

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Управление запрещенными зонами в металлизированном магнетонном  
кристалле**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки \_\_\_\_4\_\_\_\_ курса \_\_\_\_411\_\_\_\_ группы  
направления 03.03.01 «прикладные математика и физика»  
факультета нелинейных процессов  
Астафьевой Яны Сергеевны

Научный руководитель

к. ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ М. А. Морозова

Зав. кафедрой нелинейной физики

профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Н.М.РЫСКИН

Саратов 2017 г.

## Введение

Периодические структуры представляют интересный объект для изучения в связи с широкими возможностями использования таких структур для обработки и передачи сигналов в СВЧ диапазоне [1-3]. В спектре электромагнитных волн, распространяющихся через такие структуры, могут возникать запрещенные зоны на частотах брэгговских резонансов [4].

Примером таких структур являются различные типы магنونных кристаллов (МК), создание которых возможно с помощью разных ферромагнитных пленок: чередующихся ферромагнитных пленок с различным значением намагниченности, ферромагнитных пленок с наложенным на них периодическим металлическим экраном, ферромагнитных пленок, содержащие периодически вытравленные отверстия и т.д. [5-6]. В магنونных кристаллах распространяются магнитостатические спиновые волны (МСВ). МСВ представляют собой волны макроскопического магнитного момента ферромагнетика при возбуждении магнитной системы возмущением магнитного поля. Длина волны МСВ зависит от частоты возбуждающего внешнего поля, геометрии структуры, в которой распространяется волна, внешнего магнитного поля и свойств ферромагнитного материала [7].

Актуальной является задача управления характеристиками запрещенных зон в спектре распространяющихся волн, позволяющей расширить функциональные возможности устройств на основе МК. Управление характеристиками запрещенных зон в МК возможно осуществлять различными способами: за счёт изменения геометрических и магнитных параметров структур, симметрии структур, граничных условий, создания дефектов, за счёт прохождения электрического тока, изменения мощности входного сигнала, добавления в структуру слоев другой физической природы [8-10]. В качестве такого слоя в данной работе предлагается использовать металл. В то же время известно [11], что в случае однородной ферромагнитной плёнки добавление металла через диэлектрический промежуток конечной толщины приводит к существенному изменению дисперсии магнитостатических волн. В частности, при

определенных расстояниях до металла возможно формирования областей аномальной дисперсии на дисперсионных характеристиках. В связи с этим, для случая периодической структуры с металлом следует ожидать, что добавление металла будет приводить не только к изменению ширины и положения запрещенных зон при изменении расстояния до металла, но и к появлению дополнительных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса.

**Целью бакалаврской работы** является исследование особенностей формирования запрещенных зон в металлизированном магнетонном кристалле в зависимости от геометрических параметров структуры.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Получение дисперсионного соотношения для поверхностной МСВ (ПМСВ) в металлизированном МК. Исследование механизма формирования запрещенных зон в металлизированном МК.
2. Исследование возможности управления характеристиками запрещенных зон путем изменения расстояния от МК до металла.
3. Исследование возможности управления характеристиками запрещенных зон и гибридизаций при изменении различных параметров металлизированного МК: глубины канавки, ширины канавки, периода структуры.

**Во введении** обосновывается актуальность исследования управления запрещенными зонами в металлизированном МК. Приводится краткий анализ литературных источников, касающихся основных экспериментальных и теоретических исследований в области запрещенных зон в МК. Формулируется цель работы, перечисляются основные задачи, решаемые в ходе работы.

**В главе 1** описывается исследуемая структура и характеристики для металлизированного МК; приводятся дисперсионные соотношения для прямой ПМСВ и обратной ПМСВ; приводится вывод дисперсионного соотношения для одиночного МК и проводится аналогия для дисперсионного соотношения металлизированного МК; приводится рассмотрение дисперсионных характеристик металлизированного МК для случая формирования одной запрещен-

ной зоны, одной запрещенной зоны и двух гибридизаций, трех запрещенных зон и двух гибридизаций.

