

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

Кафедра физики открытых систем

**Управление свойствами сверх направленных лучей в магнонных
структурах для обработки информационных сигналов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»
код и наименование направления
института физики
наименование факультета, института, колледжа
Старкина Павла Олеговича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н., кандидат
должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Садовников
Инициалы Фамилия

Заведующий кафедрой физики открытых систем
полное наименование кафедры

д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.А. Короновский
Инициалы Фамилия

Саратов 2026 г

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы магноника рассматривается как одно из перспективных направлений развития технологий обработки и передачи информации. В качестве носителей информации в магнонных устройствах используются спиновые волны, распространяющиеся в магнитоупорядоченных средах. Особый интерес представляют поверхностные магнитостатические волны в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), обладающих малыми потерями и выраженной дисперсионной анизотропией.

Одним из наиболее интересных эффектов, наблюдаемых в анизотропных магнитных средах, является формирование сверхнаправленных спин-волновых пучков. В отличие от классической дифракции, при которой происходит расширение волнового пучка по мере распространения, в анизотропных ферритовых структурах могут реализовываться режимы с существенно подавленным дифракционным уширением. Исследование подобных режимов представляет интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для создания магнонных устройств обработки сигналов.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование условий формирования сверхнаправленных спин-волновых пучков в тангенциально намагниченных пленках железо-иттриевого граната на основе микромагнитного моделирования и анализ возможностей их применения для обработки информационных сигналов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ современных исследований в области магноники и сверхнаправленного распространения спиновых волн;
- рассмотрены дисперсионные свойства поверхностных магнитостатических волн в пленках ЖИГ;
- выполнено микромагнитное моделирование процессов дифракции спиновых волн на субволновых неоднородностях в программном комплексе MuMax3;

- исследовано влияние частоты возбуждения и ориентации волнового вектора на формирование сверхнаправленных пучков;
- проведено сравнение результатов моделирования с опубликованными экспериментальными данными, представленными в научной литературе;
- рассмотрены возможности практического применения сверхнаправленных магنونных пучков в устройствах обработки сигналов.

Материалами исследования являлись результаты микромагнитного моделирования распространения поверхностных магнитостатических волн в пленках железо-иттриевого граната, а также опубликованные экспериментальные данные, представленные в современных научных работах по магنونике.

Выпускная квалификационная работа содержит введение, четыре главы, заключение и список использованных источников. В первой главе рассмотрены теоретические основы распространения спиновых волн и особенности дифракции в анизотропных средах. Во второй главе описаны методы микромагнитного моделирования и алгоритмы обработки результатов. В третьей главе представлены результаты исследования сверхнаправленных спин-волновых пучков и их сопоставление с литературными экспериментальными данными. В четвертой главе рассмотрены перспективы использования исследуемых эффектов в устройствах обработки информационных сигналов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Теоретические основы магنونики и сверхнаправленной дифракции

Магنونика является одним из современных направлений физики конденсированного состояния, изучающим процессы распространения и взаимодействия спиновых волн в магнитоупорядоченных средах. В качестве носителей информации в магنونных устройствах используются коллективные колебания магнитных моментов, что позволяет существенно снизить энергетические потери по сравнению с традиционными электронными схемами.

Наиболее распространённым материалом для исследования спиновых волн является железо-иттриевый гранат (ЖИГ), обладающий исключительно малыми магнитными потерями. Благодаря этому в пленках ЖИГ возможно

распространение спиновых волн на расстояния, значительно превышающие длину волны.

Рассмотрены основные типы спиновых волн, существующих в ферромагнитных пленках. Особое внимание уделено поверхностным магнитостатическим волнам Деймона–Эшбаха, распространяющимся перпендикулярно внешнему магнитному полю. Для данных волн характерна выраженная анизотропия дисперсионных свойств, вследствие чего направление фазового распространения и направление переноса энергии могут существенно различаться.

В работе проанализированы особенности дифракции волн в анизотропных средах. В отличие от классической дифракции, описываемой критерием Рэлея, угловая ширина спин-волнового пучка определяется не только отношением длины волны к размеру неоднородности, но и формой изочастотных кривых в пространстве волновых векторов.

Показано, что при наличии точек перегиба на изочастотных кривых возможно формирование сверхнаправленных пучков. В данном режиме широкий спектр возбуждаемых волновых векторов переносит энергию практически в одном направлении, что приводит к значительному подавлению дифракционного уширения.

