

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

Кафедра нелинейной физики

**Распространение ограниченных пучков спиновых волн в
магнито-кристаллических структурах различной
пространственной размерности**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

Института физики

Хутиевой Анны Борисовны

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

А.В. Садовников

Заведующий кафедрой нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент

Е.Н. Бегинин

Саратов 2021 год

Введение

Вторая половина 20 века может быть названа эрой микроэлектроники. В течение этого времени мир увидел технологическую революцию, которая стала возможна благодаря цифровой логике и базирующейся на ней информационными технологиями. Но в любых устройствах, от первых транзисторов до современных микропроцессоров, в основе своей используется одно свойство электрона - это его заряд. И в тоже время электрон обладает еще одной характеристикой, так называемый собственный угловой момент или спин. Данную технологию принято называть спинтроникой [1-4].

Спинтроника – это раздел квантовой электроники, занимающийся изучением спинового токопереноса. Магнитным спином обладают и другие элементарные частицы, а также ядра атомов[4-5].

Спиновые волны в магнитоупорядоченных структурах, (ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики) это волны намагниченности[5-8].

Законы распространения, отражения и преломления электромагнитных волн в анизотропных средах начали исследовать достаточно давно при изучении свойств известных одноосных кристаллов. Поверхность волновых векторов одноосных оптических кристаллов состоит из двух поверхностей – сферы и эллипсоида, описывающих соответственно обыкновенную и необыкновенную волну, а сечения эти поверхностей – изочастотные зависимости – представляющих собой окружность и эллипс. Относительно недавно были начаты исследования волновых процессов в других анизотропных средах – акустических кристаллах, плазме, магнитоупорядоченных средах. Изочастотные зависимости в этих средах могут иметь как более сложную, чем эллипс, замкнутую форму кривой, похожую на гиперболу[10].

Весьма актуальным является исследование характеристик ограниченных по ширине волновых пучков спиновых волн (СВ) с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями, а также исследование дифракции этих пучков на различных локальных неоднородностях [9-12].

Исследование нерегулярных планарных ферритовых волноводов представляет большой интерес в настоящее время, поскольку такая топология волноведущих структур обеспечивает, как управление фазовыми характеристиками СВ, так и локализацию энергии волны по мере ее распространения вдоль структуры. Последняя особенность представляет интерес для нелинейных приложений на основе нерегулярных структур, изготовленных из тонких пленок железо – иттриевого граната (ЖИГ)[1]. На сегодняшний день активно исследуются устройства, использующие в качестве материала железо - иттриевый гранат (ЖИГ) ввиду низкого затухания. Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, фазовращателей, мультиплексоров, фильтров и ответвителей.

Глава 1. Дифракция спиновой волны на сквозном отверстии в пленке ЖИГ

Различия в поведении волн в изотропных и анизотропных средах обусловлены двумя причинами. Первое, сама волна в анизотропной среде, как правило, является необычной и отличается от волны в изотропной среде тем, что волновой вектор \mathbf{k} и вектор групповой скорости \mathbf{V} волны, не коллинеарны, как показано на рис.1(б). Второе, в анизотропных средах изочастотные зависимости, определяющие законы отражения и преломления волн, могут иметь достаточно сложную форму, из-за чего могут возникать новые физические эффекты.

В случае волн в изотропной среде волновой вектор \mathbf{k} и вектор групповой скорости \mathbf{V} волны, коллинеарные, как на рис.1(а) и, следовательно, распространение СВ происходит во всех направлениях одинаково.

