

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

Кафедра нелинейной физики

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ
ЖИГ-ПЕРМАЛЛОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4011 группы
направления (специальности) 03.03.01 Прикладные математика и физика

Институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Грехов Даниил Игоревич

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Ассистент

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Д. В. Романенко

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

Доцент, к. ф. – м. н.

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Е. Н. Бегинин

инициалы, фамилия

Саратов, 2023 г.

Введение. Целью, данной выпускной квалификационной работы является исследование амплитудно-частотных свойств метаповерхностей, структур на основе плёнок ЖИГ-пермаллой, а также изучения влияния размеров пермалловых компонентов на амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) структур. Из данной цели следуют основные задачи:

1. При помощи лабораторного оборудования анализатора цепей PNA-L N5232, лабораторного электромагнита и 3-х специальных метаповерхностей получить АЧХ для всех 3-х исследуемых структур при разных значениях индукции магнитного поля.

2. Используя программу *math3* провести численное моделирование по расчету распределения высокочастотной намагниченности в исследуемых структурах, а также коэффициентов прохождения при различных значениях индукции магнитного поля. Сравнить полученные АЧХ и экспериментальные, провести анализ карт распределения намагниченности, сделать соответствующие выводы.

Актуальность заключается в возможности создания новых структур из метаматериалов с параметрами, управляемыми магнитным полем. Такие метаповерхности можно использовать для выявления необычных изменений в характеристиках волновых процессов.

Данная работа содержит:

Введение, в котором кратко описана теория работы, результаты курсовых работ за время обучения, а также результаты некоторых из многочисленных исследований, связанных с метаматериалами и магноники. И под конец цели, задачи и актуальность.

Раздел эксперимента, где описываются шаги эксперимента, представлены фотографии и описание исследуемых структур, и результаты проведенного эксперимента. Раздел численного эксперимента, в котором кратко объясняется

как создаётся численная модель, условия для анализа и сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов.

Заключение, часть в котором анализируются полученные результаты, список использованных источников.

Основное содержание работы. Вначале, провели лабораторный эксперимент. Он заключается в том, что мы по очереди помещаем несколько макетов структур, одна из которых представлена на рисунке 1, на подложку из поликора с напылёнными микрополосковыми антеннами шириной 30 мкм и подключаем к анализатору цепей PNA-L N5232. Далее создаём магнитное поле, направленное в плоскости макета вдоль микрополосковых антенн и при помощи анализатора цепей измеряем АЧХ. Записываем показания мощности и сохраняем численные данные для дальнейшего построения АЧХ вне эксперимента.



Рисунок 1 – Снимок с микроскопа метаповерхности в виде структуры ЖИГ ($15 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \times 10 \text{ мкм}$) с решёткой из пермалловых дисков диаметром 160 мкм и толщиной 200 нм. Расстояние между дисками равно их диаметру.

После эксперимента, при помощи полученных файлов с данными и программы MatLab построили АЧХ для каждой из исследуемых структур и выбрали из них самые важные, то есть те, на которых в явном виде присутствуют большие провалы, полосы непропускания, рисунки 2 - 4 (а, б, в, г).

Проанализировав их сделали некоторые изначальные выводы о влиянии дополнительного компонента структуры, диска из пермаллоя, на амплитудно-частотные характеристики электромагнитного сигнала, проходящего через структуру. А также проанализировали изменение в АЧХ структуры, при изменении диаметра.

