

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

Кафедра физики открытых систем

**Спиновые волны в структуре волновод-резонатор для обработки
информационных сигналов**

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы

направления 09.03.02 информационные системы и технологии

код и наименование направления

института физики

наименование факультета

Фильченкова Игоря Олеговича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент кафедры ФОС, к.ф.-м.н.

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А.В. Садовников

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2022 год

Введение

Спиновые волны (СВ) – это волны намагниченности [1-3] в магнитоупорядоченных материалах, таких как ферромагнетики, ферримагнетики и антиферромагнетики. В последнее время развитие технологий изготовления планарных магнитных структур предоставляет все больше возможностей для изучения динамики СВ при их возбуждении и распространении в волноводных структурах микронных и нанометровых размеров. Как было показано в нескольких работах [4-6], СВ являются перспективными носителями информационных сигналов. Непрерывное развитие технологий формирования интегральных схем позволяет создавать структуры с более высокой плотностью магнитных функциональных элементов. Одним из преимуществ использования СВ для систем обработки информационных сигналов является возможность построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне [7, 8].

Большой интерес вызывает исследование резонаторов на ЖИГ, в которых можно наблюдать явление ферромагнитного резонанса (ФМР) [9, 10].

ФМР – одна из разновидностей электронного магнитного резонанса. Суть явления заключается в том, что ферромагнетик избирательно поглощает энергию электромагнитного поля в зависимости от частот, совпадающих с собственными частотами ЖИГ-резонатора. Важным достоинством ЖИГ-резонатора является возможность перестройки по частоте в широких пределах. Перестройка частоты достигается путем изменения величины внешнего магнитного поля. Таким образом, так как резонаторы на основе ЖИГ являются весьма компактными и технологичными, появляется возможность их использования в различных СВЧ-устройствах, например, фильтрах, генераторах, синтезаторах, ответвителях и т.д [11].

В данной работе было проведено экспериментальное и численное исследование ЖИГ-резонатора. Экспериментальные данные были сняты с

образца с помощью векторного анализатора электрических цепей. Численное исследование было проведено с помощью микромагнитного моделирования.

Рассеяние спиновых волн от магнитных неоднородностей привлекает большое внимание в последнее время [12]. СВ представляет собой коррелированное прецессионное движение множества магнитных моментов – спинов – и образуется из-за двух взаимодействий в магнетонных кристаллах: обменного взаимодействия и диполь-дипольного взаимодействия. Когда в магнитной пленке имеется магнитная неоднородность, то диполь-дипольное взаимодействие может обеспечить связь разрывом, если длина волны достаточно велика по сравнению с шириной барьера. Создать подобную ситуацию, когда в магнетонном кристалле имеется неоднородность намагниченности, можно путем локального изменения намагниченности насыщения. В этой области СВ распространяется благодаря дальнедействующему характеру диполь-дипольного взаимодействия между краями неоднородности.

На основе туннелирования СВ через неоднородности можно создавать магнетонные кристаллы. В таких кристаллах, которые являются структурами с периодически меняющимися магнитными характеристиками, СВ демонстрируют полосы непропускания, где распространение СВ запрещено. Таким образом, можно составлять магнетонные кристаллы в виде периодической структуры из магнитных пленок. Между пленками имеются механические зазоры, которые являются магнитными неоднородностями, где намагниченность насыщения равно нулю.

В данной работе исследовалась возможность использования эффекта, основанного на резонансе, возникающем при взаимодействии распространяющихся спиновых волн в нерегулярных структурах с модами резонатора, изготовленного в латеральной геометрии.

