

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра физики открытых систем
наименование кафедры

Особенности распространения спиновых волн в зигзагообразном

наименование темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

волноводе с резонансным механизмом управления

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2241 группы

направления 09.04.02 Информационные системы и технологии
код и наименование направления

Институт физики

наименование факультета

Фильченкова Игоря Олеговича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент кафедры физики

открытых систем, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Садовников

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой физики открытых систем

полное наименование кафедры

профессор, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.А. Короновский

Инициалы Фамилия

Саратов 2024 г.

Содержание

Введение.....	3
Динамика спиновых волн в зигзагообразной структуре.....	5
Заключение	13
Список литературы	14

Введение

Спиновые волны (СВ) – это волны намагниченности в магнитоупорядоченных материалах, таких как ферромагнетики, ферримагнетики и антиферромагнетики. Впервые СВ были предсказаны Феликсом Блохом в 1930 году для ферромагнетиков. В соответствии с принципом корпускулярно-волнового дуализма СВ можно считать в то же время частицами, или квазичастицами, которым дали название «магنون» [1].

Характерной особенностью спиновых волн является зависимость собственной частоты, фазы и групповой скорости от величины и направления постоянного поля намагничивания, магнитных характеристик материала и геометрических размеров волноводных структур [2-3]. Основным уравнением, описывающим все типы волн, является дисперсионное уравнение, с помощью которого можно выразить все эти зависимости, является уравнение Ландау-Лифшица с затухающим членом Гилберта, описывающее распространение намагниченности в ферромагнитных материалах.

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma [\vec{M} \times \vec{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M_0} \left[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right] \quad (1)$$

где \vec{M} – вектор намагниченности, $\gamma = 28$ ГГц/Тл – гиромагнитное отношение, $\alpha = 7 \cdot 10^{-3}$ – параметр затухания в пермаллое, $\vec{H}_{eff}(\mathbf{r}, t) = \vec{H}_0(\mathbf{r}) + \vec{h}_d(\mathbf{r}, t) + \vec{h}_{ex}(\mathbf{r}, t) + \vec{H}_{an}(\mathbf{r}) + \vec{H}_{ext}(\mathbf{r}, t)$ – эффективное магнитное поле, $\vec{H}_0(\mathbf{r})$ – внешнее постоянное магнитное поле, $\vec{h}_d(\mathbf{r}, t)$ – поле дипольного взаимодействия, $\vec{h}_{ex}(\mathbf{r}, t)$ – поле обменного взаимодействия, $\vec{H}_{an}(\mathbf{r})$ – поле анизотропии, $\vec{H}_{ext}(\mathbf{r}, t)$ – переменное поле источника.

Развитие технологий изготовления планарных магнитных структур расширяет возможности для изучения динамики спиновых волн в микронных и нанометровых волноводных структурах. СВ перспективны как носители информационных сигналов. Интерес к магنونным структурам обусловлен возможностью создания ЖИГ пленок на подложках галлий-гадолиниевого

граната методом ионно-лучевого распыления с отжигом, что позволяет получать пленки толщиной до 1 μm [4-8].

СВ представляют собой коррелированное прецессионное движение магнитных моментов (спинов), обусловленное обменным и диполь-дипольным взаимодействиями. Дипольное взаимодействие доминирует при длинных волнах, тогда как обменное взаимодействие становится значимым при коротких волнах, сравнимых с длиной обмена материала.

Управление спин-волновым транспортом осуществляется изменением эффективного магнитного поля в микроструктурах, что достигается изменением свойств магнетонных волноводов или поля подмагничивания. Исследование спин-волнового транспорта в многоуровневых топологиях магнетонных структур важно для создания функциональных элементов.

Периодические магнитные пленки позволяют создавать запрещенные и разрешенные зоны в частотном спектре спиновых волн. Свойства этих зон зависят от внешних параметров и могут изменяться под воздействием магнитных полей, спин-поляризованного тока или металлизации [9-12].

В данной работе исследовалась возможность использования резонанса спиновых волн в магнитной пленке с периодическими зигзагообразными изменениями геометрии. Для управления свойствами спиновых волн применялся ЖИГ-резонатор с возможностью ферромагнитного резонанса (ФМР), который позволяет изменять частоту и добротность запрещенных зон спиновых волн.

