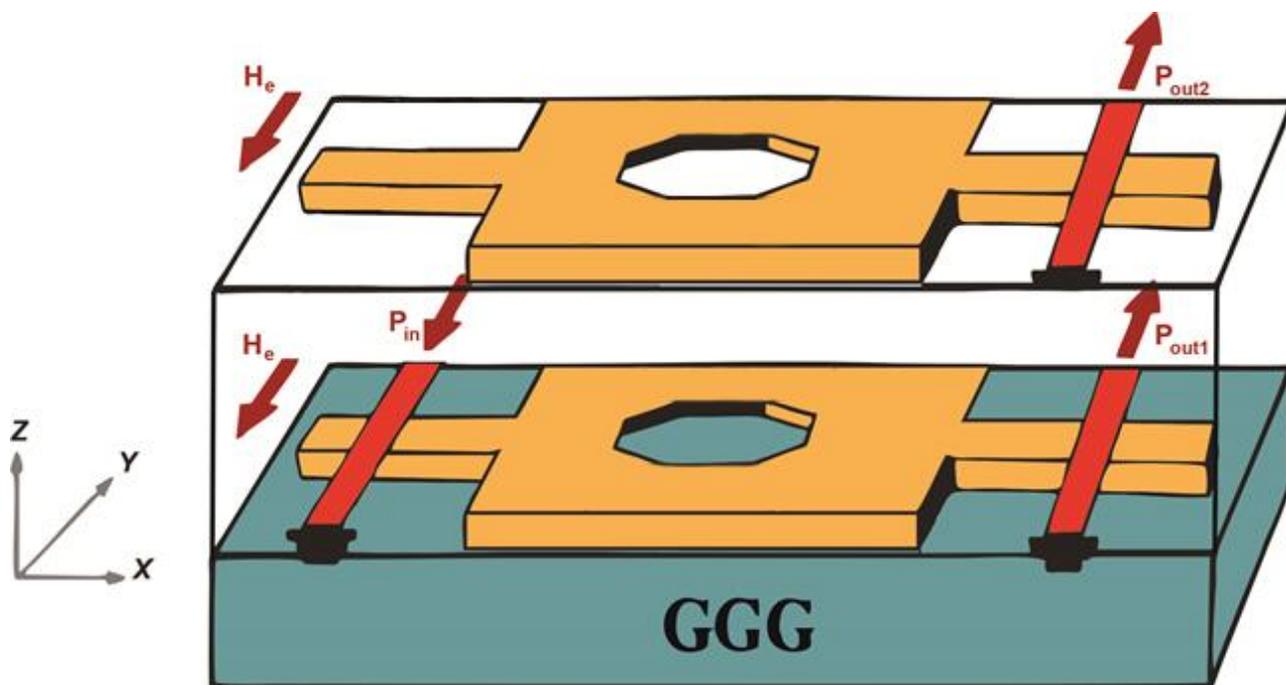


Рисунок 5 – Схема структуры из двух вертикально связанных интерферометров. H_e – вектор внешнего магнитного поля;

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

Построены карты распределения амплитуды векторов z-компоненты намагниченности для исследуемой структуры. Были проведены расчеты при разных расстояниях между интерферометрами.

При зазоре между интерферометрами в 10 микрон, гармонический сигнал со входа нижнего интерферометра распространяется практически без искажений и запаздываний как в нижнем, так и верхнем слое структуры.

В случае с зазором между верхним и нижним микроволноводами в 40 микрон, становится заметным искажение сигнала в верхнем слое. На выходе верхнего интерферометра фронт волны скругляется, заметно запаздывание фазы волны относительно нижнего интерферометра.