2. Методика микромагнитного моделирования

Для исследования процессов распространения спиновых волн использовалось микромагнитное моделирование в программном комплексе MuMax3. Данный программный пакет позволяет решать уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта и рассчитывать динамику намагниченности с учетом обменного взаимодействия, магнитостатических полей и внешнего магнитного воздействия.

В качестве исследуемой структуры рассматривалась пленка железо-иттриевого граната, находящаяся во внешнем постоянном магнитном поле. Гео-

метрические и магнитные параметры модели выбирались в соответствии с параметрами, приведенными в опубликованных экспериментальных исследованиях сверхнаправленных спин-волновых пучков.

В модели использовался линейный микрополосковый преобразователь, возбуждающий поверхностные магнитостатические волны. Для исследования дифракционных эффектов в расчетную область помещалась субволновая неоднородность в виде круглого отверстия диаметром 250 мкм.

Расчетная область дискретизировалась регулярной пространственной сеткой. Для предотвращения отражения волн от границ использовались поглощающие граничные условия. В процессе моделирования определялись пространственные распределения амплитуды и фазы динамической намагниченности.

Дополнительно выполнялся расчет изочастотных кривых и зависимостей направления групповой скорости от ориентации волнового вектора. Это позволило установить связь между особенностями дисперсионных характеристик среды и пространственной структурой формирующихся спин-волновых пучков.

Полученные результаты сопоставлялись с опубликованными экспериментальными данными, представленными в современных работах по исследованию сверхнаправленной дифракции поверхностных магнитостатических волн в пленках железо-иттриевого граната.

3. Результаты моделирования сверхнаправленных спин-волновых пучков

Основная часть работы посвящена исследованию процессов дифракции поверхностных магнитостатических волн на субволновых неоднородностях и анализу условий формирования сверхнаправленных спин-волновых пучков.

На первом этапе были рассчитаны пространственные распределения интенсивности и фазы спин-волнового поля в плёнке железо-иттриевого граната (ЖИГ) при различных углах возбуждения падающего пучка. Полученные ре-

зультаты позволили проследить изменение структуры волнового поля при переходе от обычного режима распространения к режиму пространственной коллимации.