Микромагнитное моделирование зигзагообразных периодических структур выявило возможность управления частотными диапазонами запрещенных зон в зависимости от геометрии. Такие структуры перспективны для создания СВЧ устройств, таких как фильтры, шумоподавители и ограничители мощности.

Динамика спиновых волн в зигзагообразной структуре

В настоящей работе предлагается исследовать эффекты, возникающие при распространении спиновых волн в магнитных кристаллических микроволноводах с зигзагообразным профилем. В данной работе представлены результаты исследования структуры из железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). На рисунке 1 представлено схематическое изображение зигзагообразного ЖИГ микроволновода со следующими параметрами: ширина волновода $a = 200$ мкм, длина регулярной части $b = 400$ мкм, длина наклонной части волновода $c = 800$ мкм, общая длина структуры составляет 5650 мкм. Диагонали ЖИГ-резонаторы равны $d = 300$ мкм и $e = 500$ мкм. Микрорезонатор изменял свое положение вдоль оси f . Распространение спиновой волны исследовалось для двух случаев угла наклона $\varphi = 30^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$. В процессе численного моделирования менялось количество «изломов» для случаев $n=1, 3$; то есть изменялось количество периодов в системе. В качестве референсной структуры был использовался волновод без изломов шириной a , также аналогичной длины.

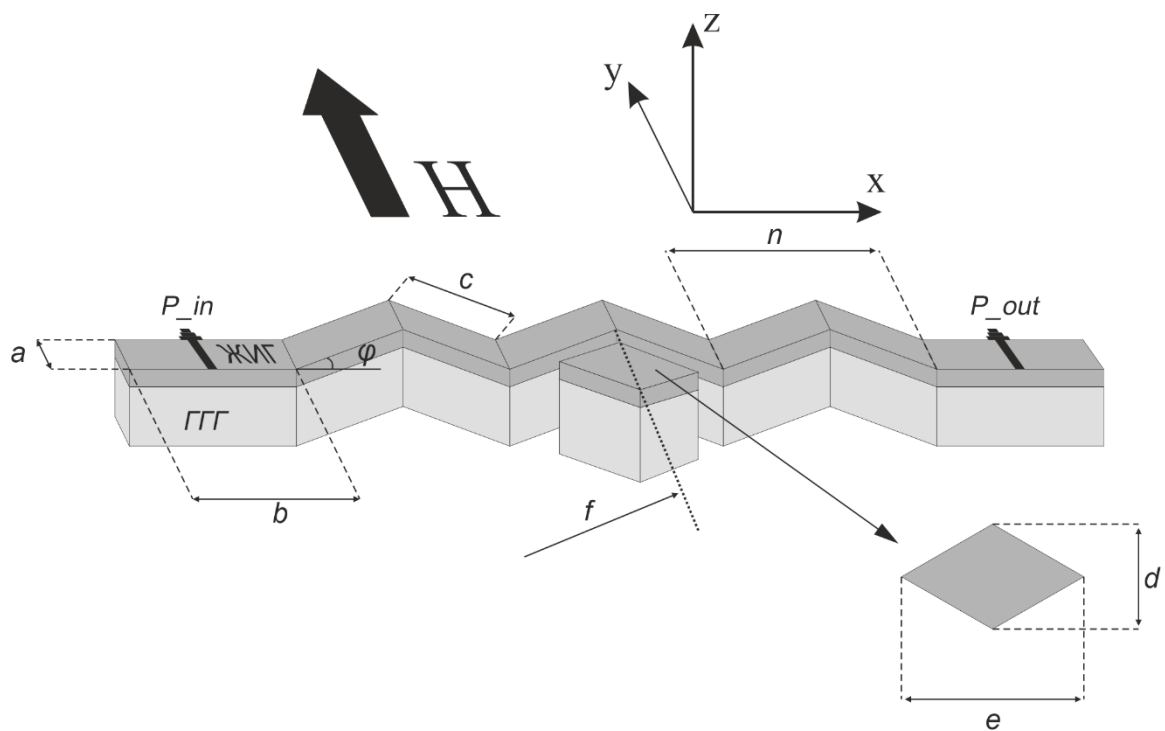


Рисунок 1. Схематическое изображение исследуемого зигзагообразного микроволновода