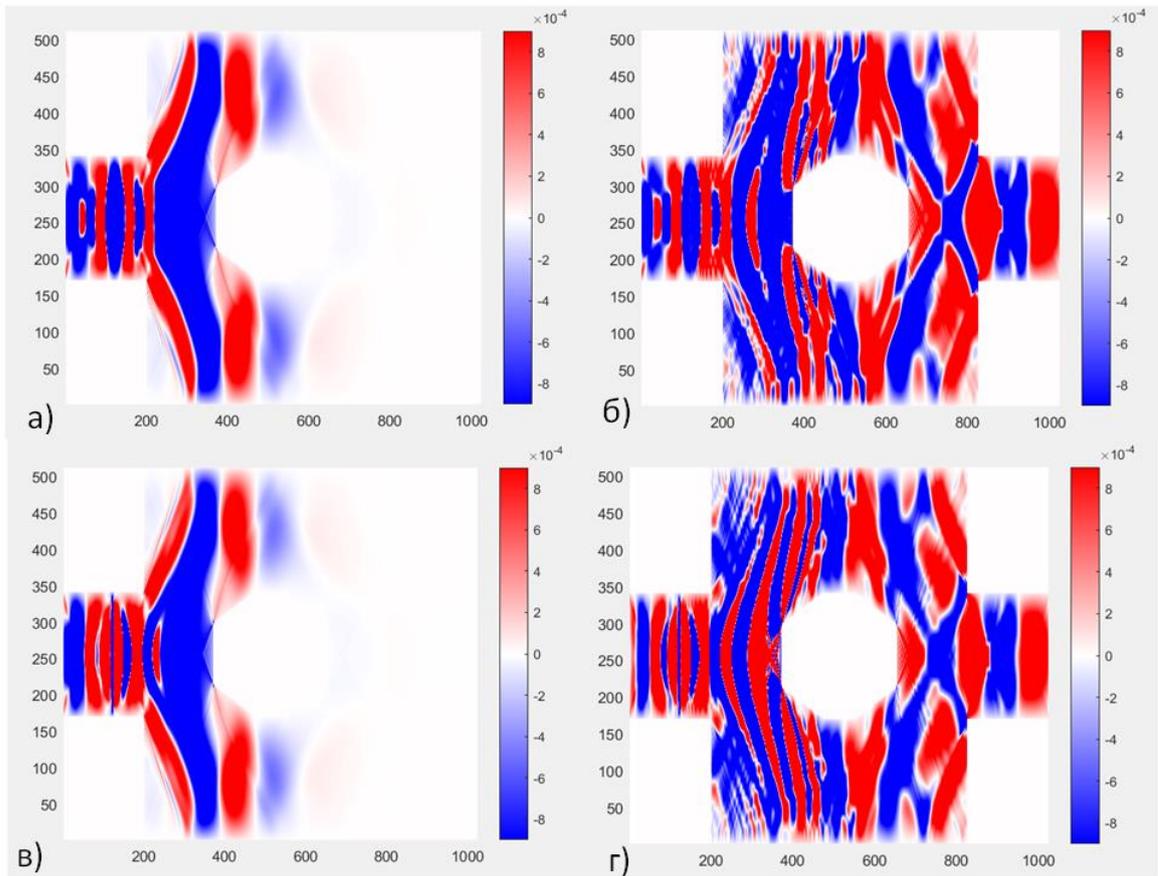


Рисунок 6 – Карты распределения амплитуды векторов намагниченности в схеме из двух интерферометров. Частота 5.3 ГГц. Зазор между слоями 10 мкм. а) Верхний слой, 10 нс; б) Верхний слой, 30 нс; в) Нижний слой, 10 нс; г) Нижний слой, 30 нс.

Наибольшие отличия в распространении сигнала между слоями заметно при величине зазора в 80 мкм. «Отставание» волны заметно более явно, становятся сильнее искажения сигнала в выходной части верхнего интерферометра. Появляется некоторая многомодовость сигнала в этой области. Установлено, что характер отличий в карте распределения между нижним и верхним слоем не меняется при изменении частоты сигнала.

В подразделе 3.2 рассмотрена схема из двух латерально связанных ЖИГ-интерферометров.