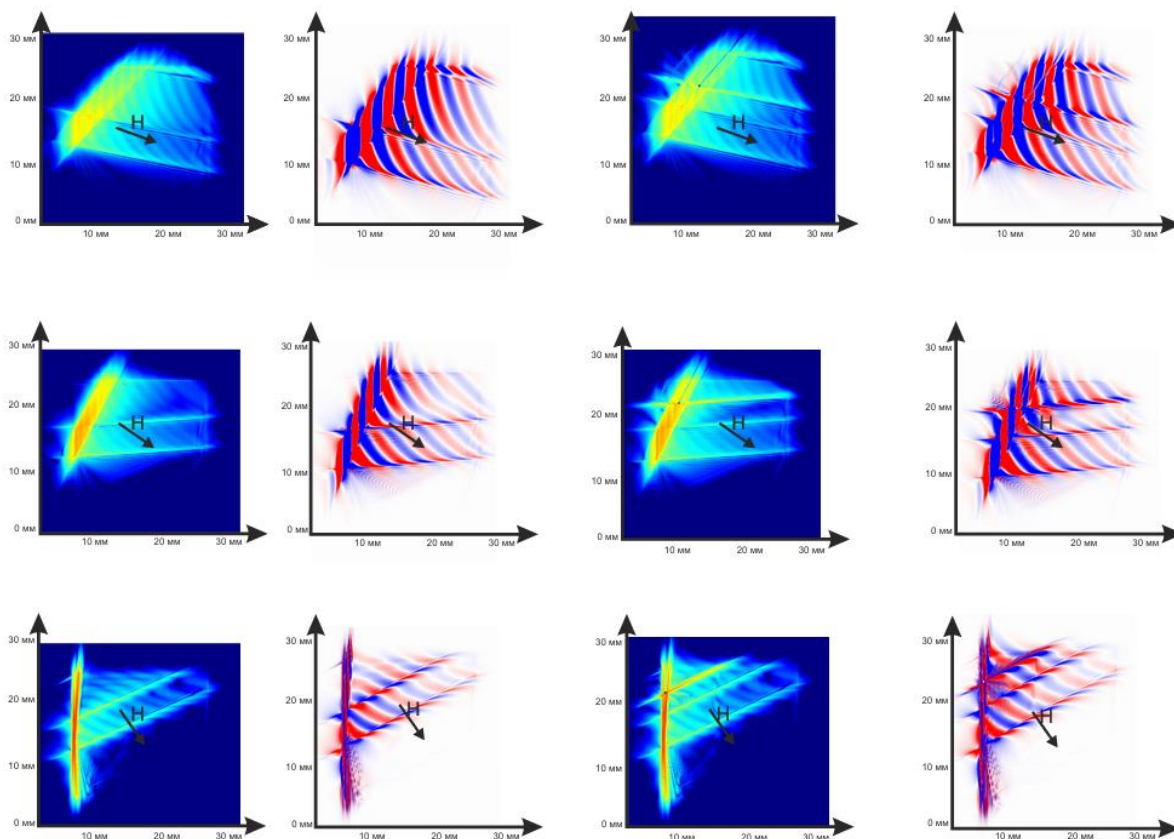


Рисунок 1 – Двумерные распределения интенсивности и фазы спин-волнового поля в плёнке ЖИГ при частоте 2966 МГц для различных углов возбуждения падающего пучка.

Анализ распределений показал, что направление распространения энергии существенно отличается от направления волнового вектора, что является характерной особенностью анизотропных магнитных сред. При определённых углах возбуждения наблюдается формирование узких пучков с минимальным дифракционным уширением.

Для объяснения наблюдаемого поведения были рассчитаны изочастотные контуры поверхностных спиновых волн в пространстве волновых векторов. Расчёты выполнялись для частот 2966, 3000, 3090 и 3300 МГц.

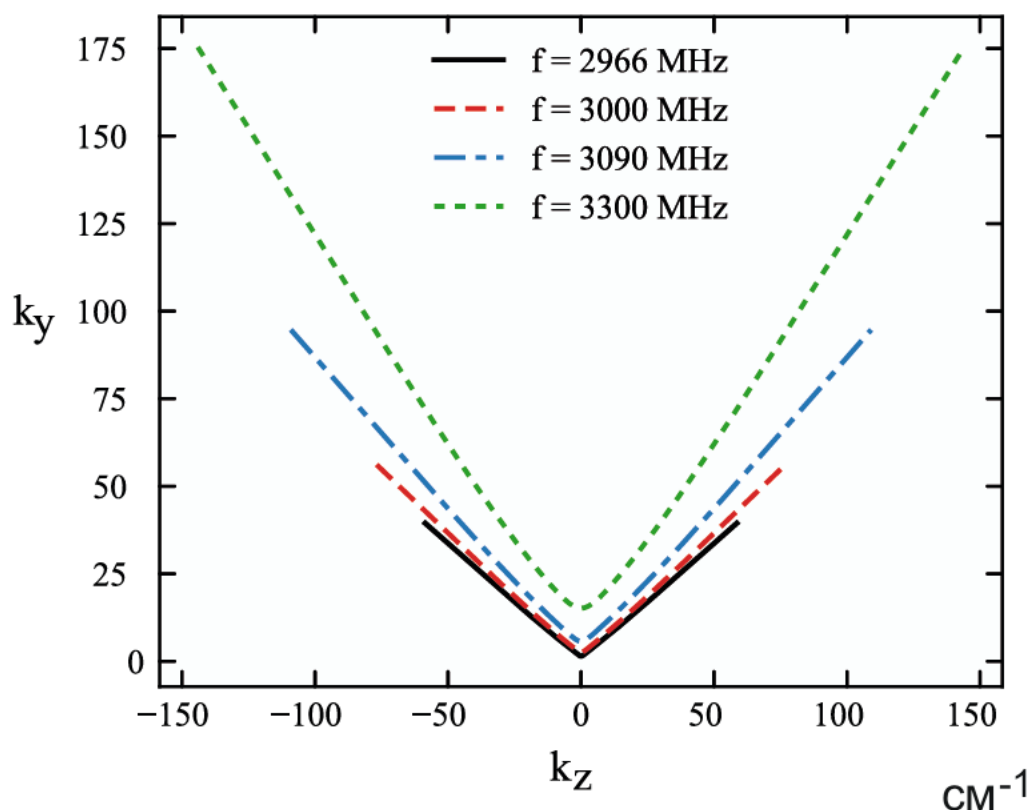


Рисунок 2 – Рассчитанные изочастотные контуры ПСВ в плоскости волновых векторов (k_y , k_z) для частот 2966, 3000, 3090 и 3300 МГц.