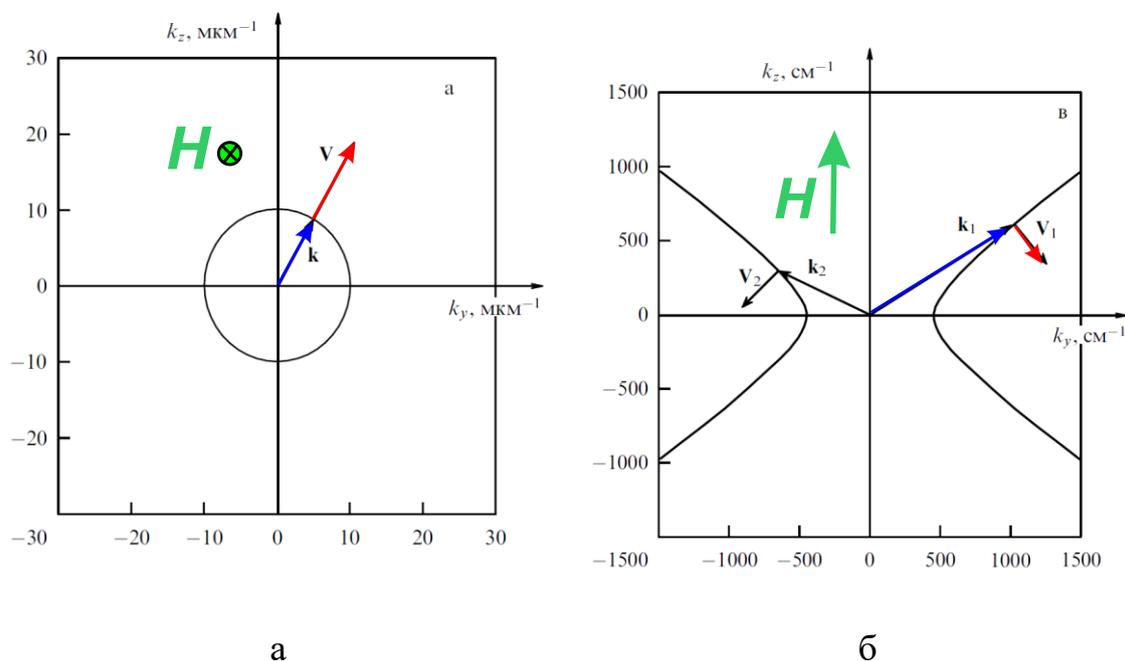


Рис 1(а, б) Представлены изочастотные поверхности (а) для случая прямой объемной магнитостатической волны, (б) для поверхностной магнитостатической волны.

Геометрия эксперимента показана на рис 2. При проведении экспериментов ферритовая плёнка железиттриевого граната толщиной $s = 17$ мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1750,5$ Гс была касательно намагничена внешним однородным магнитным полем величиной $H_0 = 485$ Э.

С помощью лазера в ферритовой плёнке было сделано сквозное отверстие диаметром $d = 250$ мкм.

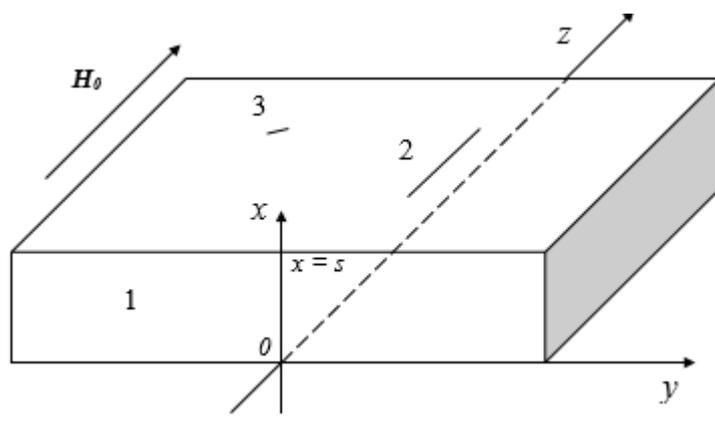


Рис 2 Схема эксперимента: 1 – ферритовая плёнка, 2 – линейный преобразователь, возбуждающий поверхностную спиновую волну, 3 – приёмный зонд длиной ~ 0.5 мм, способный перемещаться вдоль поверхности плёнки.

Измерения проводились на установке, позволяющей визуализированные дифракционные картины спиновых волн на основе СВЧ-зондирования поверхности ферритовой плёнки (подробнее используемый метод и установка описаны в [9, 14]). Возбуждающий преобразователь 2 представлял из себя позолоченную вольфрамовую проволочку толщиной 12 мкм и длиной $D = 5$ мм. Он был расположен на расстоянии 6,3 мм от отверстия и ориентирован параллельно вектору внешнего магнитного поля H_0 .

