

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

Кафедра нелинейной физики

**Динамическое управление характеристиками магнитостатических волн  
в нерегулярных магнитных волноводах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»

факультета нелинейных процессов

Жеребцовой Юлии Евгеньевны

Научный руководитель  
ассистент



Д.В. Романенко

Заведующий кафедрой  
к.ф.-м.н., доцент



Е.Н. Бегинин

Саратов 2018 год

**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. [1]

Последние экспериментальные исследования показали, что распространение спиновых волн в узких волноводах может значительно отличаться от случая широких волноводов. В микроволноводах, выполненных на основе пленок железо-иттриевого граната, наблюдалось ответвление магнитостатических спиновых волн на углы порядка девяносто градусов[2], что объясняется изменением внутреннего магнитного поля внутри волновода при уменьшении его ширины.[3] В случае широкого волновода данные эффекты не наблюдаются. Поворот волны в случае широкого волновода осуществляется за счет свойств самой волны.

Особый интерес представляет исследование нерегулярных планарных ферритовых волноведущих структур, в которых латеральное расположение магнитных волноводов приводит к многомодовой спиновой связи. [4-7] Такие структуры могут использоваться в качестве базовых элементов для создания устройств магнитоэлектроники, таких как волноводы, интерферометры, мультиплексоры, фильтры и ответвители.[8]

Задача об управлении распространением спиновых волн в широких планарных нерегулярных волноведущих структурах является актуальной, поскольку с помощью внешних токов [9] становится возможным осуществлять поворот волны на углы порядка девяносто градусов. При

микромагнитном исследовании внешние токи можно заменить на локальную неоднородность поля в волноведущей структуре, создаваемую магнитным барьером.

Целью настоящей работы является исследование влияния магнитного барьера и направления задаваемого внешнего магнитного поля на распространение магнитостатической волны, а также экспериментальное исследование влияния внешних токов на динамику магнитостатической волны.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведено численное моделирование исследования распространения магнитостатической волны в T-образном волноводе с широкими “плечами” для оптимальных задаваемых частот, полученных в курсовых работах.
2. Проведено численное моделирование распределения магнитостатической волны в T-образном волноводе с внешним магнитным полем, задаваемым под углом.
3. Проведено экспериментальное исследование распространения магнитостатической волны под действием внешних токов.

Работа состоит из трех глав. В первой главе представлено математический аппарат исследования. Во второй главе исследуется распространение магнитостатической волны под действием магнитного барьера и под действием внешнего магнитного поля, направленного под углом. В третьей главе приведено описание экспериментальной установки, метод исследования и результаты, полученные в ходе эксперимента.

**Глава 1.** В первой главе приведено теоретическое рассмотрение распространения спиновых волн в магнитоупорядоченных структурах.

Магнитостатические волны [10] возбуждаются в средах, обладающих магнитной упорядоченностью, то есть в отсутствии внешнего магнитного поля. К таким средам относятся ферримагнетики или ферриты. 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 магнитостатические 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 немагнитным ферритом, обладающим, помимо магнитных, еще и диэлектрическими свойствами. Магнитный диэлектрик (ЖИГ) является упругой средой. [10] 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 немагнитный феррит намагничен до насыщения, то в невозмущенном состоянии вектор намагниченности  $\underline{M}$  параллелен вектору внешнего магнитного поля  $\underline{H}$ . Упругая сила, момент которой пропорционален  $[\underline{M} \cdot \underline{H}]$ , возникает при выведении  $\underline{M}$  из положения равновесия. Момент упругой силы стремится вернуть систему в состояние равновесия. Вектор  $\underline{M}$  начинает прецессировать около

положения равновесия. [10] Если представить картину волновых возмущений в ферромагнетике, когда в основном состоянии все магнитные моменты атомов  $\underline{m}$  параллельны и направлены вдоль внешнего магнитного поля  $\underline{H}_0$ , возникает высокочастотное магнитное поле в результате прецессии крайнего вектора  $\underline{m}$ , 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. [10]

$$\frac{\partial \underline{m}}{\partial t} = \gamma [\underline{m} \times \underline{H}_{\text{эфф}}] + \frac{\alpha}{m} [\underline{m} \times \frac{\partial \underline{m}}{\partial t}], \quad (1)$$

где  $\underline{m}$  - вектор намагниченности,

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

$\gamma$  - гиромагнитное отношение,

$\alpha$  - параметр затухания.

