

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**Исследование амплитудно-частотных характеристик планарных магنونных  
ответвителей сигналов**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТА**

студента 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 Прикладные математика и физика  
института физики  
Шабалина Давида Васильевича

Научный руководитель  
ассистент кафедры  
нелинейной физики

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.В. Романенко

Зав. кафедрой  
нелинейной физики,  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2021 г.

## Оглавление

Введение.....	3
Теоретическое описание.....	4
Исследуемый волновод.....	5
Заключение.....	13
Источники.....	14

## Введение

Совместно с развитием систем обработки информационных сигналов, построенных на базе полупроводниковых технологий с переносом заряда, в настоящее время широкое распространение получило направление, основанное на создании аналогичных систем на основе переноса магнитных моментов или спинов электронов без переноса заряда. Данным направлением является магноника и оно открывает новые возможности применения спиновых волн для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации. Стоит отметить, что магноника является относительно новым направлением спинтроники и спин-волновой электроники.

Магноника - раздел квантовой электроники, занимающийся изучением магнонного переноса энергии или информации в твердотельных веществах, и соответствующая инженерная область. В устройствах магноники, в отличие от устройств обычной электроники, энергию или информацию переносит не электрический ток, а ток магнонов. Разработаны первые образцы магнонных транзисторов и переключателей. Преимуществом спиновых волн является их на порядок меньшая длина при той же частоте, чем у световых волн.

Задача об управлении распространением спиновых волн в широких планарных нерегулярных волноведущих структурах является актуальной, поскольку с помощью внешних токов становится возможным осуществлять поворот волны на углы порядка девяносто градусов.

Цель данной работы заключается в исследовании влияния возникшей неоднородности магнитного поля на распространение спиновой волны в волноводном ответвителе с 3 выходами.

В ходе этой работы был выполнен ряд задач:

- 1) Проведено численное моделирование волновода - ответвителя с определенной геометрией. Задано внешнее постоянное магнитное поле и область с неоднородным магнитным полем.
- 2) Рассчитан диапазон частот работы ответвителя и получены амплитудно - частотные характеристики.
- 3) Исследовано влияние изменения параметров системы на поведение спиновой волны.

Спиновые волны являются одним из основных определений в направлении под названием спинтроника. Эта область науки получила очень бурное развитие в последние десятилетия. Вследствие чего полученные знания стали широко использоваться и на практике, к примеру, для создания линий задержек и фильтров СВЧ - диапазона.

## Теоретическое описание

Здесь приведено теоретическое рассмотрение распространения спиновых волн в магнитоупорядоченных структурах.

Ферритовые структуры предназначены для обеспечения различия поведения системы при разных направлениях распространения волн и для управления параметрами системы СВЧ-диапазона. Также существует возможность управления распространением спиновых волн с помощью внешних токов. Преимуществом спиновых волн перед другими типами волн является существование в более высокочастотном диапазоне и обладание малыми потерями передачи. Также магнитоэлектрические волны существуют в более высокочастотном диапазоне, что позволяет использовать их в более широком спектре устройств. Применение таких волн в СВЧ технике стало возможным с появлением новых магнитных материалов - железо-иттриевого граната, который является неметаллическим ферритом, обладающим, помимо магнитных, еще и диэлектрическими свойствами. Магнитный диэлектрик ЖИГ является упругой средой. На основе данного феррита происходит исследование в данной работе.

Спонтанная параллельная ориентация магнитных моментов характерна для ферромагнетиков. Такое направление магнитных моментов приводит к большой намагниченности. Если при наличии внешнего переменного магнитного поля неметаллический феррит намагничен до насыщения, то в невозмущенном состоянии вектор намагниченности  $\bar{M}$  параллелен вектору внешнего магнитного поля  $\bar{H}$ . Упругая сила, момент которой пропорционален  $[\bar{M} \cdot \bar{H}]$ , возникает при выведении  $\bar{M}$  из положения равновесия. Момент упругой силы стремится вернуть систему в состояние равновесия. Вектор  $\bar{M}$  начинает прецессировать около положения равновесия. Если представить картину волновых возмущений в ферромагнетике, когда в основном состоянии все магнитные моменты атомов  $\bar{M}$  параллельны и направлены вдоль внешнего магнитного поля  $\bar{H}$ , возникает высокочастотное магнитное поле в результате прецессии крайнего вектора  $\bar{M}$ , воздействующее на следующий магнитный момент, который также начинает прецессировать и т.д. В итоге вдоль цепочки магнитных векторов побежит фазовая волна возмущения - спиновая волна.