Следует отметить, что для данных параметров ферритовой пластины, поля H_0 и частоты при ориентации волнового вектора k под углами $\psi_{s1} = 44.6^\circ$ и $\psi_{s2} = -44.6^\circ$ возможно сверхнаправленное распространение СВ в направлениях $\psi_{s1} = -31.1^\circ$ и $\psi_{s2} = 31.1^\circ$, соответствующих ориентации вектора V , поскольку для данных ориентаций k величина производной $d\psi/d\varphi$ равна нулю и, следовательно, $\sigma = 0$ в соответствии с формулой (38) в [1]. Поэтому при углах $\psi = \pm\psi_{s1}$ ситуация меняется, поскольку только при этих углах $\sigma = 0$, что означает отсутствие дифракционной расходимости волнового пучка. В результате, на дифракционной картине за отверстием в направлениях $\psi = \pm 31.1^\circ$ наблюдаются две отчетливые тени, похожие на отходящие от отверстия ровные «канавки» (см. рис. 3а), ширина которых равна диаметру

отверстия d и не меняется по мере распространения луча (рис. 3а)! Отметим, что тень от отверстия на дифракционных картинах для ПСВ с другими частотами была не столь отчётливой и сильнее расширялась, из-за того, что с увеличением частоты ПСВ величина σ не бывает равной нулю, а её минимальное значение возрастает. Поскольку $ks_1 = ks_2 = 45.37 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda_{s1,2} = 1385 \text{ мкм}$), то можно констатировать следующее: в результате дифракции на отверстии диаметром $d = 250 \text{ мкм}$ СВ длиной $\lambda_{s1,2} = 1385 \text{ мкм}$, превышающей размер отверстия в $\lambda_{s1,2}/d = 5.54$ раз, в направлениях $\psi_{s1,2} = \pm 31.1^\circ$, исходящих от отверстия, возникает отчётливая тень шириной d на расстоянии $\sim L = 21 \text{ мм}$ от отверстия (и это не предел, судя по рис. 3а), причём расстояние L превышает диаметр отверстия в $L/d = 84$ раза. Для сравнения, если провести оценки с использованием критерия разрешимости Рэлея для изотропных сред, то окажется, что в описанной выше ситуации тень от объекта наблюдаться не может!

Таким образом, из-за наличия в анизотропной среде – ферритовой пластине – направлений, в которых возможно сверхнаправленное распространение волны, в этих направлениях возникает новое физическое явление – сверхразрешение, при котором угловое разрешение оказывается во много раз меньше, чем полученное на основе критерия разрешимости Рэлея.