Спин-волновые возбуждения в прямоугольном ЖИГ-резонаторе в случае касательного намагничивания

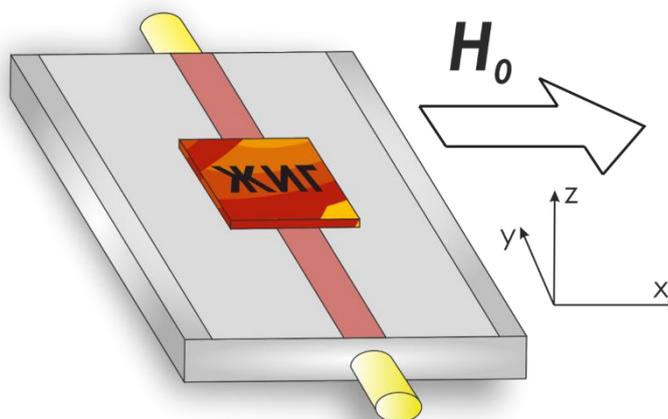


Рис.1. Исследуемый ЖИГ-резонатор.

В настоящей работе рассмотрен макет с расположенным на нем прямоугольным ЖИГ-резонатором с размерами $200 \times 200 \times 1.5$ [ШхДхТ] мкм, схематическое представление исследуемой структуры показано на рис. 1. Рассматривается распределения магнитостатических волн в резонаторе. Структура помещена во внешнее магнитное поле H_0 , направленное вдоль положительного направления оси x и может изменяться в пределах от 600 до 3600 Э.

Экспериментальное исследование было произведено с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ).

Векторный анализатор цепей - это устройство, которое позволяет измерять характеристики сигнала, проходящего через устройство, и характеристики отражения сигнала от портов переменного тока. Эти характеристики называются S -параметрами ВАЦ.

Для экспериментального исследования в качестве резонатора использовалась монокристаллическая пленка ЖИГ $[Y_3Fe_5O_{12}]$ $200 \times 200 \times 1.5$ мкм [ШхДхТ] с намагниченностью насыщения $M_0 = 139$ Гс на подложке из галлий-гадолиниевого граната $[(GGG) Gd_3Ga_5O_{12}]$. Макет с исследуемым ЖИГ-

резонатором был помещен в магнитное поле, направленным по вдоль оси x (см рис.1). Величину однородного магнитного поля можно регулировать, меняя напряжение внешнего магнита, в пределах от 600 до 3600 Э.

На рис.2 показана снятая с макета характеристика S_{11} при величине внешнего поля $H_0=1500$ Э.

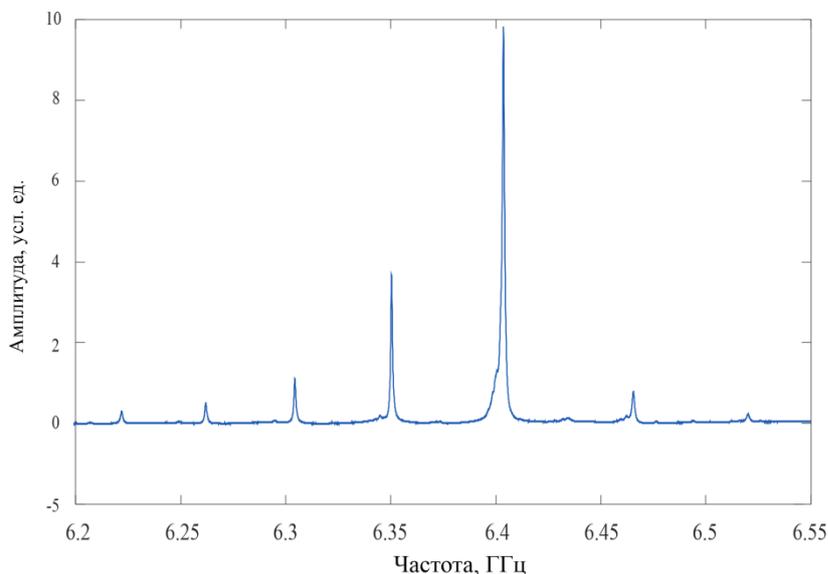


Рис. 2. АЧХ при $H_0=1500$ Э.

В спектре возбуждения (см. рис. 2) магнитостатических волн были обнаружены характерные пики резонансов. По центру наблюдается главный пик ферромагнитного резонанса (ФМР), а также несколько второстепенных пиков ФМР слева и справа от главного.