**Глава 2.** Во второй главе проведено численное моделирование исследования распространения магнитостатических волн в T-образном волноводе с широкими выходными плечами под действием магнитного барьера и под действием внешнего магнитного поля, направленного под углом.

Компьютерное моделирование проводилось в программном пакете MuMax3.

Диапазон частот существования обратной объемной магнитостатической волны задается по формулам:

$$\omega_{\text{ниж}} = \gamma \times \sqrt{H_0(H_0 + H_0)} = 3,99 \text{ ГГц}; \quad (2)$$

$$\omega_{\text{верх}} = \gamma \left( H_0 + \frac{H_0}{2} \right) = 4,40 \text{ ГГц},$$

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

$\square_0 = 800$  Э- внешнее магнитное поле,

$\square_0 = 1750$  Э- намагниченность.

Геометрические размеры моделируемого волновода были следующие: ширина входной ножки 200 мкм, ширина выходного волновода 2 мм, длина выходного волновода 2 мм. Локальное поле неоднородности задается в виде барьера величиной 640 Э и помещается на расстоянии 200 мкм от стыка плеч волновода.

В случае возбуждения обратной объемной магнитостатической волны в ножке волновода наблюдается дифракция МСВ на стыке плеч волновода. [3] Но преобразования одного типа волн в другой не происходит, так как локальное магнитное поле почти однородно, за исключением небольших участков по краям волновода.

Запускаемая в ножке антенной обратная объемная магнитостатическая волна, после дифракции на отверстии распространяется под углом к магнитному полю. Встречая на своем пути барьер в виде промодулированного внешнего магнитного поля, волна воспринимает его как стенку волновода и отражается от него, при этом возбуждая в локальной области неоднородности другой тип волн - поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ). Результаты моделирования показаны на рисунке 1.

На нижней границе диапазона частот энергии волны достаточно, чтобы с минимальными потерями достигнуть выходов из плечей. На средних частотах большая часть энергии волны передается на возбуждение ПМСВ. На верхней границе диапазона частот существования магнитостатических волн также происходит передача большей части энергии на возбуждение ПМСВ и объемные волны в плечах быстро затухают.