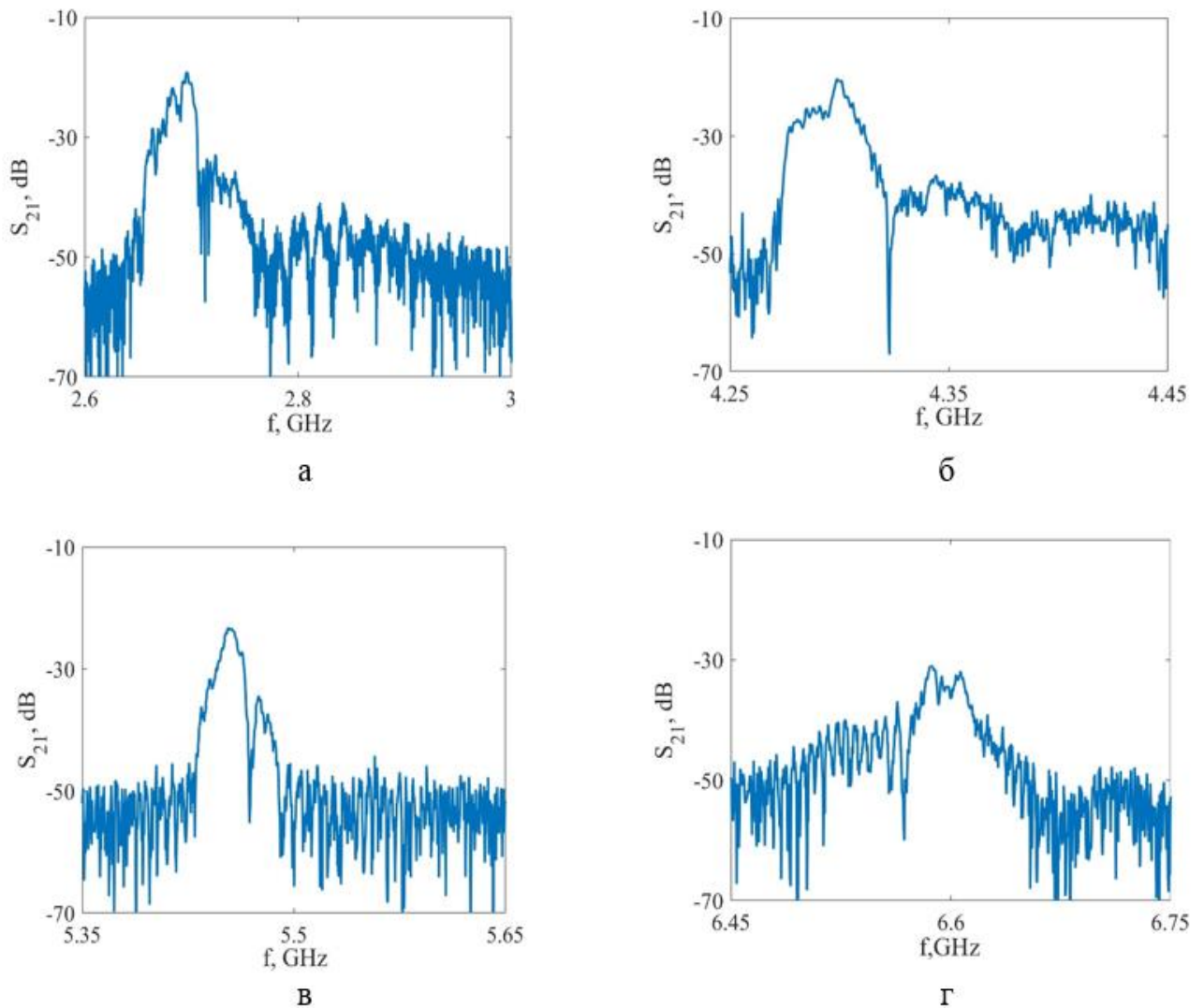
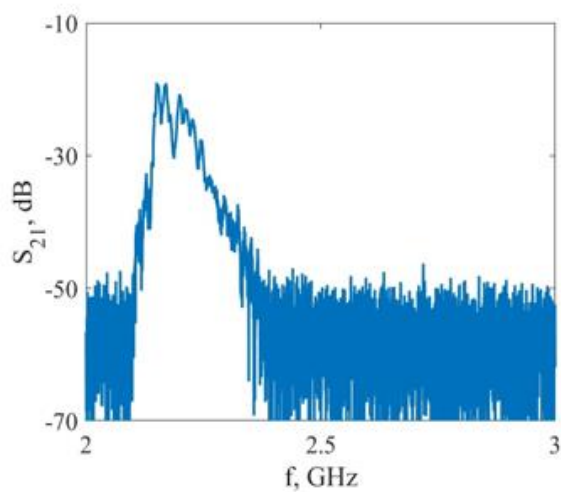
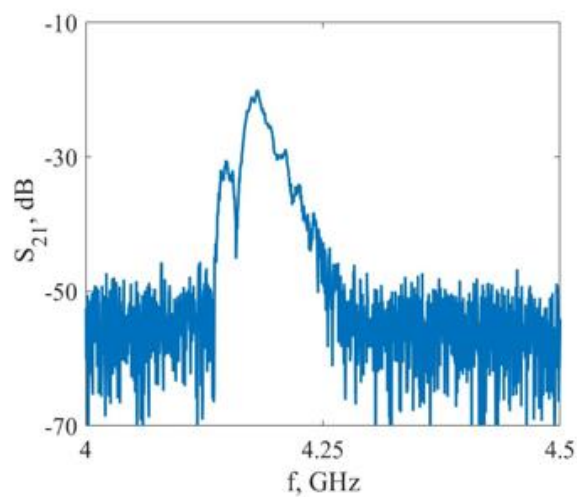