Значение внешнего магнитного поля равно $H = 1200$ Э, чтобы эффективно возбудить поверхностные магнитоэлектрические спиновые волны (ПМСВ), направление внешнего магнитного поля было выровнено вдоль оси OY . Входные и выходные микрополосковые антенны установлены на противоположных концах микроволновода в их регулярной части. Кроме того, при моделировании были включены слои pml (perfectly matched layers), чтобы предотвратить отражение спиновой волны от краев микроволновода, что может негативно сказаться на возбуждении и считывании сигнала с использованием микрополосковых антенн.

В качестве референсной структуры был выбран микроволновод аналогичной ширины в 200 мкм, но без каких-либо характерных изломов, т.е. прямоугольный регулярный волновод, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) для которого представлены на рисунке 2. На АЧХ видно ровную полосу пропускания СВ от 5 до 5.5 ГГц,

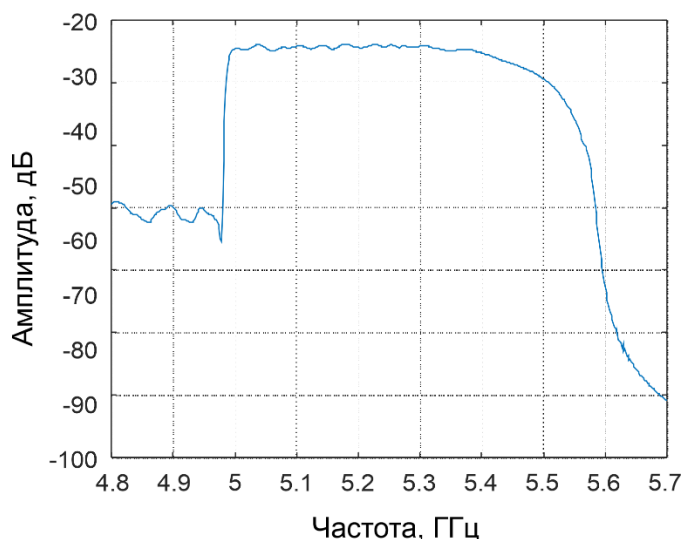


Рисунок 2. АЧХ для референсной структуры

Далее будут представлены результаты численного моделирования исследуемого зигзагообразного волновода.

Для численного моделирования была использована программа `mitax3` [13]. Этот программный пакет, построенный на методе конечных разностей,

предназначен для решения временных и пространственных задач, связанных с распространением спиновых волн в структурах. Для достижения этой цели структура разбивается на сетку, где в каждом узле решается уравнение Ландау-Лившица-Гилберта.

В результате численного моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) спиновой волны. Для получения АЧХ спиновых волн сигнал подавался на структуру и фиксировались значения амплитуд намагниченности. Обработка результатов микромагнитного моделирования проводилась в программе Matlab. С помощью двумерного преобразования Фурье строились амплитудно-частотные характеристики для различных параметров системы.

На следующем рисунке 3 показана АЧХ для исследуемой структуры при $n=1$. На АЧХ видно, что в данном случае на частотах вблизи 5.4 ГГц происходит серия пиков затухания сигнала – запрещенных зон, но в данном случае глубина этих зон очень мала. Было построено пространственное распределение намагниченности СВ на частоте запрещенной зоны из которой видно, что волна достаточно свободно преодолевает данную неоднородность.

