

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

Гибридизация магнитостатических, электромагнитных и упругих волн в
периодических и слоистых ферромагнитных структурах

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

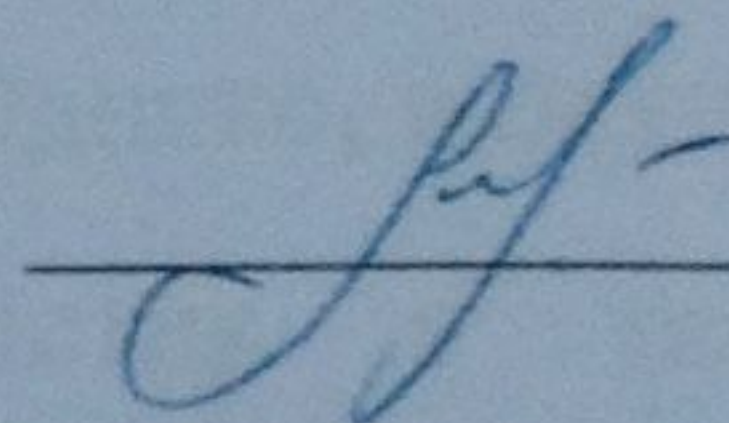
студента 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 "Прикладные математика и физика"

факультета нелинейных процессов

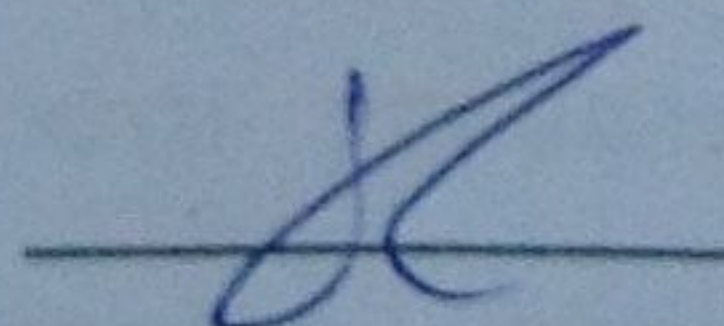
Злобина Дмитрия Васильевича

Научный руководитель
к. ф.-м.н., доцент кафедры
нелинейной физики



М.А. Морозова

Зав. кафедрой нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент кафедры
нелинейной физики



Е.Н. Бегинин

Саратов 2018 г.

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

**Гибридизация магнитостатических, электромагнитных и упругих волн в
периодических и слоистых ферромагнитных структурах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 "Прикладные математика и физика"

факультета нелинейных процессов

Злобина Дмитрия Васильевича

Научный руководитель
к. ф.-м.н., доцент кафедры
нелинейной физики

М.А. Морозова

Зав. кафедрой нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент кафедры
нелинейной физики

Е.Н. Бегинин

Саратов 2018 г.

Введение

Ферромагнетики – твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, изменения температуры. Они имеют магнитную проницаемость, превышающую проницаемость вакуума в несколько тысяч раз. В ферромагнитных материалах возможно распространение диполь-дипольных магнитостатических волн, представляющих собой волны прецессии магнитных моментов атомов[1].

Большой интерес представляет исследование слоистых мультиферроидных структур на основе ферромагнитных пленок – сегнетоэлектрик (ФП-СЭ). В такой структуре, на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между ЭМВ и МСВ, возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ). Причем значение частот фазового синхронизма определяется как величиной электрического, так и магнитного поля, т.е. возможно двойное управление характеристиками ГЭМСВ, возбуждаемых в таких слоистых структурах[2,3].

Использование периодических мультиферроидных структур типа магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик (МК-СЭ) расширяет возможности управлению характеристиками волн в таких структурах[4,5]. В частности, периодичность структуры приводит к формированию запрещенных зон – полос непропускания в спектре МСВ. Однако, в отличие от одиночного МК, поведение дисперсионных характеристик в такой структуре будет определяться не только связью между прямой и встречной МСВ, что приводит к появлению запрещенных зон, но и связью между МСВ в ЭМВ, что существенно расширяет возможности управления характеристиками запрещённых зон. Актуальной является задача управления характеристиками запрещённых зон в спектре распространяющихся волн, позволяющей расширить функциональные возможности устройств на основе МК.