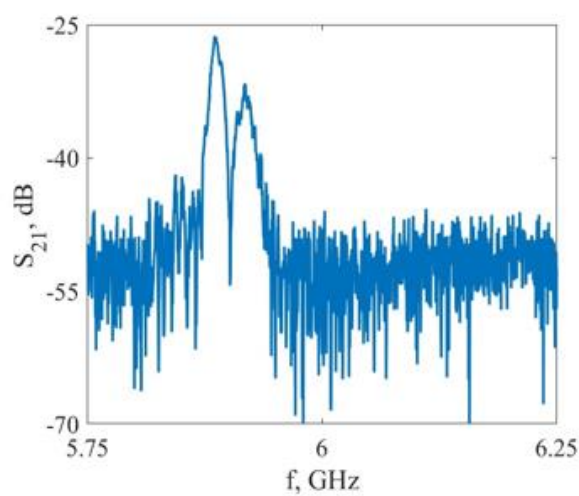
Рисунок 2 – АЧХ спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 80 мкм на подложке из ЖИГ при разных значениях индукции магнитного поля: а – индукция магнитного поля 400 Гс; б – индукция магнитного поля 860 Гс; в – индукция магнитного поля 1230 Гс; г – индукция магнитного поля 1640 Гс.



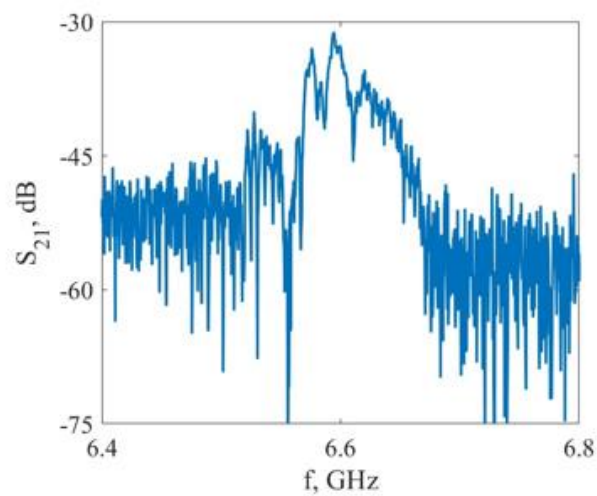
а



б



в



г

Рисунок 3 – АЧХ спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 160 мкм на подложке из ЖИГа при разных значениях индукции магнитного поля: а – индукция магнитного поля 255 Гс; б – индукция магнитного поля 820 Гс; в – индукция магнитного поля 1405 Гс; г – индукция магнитного поля 1650 Гс.