Меняя величину внешнего магнитного поля с помощью регулировки напряжения внешнего магнита, были сняты аналогичные характеристики для различных значений H_0 .

Далее методом микромагнитного моделирования с помощью программы Mimax3 была исследована динамика спиновых волн при изменении геометрии структуры и величины внешнего магнитного поля.

На рисунке 3 показана АЧХ, полученная с помощью микромагнитного моделирования. Данный результат неплохо соотносится с результатом

эксперимента. На АЧХ так же видно главный пик ФМР и несколько второстепенных пиков ФМР слева и справа от главного.

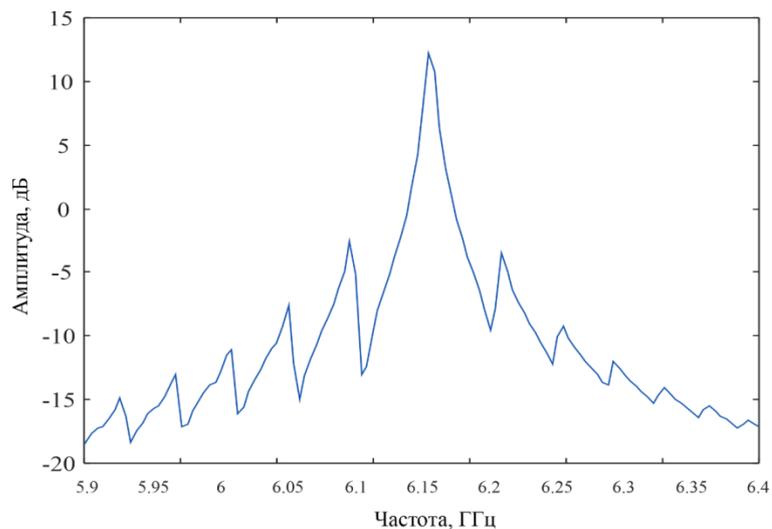


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика при $H_0=1500$, полученная методом микромагнитного моделирования.

Меняя величину внешнего магнитного поля H_0 , можно осуществлять перестройку пиков ФМР и получить АЧХ, аналогичные экспериментальным.

Динамика спиновых волн в структурах с неоднородными параметрами намагниченности

В данной части работы было проведено численное моделирование с помощью программы Muph3 исследуемых структур, схематичное изображение которых продемонстрировано на рис. 10.