Важным свойством ферромагнитных материалов является явление магнитострикции, которая проявляется в связи между спинами и движением ионов кристаллической решетки. Колебания спинов сопровождаются колебаниями ионов, а колебания ионов – колебаниями спинов. Иными словами, спиновые волны в ферромагнетиках сопровождаются упругими волнами и упругие волны – спиновыми волнами. Следовательно, в магнитоупорядоченных кристаллах распространяются не чисто магнитные и не чисто упругие, а связанные магнитоупругие волны. Связь между спиновыми и упругими волнами, однако, невелика и практически проявляется только при выполнении определенных условий – условий резонанса. Если же эти условия не выполняются, то с большой степенью точности можно говорить о раздельном существовании спиновых и упругих волн, которые, тем не менее, взаимодействуют между собой.

Исследованию взаимодействию магнитостатических и упругих волн в ферромагнитных плёнках с магнитострикцией посвящено большое количество работ[6,7,8]. В частности, показано, что на частотах фазового синхронизма магнитостатической и упругой волн имеет место гибридизация дисперсионных характеристик и распространение магнитоупругой волны (МУВ). Следует ожидать, что при использовании периодических ферромагнитных структур – магنونных кристаллов гибридизация магнитостатической и упругой волн приведет к существенному изменению механизма формирования запрещенных зон.

Целью бакалаврской работы является исследование особенностей формирования запрещенных зон и гибридизации магнитостатических волн с электромагнитными и упругими волнами в магنونных кристаллах и слоистых структурах типа магنونный кристалл-сегнетоэлектрик.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Исследование особенностей гибридизации магнитостатической волны и электромагнитной волны в структуре однородная ферромагнитная плёнка-сегнетоэлектрик.

2. Исследование особенностей гибридизации и формирования запрещенных зон в периодической структуре МК-сегнетоэлектрик.

3. Исследование особенностей гибридизации магнитостатической волны и упругой в МК с магнитострикцией.

Во введении обосновывается актуальность исследования влияния электромагнитных и упругих волн на формирования запрещенных зон в МК и структуре МК-сегнетоэлектрик. Приводится краткий анализ литературных источников, касающихся основных экспериментальных и теоретических исследований в области волновых процессов в ферромагнитных плёнках, ферромагнитных плёнках с магнитострикцией и периодических ферромагнитных структур. Формулируется цель работы, перечисляются основные задачи, решаемые в ходе работы.

Глава 1 посвящена исследованию особенностей гибридизации магнитостатической волны и электромагнитной волны в структуре однородная ферромагнитная плёнка-сегнетоэлектрик. Описывается исследуемая структура, приводится дисперсионное соотношение, приводятся результаты численного решения дисперсионного соотношения при различных параметрах слоистой структуры, обсуждается механизма гибридизации волн в такой структуре, приводятся результаты исследования ширины и положения области гибридизации в зависимости от параметров структуры и величины внешнего магнитного поля.

Глава 2 посвящена исследованию особенностей гибридизации в периодической структуре МК-сегнетоэлектрик, в которой возможно формирования запрещенных зон. Описывается исследуемая структура, приводится дисперсионное соотношение для прямых и встречных волн в такой структуре, приводятся результаты численного решения дисперсионного соотношения, обсуждаются механизмы гибридизации и

формирования основной и дополнительной запрещенных зон в такой структуре, приводятся результаты, касающиеся влияние характера периодичности на формирования запрещенных зон, приводятся результаты, касающиеся влияния слоя сегнетоэлектрика на формирования запрещенных зон.