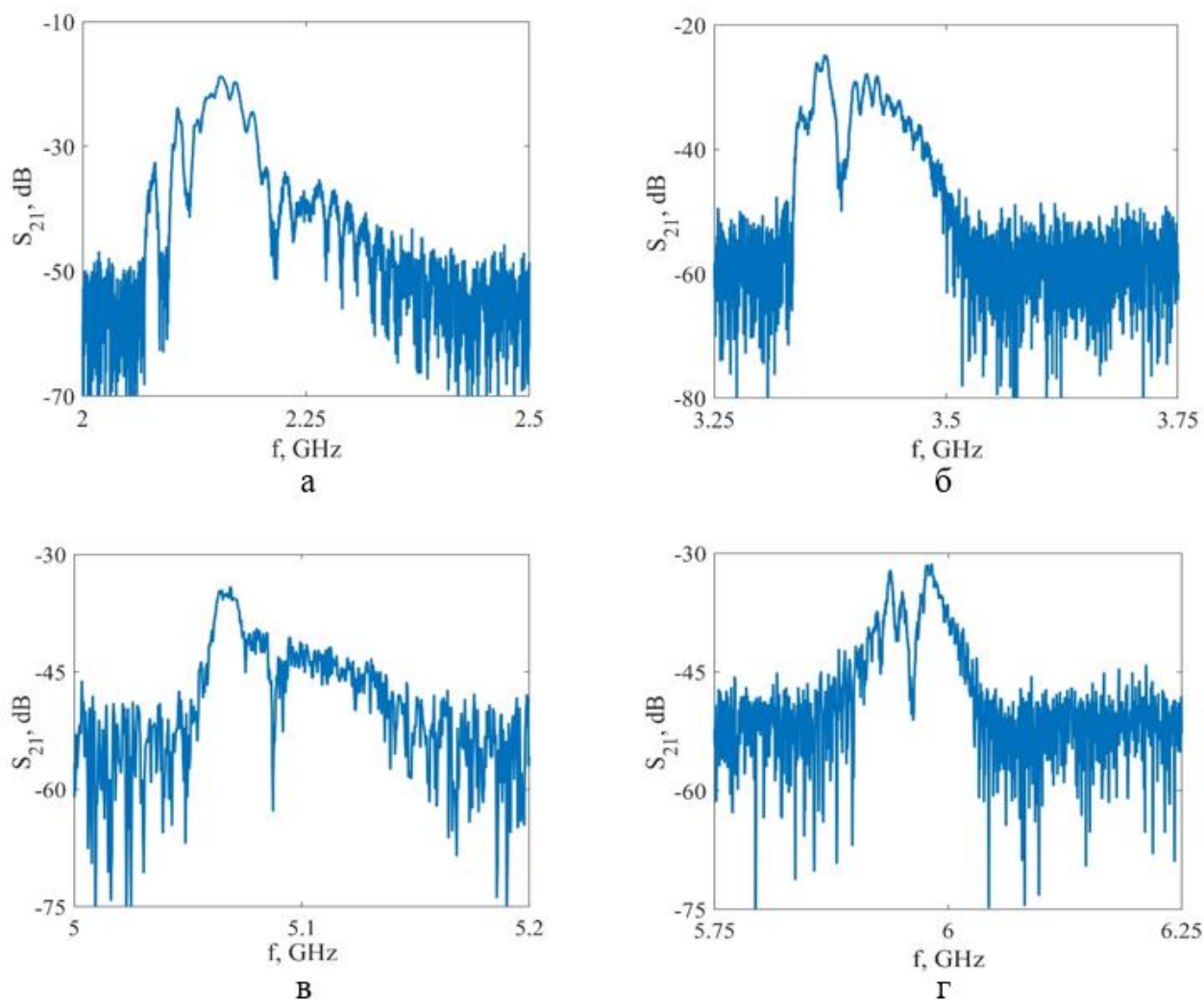


Рисунок 4 – АЧХ спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 480 мкм на подложке из ЖИГа при разных значениях индукции магнитного поля: а – индукция магнитного поля 250 Гс; б – индукция магнитного поля 830 Гс; в – индукция магнитного поля 1410 Гс; г – индукция магнитного поля 1630 Гс.

Далее в работе провели серию численного моделирования при помощи программы mтах3 и данных радиофизического эксперимента для каждой из структур. В программе была создана модель отдельного участка всей структуры, такая же как на рисунке 3, поскольку для создания полной модели нужен очень мощный компьютер, а также для её анализа программой, потребовалось бы очень много времени. По завершению работы программы, получили файлы с данными расчетного коэффициента прохождения структур

и распределения высокочастотной намагниченности. При помощи программы MatLab построили графики АЧХ (см. рисунки 5 – 7).