Из рисунка 2 видно, что форма изочастотных контуров существенно зависит от частоты возбуждения. На частоте 2966 МГц контур содержит участок с малой кривизной, близкий к точке перегиба. Именно наличие таких участков определяет возможность формирования сверхнаправленных спин-волновых пучков.

Для количественного анализа была построена зависимость направления луча, определяемого направлением групповой скорости ψ , от направления волнового вектора ϕ .

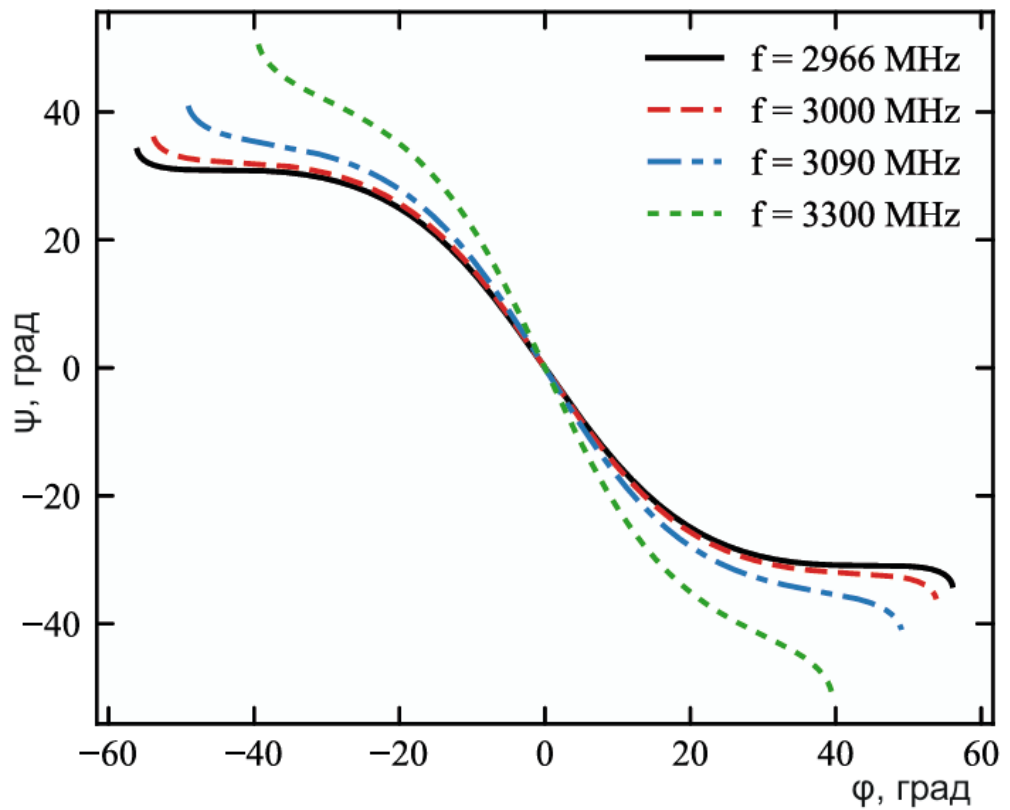


Рисунок 3 – Зависимость направления луча (угла групповой скорости ψ) от направления волнового вектора ϕ для фиксированного набора частот. Горизонтальные участки кривых соответствуют режимам пространственной коллимации.

Как видно из рисунка 3, для ряда частот на зависимостях $\psi(\phi)$ появляются участки с практически постоянным значением угла групповой скорости. В этих областях изменение направления волнового вектора практически не влияет на направление переноса энергии. В результате широкий спектр возбуждаемых волновых векторов формирует единый узкий энергетический пучок.