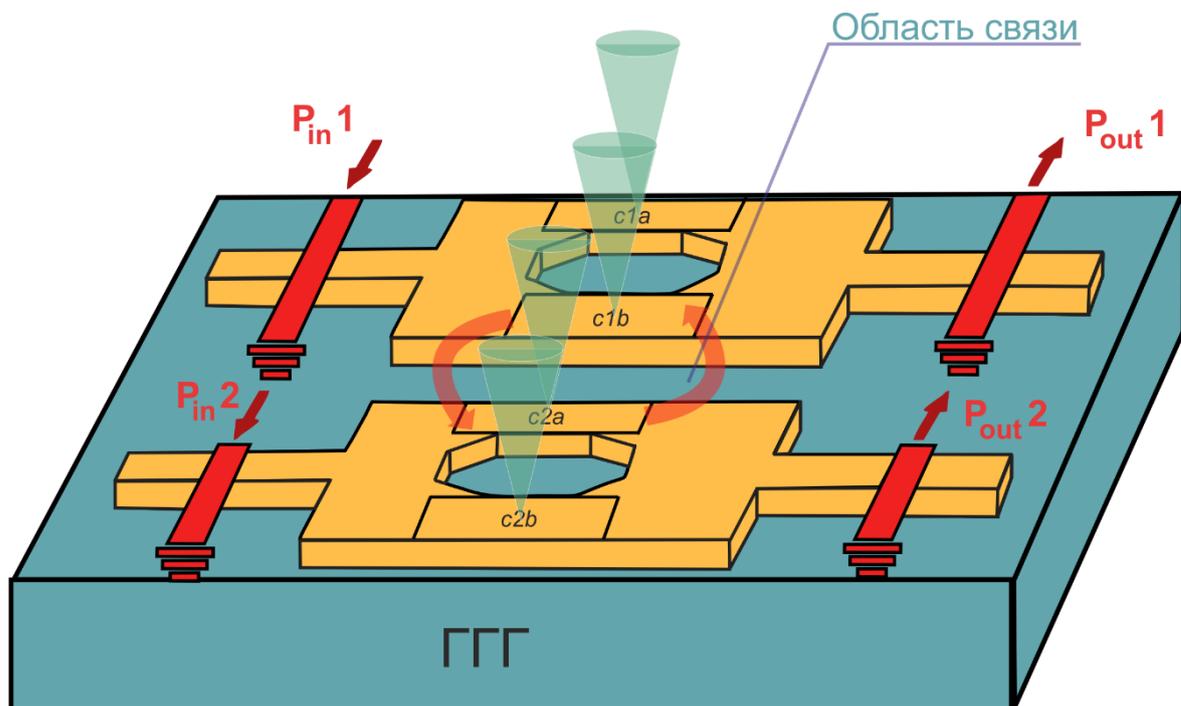
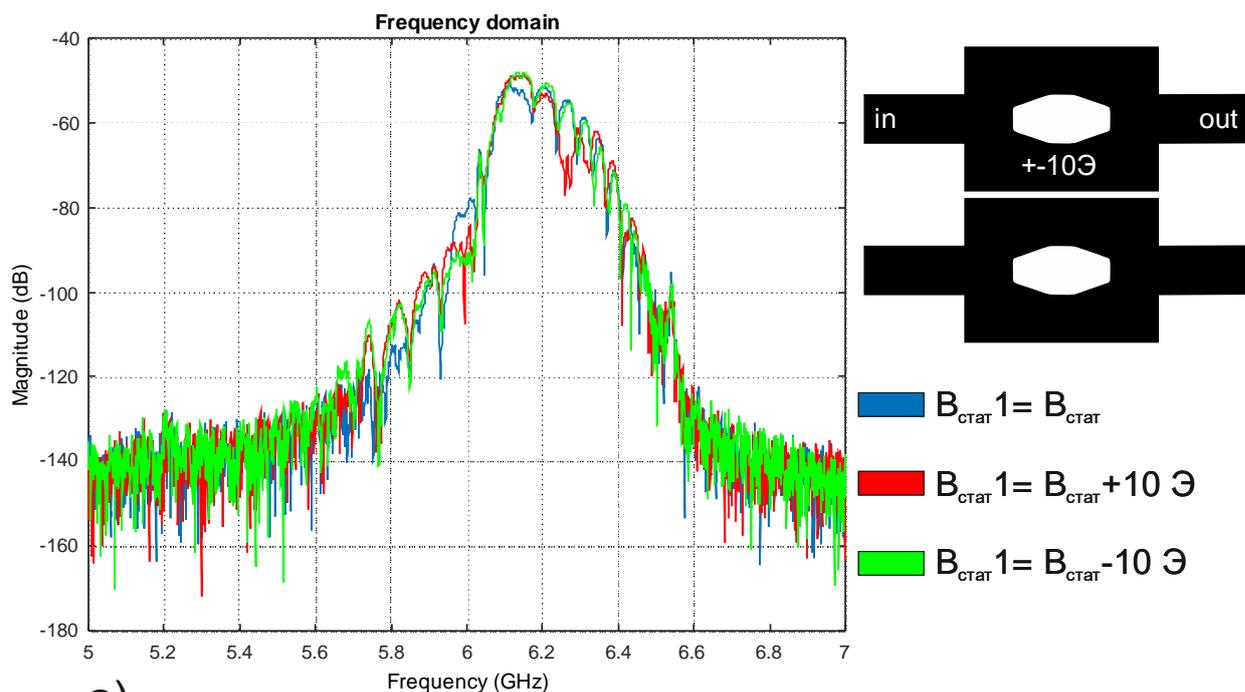