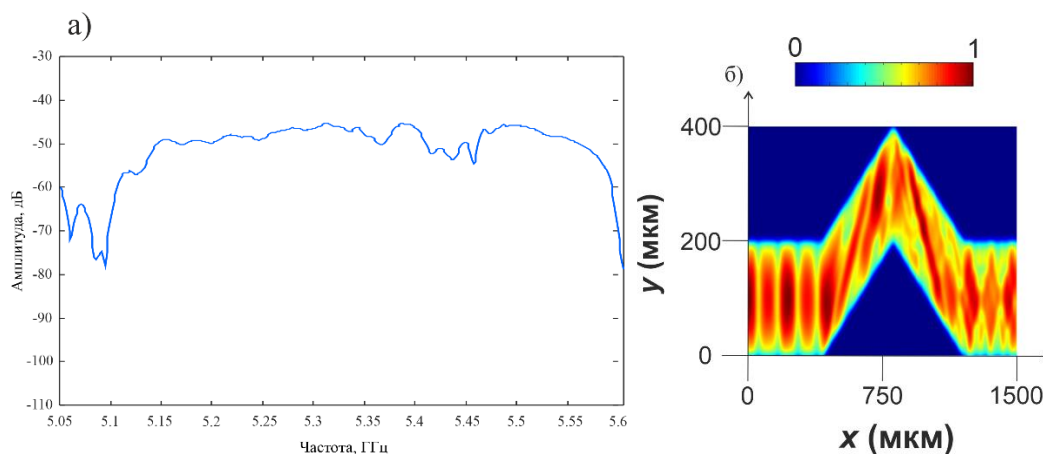


Рисунок 3. АЧХ исследуемой структуры при $n=1$. Пространственное распределение СВ при $n=1$ вблизи запрещенной зоны.

На следующем рисунке показана АЧХ для аналогичной структуры, но с углом $\varphi = 45^\circ$. В данном случае имеется отличие, которое заключается в том, что сигнал прошел гораздо хуже из-за более сильных отражений из-за большего угла поворота петляющей секции, и, кроме того, на АЧХ видно, что дополнительная запрещенная зона сформировалась в районе 5.2 ГГц.

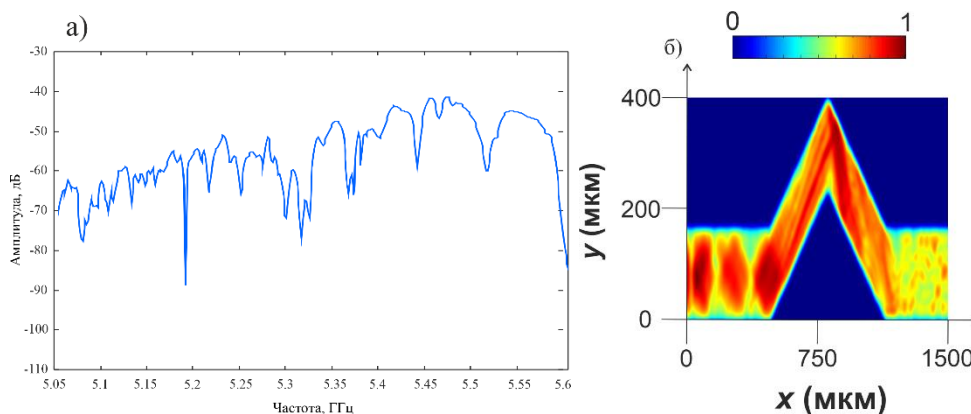


Рисунок 4. а) АЧХ исследуемой структуры при $\varphi = 45^\circ$; б) Пространственное распределение СВ при $\varphi = 45^\circ$ вблизи запрещенной зоны на частоте 5.2 ГГц.

Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать структуру при величине угла $\varphi = 30^\circ$, т.к. она является более устойчивой в плане прохождения спиновой волны и не демонстрирует таких сильных отражений, как случай при величине $\varphi = 45^\circ$.

Далее рассмотрим структуру, продемонстрированную на рисунке 1, но без ЖИГ-резонатора. В данной структуре за счет многократного повторения геометрических неоднородностей формируются уже более выраженные запрещенные зоны с высокой добротностью. На рисунке 5 показана АЧХ для данной структуры.