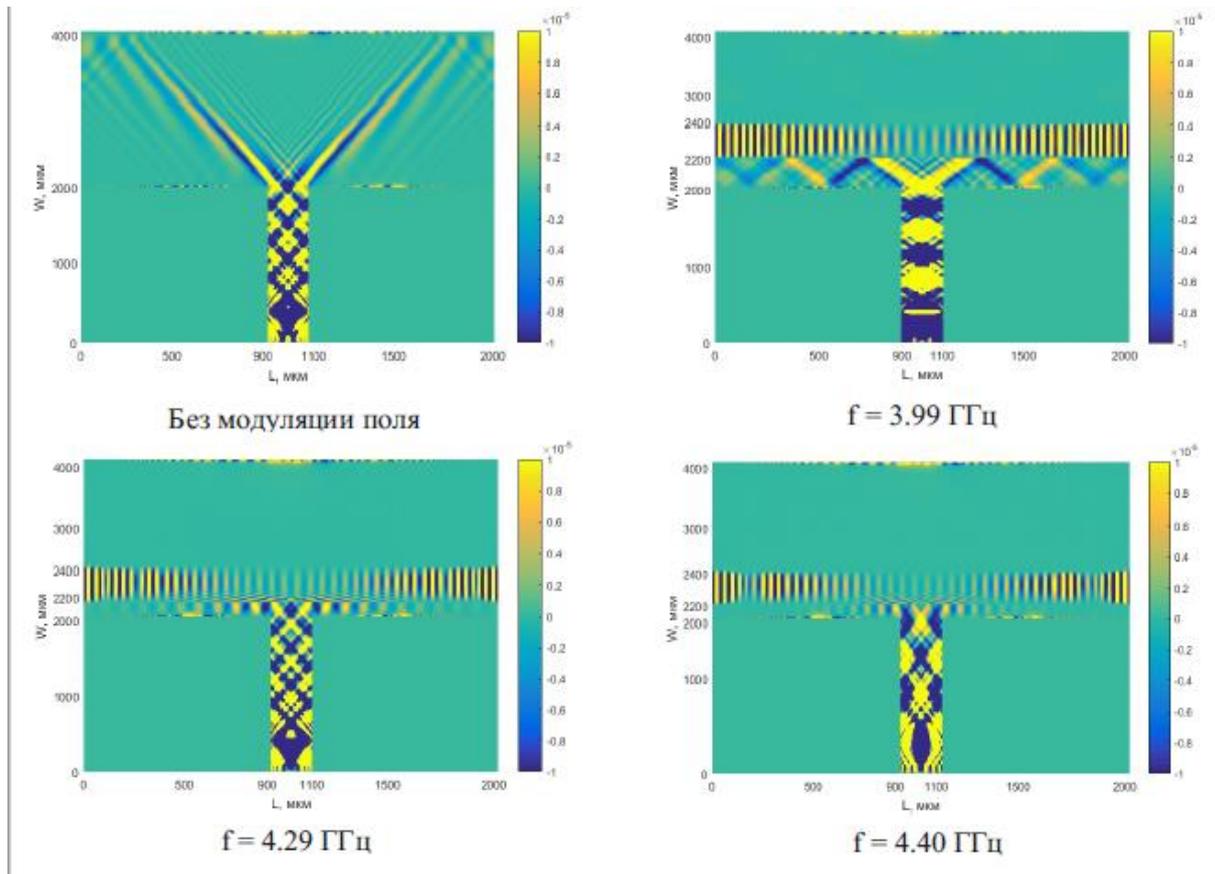


Рис.1. Пространственное распределение высокочастотной намагниченности в T-образном волноводе.

При помещении магнитной структуры во внешнее магнитное поле, направленного под углом, наблюдается искажение пространственного распределения в сторону направления внешнего магнитного поля. Возбуждение ПМСВ в локальной области неоднородности возникает только до  $20^\circ$  из-за того, что волна на больших поворотах угла не отражается от локальной области неоднородности. На правой границе выходного плеча поле распространяющегося волнового фронта слабее, чем на левой границе, как видно из рисунка 2.