Рисунок 7 – схема системы из двух латерально связанных интерферометров Маха-Цендера.

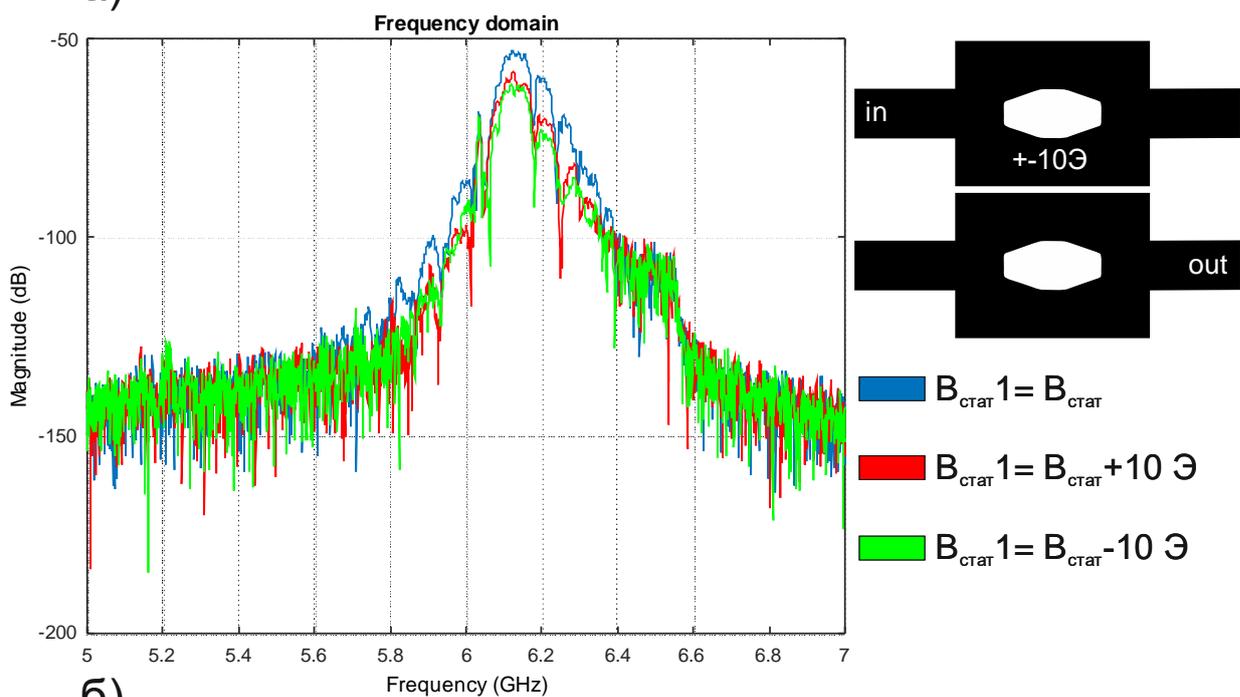
Общая длина структуры – 10000 мкм; общая ширина - 3020 мкм; ширина волновода – 500 мкм; Толщина каждого интерферометра - 10 мкм; Намагниченность насыщения - $1,39e-5$ А/м; Величина постоянного внешнего магнитного поля – 1490 Э; Затухание $\alpha = 10e-5$. ГГГ - Галлий-гадолиниевый гранат; P_{in1} , P_{in2} – входные, P_{out1} , P_{out2} – выходные преобразователи сигнала; c1a, c1b, c2a, c2b – управляющие элементы, зоны локального изменения магнитного поля. Область связи – зона, где взаимодействуют магнитные поля каждого из интерферометров, представляет собой зазор величиной 20 мкм между интерферометрами.