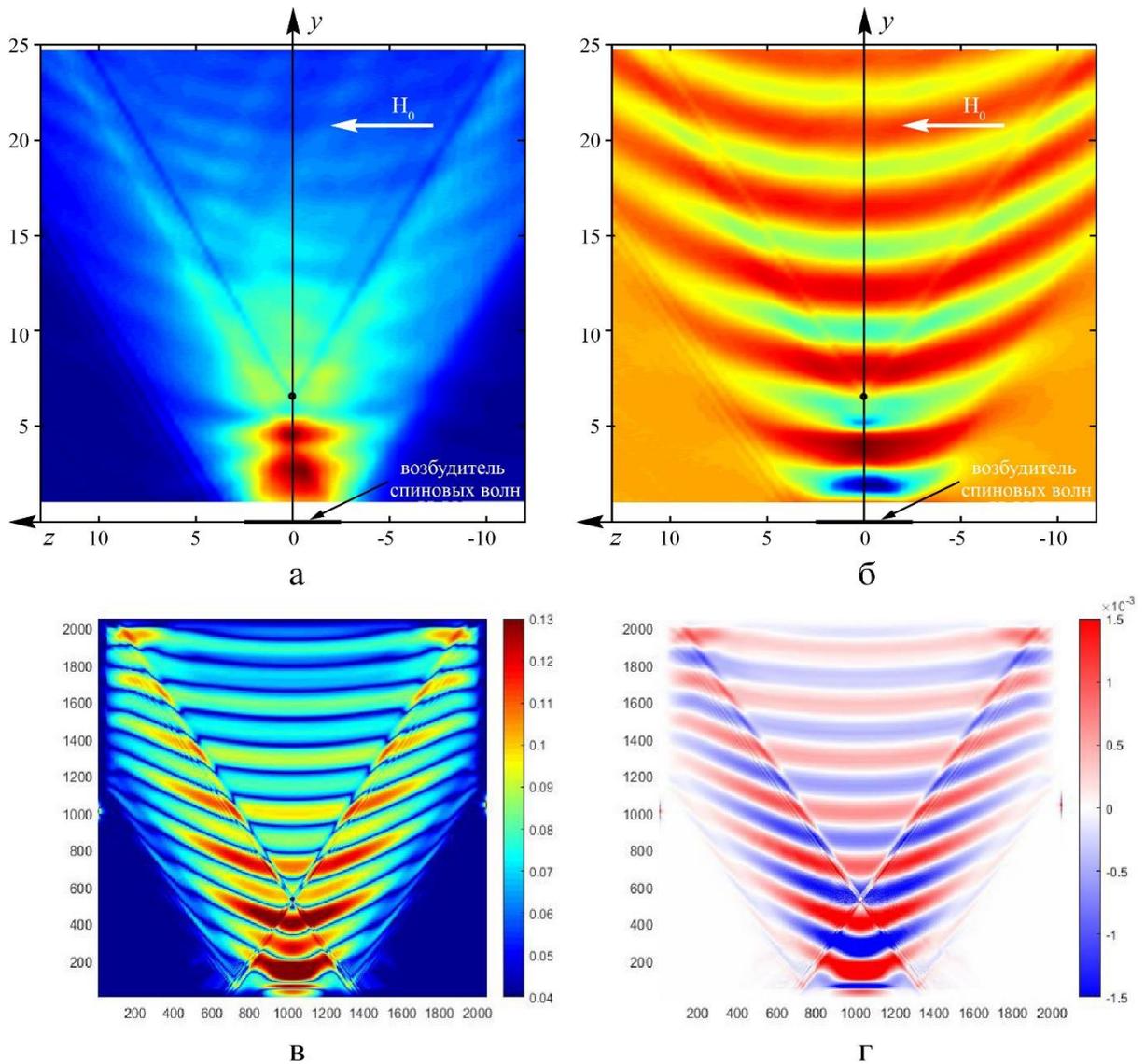


Рис 3 Экспериментальное (а, б) и рассчитанное (в, г) распределения амплитуды (а, в) и фазы (б, г) ПСВ с коллинеарной ориентацией групповой и фазовой скоростей при её дифракции на сквозном отверстии в ферритовой пластине.

Расчёты распределения спиновых волн в плоскости ферритовой плёнки выполнялись на базе пакета программ MUMAX3 с помощью методики микромагнитного моделирования. Распределение амплитуды (интенсивности) спиновой волны в плоскости ферритовой плёнки рассчитывалось методом конечных разностей на основе уравнения Ландау-Лифшица с диссипативным членом в форме, предложенной Гильбертом.

Использование указанной методики позволило получить двумерные картины, которые теоретически описывают дифракцию любых типов спиновых волн на различных локальных неоднородностях, имеющихся в ферритовой плёнке или в ферритовых структурах.

Глава 2 Дифракция сверхнаправленного луча поверхностной спиновой волны на слабоконтрастном магнетонном кристалле

Рассеяние спиновых волн периодическими магнитными решётками, называемыми также слабоконтрастными магнетонными кристаллами, изучалось ранее в работах [1, 2]. Ниже представлены результаты экспериментов и расчётов по исследованию дифракции поверхностных спиновых волн (ПСВ) на слабоконтрастном магнетонном кристалле, созданном в плёнке железоиттриевого граната (ЖИГ) с помощью пространственно-периодического магнитного поля. При проведении экспериментов плёнка ЖИГ толщиной $s = 15$ мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1850$ Гс была касательно намагничена внешним однородным магнитным полем величиной $H_0 = 500$ Э. Пространственно-периодическое магнитное поле создавалось в части плёнки ЖИГ четырьмя отрезками магнитофонной ленты, расположенными на поверхности плёнки ЖИГ параллельно друг другу, так что общая ширина магнетонного кристалла составляла 15 мм. Для совмещения максимумов записанных на ленту синусоидальных сигналограмм использовался метод визуализации магнитных доменов, наведенных магнитофонной записью, по наблюдаемому фарадеевскому вращению (подробнее этот метод описан в [3]).