Глава 3 посвящена исследованию особенностей гибридизации магнитостатической волны и упругой в МК с магнитострикцией. Описывается исследуемая структура, приводится дисперсионное соотношение для прямых и встречных волн в такой структуре, приводятся результаты численного решения дисперсионного соотношения, обсуждаются механизмы гибридизации и формирования трёх запрещенных зон в такой структуре, приводятся результаты, касающиеся влияние характера периодичности на формирования запрещенных зон, приводятся результаты, касающиеся влияния упругой волны на формирования запрещенных зон.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Глава 1. Гибридные электромагнитные спиновые волны в структуре ФП-СЭ. В данной главе рассматривается структура, состоящая из ферромагнитной плёнки и слоя сегнетоэлектрика(рис.1).

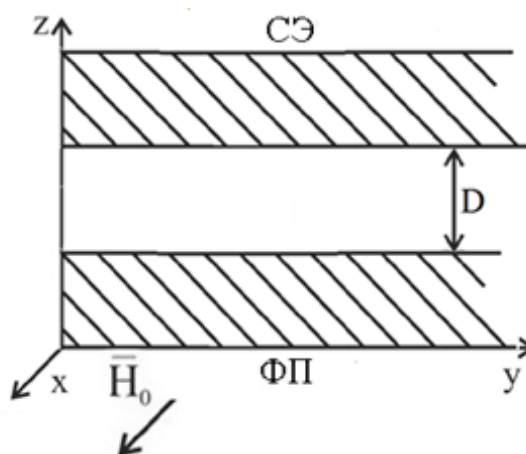


Рис. 1 Структура состоящая из ферромагнитной пленки и слоя сегнетоэлектрика

Дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в структуре ФП-СЭ имеет вид [3].

$$\Omega_{\text{СЭ}}(k_0, \omega) \Omega_{\text{ФМ}}(k_0, \omega) = \chi_{\text{ФМ}}(k_0) \chi_{\text{СЭ}}(k_0, \omega) \quad (1)$$

Каждый элемент - это уравнение, которое описывает связь между волнами внутри структуры. $\Omega_{\text{ФМ}}(k_0, \omega) = \omega^2 - \omega_{\perp}^2 - \omega_M^2 \frac{k_0 d_0}{2} = 0$ - дисперсионное соотношение, описывающее поверхностную МСВ в ФП, k_0 - волновое число, d_0 - толщина плёнки, $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $\omega_{\perp}^2 = \omega_H(\omega_H + \omega_M)$, H_0 - внешнее магнитное поле, M_0 - намагниченность насыщения, γ - гиромагнитное отношение; $\Omega_{\text{СЭ}}(k_0, \omega) = \text{arccctg} \frac{\chi}{k} - \frac{\chi a}{2} - 2\pi = 0$ - дисперсионное соотношение, описывающее ЭМВ в СЭ, $\chi = \frac{\omega \sqrt{\epsilon}}{c} - k_0$, где ϵ - диэлектрическая восприимчивость СЭ, a - толщина СЭ, μ - магнитная постоянная; $\chi_{\text{ФМ}}(k_0) \chi_{\text{СЭ}}(k_0, \omega)$ - коэффициент связи между МСВ в ФП и ЭМВ в СЭ; $\chi_{\text{ФМ}}(k_0) = \frac{1}{2} k_0 d_0 \omega_H \omega_M$, $\chi_{\text{СЭ}}(k_0, \omega) = K \frac{\omega^2 \epsilon}{k_0^2 c^2}$, c - скорость света, $K = e^{-kD}$ - коэффициент связи между ФП и СЭ.

На основе дисперсионного соотношения (1) рассчитывались дисперсионные характеристики ГЭМСВ в исследуемой структуре.