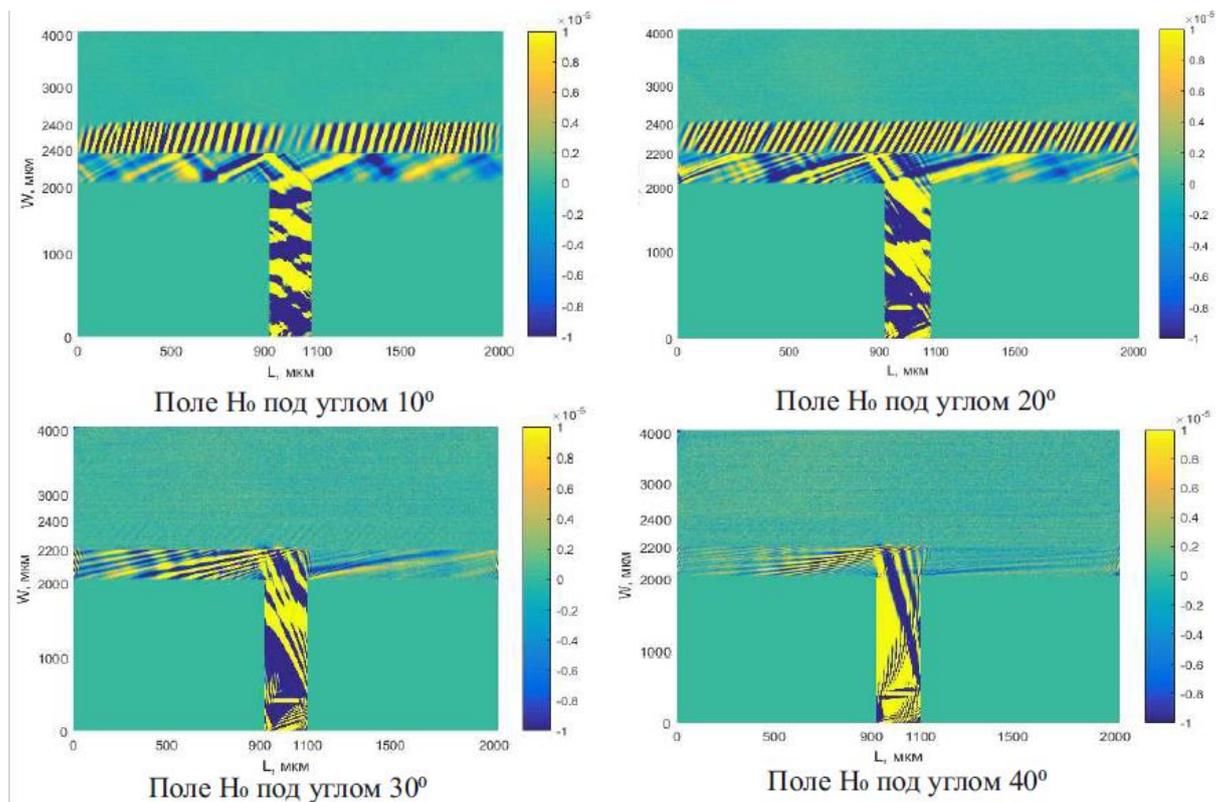


Рис.2. Пространственное распределение высокочастотной намагниченности в Т-образном волноводе на частоте  $\omega = 3.99$  ГГц с направлением внешнего магнитного поля  $H_0$  под углом.

**Глава 3.** В третьей главе приведено экспериментальное исследование распространения магнитостатической волны под действием внешних токов.

В настоящее время для исследования пространственно-временной динамики спин-волновых возбуждения в магнитоупорядоченных средах широко применяются оптические зондовые методы. [11] К таким методам относится метод, который основан на эффекте мандельштам-бриллюэновского рассеяния света. [12, 13]

Исследуемая структура помещается в систему пространственного микропозиционирования при постоянном однородном магнитном поле, направленном касательно к плоскости структуры. Система микропозиционирования обеспечивает сканирование поверхности структуры сфокусированным лазерным пучком. В настоящей работе для

проведения исследований был разработан планарный нерегулярный ферритовый Т-образный волновод, который по своим параметрам схож с тем, что использован в численном моделировании.

Волновод был изготовлен методом лазерного скрайбирования пленки ЖИГ, выращенной на диэлектрической подложке ГГГ толщиной 500 мкм, пленка ЖИГ имела толщину  $d=12$  мкм и намагниченность насыщения  $\square_0 = 1750$  Э. Для экспериментального исследования была выбрана частота СВЧ-сигнала, подаваемая на микрополосковую антенну, величиной  $\square = 5,279$  ГГц. Источник постоянного тока помещен на широкую часть волновода под углом, так как не представляется возможным установить его ровно, как это было сделано при численном моделировании.

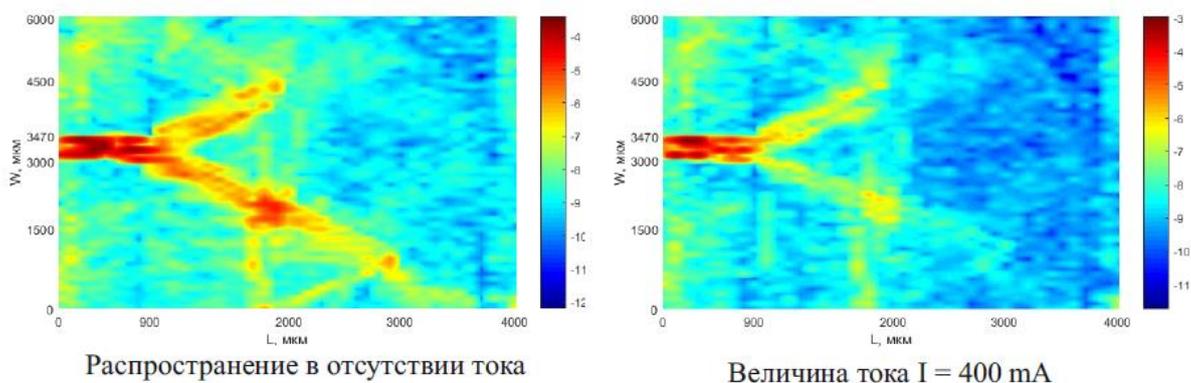


Рис.3. Экспериментальные результаты распространения ПМСВ в Т-образном волноводе.

При отсутствии тока наблюдается дисперсия от стыка плеч волновода, что подтверждает результаты численного исследования. Под одним углом магнитостатическая волна не встречает препятствия в виде полоска и распространяется к краю волновода. При распространении магнитостатической волны под другим углом наблюдается отражения от полоска. Это связано с тем, что полосок выполнен из металла, поэтому часть волны от ближе расположенного полоска отражается.