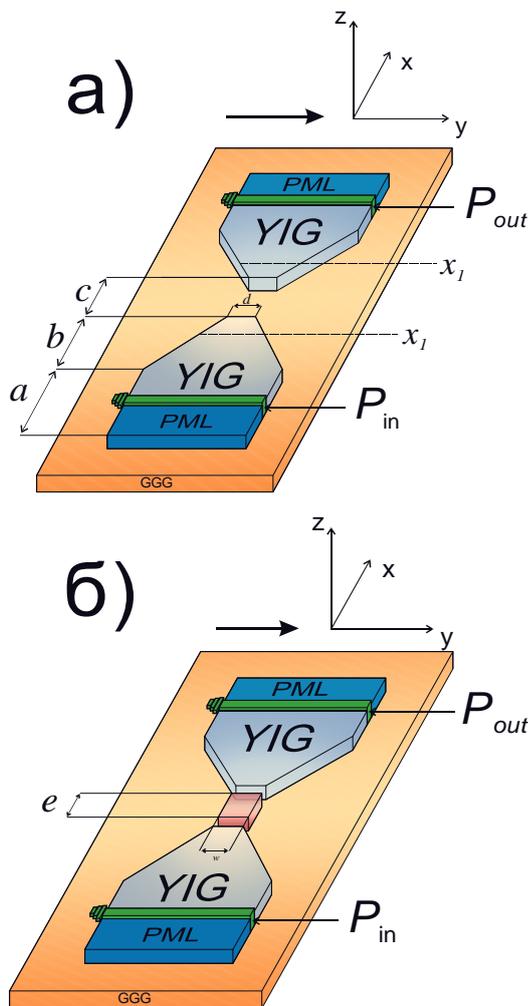


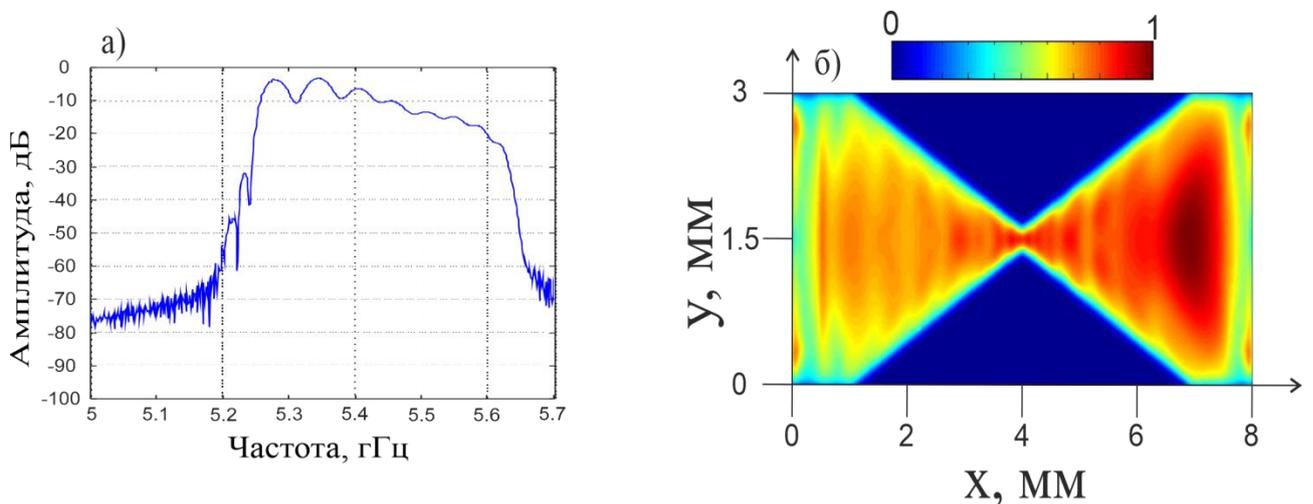
Рис. 4. Схематическое изображение исследуемых структур.

Структура на рисунке 4 (а) содержит подложку, выполненную из пленки ГГГ, на которой вдоль продольной оси расположены с зазором направленные друг на друга два идентичных планарных микроволновода из плёнки ЖИГ, каждый из микроволноводов имеет прямоугольную часть, переходящую в клинообразный сужающийся участок, образуя усеченную боковую сторону микроволновода. Ширина изменяется с 3 мм до 0,2 мм. Длина «прямоугольной» части микроволновода $a=1$ мм. Длина «сужающейся» части микроволновода $b=3$

мм. Антенна расположена по центру данной части, при этом с одной из стороны были расположены области с повышенным коэффициентом затухания, чтобы избежать влияния на динамику распространения СВ отраженной волны. Принимающая антенна расположена на второй секции. Вторая секция микроволновода является идентичной первой и расположена так, что сужающиеся части секций смотрят друг на друга. Размер зазора изменяется в пределах от $c=0$ до $c=0,2$ мм. Общая длина структуры для случая, когда зазор $c=0,2$ мм, равняется 7,8 мм. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси y , таким образом в структуре возбуждаются поверхностные магнитостатические волна (ПМСВ). Величина внешнего магнитного поля равна 1750 Э.

Структура, изображенная на рисунке 4 б), является аналогичной структуре на рисунке 4 а) для случая, когда размер зазора $c=0,2$ мм. В зазоре между двумя секциями расположен ЖИГ-микрорезонатор с размерами $0,18 \times 0,2$ мм.

На рисунке 5 а) представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и интенсивности распространения СВ на частоте 5,6 ГГц для случая, когда зазор между секциями равен $c=10$ мкм.