В структуре МК-СЭ в точке фазового синхронизма имеет место гибридизация МСВ и ЭМВ и образование ГЭМСВ. Положение и ширина области гибридизации определяется как свойствами СЭ, так и свойствами ФП, а также величиной магнитного поля и величиной связи между ФП и СЭ. В частности, при увеличении связи между ФП и СЭ зона гибридизации поднимается по частоте. С ростом диэлектрической проницаемости СЭ растет ширина зоны гибридизации. При увеличении толщины СЭ зона гибридизации сужается и сдвигается вверх по частоте. При увеличении намагниченности насыщения ФП зона гибридизации поднимается по частоте. При увеличении значения внешнего магнитного поля зона гибридизации поднимается по частоте.

Глава 2. Гибридизация и формирование запрещенных зон в структуре магнанный кристалл-сегнетоэлектрик. В данной главе рассматривается структура, состоящая из магннного кристалла и слоя сегнетоэлектрика(рис.2).

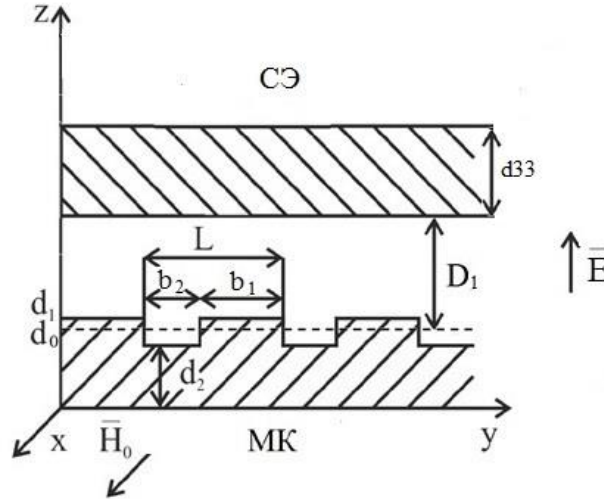


Рис.2.Схема структуры МК-СЭ.

Дисперсионное соотношение для гибридных электромагнитных спиновых волны в структуре МК-СЭ выглядит следующим образом[5]:

$$\begin{vmatrix} \chi_{СЭ}(k_0, \omega) & \Omega_{ФМ}(k_0, \omega) & \kappa(k_0, \omega) & 0 \\ 0 & \kappa(k_{-1}, \omega) & \Omega_{ФМ}(k_{-1}, \omega) & \chi_{СЭ}(k_{-1}, \omega) \\ \Omega_{СЭ}(k_0, \omega) & \chi_{ФМ}(k_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{ФМ}(k_{-1}) & \Omega_{СЭ}(k_{-1}, \omega) \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

где $\Omega_{ФМ}(k_{0,-1}, \omega) = \omega^2 - \omega_{\perp}^2 - \omega_M^2 \frac{k_{0,-1} d_0}{2} = 0$ - дисперсионное соотношение

для прямой и встречной МСВ в МК; $\Omega_{СЭ}(k_{0,-1}, \omega) = \text{arccctg} \frac{\chi_{0,-1}}{k_{0,-1}} - \frac{\chi_{0,-1} a}{2} - 2 = 0$

- дисперсионное соотношение, описывающее ЭМВ в СЭ, $\chi_{0,-1} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon}}{c} - k_{0,-1}$;

$\chi_{ФМ}(k_{0,-1}) = \frac{1}{2} k_{0,-1} d_0 \omega_H \omega_M$, $\chi_{СЭ}(k_{0,-1}, \omega) = K \frac{\omega^2 \epsilon}{k_{0,-1}^2 c^2}$ - коэффициенты

связи между прямыми и встречными МСВ и ЭМВ,

$k_{-1} = -k_0 + 2kb$, $kb = \frac{\pi}{L}$ - брэгговское волновое число; $\kappa(k_{0,-1}, \omega) =$

$\frac{d_0 k_{-1,0}^2 \delta d \omega_M^2}{4a k_{0,-1}}$ - коэффициент связи между прямой и встречной волной в МК,

$d_0 = d_1 + \frac{(d_1 - d_2)(L - b_1)}{L}$ - эффективная толщина МК; $\delta = \frac{d_1 - d_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi(L - b_1)}{L}\right)$.