Под действием внешнего постоянного тока величиной  $I = 400 \text{ А}$  наблюдается отражение магнитостатической волны и отсутствует прохождение через барьер.

Использовать более высокие токи для исследования распространения магнитостатических волн не представляется возможным, так как возникает необходимость охлаждать исследуемую структуру.

**Заключение.** Таким образом, в первой главе был приведен математический аппарат, с помощью которого можно описать распространение магнитостатических волн в магнитных волноведущих структурах. Было представлено основное уравнение, которое используется при исследовании магнитных систем методом микромагнитного моделирования.

Во второй главе приведена схема макета, на основе которой было проведено микромагнитное моделирование в программном пакете MuMax3. Показано распространение магнитостатической волны в широком T-образном волноводе при различных частотах входного сигнала и различном направлении внешнего магнитного поля. Наиболее оптимальной частотой входного сигнала является нижняя граница диапазона распространения, т.к. там наблюдается наименьшее затухание на краях волновода и большая часть энергии передается на выходы из плечей волноведущей структуры. На средних и высоких частотах наблюдается передача энергии в локальную область существования магнитного барьера, при этом изменяется тип распространяемой волны, а исходная волна в плечах волновода сильно затухает.

В отличие от случая волноведущей структуры, помещенной во внешнее магнитное поле вдоль подводящего волновода, в структуре, помещенной во внешнее магнитное поле направленного под углом, нарушается симметрия. При распространении волновой фронт движется под разными углами в плечах волноведущей структуры и выделяется направление преимущественного распространения, куда переносится основная энергия волны. При этом существуют углы, при которых в области локальной неоднородности магнитного поля поверхностная волна не возбуждается. Возбуждение связано с углом, под которым направлено внешнее магнитное поле.

В третьей главе приведено описание проведения экспериментального исследования и основные результаты. Было показано, что даже в отсутствие токов в металлическом полоске магнитостатическая волна может частично отражаться. Источник внешнего тока воспринимается волной как барьер и отражается от нее, как и было показано при численном моделировании с использованием локальной неоднородности магнитного поля. Отличие состоит в том, что при численном исследовании изменялась величина частоты, а при экспериментальном изменялось значение величины тока, подаваемого металлический полосок.

### **Список используемых источников:**

1. Садовников А.В., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Грачев А.А. и др. Нелинейные спин-волновые эффекты в системе латеральных магнетонных структур // Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 1, с. 29-34.
2. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Grishin S.V. et. al. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry // Applied Physics Letters. – 2015. V. 106, No 19. – P. 192406–1-4.
3. O'Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface wave propagation in finite samples // Journal of Applied Physics. – 1978. V. 49, No 9. - P. 4886-4895.
4. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. Multimode Propagation of Magnetostatic Waves in a Width-Modulated Yttrium-Iron-Garnet Waveguide. IEEE Magnetics Letter, 2014, V. 5.
5. K. Vogt, H. Schultheiss, S. Jain, J. E. Pearson, A. Hoffmann, S. D. Bader, and B. Hillebrands Spin waves turning a corner Applied. Physics Letters, 2012, 101, 042410.
6. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S.A. Multimode Surface Magnetostatic Wave Propagation in Irregular Planar YIG Waveguide. Solid State Phenomena, 2014, V. 215, pp 389.
7. Одинцов С.А., Садовников А.В. Нелинейная динамика спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах. // “Известия вузов, ПНД”, 2017, т.25, №5, стр. 56.
8. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics. Journal of Physics D: Appl. Phys, 2010, V. 43, P. 264001.
9. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Chumak A.V., Serga A.A., Vasyuchka V.I., L'ahderanta E., Kalinikos B.A., Hillebrands B. A spin-wave logic gate based on a width-modulated dynamic magnonic crystal Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. N 10. P. 102 405.

10. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. С. 8, 20, 38.
11. С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков и др. Магноника - новое направление спинотроники и спин-волновой электроники. Успехи физических наук, 2015, том 185, №10, стр. 1100.
12. Л.И. Мендельштам. Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва. Ч. физ. 58 381 (1926); Полное собрание трудов Т.1 (Москва: Издательство АН СССР, 1948) с.280
13. Brillouin L, Ann. Physique 17 88 (1922)