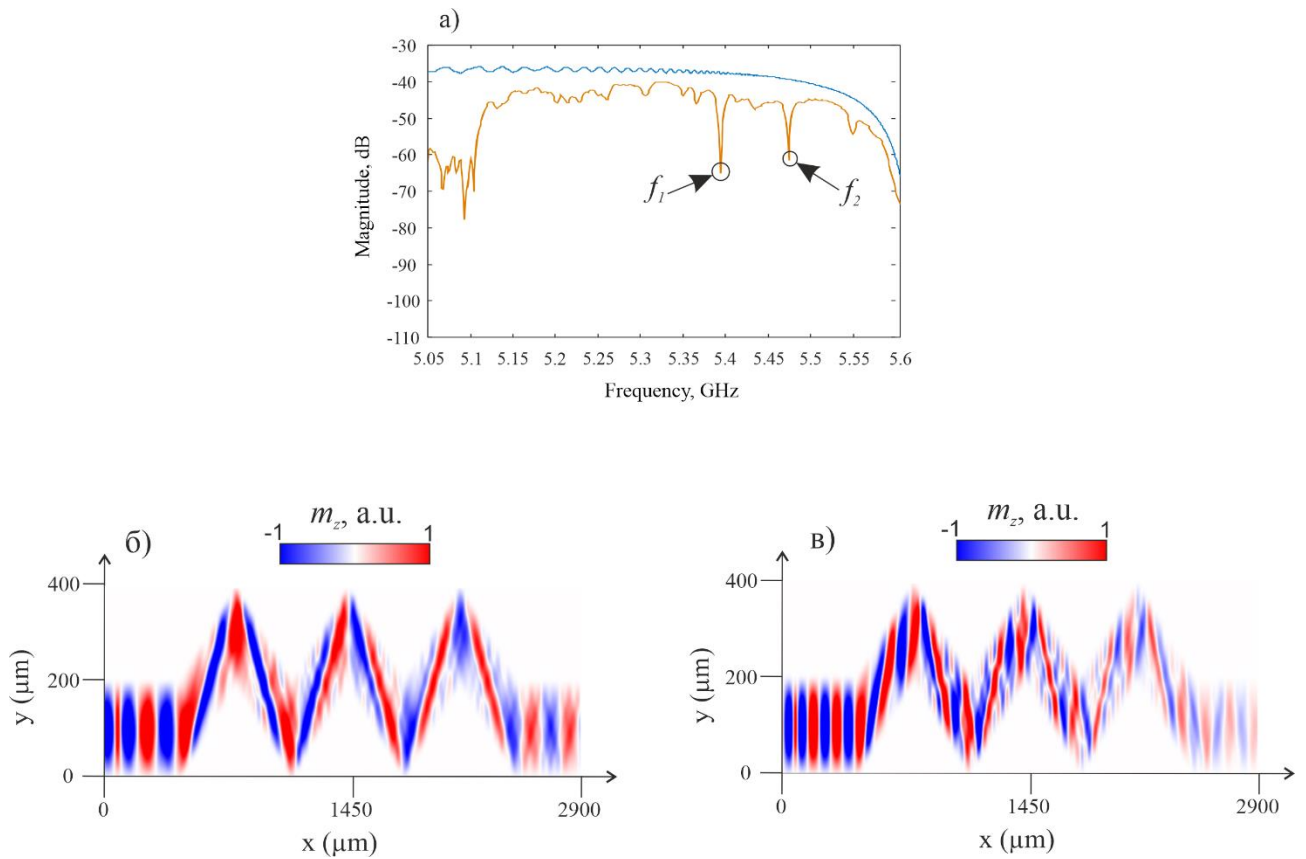


Рисунок 5. а) АЧХ для структуры при $\varphi=30^0$ и $n=3$; б) пространственное распределение СВ при $\varphi = 30^0$ в полосе пропускания СВ на частоте 5.2 ГГц; в) пространственное распределение СВ при $\varphi = 30^0$ в полосе пропускания СВ на частоте запрещенной зоны на 5.37 ГГц;

На рисунке 7. представлены численно рассчитанные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). На фоне непрерывного спектра референсного прямоугольного волновода (рис. 7а, голубая линия) на АЧХ исследуемой структуры (рис. 7а, оранжевая линия) наблюдаются 2 зоны непропускания сигнала на частотах $f_1 \sim 5.37$ ГГц и $f_2 \sim 5.46$ ГГц с достаточно высокой добротностью. Данный эффект возникает из-за многократного отражения спиновой волны на каждом изломе структуры. Также были построены пространственные карты распределения динамической компоненты намагниченности m_z , которую можно трактовать как фазу спиновой волны (СВ) в волноводе на частотах $f = 5.2$ ГГц (рис. 7б) и f_1 (рис. 7в). Видно, что на частоте зоны непропускания f_1 мощность спиновой волны слабо достигает выходной