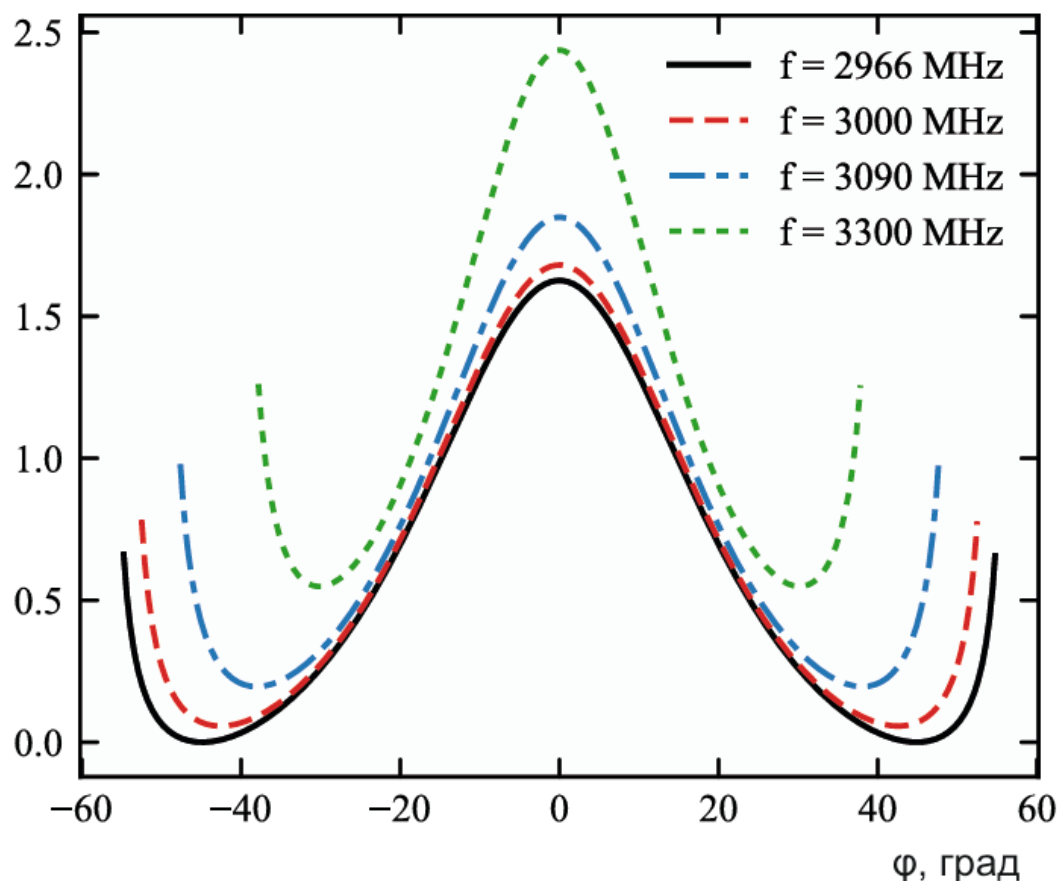
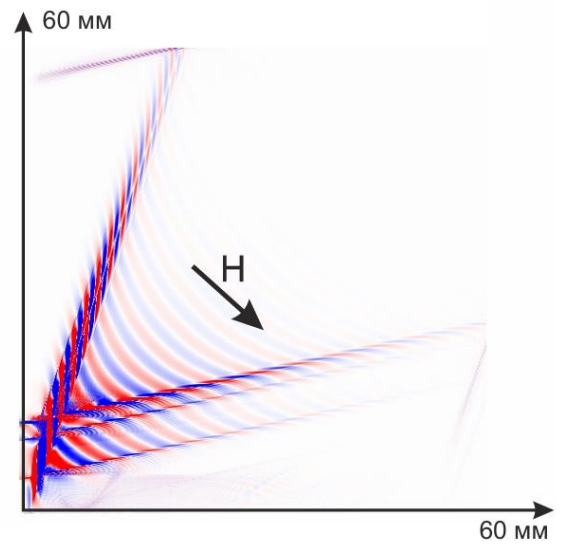
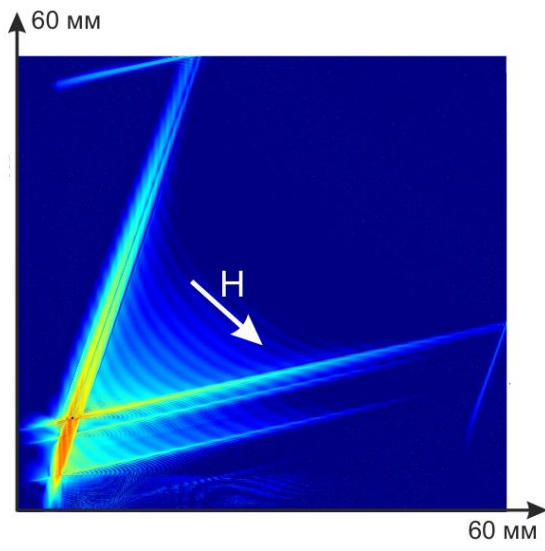