Спиновые волны можно рассматривать как волны намагниченности, которые удовлетворяют уравнению Ландау-Лифшица.

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = \gamma [\bar{M} \cdot \bar{H}_{\text{эфф}}] + \frac{\alpha}{M_0} [\bar{M} \cdot \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}], \quad (1)$$

где  $\bar{M}$  - вектор намагниченности,

$\bar{H}_{\text{эфф}}$  - эффективное магнитное поле,

$\gamma$  - гиромагнитное отношение,

$\alpha$  - параметр затухания.

Структура ЖИГ, в которой возможны распространения спиновых волн и на основе которой строится работа, показана схематично на рисунке снизу:

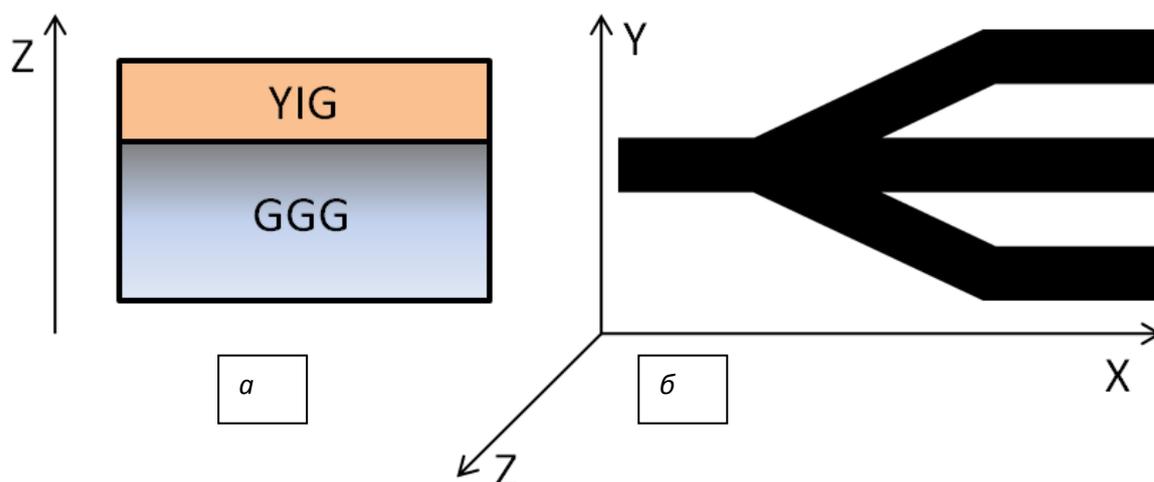


Рис.1.Схематическое представление волновода на основе ЖИГ. а) Внизу - подложка из галлия гадолиниевого граната(GGG), выше - ЖИГ пленка (YIG). б) Волновод.

## Исследуемый волновод

В этой части представлено численное моделирование исследования распространения спиновых волн в исследуемом волноводе под действием внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно структуре.

Диапазон частот существования обратной объемной магнитостатической волны задается по формулам:

$$f_{ниж} = \sqrt{w_H(w_H + w_M)} = 3,9 \text{ ГГц}; \quad (2)$$

$$f_{верх} = w_H + \frac{w_M}{2} = 4,6 \text{ ГГц},$$

$$w_H = \gamma * H_0$$

$$w_M = \gamma * M_0$$

где  $\gamma = 2,8 \times 10^6 \text{ Гц/Э}$ - гиромагнитное отношение,

$H_0 = 800 \text{ Э}$ - внешнее магнитное поле,

$M_0 = 1750 \text{ Э}$ - намагниченность.

Важно сказать что данная формула фактически описывает распространение волны в неограниченной области, но тем не менее можно узнать примерные значения, которые находятся приблизительно в том же диапазоне.

Геометрические размеры моделируемого волновода были следующие:

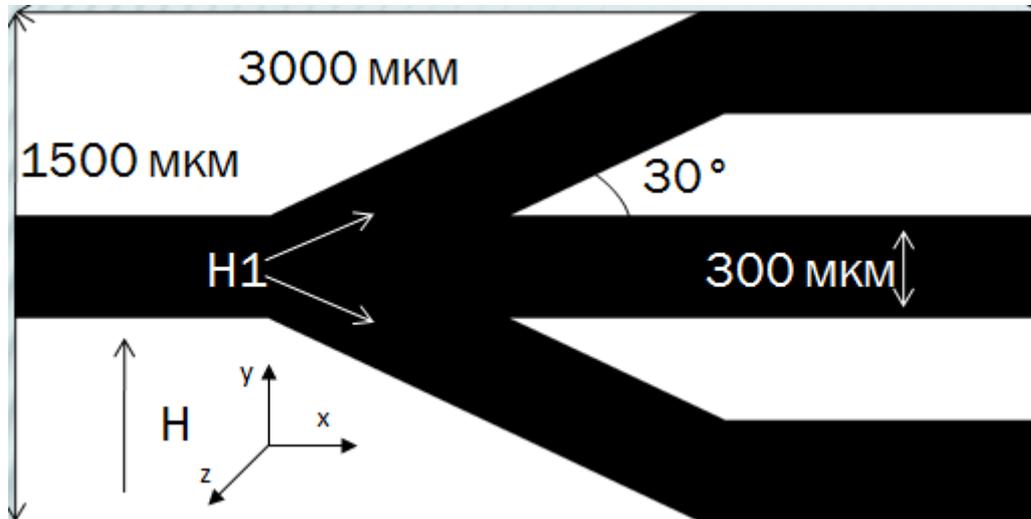
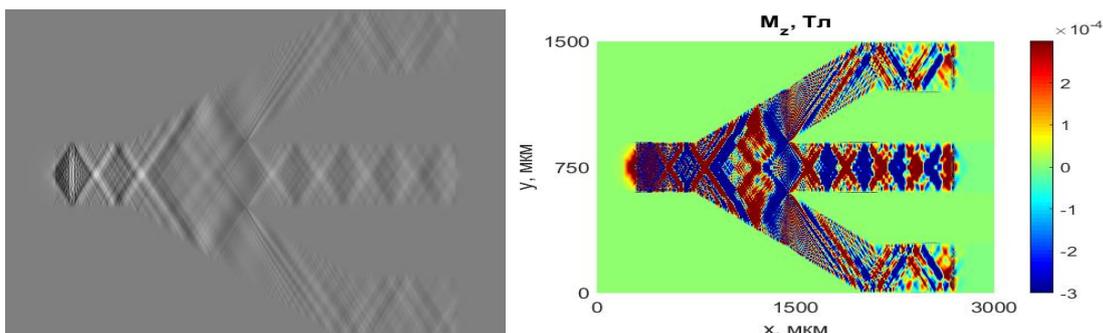


Рис.2. Схема исследуемого волновода с указанными размерами.

Где  $H$  - однородное магнитное поле направленное перпендикулярно волноводу. Толщина волновода составляет 7 мкм. Локальное поле неоднородности  $H_1$  задается в месте разветвления волновода. Ширина данного волновода такова, что при различных частотах возможны появление мод 1, 2, 3 так и мод более высокого порядка.

Математическое моделирование было выполнено с помощью программного пакета MuMax3, обработка результатов в Matlab.

При условии если внешнее магнитное поле направленное перпендикулярно волноводу будет полностью однородно, в системе спиновая волна равномерно распространяется по всей площади и лишь на крайних выходах происходит небольшой спад интенсивности. Как показано на рисунке:



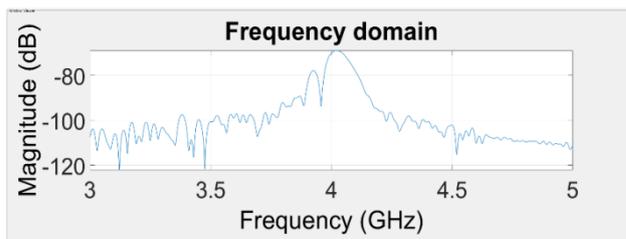
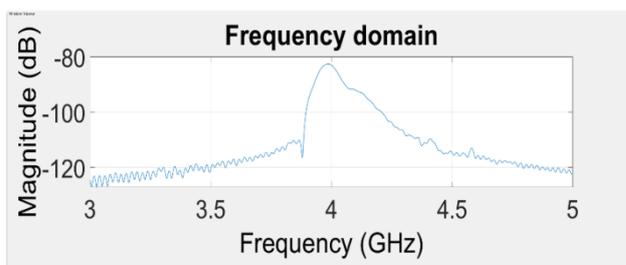
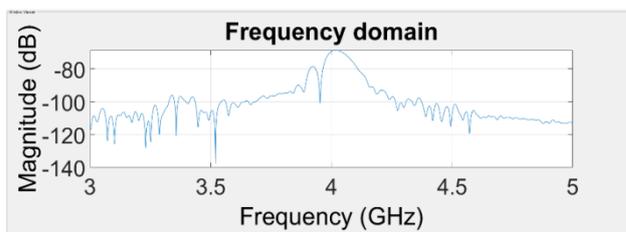
*a**Выход 1**б**Выход 2**в**Выход 3*

Рис.3. Распространение спиновой волны: *a* - в MuMax3, *б* - обработанный результат, *в* - амплитудно - частотные характеристики.