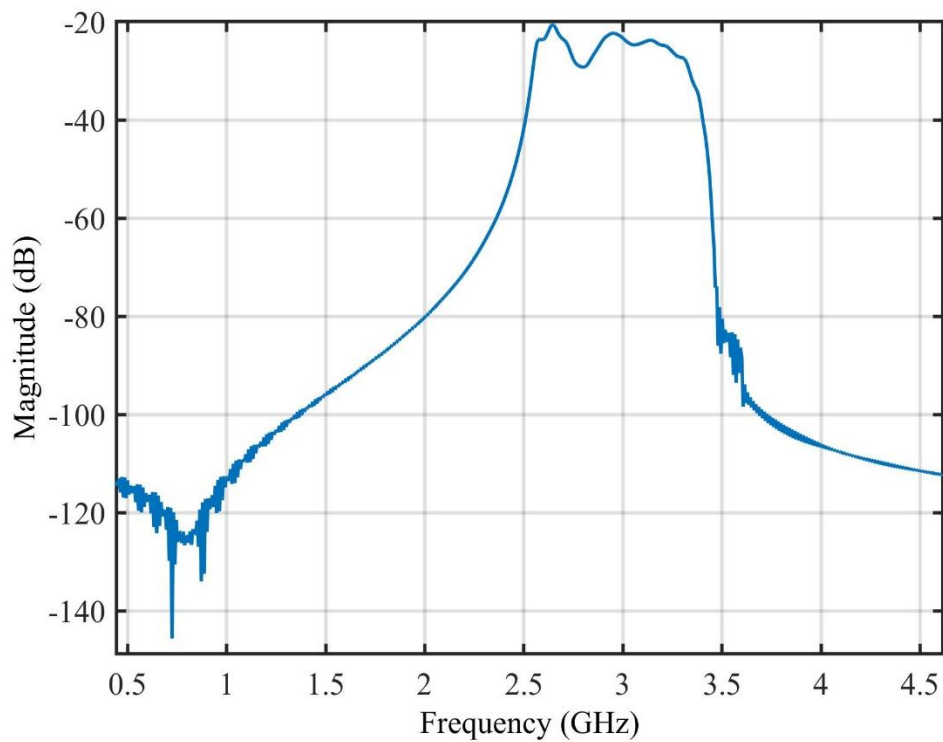


Рисунок 5 – АЧХ численной модели спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 80 мкм на подложке из ЖИГа.