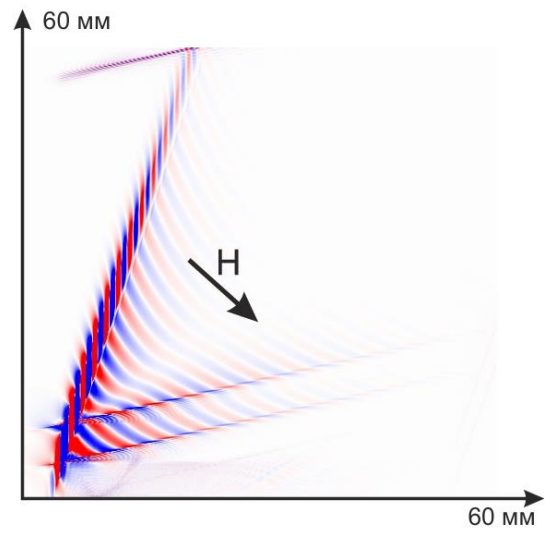
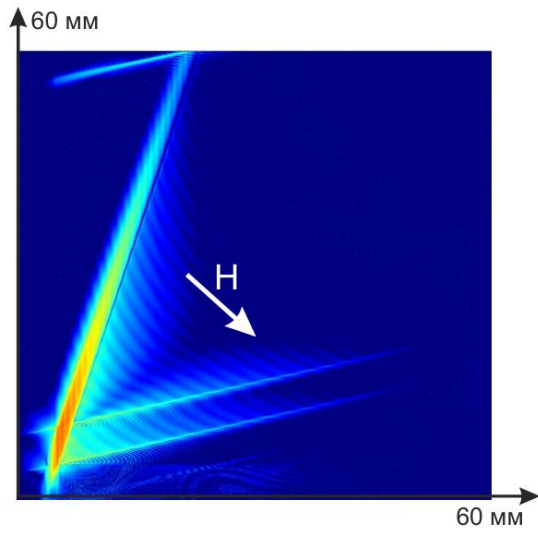