За счет четырех управляющих элементов, двух входов и выходов, данная система реализует множество режимов распространения сигнала путем разных комбинаций управляющих параметров. Некоторые из возможных режимов рассмотрены в данной работе.

Были построены спектры возбуждения спиновых волн для данной системы. По полученным данным можно определить оптимальный частотный диапазон для возбуждения гармонического сигнала при заданных параметрах среды, величины внешнего магнитного поля.



а)



б)

Рисунок 8 – спектры возбуждения спиновых волн в системе латерально связанных интерферометров при изменении поля в нижнем плече верхнего интерферометра, снятые а) на верхнем выходе б) на нижнем выходе.

Из построенных спектров возбуждения сигнала были выбраны частоты, на которых наблюдаются наибольшие провалы на графиках, для каждого случая размещения области локального изменения магнитного поля. На этих частотах

были получены карты распределения z-компоненты намагниченности в системе.

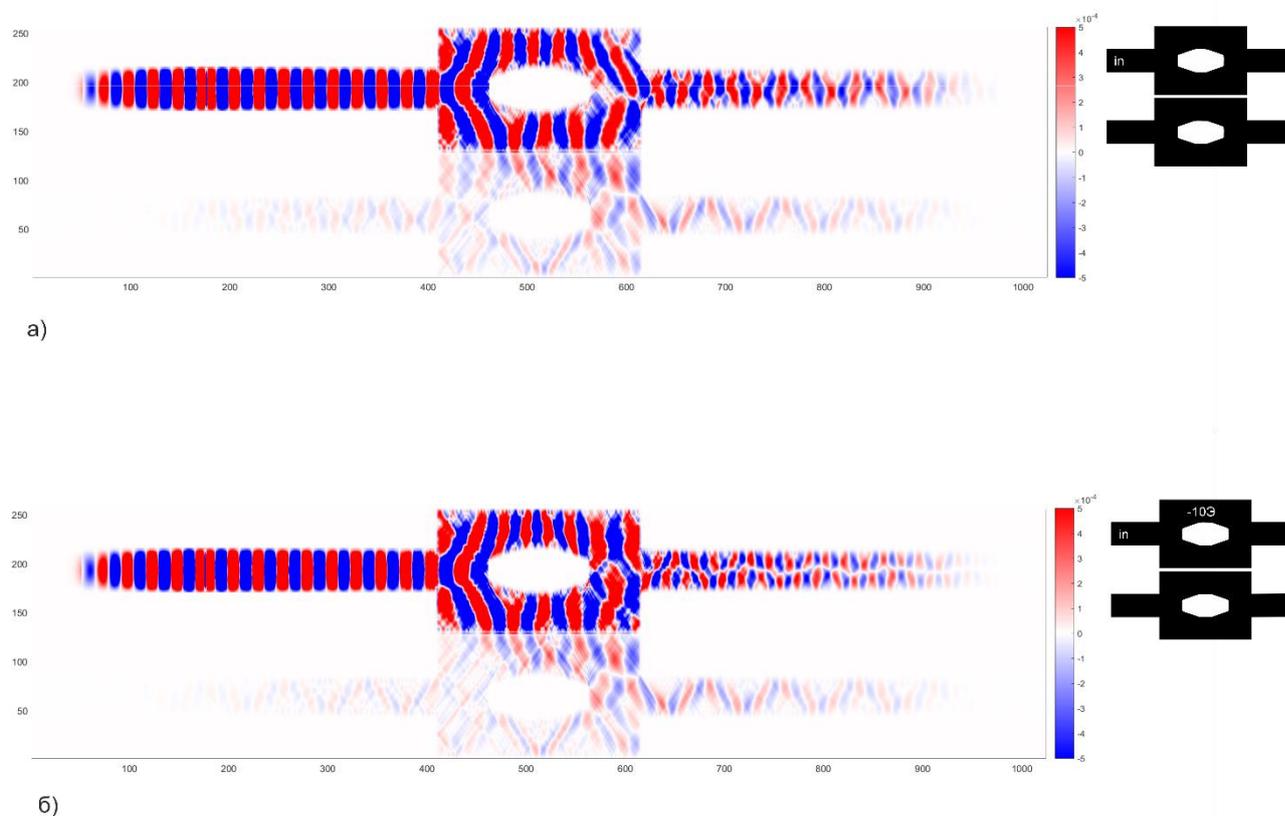


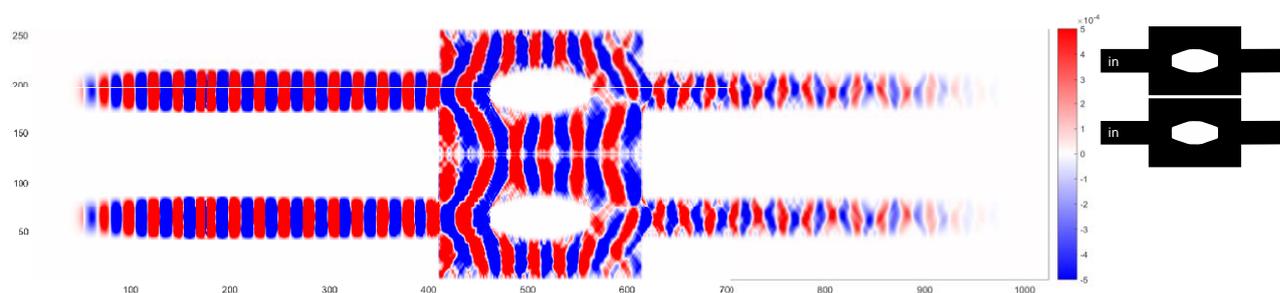
Рисунок 9 – карты распределения z-компоненты намагниченности в системе на частоте 6.26 ГГц а) при отсутствии управляющего поля б) с уменьшением управляющего поля в верхнем плече верхнего интерферометра.