Предварительные расчёты показали, что при указанных параметрах волновые пучки ПСВ с различными частотами могут быть подобны сверхнаправленным лучам с малой дифракционной расходимостью [4 - 7], если расположить возбуждающий линейный преобразователь под углом 45° к вектору магнитного поля \mathbf{H}_0 , причём такая геометрия одновременно обеспечит как малую расходимость луча ПСВ, так и режим брэгговской дифракции на частотах около 3000 МГц.

Для рассмотрения была взята структура, на основе ЖИГ пленки, толщиной 10 мкм, шириной 50 мм и длиной 50 мм, схематическое изображение расчётной области представлено на рис 4.

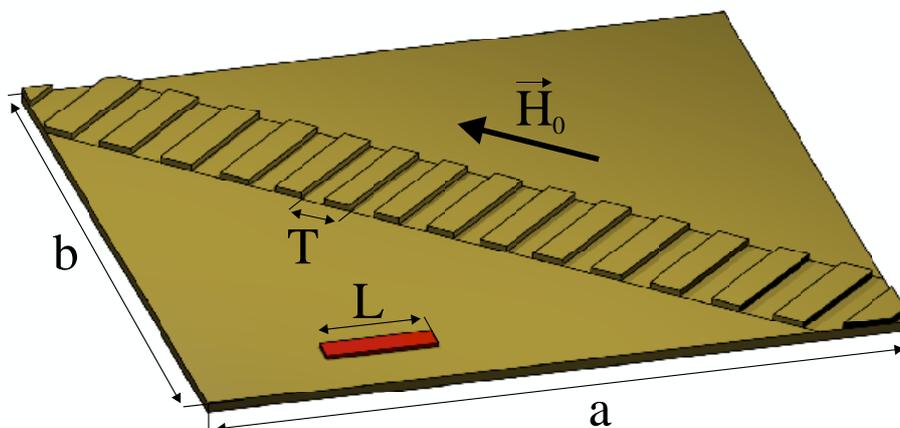


Рис 4 Схематическое изображение исследуемой структуры с МК

С помощью методов микромагнитного моделирования исследовано распространение сверхнаправленного пучка поверхностной СВ в касательно намагниченной пленке ЖИГ. Изучен диапазон параметров (характерный размер неоднородности, угол ориентации магнитного поля, размеры антенны для возбуждения СВ), в котором наблюдается эффективное формирование и распространение сверхнаправленного луча СВ. Рассчитаны дифракционные картины сверхнаправленного луча поверхностной СВ на основе магнетонного кристалла.

Изучен диапазон параметров (характерный размер неоднородности, угол ориентации магнитного поля, размеры антенны для возбуждения СВ), в котором наблюдается эффективное формирование и распространение сверхнаправленного луча СВ. Рассчитаны дифракционные картины сверхнаправленного луча поверхностной СВ, возникающие при его распространении через МК.

Распределение СВЧ поля ПСВ измерялось методом зондирования поверхности ферритовой плёнки в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль осей Y и Z , причём ось Z совпадала с направлением вектора \mathbf{H}_0 (подробнее указанный метод и экспериментальная установка

описаны в [8]). В соответствии с предварительными расчётами период решётки кристалла был выбран равным $T = 810$ мкм, что позволило обеспечить подходящие условия для возникновения брэгговской дифракции при падении на кристалл сверхнаправленного луча ПСВ [9].