Рисунок 4 – Зависимость параметра относительной угловой ширины спин-волнового пучка $\sigma = |d\psi/d\phi|$ от угла волнового вектора ϕ . Точки минимума определяют условия сверхнаправленного распространения.

Из рисунка 4 следует, что на частоте 2966 МГц параметр σ принимает минимальные значения, близкие к нулю. Это свидетельствует о реализации режима сверхнаправленного распространения, при котором дифракционное уширение пучка практически отсутствует.

На следующем этапе было проведено моделирование дифракции поверхностных магнитостатических волн на микроотверстии диаметром 250 мкм. Полученные результаты позволили исследовать пространственную эволюцию спин-волновых пучков при различных частотах возбуждения.



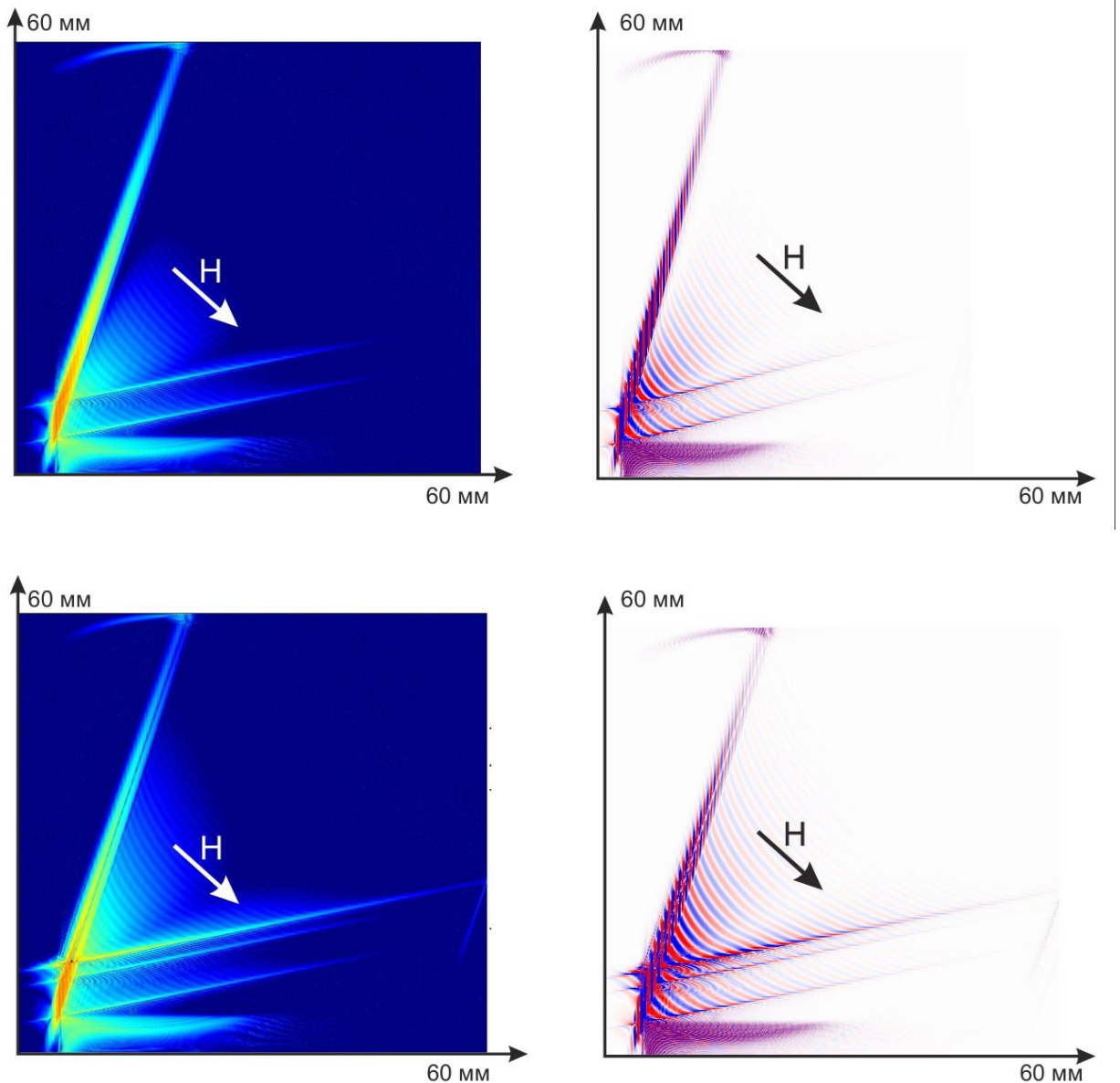


Рисунок 5 – Пространственная эволюция спин-волновых пучков при изменении частоты возбуждения. Верхняя строка – невозмущённая среда (без отверстия), нижняя строка – дифракция на микроотверстии с формированием нерасходящейся области геометрической тени на расстояниях $L/d > 80$: (а) $f = 2966$ МГц ($\phi = 42,54^\circ$); (б) $f = 3000$ МГц ($\phi = 42,54^\circ$).

В классической волновой оптике после прохождения волны через отверстие наблюдается постепенное расширение дифракционного пучка. Однако результаты моделирования показали, что в анизотропной магнитной среде ширина области распространения энергии определяется не только размером отверстия, но и формой изочастотных кривых.

На частоте 2966 МГц наблюдается наиболее выраженный режим сверхнаправленного распространения. В данной области изочастотная кривая содержит участок с малой кривизной, соответствующий точке перегиба. В результате широкий диапазон волновых векторов переносит энергию практически вдоль одного направления. Сформированный пучок характеризуется минимальным дифракционным уширением и высокой пространственной локализацией. Кроме того, за препятствием формируется область геометрической тени, ширина которой практически не изменяется на расстояниях, превышающих восемьдесят диаметров отверстия.

При увеличении частоты до 3000 и 3090 МГц форма изочастотных кривых постепенно изменяется. Наблюдается рост кривизны контуров в рабочей области, что приводит к увеличению углового разброса направлений групповой скорости. В результате происходит постепенное расширение спин-волнового пучка и снижение степени его направленности.

На частоте 3300 МГц эффект сверхнаправленности выражен значительно слабее. Пространственные распределения интенсивности демонстрируют заметное дифракционное уширение, а ширина пучка начинает возрастать по мере удаления от источника возбуждения. Данный результат согласуется с изменением геометрии изочастотного контура и исчезновением условий, необходимых для реализации сверхнаправленного режима.