**В главе 2** приводятся результаты исследования изменения дисперсионной кривой прямой ПМСВ при изменении расстояния от МК до металла; приводятся результаты исследования положения и ширины запрещенной зоны и гибридизаций от расстояния до металла для случая формирования одной запрещенной зоны, одной запрещенной зоны и двух гибридизаций, трех запрещенных зон и двух гибридизаций.

**В главе 3** приводятся результаты исследования положения и ширины запрещенных зон и гибридизаций для случаев формирования одной запрещенной зоны, - запрещенной зоны и двух гибридизаций, - трех запрещенных зон и двух гибридизаций в зависимости от геометрических параметров структуры: глубины канавки, ширины канавки и периода металлизированного МК.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

### **Основное содержание работы.**

**В главе 1 «Модель задачи и основное уравнение»** описывается исследуемая структура в виде МК с металлом (рисунок 1). Приводится дисперси-

онное уравнение для поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) в такой структуре.



Рис. 1. Металлизированный магнотонный кристалл.

Приведено дисперсионное соотношение для прямой ПМСВ в металлизированной МК [12,13]:

$$\left( th(kd_1) * th(kl_1) + \mu * (th(kd_1) + th(kl_1)) * cth(kd) + p_1 * \mu_a * (th(kd_1) - th(kl_1)) + \mu^2 + \mu_a^2 \right) = 0$$

где

$$\mu = \frac{\omega_H (\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \mu_a = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \omega_H = \gamma H_0, \quad \omega_M = 4\pi\gamma M_0,$$

$H_0$  – напряженность внешнего магнитного поля,  $M_0$  – намагниченность насыщения,  $t$  – толщина пленки,  $\gamma$  – гиромангнитное соотношение.

**В разделе 1.1 «Дисперсионное соотношение для металлизированного МК»** получено дисперсионное соотношение для случая, если ферромагнитная плёнка имеет переменную толщину, т.е. является магнотонным кристаллом.

Дисперсионное соотношение для одиночного МК:

$$\left( \frac{\omega_H^2 - \omega^2}{\omega_H \omega_M d_0} + \frac{k_+}{2} \right) \left( \frac{\omega_H^2 - \omega^2}{\omega_H \omega_M d_0} - \frac{(k_+ - 2k_B)}{2} \right) + \frac{\delta d^2}{4} \frac{(k_+ - 2k_B)}{2} \frac{k_+}{2} = 0$$

Дисперсионное соотношение для металлизированного МК:

$$\left( th(kd_1) * th(kl_1) + \mu * (th(kd_1) + th(kl_1)) * cth(kd) + p_1 * \mu_a * (th(kd_1) - th(kl_1)) + \mu^2 + \mu_a^2 \right) * \left( th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) d_0\right) * th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) l_1\right) + \mu * \left( th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) d_0\right) + th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) l_1\right) \right) * cth\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) d\right) + p_1 * \mu_a * \left( th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) d_0\right) - th\left(-\left(k - \frac{2\pi}{L}\right) l_1\right) \right) + \mu^2 + \mu_a^2 \right) + \left[ \left( \omega_H^2 - \omega^2 \right) \frac{k_+}{16} \right] * \left( k - \frac{2\pi}{L} \right) = 0$$

**В разделе 1.2 «Дисперсионные характеристики в металлизированном МК. Механизм формирования запрещенных зон»** были рассмотрены дисперсионные характеристики структуры металлизированный МК на основе численного решения дисперсионного соотношения для металлизированного МК. Построены дисперсионные характеристики ПМСВ в металлизированном МК в случае формирования одной запрещенной зоны, одной запрещенной зоны и двух гибридизаций, трех запрещенных зон и двух гибридизаций. Было отмечено, что в точки пересечения прямой и обратной волн формируется запрещенная зона, в этой области частот  $\text{Im}(k)$  отлична от нуля, что говорит о затухании волны в этой области частот.