На рисунке 9 (а) показано, что в случае возбуждения сигнала на верхнем входе системы, при управляющем поле, равном внешнему полю, наблюдается конструктивная интерференция спиновых волн в обоих интерферометрах и одномодовый сигнал на верхнем и нижнем выходах структуры. Интегрированная по ширине волновода амплитуда сигнала будет максимальной.

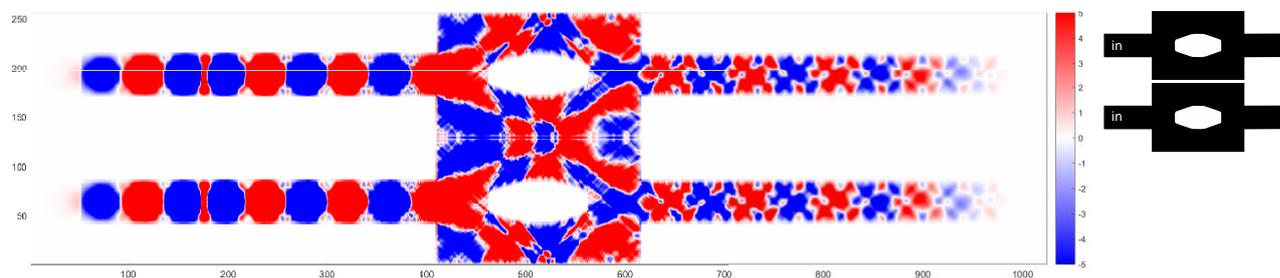
При уменьшении магнитного поля в верхнем плече верхнего интерферометра (рисунок 9 (б)), наблюдается деструктивная интерференция спиновых волн в верхнем интерферометре и двумодовый сигнал на верхнем выходе структуры. Интегрированная по ширине волновода амплитуда сигнала

будет во много раз меньше, чем без управляющего поля.

Далее проводилось моделирование распространения спиновых волн в структуре при возбуждении сигнала на обоих входах. При таком режиме ожидалось еще меньшее влияние изменения управляющего параметра в одном интерферометре на сигнал в другом интерферометре. Моделирование проводилось для двух вариантов расположений зоны управляющего магнитного поля, а не четырех, так как структура симметрична.



а)



б)

Рисунок 10 – карты распределения z-компоненты намагниченности при подаче сигнала на оба входа системы а) на частоте 6.26 ГГц б) на частоте 6.1 ГГц.