области волновода. При этом на частоте f_1 во входной секции микроволновода возбуждается СВ с длиной волны $\lambda_1=180$ мкм, а в изогнутой секции длина волны на данной частоте становится равной $\lambda_{c1}=240$ мкм. При длине изогнутой секции $c = \frac{b}{\cos(\varphi)} \approx 465.1$ мкм можно утверждать, что выполняется соотношение $\lambda_{c1}/c \approx 1/2$, что соответствует условию, когда на длине одной «наклонной» секции укладывается две длины спиновой волны. Принимая во внимание условие брэгговского резонанса для магнетонного кристалла $\lambda = 2D/n$, где n -натуральное число и D – период магнетонного кристалла, можно заметить сходство механизмов образования зон непропускания в предложенной структуре и традиционно рассматриваемыми магнетонно-кристаллическими структурами. Таким образом, можно указать на то, что причина образования зон непропускания в спектре зигзагообразной магнетонной структуры схожа с механизмом образования запрещенных зон в спектрах спиновых волн магнетонных кристаллов, образованных, например, периодической системой канавок или отверстий на поверхности ЖИГ микроволновода, расположенных на расстоянии D друг от друга. При этом можно ввести эффективный период рассматриваемой структуры $D_{eff} = 2c$, тогда соотношение между длиной волны в изогнутой секции станет $\lambda_{c1} = D_{eff}/4$. Появление в спектре прохождения сигнала области непропускания с центральной частотой f_2 можно связать с укорочением длины волны, при котором на изломах структуры также возникают условия для формирования отраженной волны и деструктивной интерференции падающей и отраженных волн, при этом используя дисперсионное соотношение для ПМСВ в пленке [1] или микроволноводе можно оценить, что при изменении частоты на 100 МГц, т.е. для частоты входного сигнала f_2 , соотношение между длиной волны в изогнутой секции станет $\lambda_{c1} = D_{eff}/8$. Можно заметить качественную аналогию со структурами на основе меандровых волноводов, в которых ввиду выполнения условия симметрии типа «скользящая плоскость» не наблюдается первого брэгговского резонанса в спектре СВ.

Далее, рассмотрим возможный способ управления составом запрещенных зон в магнитном кристалле. В качестве способа управления составом запрещенных зон в данной работе предложена концепция добавления в структуру ЖИГ-резонатора, в котором возможны явления ферромагнитного резонанса (ФМР).

На следующем рисунке продемонстрированы результаты расчетов структуры, показанной на рисунке 1, то есть волновод, в центральной секции которого установлен ЖИГ-резонатор. В программе muth3 были проведены расчеты прохождения по волноводу в виде зигзагообразной периодической структуре с ЖИГ-резонатором при изменении расстояния между волноводом и резонатором. На следующем рисунке показаны АЧХ из рисунка 7 (синяя линия), то есть без резонатора, и АЧХ при расстоянии между волноводом и резонатором 200 мкм (красная линия).