**В главе 2 «Зависимость характеристик запрещенных зон от расстояния от МК до металла»** приводятся результаты исследования особенностей дисперсионных характеристик ПМСВ при изменении расстояния от МК до металла; приводятся результаты исследования положения и ширины запрещенной зоны и гибридизаций от расстояния до металла для случая формирования одной запрещенной зоны, одной запрещенной зоны и двух гибридизаций, трех запрещенных зон и двух гибридизаций.

**В разделе 2.1 «Влияние расстояния до металла на дисперсию ПМСВ в однородной плёнке»** проводится рассмотрение изменения дисперсионной кривой прямой ПМСВ при изменении расстояния до металла. Было показано, что при расстоянии от ферромагнитной плёнки (ФП) до металла равному нулю ПМСВ имеет такой же вид как для ФП без металла, однако верхняя частотная граница полосы пропускания выше. При увеличении расстояния от ФП до металла дисперсионная характеристика деформируются, чем дальше металлический экран, тем большее деформация. Особенность дисперсионной характеристики заключается в том, что формируется область с аномальной дисперсией, т.е. с отрицательным знаком групповой скорости. Когда расстояние достигает 100 мкм, в структуре имеют место прямые ПМСВ с нормальной дисперсией и дисперсионные кривые принимают вид кривых для ФП без экрана [14,15], следовательно, влияние со стороны металла на МК в этом случае полностью отсутствует.

**В разделе 2.2 «Влияние расстояния от МК до металла на характеристики запрещенных зон»** рассмотрено влияние расстояния от МК до металла на дисперсионные характеристики ПМСВ в металлизированном МК. Рассмотрим три характерных случая: формирования одной запрещенной зоны, формирования одной запрещенной зоны и одной гибридизации, формирование трёх запрещенных зон и двух гибридизаций.

**В случае формирования одной запрещенной зоны:**

Показано, что дисперсионные характеристики прямой ПМСВ и обратной ПМСВ при  $l_1=0$  мкм имеют вид дисперсионных характеристик для однородного МК, но в более высоком диапазоне частот, однако при  $l_1=100$  мкм полностью с ними совпадают. Дисперсионные кривые деформируются в промежутке  $l_1 \in (0 \text{ мкм}, 100 \text{ мкм})$ . Запрещенная зона сдвигается в область низких частоте при увеличении расстояния от МК до металла и при достижении 100 мкм не меняется, т.к. при 100 мкм влияние металла на МК отсутствует, следовательно, зоны одиночного МК и металлизированного МК совпадают.

**В случае формирования одной запрещенной зоны и двух гибридизаций:**

Показано, что дисперсионные характеристики при  $l_1=0$  мкм имеют вид дисперсионных характеристик для однородного МК, но в более высоком диапазоне частот, однако при  $l_1=100$  мкм полностью с ними совпадают. Дисперсионные кривые деформируются в промежутке  $l_1 \in (0 \text{ мкм}, 100 \text{ мкм})$ . Запрещенная зона и две гибридизации при увеличении расстояния до металла сдвигается в область низких частот. Гибридизации возникают в области высоких частот (при  $l_1=1$  мкм) и в области низких частот (при  $l_1=10$  мкм) полностью входят в частотный диапазон запрещенной зоны.

**В случае формирования трех запрещенных зоны и двух гибридизаций:**

Показано, что случай формирования трех запрещенных зон и двух гибридизаций возможен лишь при больших расстояниях от МК до металла в низких частотных диапазонах. 331 и 332 смещаются в область низких частот

при увеличении расстояния до металла. При  $l_l=18$  мкм прямая ПМСВ и обратная ПМСВ пересекаются 4 раза формируя две гибридизации. Верхняя частотная граница гибридизаций всегда выше верхней границы запрещенных зон, тогда как нижняя частотная граница гибридизаций всегда входят в частотный диапазон 331. При  $l_l=21.5$  мкм 332 и гибридизации сливаются и при  $l_l=22$  мкм исчезают. При  $l_l=22$  мкм не останется одна запрещенная зона.

