

Расчёт амплитудно-частотных характеристик градиентных магнонных кристаллов

А.П. Буровихин, Р.В. Гапончик, Е.А. Фомина, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в работе проведено моделирование амплитудно-частотных характеристик градиентных магнонных кристаллов на основе тонкоплёночных ферритмагнитных структур. Расчёты выполнены методом матриц передачи для системы, поддерживающей распространение поверхностных спиновых волн в плёнке железо-иттриевого граната. Рассмотрены как периодические, так и градиентные структуры с изменяющимся периодом элементарной ячейки.

Ключевые слова: Магнонные кристаллы, спиновые волны, СВЧ фильтры, железо-иттриевый гранат (ЖИГ), магноника, амплитудно-частотная характеристика

1. Введение

Магнонные кристаллы на основе тонкоплёночных ферритмагнетиков являются перспективными элементами СВЧ-магноники [1,2], предназначенными для фильтрации, задержки и спектральной обработки сигналов. В последние годы значительный интерес вызывают градиентные магнонные кристаллы (ГМК), в которых период ячейки изменяется вдоль структуры. В отличие от строго периодических систем, такие структуры позволяют гибко управлять полосами подавления и спектром пропускания. Это открывает возможность реализации компактных полосно-пропускающих и перестраиваемых фильтров.

Целью данной работы является моделирование амплитудно-частотных характеристик градиентного магнонного кристалла.

2. Модель и метод расчёта

Рассматривалась структура на основе плёнки железоиттриевого граната (ЖИГ), в которой распространяются поверхностные магнитостатические спиновые волны при продольном намагничивании (ПСВ).

В качестве базового случая анализировалась периодическая структура с чередующимися участками различной толщины. Период ячейки определялся как:

$$\Lambda = d_1 + d_2, \quad (1)$$

где d_1 и d_2 – длины толстого и тонкого участков ячейки.

Расчёт коэффициента передачи осуществлялся методом матриц передачи. Для каждой ячейки строилась матрица, связывающая амплитуды падающей и отражённой волн на входе и выходе. Полная матрица структуры получалась перемножением матриц отдельных ячеек.

Для градиентной структуры длина ячейки изменялась от периода к периоду по закону:

$$\Lambda(n) = d_1 - \Delta_1 \cdot (n-1) + d_2 - \Delta_2 \cdot (n-1), \quad (2)$$

где n – номер ячейки, Δ_1 и Δ_2 – значение на которое уменьшается длина толстого и тонкого участка к следующей ячейке.

Длина всей структуры вычислялась как:

$$Y = \sum_n \Lambda(n). \quad (3)$$

Анализировалось влияние: числа ячеек и величины шага изменения периода на форму амплитудно-частотной характеристики.

Исследуемая структура моделировалась при следующих параметрах: намагниченность насыщения $M = 1750$ Гс; напряжённость магнитного поля $H = 1000$ Э; ширина линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.5$ Э; коэффициент отражения $\Gamma = 0.2$; толщина плёнки $L_1 = 5$ мкм, толщина канавки $L_2 = 4.5$ мкм; длина толстого и тонкого участка в первой ячейке $d_1 = d_2 = 200$ мкм.

3. Результаты и обсуждение

Для периодической структуры, как и ожидалось, амплитудно-частотная характеристика имеет зонный характер и состоит из чередующихся полос пропускания и узких полос заграждения, обусловленных выполнением брэгговского условия (рисунок 1):

$$k = k_B = \frac{\pi}{\Lambda}. \quad (4)$$

В пределах каждой полосы наблюдается устойчивое распространение спиновой волны, а в запрещённых зонах коэффициент передачи резко уменьшается.