Полученные карты распределения без влияния управляющих элементов можно наблюдать на рисунке 10. На разных частотах распространения сигнала картина одинаковая: наблюдается небольшое изменение длины в плечах, расположенных в области связи, из-за взаимодействия полей двух интерферометров в зоне зазора, но на выходе получаем простой одномодовый сигнал.

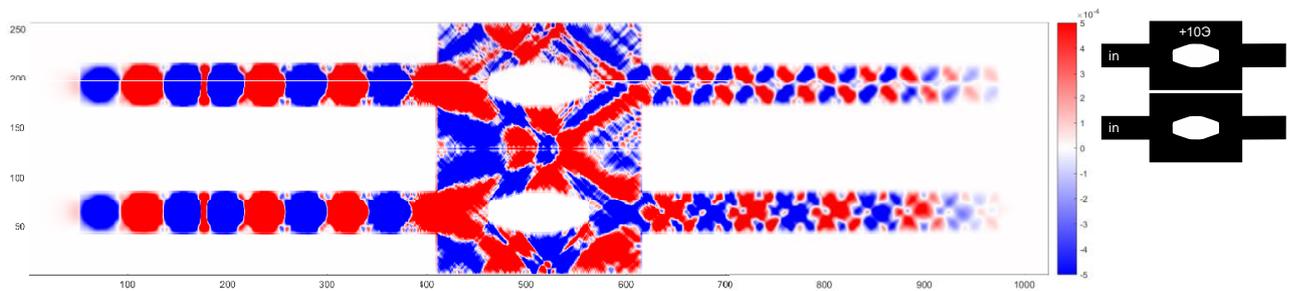


Рисунок 11 – карты распределения z-компоненты намагниченности при подаче сигнала на оба входа системы и увеличении управляющего поля в верхнем плече верхнего интерферометра.

Рисунок 11 показывает распределение z-компоненты намагниченности в системе при возбуждении сигнала на обоих входах и локальном изменении магнитного поля в верхнем плече верхнего интерферометра. На верхнем выходе структуры наблюдается двумодовый сигнал и низкая амплитуда сигнала, взятая по всей ширине волновода. В нижнем интерферометре сигнал распространяется так же, как и без изменения управляющего параметра.

По принципу, описанному в главе 2, можно получить таблицу истинности для данной системы, приняв за логическую 1 подачу гармонического сигнала на входы P_{in1} , P_{in2} , изменение на 10 Э величины магнитного поля в управляющих элементах $c1a$, $c1b$, $c2a$, $c2b$, некоторую величину взятой по всей ширине волновода амплитуды сигнала на выходах P_{out1} , P_{out2} . За логический 0 примем отсутствие сигнала на входах P_{in1} , P_{in2} , отсутствие локального изменения магнитного поля в зонах $c1a$, $c1b$, $c2a$, $c2b$ (равенство поля величине внешнего поля в этих зонах) и некоторую малую величину амплитуды сигнала на выходах P_{out1} , P_{out2} . Были смоделированы некоторые из возможных режимов работы данной структуры. Они соответствуют теоретическим ожиданиям, построенным в таблице 2.

$P_{\text{вх}} 1$	$P_{\text{вх}} 2$	$c1a$	$c1b$	$c2a$	$c2b$	$P_{\text{вых}} 1$	$P_{\text{вых}} 2$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	1	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0
1	0	1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1

Таблица 2 – фрагмент таблицы истинности системы из двух латерально связанных интерферометров с четырьмя управляющими элементами.

В заключении подводятся итоги исследования, излагаются его основные результаты.

Была рассмотрена динамика распространения спиновых волн в системе с ЖИГ-интерферометром с управляющим элементом в виде зоны локального изменения магнитного поля. Построена зависимость амплитуды сигнала на выходе от значения управляющего параметра и описан принцип управления сигналом. Проведено моделирование распространения спиновых волн в системах интерферометров Маха-Цендера в вертикально и латерально связанных конфигурациях. Для всех систем получены спектры возбуждения спиновых волн, построены карты распределения намагниченности в структурах при разных значениях управляющих параметров, при подаче сигнала на один и на оба входа структур, при разных частотах входного сигнала. Описано использование исследованных структур в качестве логических устройств. Получены таблицы истинности для данных систем.