**В главе 3 «Зависимость характеристик запрещенных зон от геометрии МК»** приводятся результаты исследования положения и ширины запрещенной зоны и гибридизаций в зависимости от геометрических параметров структуры: высоты канавки МК, ширины канавки МК, периода МК.

**В разделе 3.1 «Влияние глубины канавки»** приводятся результаты исследования влияния высоты канавки МК на характеристики запрещенной зоны и гибридизации.

Показано, что ширина запрещенной зоны и гибридизаций уменьшается при уменьшении глубины канавки ( $\Delta$ ).

**В разделе 3.2 «Влияние ширины канавки»** приводятся результаты исследования влияния ширины канавки МК на запрещенную зону и две гибридизации.

Показано, что при ширине канавки ( $a_l$ ) равной периоду образца (в данном случае 10 мкм) запрещенной зоны нет.

Показано, что при ширине канавки равной  $1/80$  периода МК, ширина запрещенной зоны находится в узком частотном диапазоне. Показано, что максимальное увеличение коэффициента связи достигается при ширине канавки равной  $1/2$  периода МК.

**В разделе 3.3 «Влияние периода»** приводятся результаты исследования влияния периода МК на запрещенную зону и две гибридизации.

**В случае формирования одной запрещенной зоны, одной запрещенной зоны и двух гибридизаций:**

Показано, что запрещенная зона сдвигается в область высоких частот (до  $L=30$  мкм), затем происходит сдвиг вниз по частоте и расширение зоны. Ги-

бридизации аналогично сдвигаются вниз по частоте и при  $L=3.5$  мкм входят в частотный диапазон запрещенной зоны.

**В случае формирования трёх запрещенных зон и двух гибридизаций:**

Показано, что ЗЗ1 сдвигается в область высоких частот (до  $L=90$  мкм), затем происходит сдвиг вниз по частоте и расширение зоны. ЗЗ2 формируется при  $L=90$  мкм и аналогично сдвигаются вниз по частоте пока при  $L=45$  мкм не входит в частотный диапазон ЗЗ1. Гибридизации формируется при  $L=40$  мкм и полностью входят в частотный диапазон ЗЗ1. Кроме того, отмечено, что существует диапазон значений  $1/L$  от  $0,015$   $1/\text{мкм}$  до  $0,02$   $1/\text{мкм}$ , в котором формируются две запрещенные зоны в разных частотных интервалах, не перекрывающиеся между собой.

### **Заключение**

В работе рассмотрен металлизированный МК и проведено исследование особенностей формирования запрещенных зон в такой структуре. Приведены дисперсионные уравнения для прямой и обратной ПМСВ в такой структуре. С использованием метода связанных волн для одиночного МК получено дисперсионное соотношение для ПМСВ в металлизированном МК. Исследованы дисперсионные характеристики ПМСВ в металлизированном МК при изменении различных геометрических параметров структуры.

Показано, что добавление металла к магнетонному кристаллу приводит к формированию нескольких запрещенных зон и гибридизаций в области первого брэгговского резонанса. В частности, в зависимости от расстояния от МК до металла и периода МК возможны три характерных случая:

- (а) Формирование одной запрещенной зоны.
- (б) Формирование одной запрещенной зоны и двух гибридизаций.
- (в) Формирование трёх запрещенных зон (две из которых находятся в одном частотном диапазоне) и двух гибридизаций в узком диапазоне значений расстояний от МК до металла.

В случае (а) показано, что запрещенная зона при уменьшении расстояния до металла ( $l$ ) расширяется и сдвигается вверх по частоте.

Для случая (б) показано, имеет место аналогичное поведение. Гибридизации проявляет такие же свойства, при некоторых расстояниях входит в частотный диапазон запрещенных зон.

Для случая (в) показано, что три запрещенные зоны формируются лишь в промежутке  $l \in [18 \text{ мкм}, 21.5 \text{ мкм}]$ . При уменьшении расстояния до металла все запрещенные зоны и гибридизации смещаются в область высоких частот.