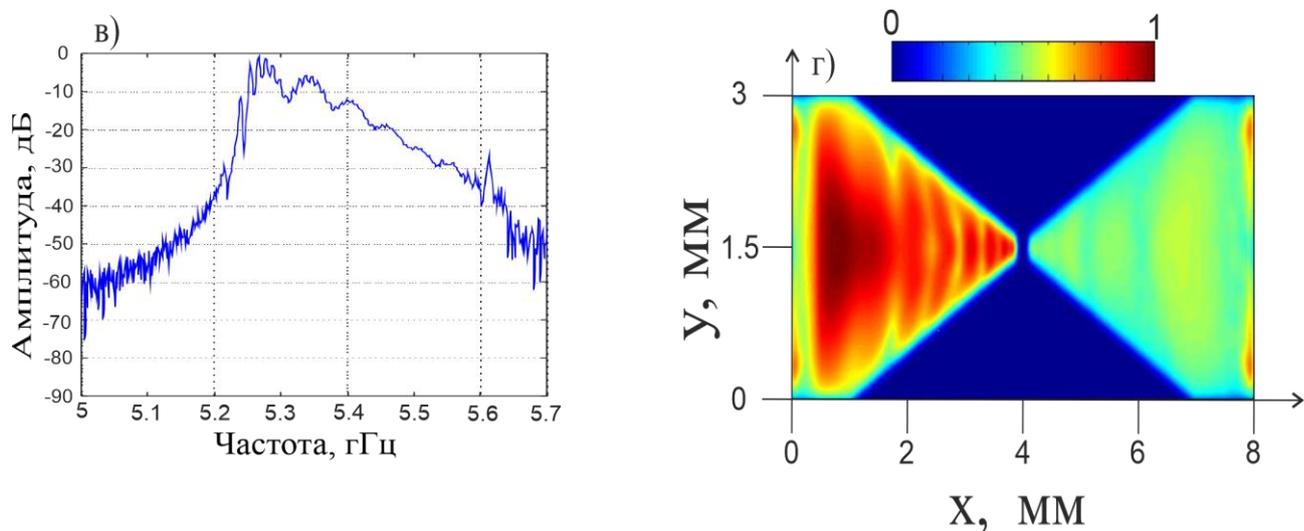


Рис. 5. Для случая $s=10$ мкм: а) АЧХ и б) интенсивность растространения СВ, для случая $s=200$ мкм: в а) АЧХ и б) интенсивность растространения СВ

На рис 5 б) показана интенсивность распространения СВ, из которой видно, что энергия СВ успешно преодолела зазор в 10 мкм. Волна распространилась на противоположный конец структуры.

На рисунке 5 в), г) продемонстрированы результаты расчетов для случая, когда зазор между секциями равен $s=200$ мкм.

На данных результатах видно, что спектр прохождения СВ изменился. Высокочастотная компонента СВ не прошла через зазор в 200 мкм, Таким образом, полоса прохождения СВ уменьшается при увеличении зазора между секциями. На рисунке 5 б) показана интенсивность распространения СВ на частоте 5,6 ГГц, из которой видно, что на этой частоте волна практически не распространилась на вторую секцию структуры.

Далее будет рассматриваться структура, изображенная на рисунке 1б, то есть аналогичная структуре из предыдущего пункта, но в зазор между секциями помещается ЖИГ-микрорезонатор.

На рисунке 6 показаны АЧХ для исследуемой структуры при различных значениях величины намагничивания резонатора.