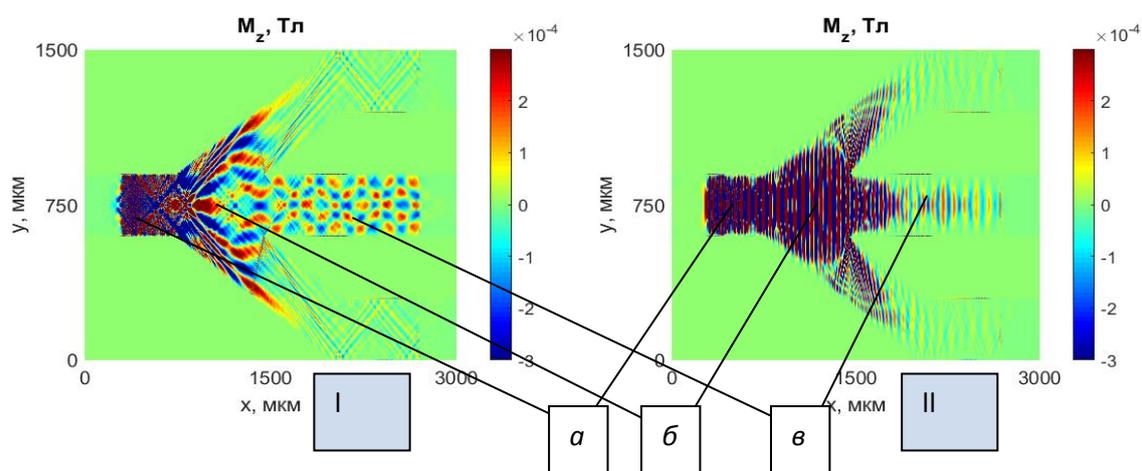
Слева под буквой (*a*) представлен скриншот из программного пакета MuMax3, справа(*б*) обработанные результаты в Matlab. В дальнейшем для наглядности будут использоваться результаты исключительно из Matlab. В следствии того что динамическая составляющая намагничивания в плоскости осей *xy* уминимальна по сравнению со статической, то амплитуда намагничивания будет считываться по оси *z*, так как там в большей степени будет наблюдаться динамическое намагничивание. Моделирование было при оптимальной частоте  $f = 4.1$  ГГц.

Если показать прохождение спиновой волны только с использованием амплитуды намагничивания, то в таком случае останутся не решенные численный вопросы, а именно: во сколько раз эффективнее прохождение в одну область по

сравнение с другой, а также какие частоты способны возбуждаться. Для того чтобы в этом разобраться необходимо ввести понятие коэффициента передачи сигнала. Коэффициент передачи - отношение приращения некоторой физической величины на выходе некоторой системы к вызвавшему это приращению приращению на входе этой системы. В данной работе используется логарифмический коэффициент передачи  $K = \lg \frac{S_{out}}{S_{in}}$ , который измеряется в децибелах (дБ). При помощи программного скрипта, Muxah записывает значения сигнала и частот в таблицу, если предварительно указать области считывания значений. После этой операции необходимо лишь обработать полученные значения и нанести на график (рис.3, в).

На рис. 3, (в) видно, что коэффициент передачи на каждом из выходов примерно одинаковый, а также преобладающий частотный диапазон равен примерно 4 ГГц.

Если же подбирать значения вблизи верхней либо нижней границы диапазона частот, в таком случае затухание будет происходить гораздо раньше и энергии волны будет недостаточно для прохождения на каждый выход:



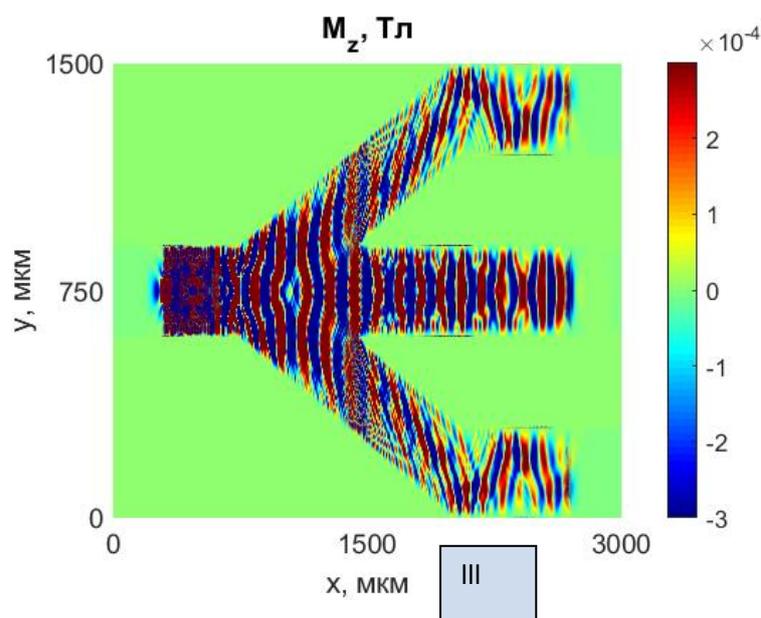


Рис.4 I)  $f=3.8$  ГГц, II)  $f=4.5$

ГГц, III)  $4.3$  ГГц. Участки: *a* - вход, *б* - вблизи ответвления, *в* - область центрального выхода.

Также на рисунке 4 отчетливо видно, что амплитуды намагничивания сильно отличаются друг от друга на каждом участке. На рисунке слева, намагничивание в области *a* имеет амплитудную структуру ромба, тем самым можно говорить о том, что на этом участке преобладает ширинная мода  $n=2$ . На участке ответвления *б* ромб полностью исчезает и появляются симметричные по вертикали участки, это связано с тем, что крайние части волны распространяются в свободные области. Ширинные моды в этой части и последующей, обозначенной под буквой *в*, будут обладать большим значением  $n>3$ . Рисунок справа не обладает подобным многообразием и на всех выделенных областях представлен в виде вертикальных полос чередуя максимумы и минимумы намагничивания, что говорит о преобладании первой ширинной моде и нахождения волн в фазе друг с другом. Подобная ситуация будет возникать и при меньших частотах, примерно начиная от  $f=4.3$  ГГц.

При введении в систему неоднородности, как ранее было указано вблизи разделения сигнала, волна изменит свое поведение и в зависимости от угла поворота неоднородного магнитного поля (в дальнейшем будет обозначаться как  $\phi$ ) пройдет только в определенном направлении или направлениях:

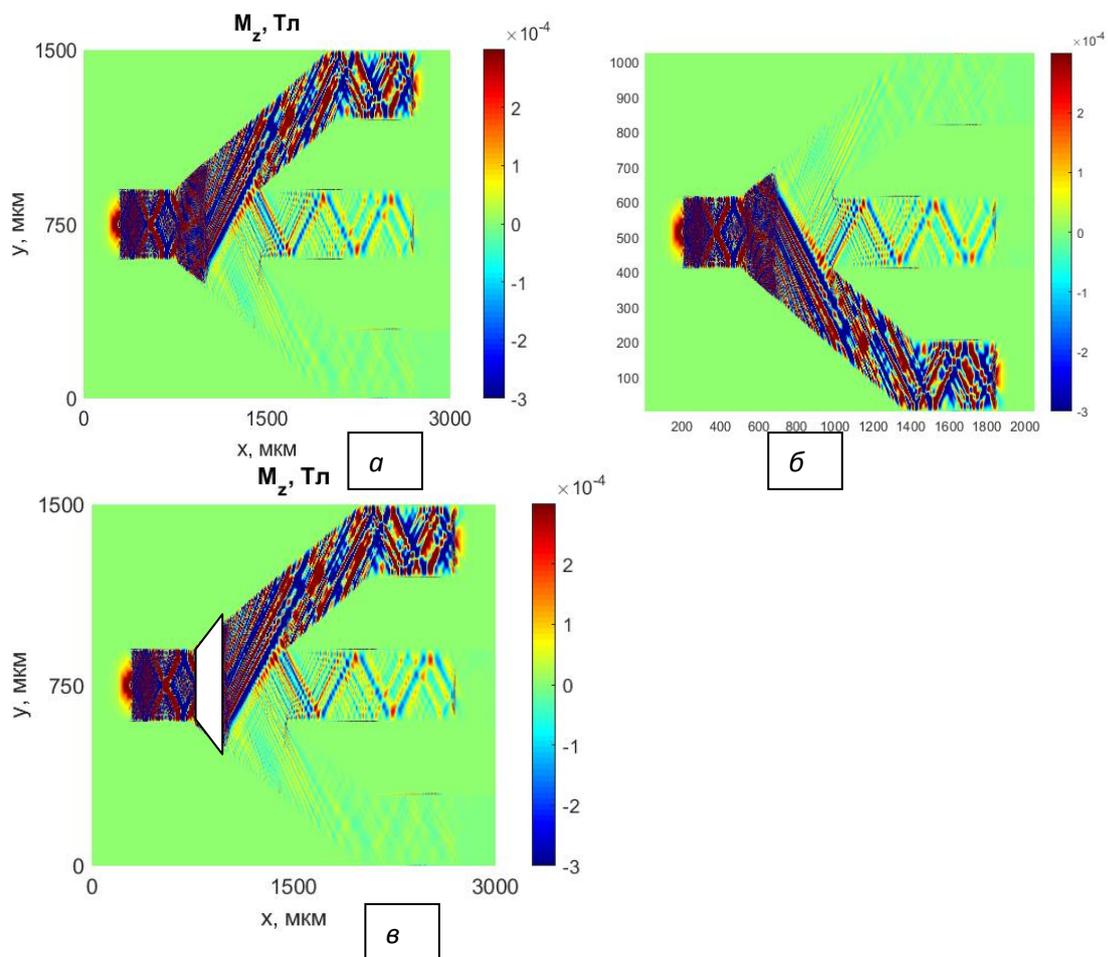


Рис.5. Параметры системы при различных значениях: *a* -  $f = 4.1$  ГГц,  $\varphi = 60^\circ$ ; *б* -  $f = 4.1$  ГГц,  $\varphi = -60^\circ$ , *в* -  $f = 4.1$  ГГц,  $\varphi = 60^\circ$ , выделена неоднородность.

В данном случае практически весь волновой поток будет направлен только на один из выходов. Область неоднородности расположена по всей ширине волновода и для наглядности была выделена белым на рисунке 5, (*в*).

В связи с тем что графики отличаются только направлением распространения и по сути представляют собой одну и ту же картину, то на следующих рисунках будет представляться только намагничивание в верхнюю часть области.

Также одной из составляющей распространения спиновой волны является внешнее магнитное поле. Из-за его изменения картина происходящего может видоизменяться, тем самым возможно корректировать поведение системы:

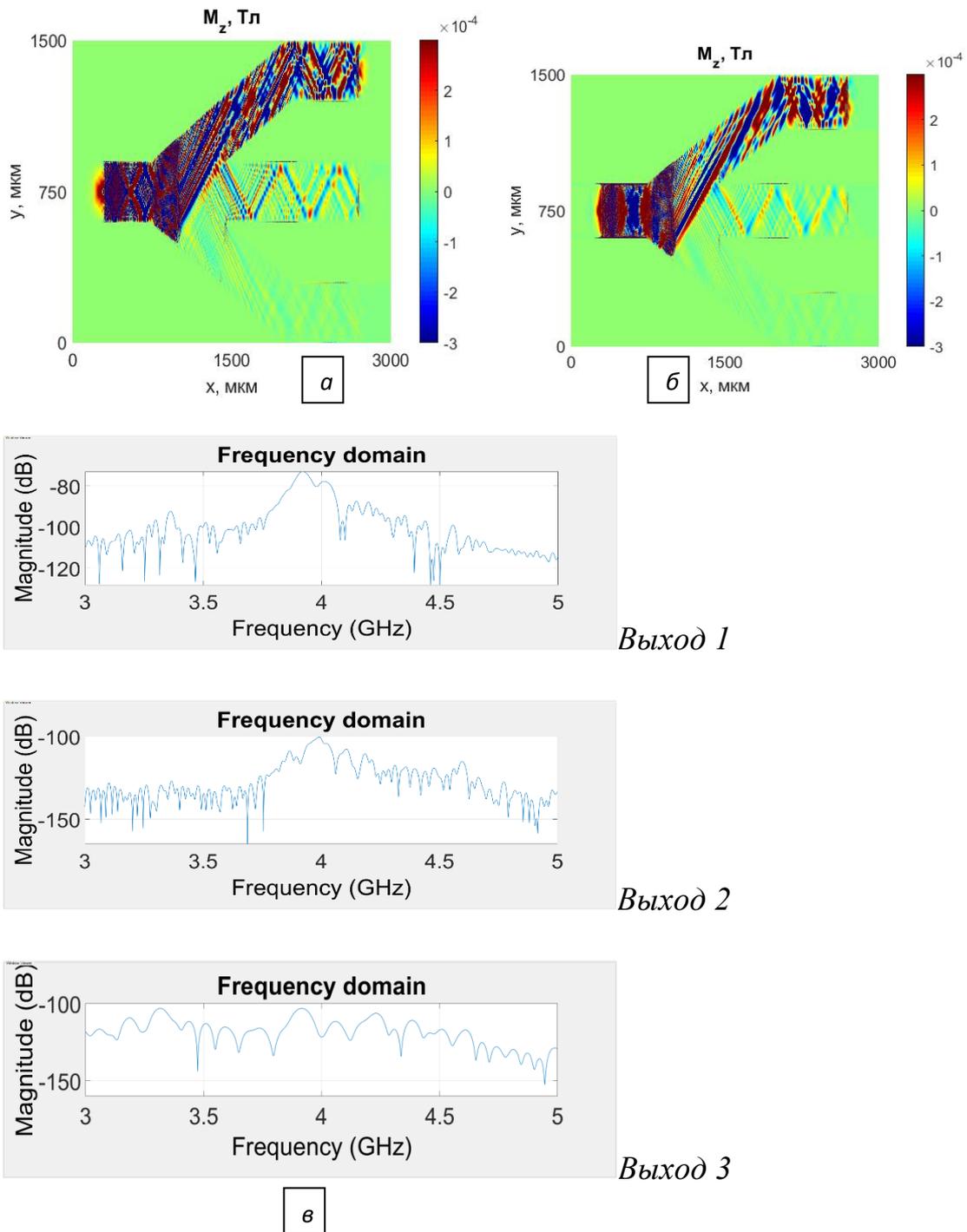
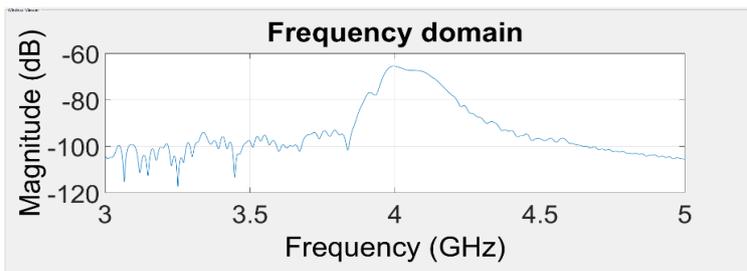
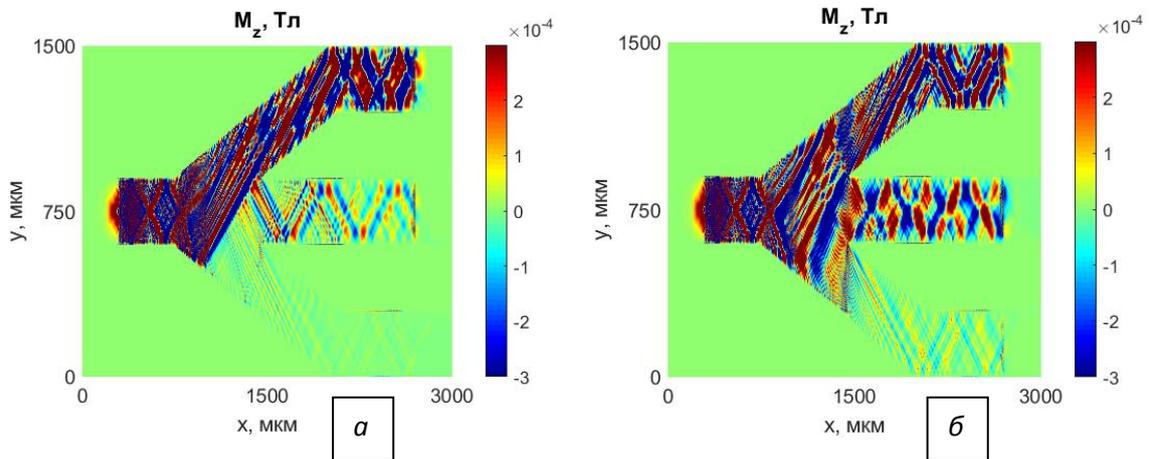


Рис. 6. *a* -  $f = 4.1$  ГГц,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $H = 800$  Э; *б* -  $f = 4.1$  ГГц,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $H_{\text{изм}} = 0.7 \cdot H$ ; *в* - амплитудно- частотные характеристики для режима с измененным внешним полем.