Для проверки корректности моделирования было выполнено сравнение полученных результатов с опубликованными экспериментальными данными. Анализ показал качественное совпадение пространственной структуры волнового поля, положения области геометрической тени и направлений распространения энергетических потоков. Наблюдаемое соответствие подтверждает адекватность используемой модели и возможность применения микромагнитного моделирования для исследования сверхнаправленных режимов.

Проведённый анализ показал, что ключевую роль в формировании сверхнаправленных пучков играют точки перегиба изочастотных кривых. В окрестности таких точек направление групповой скорости слабо зависит от

ориентации волнового вектора, вследствие чего энергия распространяется вдоль узкого пространственного канала.

Полученные результаты подтверждают возможность управления характеристиками спин-волновых пучков посредством изменения частоты возбуждения и параметров внешнего магнитного поля. Это открывает перспективы создания перестраиваемых магнитных устройств обработки информации, использующих эффект сверхнаправленного распространения для пространственного разделения и маршрутизации сигналов.

4. Перспективы применения сверхнаправленных спин-волновых пучков для обработки информационных сигналов

Одним из важных преимуществ магнитных систем является возможность управления распространением сигналов без использования физических волноводов. В анизотропных магнитных средах направление переноса энергии определяется формой изочастотных кривых и может изменяться при варьировании внешнего магнитного поля или частоты возбуждения. Это позволяет реализовывать устройства пространственной обработки сигналов на основе естественных дисперсионных свойств среды.

На основании полученных результатов был рассмотрен принцип работы частотно-пространственного демультимплексора на основе сверхнаправленных спин-волновых пучков. Работа такого устройства основана на том, что волны различных частот распространяются в разных направлениях вследствие частотной зависимости изочастотных контуров.

При возбуждении нескольких сигналов на различных частотах в одной входной линии каждому сигналу соответствует собственное направление распространения энергии. В результате происходит пространственное разделение сигналов без использования дополнительных фильтров или разветвителей.

Проведённый анализ показал, что эффективность такого демультимплексирования определяется кривизной изочастотных контуров и взаимным углом

вым разделением энергетических потоков. Вблизи точек перегиба изочастотных кривых достигается высокая пространственная локализация сигнала, что способствует уменьшению взаимных помех между каналами.

Дополнительным преимуществом рассматриваемого подхода является возможность динамической перестройки характеристик устройства посредством изменения внешнего магнитного поля. В отличие от традиционных пассивных устройств, параметры магнонного демультиплексора могут изменяться без модификации его геометрии.

Полученные результаты показывают, что сверхнаправленные спин-волновые пучки могут использоваться не только для демультиплексирования сигналов, но и для создания магнонных маршрутизаторов, переключателей, логических элементов и других компонентов перспективных систем обработки информации.

Таким образом, управление пространственной динамикой спиновых волн за счёт дисперсионной анизотропии магнитной среды представляет собой перспективный подход к созданию энергоэффективных магнонных устройств нового поколения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы особенности формирования сверхнаправленных спин-волновых пучков в анизотропных магнитных средах и рассмотрены возможности их применения для обработки информационных сигналов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведён анализ современных научных публикаций, посвящённых распространению поверхностных магнитостатических волн и эффектам сверхнаправленной дифракции в плёнках железо-иттриевого граната.
2. Рассмотрены теоретические основы распространения спиновых волн в анизотропных средах и показана определяющая роль изочастотных кривых в формировании пространственной структуры волнового поля.

3. Выполнено микромагнитное моделирование распространения поверхностных магнитостатических волн в плёнке железо-иттриевого граната с использованием программного комплекса MuMax3.
4. Исследовано влияние частоты возбуждения на форму изочастотных контуров и характеристики распространяющихся спин-волновых пучков.
5. Показано, что формирование сверхнаправленных режимов связано с существованием точек перегиба на изочастотных кривых, в окрестности которых происходит пространственная коллимация энергетического потока.
6. Выполнено моделирование дифракции поверхностных магнитостатических волн на субволновых неоднородностях и продемонстрирована возможность формирования практически нерасходящихся спин-волновых пучков.
7. Проведено сравнение результатов моделирования с опубликованными экспериментальными данными, показавшее качественное совпадение основных закономерностей формирования сверхнаправленных лучей.
8. Рассмотрен принцип построения частотно-пространственного демультиплексора на основе сверхнаправленных спин-волновых пучков и показаны перспективы использования данного подхода в магнонных устройствах обработки информации.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения эффектов сверхнаправленного распространения спиновых волн для создания новых элементов магнонных систем передачи и обработки информационных сигналов.