Исследовано влияние геометрических параметров МК, таких как глубина канавки, ширина канавки, период на характеристики запрещенных зон в металлизированном МК для случая (б). Показано, что увеличение глубины канавки области запрещенных зон и гибридизаций расширяются. При нулевой высоте канавки запрещенная зона и гибридизации исчезают, т.к. МК вырождается в однородную плёнку. Показано, что при ширине канавки равной периоду образца или ширине канавки равной нулю запрещенная зона и две гибридизации отсутствуют. Ширина запрещенной зоны максимальна при ширине канавки равной половине периода МК.

При изменении периода МК выявлены следующие особенности.

Показано, что в случае (а) при уменьшении периода МК запрещенная зона сначала сдвигается вверх по частоте, затем вниз по частоте и расширяется.

Показано, что при уменьшении периода МК в узком диапазоне расстояний до металла возможен третий случай – формирование трёх запрещенных зон и двух гибридизаций. Показано, что две запрещенные зоны формируются в одном и том же диапазоне частот, третья запрещенная зона частично перекрывается с ними по частотам. Однако, существует узкий диапазон значений

периода, в котором две запрещенные зоны формируются в одном частотном интервале, а третья запрещенная зона в другом частотном интервале. Обе гибридные зоны формируются также в одном и том же диапазоне частот, который входит в область запрещенных зон. При уменьшении периода МК области запрещенных зон и гибридных зон расширяются.

Таким образом, добавление металлического слоя существенно расширяет возможности по управлению запрещенными зонами в магнетонных кристаллах. Управление запрещенными зонами важно при расширении функциональных возможностей СВЧ устройств обработки информации.

#### **Список использованных источников**

1. Вапнэ Г. М. СВЧ устройства на магнитоэлектрических волнах: Обзоры по электронной технике. Сер. 1, Электроника СВЧ. М., 1984. Вып. 8 (1060).
2. Adam J. D., Daniel M. R., Keeffe T. W. Magnetostatic wave devices // Microwave Journal. 1982. Vol. 25, N 2. P. 95-99.
3. Sethares J. C. Magnetostatic wave devices and applications // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 3. P. 2646-2651.
4. Высоцкий С.Л., Хивинцев Ю.В., Филимонов Ю.А., Никитов С.А., Стогний А.И., Новицкий Н.Н. Поверхностные спиновые волны в одномерных магнетонных кристаллах с двумя пространственными периодами // Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 22, с. 66-67.

5. Гуляев Ю. В., Никитов С. А. Магнонные кристаллы — спиновые волны в периодических структурах // Доклады академии наук, том 380, №4, с. 469-471.
6. Григорьева Н. Ю., Калиников Б. А., Устинов А. Б. Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах // Письма в ЖЭТФ, 2008, том 88, вып. 1, с. 34-39.
7. Высоцкий С. Л., Никитов С. А., Филимонов Ю. А. Магнитостатические спиновые волны в двумерных периодических структурах – магнитофотонных кристаллах // ЖЭТФ, 2005, том 128, вып. 3(9), с. 636-644.
8. Никитов С. А. Кристаллы нового поколения // Академические статьи, 2012.
9. M. Krawczyk, D. Grundler // Phys. Review and prospects of magnetic crystals and devices with reprogrammable band structure, 2014.
10. M.A. Morozova, A.Yu. Sharaevskaya, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, D.V. Romanenko, E.N. Beginin, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // Journal of Applied Physics, V. 120, № 22, 223901 (2016).
11. Устинов А.Б., Калиников Б.А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств // ПЖТФ, 2014. Т. 40. № 13. С. 58-65.
12. Вашковский А.В. Стальмахов В.С. Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот, Саратов: СГУ, 1993, с. 63-69.
13. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М., 1959.
14. Joseph A., Schlomann E. Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36, N 5. P. 1579-1593.
15. Прокушкин В. Н., Шараевский Ю. П. Поверхностные магнитостатические волны в ферритовой структуре с импедансными границами // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 8. С. 1750-1752.