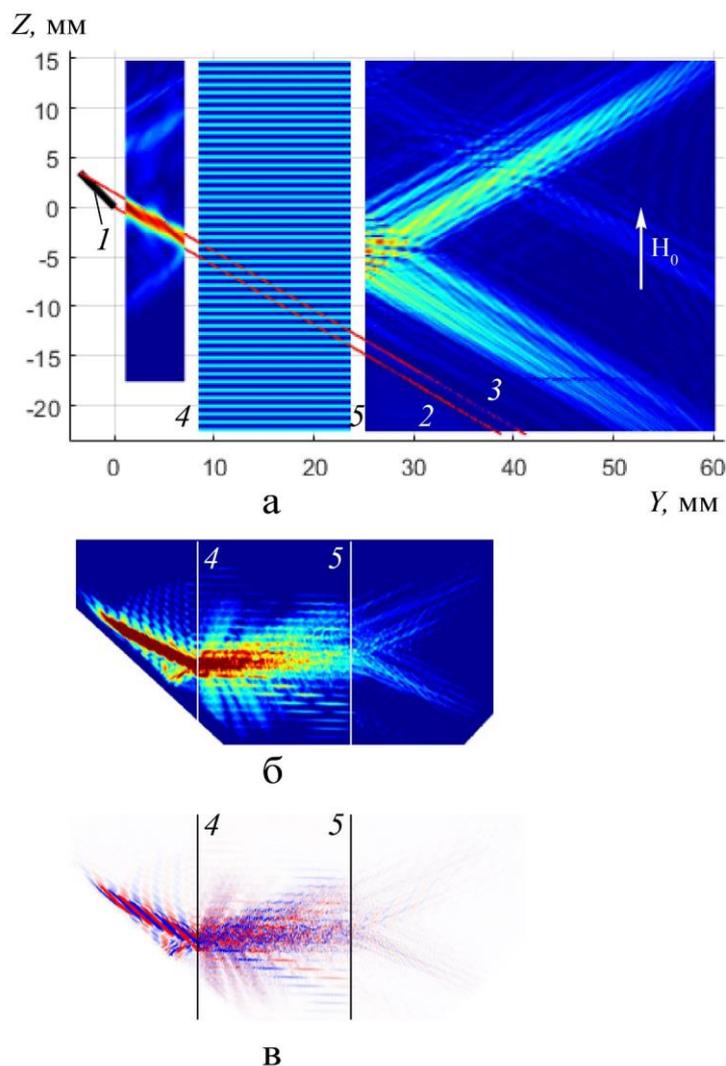


Рис 5 Экспериментальная (а) и рассчитанные картины распределения амплитуды (б) и фазы (в) ПСВ с частотой 2960 МГц при её дифракции на слабоконтрастном магнотом кристалле. 1 - возбуждающий СВ линейный преобразователь длиной 5 мм; 2 и 3 – условные границы сверхнаправленного луча СВ при отсутствии магнотомного кристалла; 4 и 5 – границы магнотомного кристалла с периодом решётки 810 мкм (кристалл схематично изображён в виде полосы, заполненной чередующимися полосками); цветовая гамма

распределения СВ соответствует увеличению амплитуды СВ от синего (малая амплитуда) до красного (большая амплитуда).

Поскольку как сверхнаправленное распространение, так и возникновение брэгговской дифракции существенно зависят от волнового числа и частоты ПСВ, то при небольшом изменении частоты волны в пределах ~ 100 МГц в эксперименте наблюдался целый ряд совершенно разных дифракционных картин, на которых прохождение луча ПСВ через магнетонный кристалл сопровождалось появлением множества смещенных лучей с тем же направлением распространения и множества продифрагировавших лучей с зеркально-симметричным относительно оси Y направлением распространения. Полученные дифракционные картины на рис 5 зависели от частоты и направления вектора решётки \mathbf{q} , определявшего параметры прошедшей волны, количество лучей, их направления и амплитуды.

Заключение

Таким образом, было показано распространение электромагнитных спиновых волн на примере дифракции ПМСВ и ПОМСВ на сквозном отверстии, численно исследована двумерная дифракционная картина, возникающая в дальней зоне ферритовой пленки ЖИГ. Получена универсальная формула для угловой ширины дифракционного пучка в анизотропных средах. Показана, что при помощи периодической решетки возможно управление сверхнаправленным лучом.

В магистерской работе было проведено численное моделирование распространения магнитостатических волн в касательно намагниченной структуре на основе пленки железо - иттриевого граната. Методом микромагнитного моделирования было получено распределение интенсивности намагниченности сверхнаправленного пучка поверхностных магнитостатических волн в плоскости плёнки ЖИГ. Были подобраны

характеристики волноведущей структуры, для формирования сверхнаправленного луча.