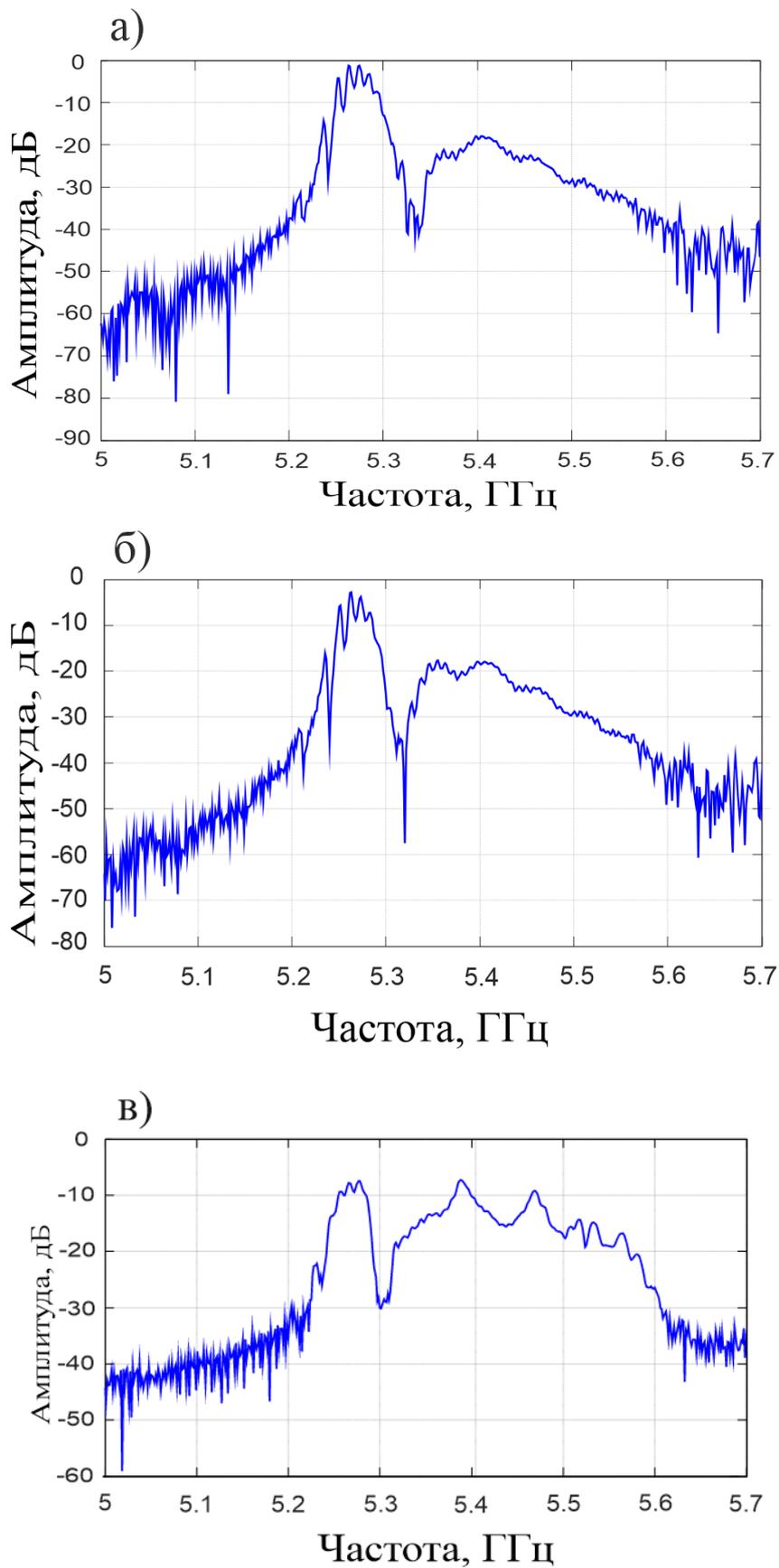


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики при различной намагниченности микрорезонатора: а) 0 Гс, б) 50 Гс, в) 1750 Гс.

Величину намагниченности выбранных областей можно изменять в программе Mux3. Для рисунка 6 а) $4\pi M_0 = 0$ Гс, то есть резонатор не намагничен, для рисунка 6 б) $4\pi M_0 = 500$ Гс, для рисунка 6 в) $4\pi M_0 = 1750$ Гс, то есть случай намагниченности насыщения для ЖИГ.

Из АЧХ на рисунке 16 а) видно, что в отличие от графика для структуры без резонатора, для структуры с микрорезонатором появляется характерный провал в спектре прохождения сигнала на частоте 5.32 ГГц. СВ взаимодействует с собственной модой резонатора, и в результате отражения от краев резонатора волна на определенной частоте не проходит на вторую секцию структуры.