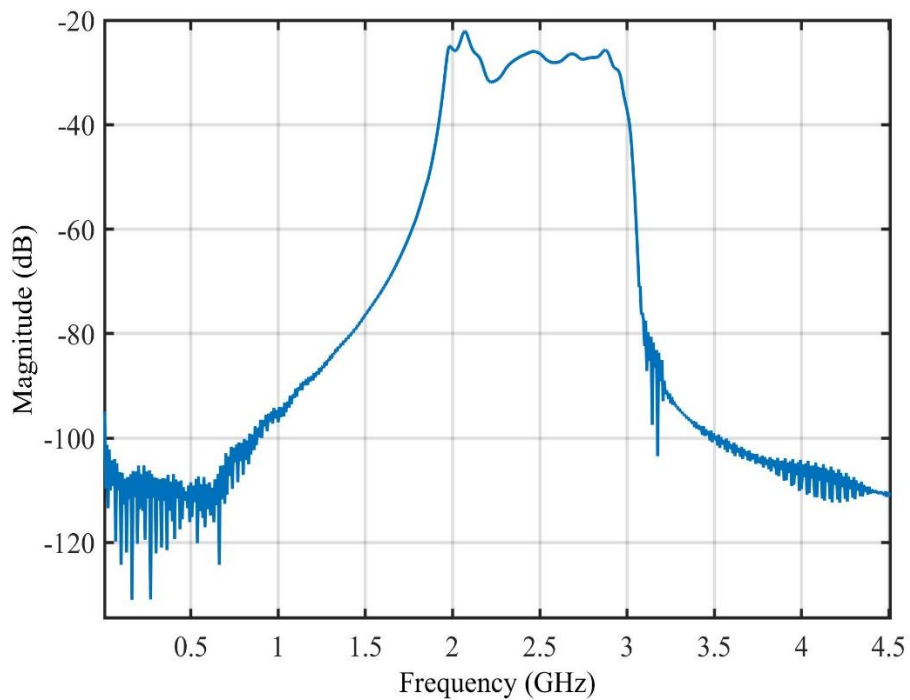


Рисунок 6 – АЧХ численной модели спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 160 мкм на подложке из ЖИГа.

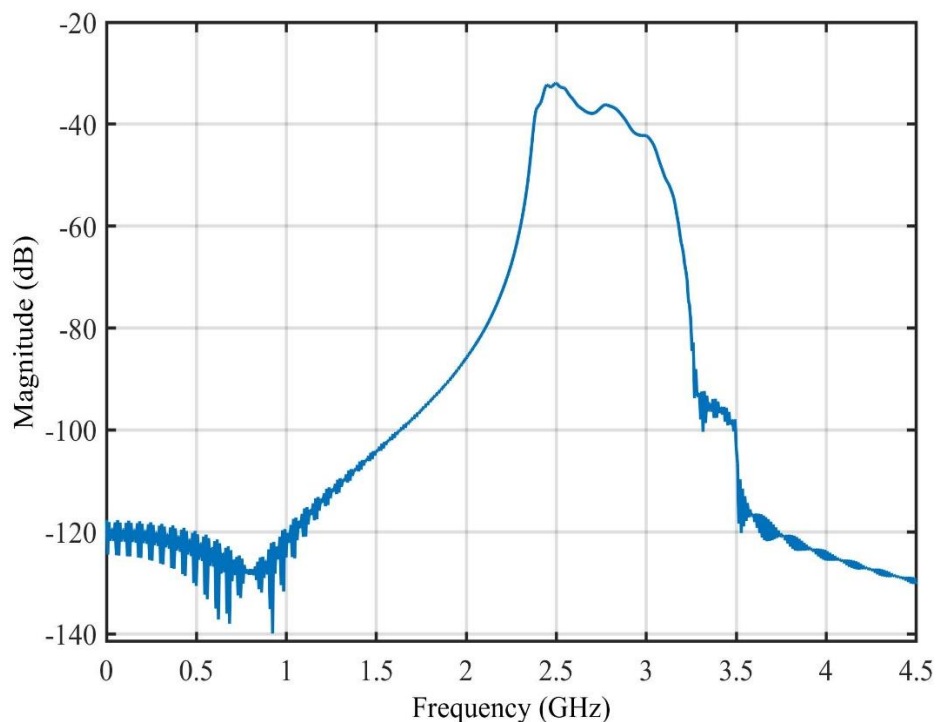


Рисунок 16 – АЧХ численной модели спин-волновой линии передачи выполненной на основе метаповерхности в виде решетки из пермалловых дисков диаметром 480 мкм на подложке из ЖИГ.

После построения всех графиков сравнили их с полученными из результатов лабораторного эксперимента и в результате получили подтверждение выводов из лабораторного эксперимента.

Заключение. В заключении составим полный анализ результатов эксперимента. На структурах с дисками по сравнению с обычной плёнкой ЖИГ можно заметить полосы непропускания, провалы в области максимумов амплитудно-частотных характеристик структур. Связано это с поглощением со стороны пермалловых дисков, отражение решётки на частотах зоны Бриллюэна не оказывают значимого эффекта в силу больших потерь на данных частотах.

С изменением магнитного поля, полоса непропускания в каждой из структур, то есть провал, так же изменяют своё положение и форму на графиках, но только при определённых значениях индукции магнитного поля. В основном значения провалов для первой структуры с колеблются в пределах

от -10 дБ до -30 дБ и только при $B = 1230$ Гс можно заметить резкое смещение провала на значения ниже -50 дБ.