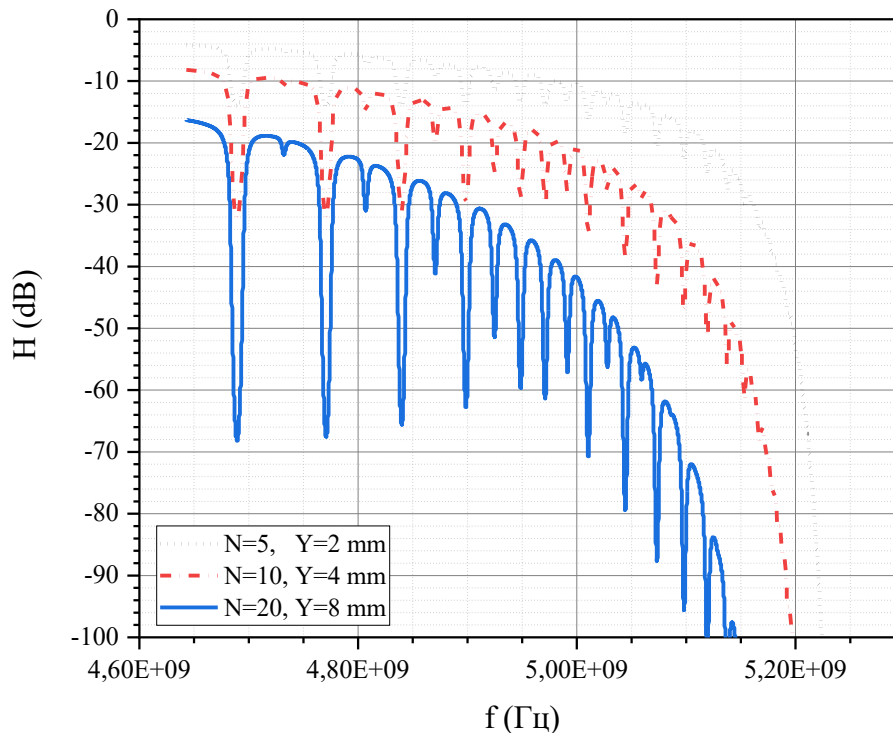


Рисунок 1. Амплитудно-частотная характеристика периодического магнетонного кристалла. Где N – общее количество ячеек, Y – длина всей структуры.

При введении зависимости длины ячейки от её порядкового номера, получается градиентный магнетонный кристалл и характер спектра изменяется. Поскольку каждая ячейка формирует отражение на собственной частоте, это приводит к нарушению пространственной однородности волнового вектора Блоха и постепенному уширению запрещённых зон. В результате отдельные полосы заграждения начинают перекрываться, формируя распределённую область подавления.

Были исследованы зависимости АЧХ градиентных магнонных кристаллов от количества ячеек и величины изменения периода. Для этого все параметры для ГМК были зафиксированы и изменялось только количество ячеек (рисунок 2) или шаг уменьшения длины ячейки (рисунок 3).

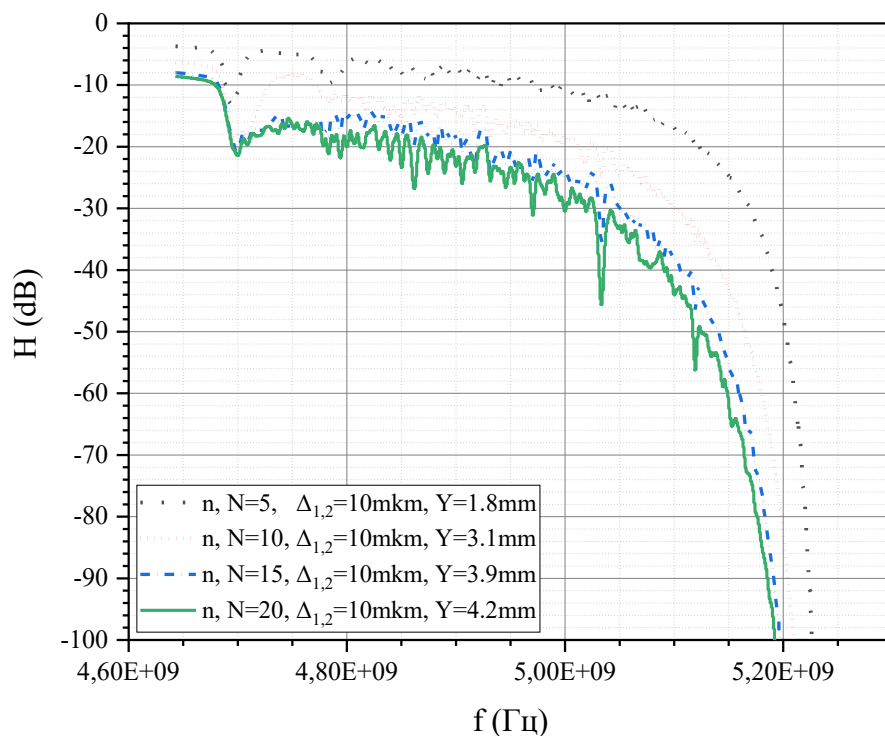


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика градиентного магнонного кристалла при изменении числа ячеек.