На рисунке 6 б) и в) показаны АЧХ при различных значениях намагниченности микрорезонатора. Изменяя намагниченность резонатора, можно выполнять перестройку запрещенной зоны по частоте.

Итак, в данном разделе была рассмотрена структура волновод-резонатор-волновод, благодаря которой можно управлять модовым составом СВ. При этом рассматриваемая система имеет возможность перестройки резонансных частот и частот непропускания в спектре прохождения ПМСВ в нелинейном режиме. При этом ввиду возможности связи распространяющихся мод ЖИГ микроволновода с дискретным спектром мод резонатора в системе оказывается возможным наблюдение резонансов типа резонанса Фано при добавлении микрорезонаторов в латеральном направлении. Важным преимуществом предложенной системы является возможность перестройки спектров как величиной и направлением внешнего поля подмагничивания, так и интенсивностью спиновой волны, распространяющейся в градиентной структуре. Благодаря клинообразной форме подводящего микроволновода оказывается возможным развитие нелинейных параметрических трехмагнонных процессов распада в области сужения и в микрорезонаторе.

Заключение

Таким образом, в данной работе было проведено экспериментальное и численное исследование динамики спиновых волн в ЖИГ-резонаторе. Важным преимуществом ЖИГ-резонатора является широкая возможность частотной перестройки, причем с достаточно высокой скоростью. Перестройки частоты можно добиться, изменяя величину внешнего магнитного поля в системе, при этом зависимость резонансных частот от величины внешнего магнитного поля является с высокой степенью линейной. Исследовав с помощью микромагнитного моделирование ЖИГ-резонатор, было установлено, что в данной структуре возможно возбуждение различных мод волн, а также разных типов волн, таких как поверхностные магнитостатические волны и обратные объемные магнитостатические волны.

Система связанных неоднородных магнитных структур может демонстрировать резонансы, которые могут возникать при рассмотрении связи распространяющейся моды спиновой волны с собственной модой магнитной структуры между двумя неоднородными волноводами, в рассматриваемом случае. В этом случае спектры пропускания сигнала спиновой волны, который возбуждается на одном сегменте волновода и затем детектируется на втором сегменте, могут контролироваться параметрами геометрии квадратного микрорезонатора, интенсивностью спиновой волны и изменением угла намагниченности всей системы.

Список литературы

1. **А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков**, Магнитные колебания и волны, Физматлит, с. 16-30, 40-47 (1994).
2. **А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский**, Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот, Изд-во Саратовского университета, с. 14-24 (1993).
3. **Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.**, Спиновые волны [Текст]. В.: Наука, М. (1967).
4. **В.Ф. Шкарь, Е.И. Николаев, В.Н. Саяпин, В.Д. Пойманов**. Физика твердого тела. Т. 46. – №. 6. – С. 1043-1050 (2004).
5. **Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D.**, J. Phys. D: Appl. Phys. 43. 264001. (2010).
6. **Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A.**, Phys. Rev. Lett. 2018. 120. 257203.
7. **Khitun A., Bao M. Wang K.L.**, J. Phys. D.43. 264005. (2010)
8. **Demidov V.E., Urazhdin S., De Loubens G., Klein O., Cros V., Anane A., Demokritov S. O.**, Phys. Rep. 673. (2017).
9. **В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко, А.В. Садовников, С.А. Никитов**. Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 80. – №. 10. – С. 1389-1394 (2016).
10. **А. А. Грачев, Е.Н. Бегинин, А.А. Мартышкин, А.Б. Хутиева, И. О. Фильченков, А.В. Садовников**, Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. Т. 29. – №. 2 (2021).
11. **А.В. Садовников, А.А. Грачев, С.А. Одинцов, А.А. Мартышкин, В.А. Губанов, С.Е. Шешукова, С. А.Никитов**. Письма в ЖЭТФ. Т.108. Вып.5. С 332–338 (2018).
12. **Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B. and Kostylev M. P.**, Appl. Phys. Lett., 93, 022508. (2008).