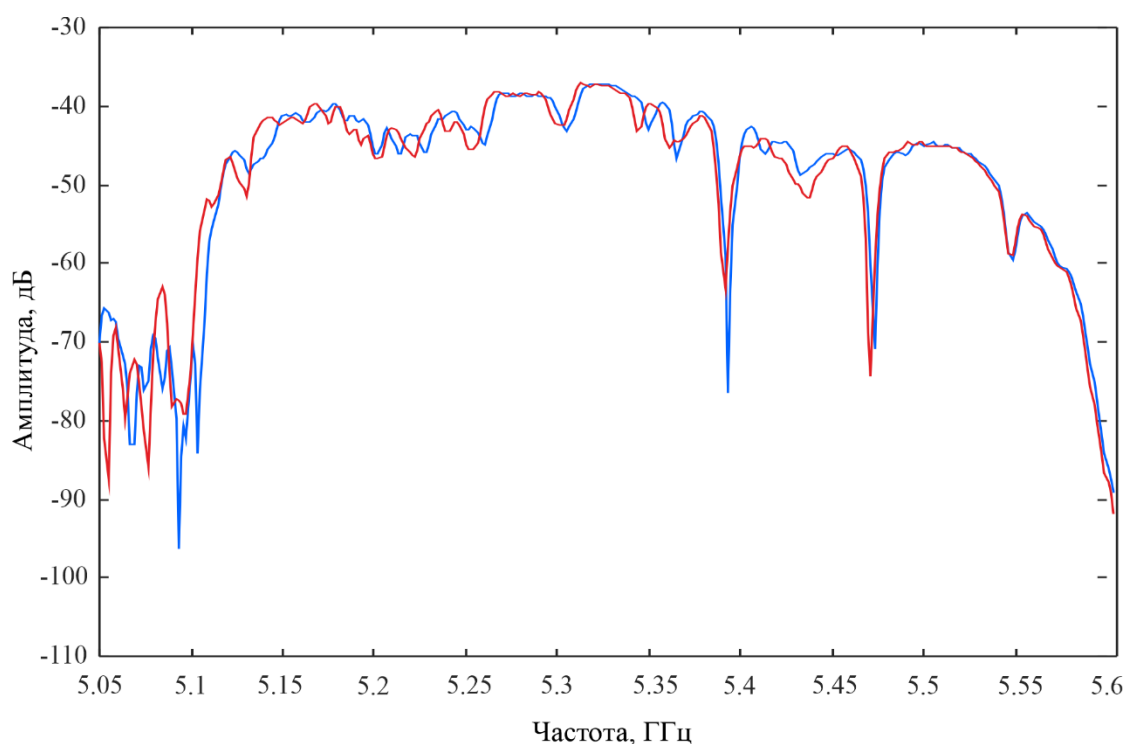


Рисунок 6. АЧХ структуры без резонатора (синяя линия), с резонатором на расстоянии 200 мкм (красная линия).

Из рисунка видно, что на таком расстоянии волновод мало влияет на прохождение волны, но все же глубина запрещенной зоны в районе 5.4 ГГц уменьшилась, а в районе 5.43 начала формироваться новая запрещенная зона.

Далее показаны АЧХ при расстоянии резонатора в 40, 30 и 20 мкм.