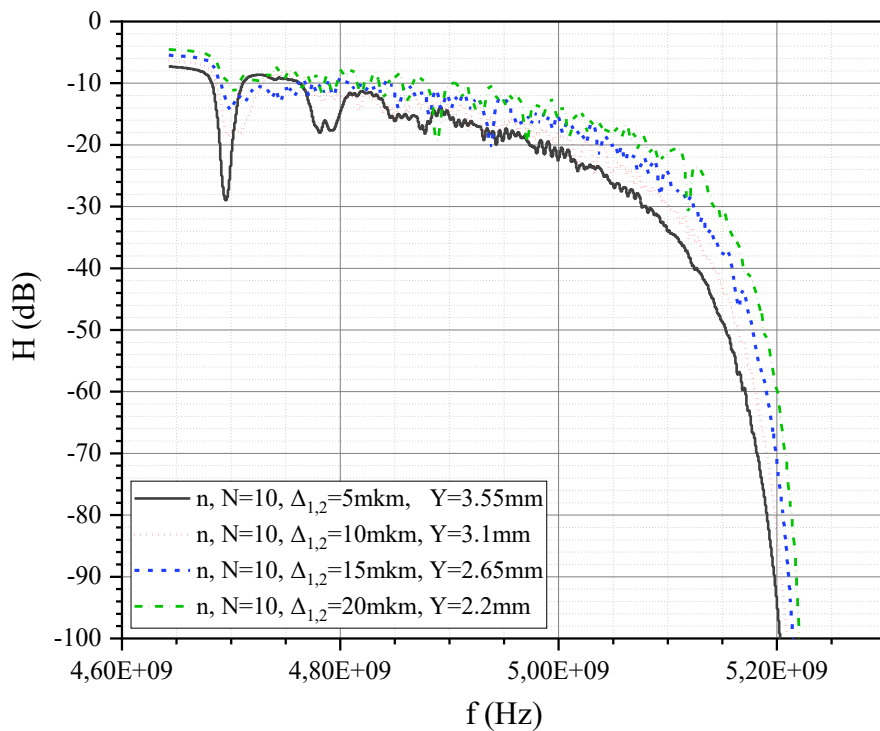


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика градиентного магнонного кристалла при изменении шага градиента.

По полученным результатам видно, что увеличение количества ячеек в ГМК позволяет расширить запрещённые зоны и подавить все полосы пропускания кроме первой (в которой выполняется условие $0 < k < k_B$), образуя таким образом полосно-пропускающий фильтр. Однако увеличение числа ячеек ведёт к увеличению длины структуры и соответственно активных потерь при распространении.

Уменьшение же параметров Δ_1 и Δ_2 ведёт к тому, что изменяется ширина и глубина запрещённых зон на графике АЧХ. Чем меньше Δ , тем более узкими и глубокими становятся запрещённые зоны при прочих равных.

Таким образом правильно подобранные параметры ГМК позволят создать управляемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр.

4. Заключение

Проведено моделирование амплитудно-частотных характеристик градиентного магнетонного кристалла методом матриц передачи. Показано, что введение пространственного градиента периода приводит к трансформации узких брэгговских запрещённых зон в распределённую область подавления.

При достаточном числе ячеек и правильно подобранном профиле изменения периода возможно формирование структуры, обладающей единственной эффективной полосой пропускания при $k \leq k_B$.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании магнетонных полосно-пропускающих фильтров и устройств спектральной селекции на основе плёнок ЖИГ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSEE-2025-0008).

Список литературы

1. Ustinov A. B., Grigor'eva N. Y., Kalinikos B. A. Observation of spin-wave envelope solitons in periodic magnetic film structures // JETP letters. – 2008. – Т. 88. – №. 1. – С. 31-35.
2. Nikitin A. A. et al. Dynamic magnonic crystals based on vanadium dioxide gratings // Physical Review Applied. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 044026.