Таким образом, было показано распространение электромагнитных спиновых волн на примере дифракции, численно исследована двумерная дифракционная картина, возникающая в дальней зоне ферритовой пленки ЖИГ при падении сверхнаправленного пучка спиновых волн на произвольно ориентированное отверстие. Получена универсальная формула для угловой ширины дифракционного пучка в анизотропных средах. Показана, что при помощи периодической решетки возможно управление сверхнаправленным лучом.

Методом конечных разностей проведен расчет электродинамических характеристик прямых объемных и поверхностных СВ в ЖИГ-волноводе с отверстием и магнетонным кристаллом. На основе данной структуры можно создать мультиплексор, управляемый как магнитным полем.

Полученные численные результаты при прохождении сверхнаправленного пучка через магнетонный кристалл качественно согласуются с результатами экспериментальных измерений взаимодействия пучка СВ и слабоконтрастного МК, создаваемого в плёнке ЖИГ пространственно-периодическим магнитным полем.

Список использованных источников

1. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic Modes of a Ferromagnetic Slab. / J. Phys. Chem. Sol., 1961, V.19 – №3/4 – P. 308-320.
2. Стальмахов А.В. Дисс. ... доктора физ.-мат. наук (М.: ИРЭ АН СССР, 1992).
3. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. / Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993.
4. Герус С В Дисс. ... доктора физ.-мат. наук (М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2010).
5. Lock E.H. On the Angular Width of Diffractive Beam in Anisotropic Media / Cornell University Library: <http://arxiv.org/abs/1112.3929>
6. Локк Э.Г. Угловая ширина луча при дифракции на щели волны с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями / Успехи физических наук, 2012, т. 182 – №12 – с. 1327-1343.
7. Локк Э.Г. Угловая ширина волнового пучка обратной спиновой волны, возбуждаемой линейным преобразователем в ферритовой пластине / Радиотехника и электроника, 2015, Т.60 – №1 - с. 102-106.
8. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirected beam of the backward volume spin wave / EPJ Web of Conferences, 2018 – V. 185 – P. 02006-1 - 02006-3
9. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirectional beam of surface spin wave / EPL (EuroPhysics Letters), 2018, V. 123, №4, P. 44003-p1 – 44003-p7.
10. Зубков В. И., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Распространение поверхностных магнитостатических волн в неоднородном постоянном магнитном поле с профилем типа вала / Радиотехника и электроника, 1990, Т. 35 – №8 – с. 1617-1623.
11. Вашковский А. В., Зубков В. И., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Распространение поверхностных магнитостатических волн в

неоднородном постоянном магнитном поле типа протяженной ямы / Журнал технической физики, 1990, Т. 60 – №7 – с. 138-142.

12. *Анненков А.Ю., Герус С.В.* 2-D распределение магнитостатических волн в окрестности зоны непропускания магнетонного кристалла // Труды XXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». 15–17 ноября 2017. М.: МЭИ. С. 113–117.
13. *Анненков А.Ю., Герус С.В.* Дисперсионные свойства магнетонного кристалла с невзаимностью // Известия РАН. Сер. Физическая. 2017. Т. 81. № 8. С. 1091–1094.
14. *Герус С.В., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С.* Способ определения напряженности статического периодического магнитного поля / А.с. №1396761. Опубл. в Б.И. 1989. № 39. С. 278.
15. Локк Э.Г. Угловая ширина луча при дифракции на щели волны с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 1327–1343.
16. Локк Э.Г. Угловая ширина волнового пучка обратной спиновой волны, возбуждаемой линейным преобразователем в ферритовой пластине. Радиотехника и электроника, 2015, Т.60 – №1 - с. 102-106.
17. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirected beam of the backward volume spin wave. EPJ Web of Conferences, 2018, V. 185, P. 02006.
18. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirectional beam of surface spin wave. EPL, 2018, V. 123 August, P. 44003.
19. *Анненков А.Ю., Герус С.В.* Исследование распределения поверхностных магнитостатических волн путем сканирования поверхности ферритовой пластины // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 5. С. 572–577.
20. *Герус С.В.* Магнитостатические волны в пространственно-периодических и двумерно-неоднородных магнитных полях / Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 2010.