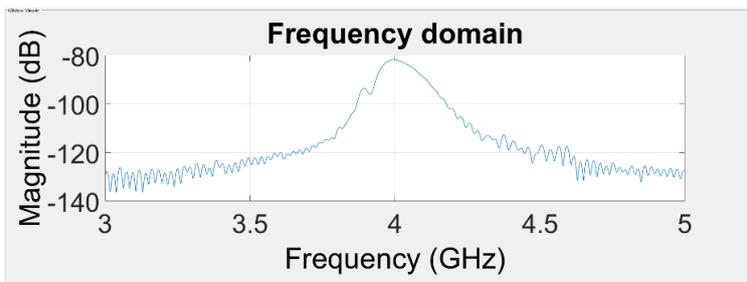
На рисунке 6 представлена все та же частота и угол направления неоднородности. Здесь изменено лишь влияние внешнего магнитного поля в 0.7 раз на графике справа (*б*). Видно, что теперь распространение волны в центральной части снизилось еще больше по сравнению с предыдущим результатом при

сохранении той же интенсивности в верхней части. Также видно, что коэффициент передачи на 1ом выходе будет больше чем в 100 раз по сравнению со 2ым и 3им.

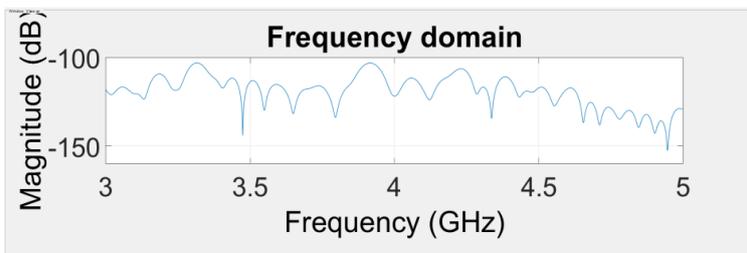
С помощью изменения угла направления неоднородности возможно достичь новых полезных результатов, при которых распространение волны можно направить лишь в 2 области:



*Выход 1*



*Выход 2*



*Выход 3*

**в**

Рис.7. Частоты на обоих графиках одинаковы и составляют  $f = 4.1$  ГГц. На графиках разные углы направления неоднородности: а -  $\varphi = 70^\circ$ , б -  $\varphi = 80^\circ$ , в - амплитудно - частотные характеристики для режима под буквой (б).

Если на рисунке 7(а) волна распространяется с очень большим затуханием, то на графике (б) наоборот волна распространяется достаточно явно. Как и предполагалось наибольший коэффициент передачи будет наблюдаться также на верхнем выходе, на центральном, согласно графику будет происходить распространение волны, но при этом разница с первым выходом будет практически в 100 раз, а на нижнем выходе коэффициент будет минимальный, почти доходя до -100дБ.

## Заключение

В работе приведена модель латерального волноводного ответвителя сигнала в программном пакете MuMax3. Рассчитан оптимальный диапазон частот, и показано распространение спиновой волны при различных частотах входного сигнала. Рассчитана подходящая частота для распространения при разных параметрах системы, которая является частотой близкой к нижней границы диапазона, так как с ней наблюдается наименьшее затухание на всей области.

При изменении направления статического магнитного поля в области неоднородности были получены результаты, в которых показано распространение волн только в определенные участки системы. С помощью локального изменения внешнего магнитного поля показана возможность изменения направления распространения спиновой волны.

Были рассчитаны амплитудно - частотные характеристики планарного магнетонного ответвителя в различных режимах работы, а именно когда волна эффективно распространяется на все выходы, когда на первый и когда на первый и второй. При этом наибольший из всех коэффициент передачи наблюдается для ситуации, когда волна распространялась только на первый выход в следствии неоднородного локального магнитное поля.

## Источники

1. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. - Магнитные колебания и волны. - М.: Физматлит, 1994. - 464 с. - ISBN 5-02-014366-9
2. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.  
Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот.  
Саратов: СГУ, 1993. С. 8, 20, 38.
- 3.T. W. O’Keeffe, and R. W. Patterson Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples Cite as: Journal of Applied Physics 49, 4886 (1978); Published Online: 12 August 2008
4. К. В. Бубликов, А. В. Садовников. Ширинные модыповерхностных магнитостатических волн в жиг-волноводе конечной длины.
- 5.S. Klingler, P. Pirro, T. Brächer, B. Leven, B. Hillebrands, and A. V. Chumak Design of a spin-wave majority gate employing mode Citation: Applied Physics Letters 105, 152410 (2014); doi: 10.1063/1.4898042
6. Alexander Khitun and Alexander Kozhanov Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy-Efficient Memory and Computing, First Edition. Edited by Jayasimha Atulasimha and Supriyo Bandyopadhyay. © 2016 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2016 by John Wiley & Sons, Ltd.
7. A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga and B. Hillebrands. Magnon spintronics PUBLISHED ONLINE: 2 JUNE 2015