При изменении диаметра дисков провалы на амплитудно-частотных характеристиках значительно увеличиваются по амплитуде. То есть, если в первой структуре значения амплитуды сохранялись в пределах от -10 до -30 дБ, то уже во второй с диаметром дисков в 3 раза больше, значения изменяются в пределах от -30 до -40 дБ.

Получаем, что при изменении поля, полосы непропускания остаются в тех же пределах, за исключением некоторого критического значения магнитного поля, при котором значение амплитуды сигнала резко падает. Но вот при изменении диаметра дисков получаем резкое изменение границ спектра для провалов. Следовательно, размер дисков напрямую влияет на спектр сигнала, распространяющегося в структуре.

Было проведено численное моделирование при помощи программы *mithax3* используя данные радиофизического эксперимента для каждой из структур. При помощи *MatLab* построили графики АЧХ, а также карты распределения намагниченности. Спектр прохождения структур, а также поведение полос непропускания при изменении диаметра диска, качественно соответствуют данным радиофизического эксперимента. Так же, как и в физическом эксперименте, в моделировании при увеличении диаметра диска увеличивается и глубина зоны поглощения.

Список литературы

1. Л. Р. Ахметшин, И. Ю. Смолин Анализ напряжений и деформаций в тетрахиральном метаматериале с различными типами соединений элементарных ячеек // *Procedia Structural Integrity*. — 2022. — № 35. — С. 247-253.

2. М. А. Ремнёв, В. В. Климов. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом // УФН. — 2018. — Т. 188. — С. 169—205.
3. А. А. Орлов, Е. А. Янковская, П. А. Белов, С. В. Жуковский Извлечение материальных параметров плазмонного мультислоя из коэффициентов отражения и прохождения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — Университет ИТМО, 2014. — 1—2 (вып. 1 (89)). — ISSN 2226-1494
4. A. Grbic, G. V. Eleftheriades. Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-handed Transmission-line Lens // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 92. — P. 117403.
5. D. Brizi & A. Monorchio Magnetic metasurfaces properties in the near field regions // Scientific Reports. — 2022. — № 3258. — С. 1-13.
6. F. Magnus , B. Wood, J. Moore, K. Morrison, G. Perkins , J. Fyson, M. C. K. Wiltshire, D. Caplin, L. F. Cohen and J. B. Pendry A d.c. magnetic metamaterial // Nature materials. — 2008. — № 7. — С. 297.
7. I. A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov, P. S. Dzhumaev, O. V. Emelyanova, A. A. Golubov, V. V. Ryazanov, and A. V. Ustinov Ferromagnet/Superconductor Hybrid Magnonic Metamaterials // Advanced Science. — 2019. — № 6. — С. 1-8.
8. L. Wang, A. S. Shorokhov, P. N. Melentiev, S. Kruk, M. Decker, C. Helgert, F. Setzpfandt, A. A. Fedyanin, Yu. S. Kivshar and D. N. Neshev Multipolar Third-Harmonic Generation in Fishnet Metamaterials // ACS Photonics. — 2016. — № 3. — С. 1494–1499.
9. М. А. Морозова, Д. В. Романенко, А. А. Сердобинцев, О. В. Матвеев, Ю. П. Шараевский, С. А. Никитов Magnonic crystal-semiconductor heterostructure: Double

electric and magnetic fields control of spin waves properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2020. — № 514.

10. N. Lazarides & G. P. Tsironis Compact Localized States in Engineered Flat-Band PT Metamaterials // Scientific Reports. — 2019. — № 9. — С. 1-9.

11. J. Valentine ; Valentine, J.; Zhang, S.; Zentgraf, T.; Ulin-Avila, E.; Genov, D. A.; Bartal, G.; Zhang, X. et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index // Nature : journal. — 2008. — Vol. 455, no. 7211. — P. 376—379.

12. А. Г. Колпаков, С. И. Ракин К задаче синтеза композиционного материала одномерного строения с заданными характеристиками // Журнал ПМТФ. — 1986. — № 6. — С. 143-150.