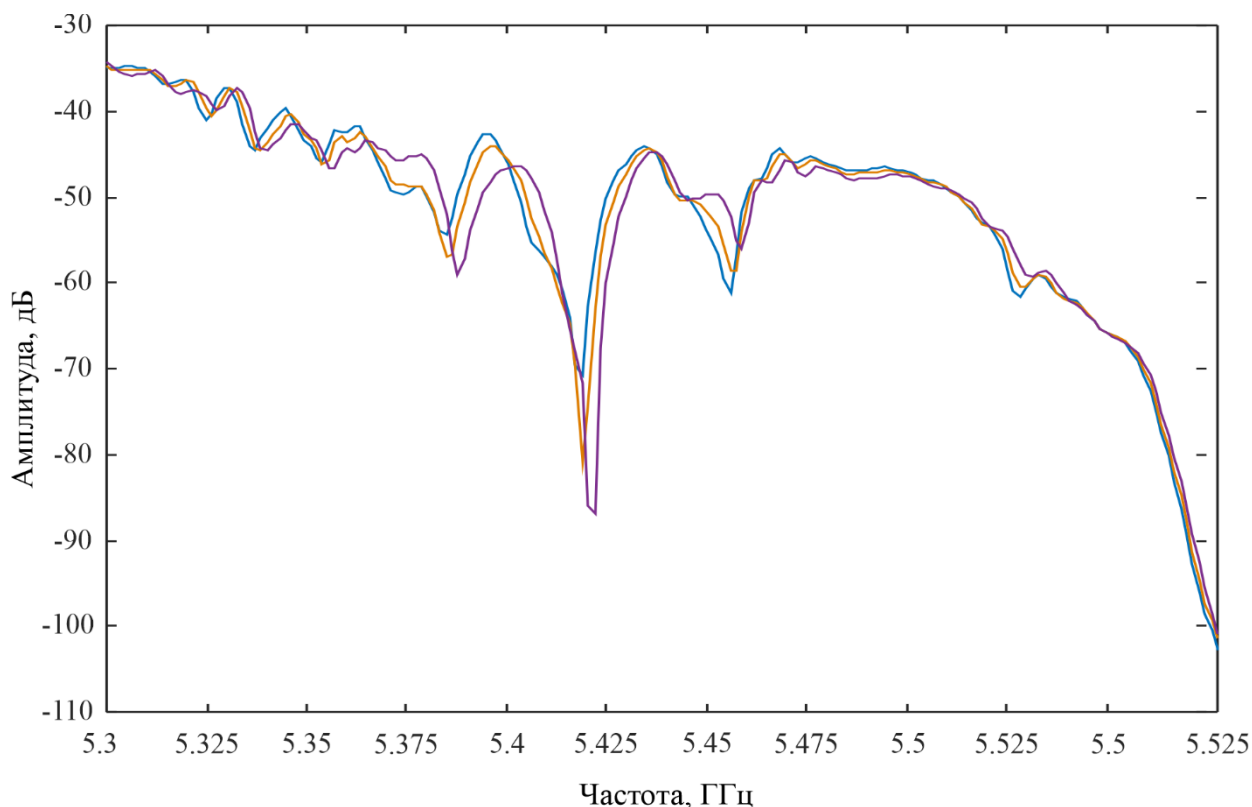


Рисунок 7. АЧХ структуры при расстоянии между волноводом и резонатором 40 мкм (синяя линия); 30 мкм (желтая линия); 20 мкм (фиолетовая линия)

Из АЧХ на рисунке 11 видно, что при приближении резонатора к микроволноводу запрешенные зона слева и справа постепенно исчезают, но в это же время центральная запрешенная зона становится все глубже. Это связано с тем, что часть волны, распространяясь по волноводу, переходит благодаря диполь-дипольному взаимодействию на ЖИГ-резонатор, где происходит взаимодействие с собственными модами резонатора, в результате чего в спектре прохождения спиновой волны происходят изменения. При изменении расстояние между волноводом и резонатором процесс перехода между ними облегчается, в следствие чего сильнее изменяет и АЧХ

Заключение

В заключение следует отметить, что численные расчеты показывают, что ЖИГ-волновод с периодической секцией в виде зигзагообразных изломов может изменять частотный состав проходящей через него спиновой волны, в результате чего в спектре прохождения сигнала образуются зоны непропускания. Кроме того, обеспечить управление этими зонами непропускания можно добавив в структуру резонатор. Управление составом зон непропускания происходит путем изменения расстояния между волноводом и резонатором. Механизм формирования зон непропускания схож с процессом образования запрещенных зон в спектрах спиновых волн магнитных кристаллов. Запрещенные зоны в магнитных кристаллах предоставляют ключевое преимущество в регулировании прохождения спиновых волн. Эти запрещенные зоны служат эффективным механизмом управления передачей магнитного момента в кристаллической структуре. Такой контроль открывает перспективы для разработки новых устройств и технологий на основе магнитных свойств. Данная структура может быть использована как пространственно-частотный фильтр СВЧ сигнала для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

Представленные в работе результаты расширяют представления о физических процессах в периодических магнитных структурах. Особенно интересной является волновая модель, которая описывает распространение магнитостатических волн в связанных магнитных кристаллах. Это открывает новые возможности для изучения разнообразных нелинейных явлений, возникающих в слоистых периодических структурах на основе магнитных пленок. Кроме того, такая модель может быть полезна при исследовании нелинейных явлений в периодических структурах различной физической природы, где периодичность играет важную роль.

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. ITRS. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). 2015. ed. <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html> (accessed 1 April 2017).
10. **Vashkovskii A.V., Stal'makhov V.S., Sharaevskii Yu. P.**, Magnetostatic Waves in Microwave Electronics. Sarat. Gos. Univ. Saratov. (1993).
11. **Sadovnikov A.V., Davies C.S., Grishin S.V., Kruglyak V., Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.**, Appl. Phys. Lett. 106. 192406. (2015)
12. **Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Serdobintsev A. A., Mitin D. M., Nikitov S. A.**, Physical Review Letters 120, 257203 (2018).
13. **A. Vansteenkiste, B. Van de Wiele**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. T. 323. – №. 21. – С. 2585-2591 (2011).