На основе дисперсионного соотношения (2) проводился расчет дисперсионных характеристик ГЭМСВ в исследуемой структуре.

На рис.3 изображены ЭМВ в изолированном СЭ (точечные кривые), МСВ в изолированном ФП (пунктирные кривые), ГЭМСВ в МК-СЭ (сплошные кривые). В точках пересечения дисперсионных характеристик противоположно направленных волн формируются запрещенные зоны (33). В структуре может сосуществовать до двух запрещенных зон. Первая (основная) запрещенная зона формируется в точке пересечения прямой и встречной МСВ (показана темной заливкой), вторая запрещенная зона (гибридная) формируется в точке пересечения прямой МСВ и прямой ЭМВ (показана светлой заливкой).

В структуре МК-СЭ имеет место гибридизация ЭМВ и МСВ и формирование запрещенных зон. В отличие от одиночного МК в такой структуре формируется две запрещенные зоны – основная (за счёт взаимодействия прямой МСВ и обратной МСВ) и гибридная (за счёт взаимодействия прямой ЭМВ и встречной МСВ). Положение и ширина запрещенных зон определяется как свойствами СЭ, так и свойствами МК, а также величиной магнитного поля и величиной связи между ФП и МК. В частности, при увеличении коэффициента связи между МК и СЭ основная зона расширяется, а гибридная зона опускается по частоте. С ростом диэлектрической проницаемости растет ширина гибридной зоны, основная зона сужается и опускается вниз по частоте. При увеличении толщины СЭ гибридная зона увеличивается и опускается по частоте. Основная 33 при

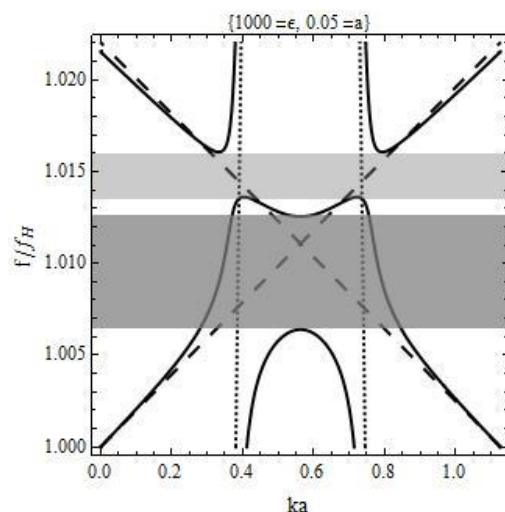


Рис.3. Дисперсионная характеристика ГЭМСВ в структуре МК-СЭ.

увеличении параметра остается неизменной. При увеличении намагниченности насыщения основная гибридная ЗЗ поднимается по частоте. При увеличении значения внешнего магнитного поля основная и гибридная ЗЗ опускаются вниз по частоте.

Глава 3. Гибридизация и формирование запрещенных зон в магнетонном кристалле с магнитострикцией. В данной главе рассматривается структура, состоящая из магнетонного кристалла, обладающего свойством магнитострикции (рис.3).

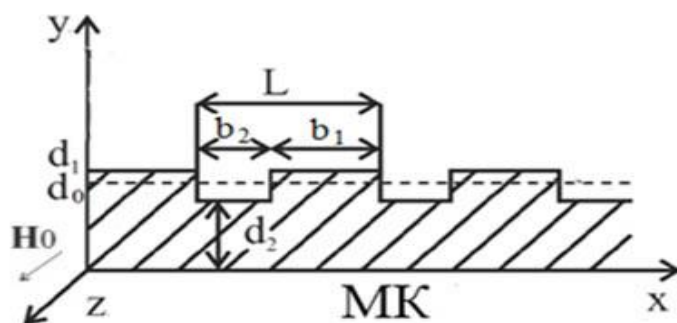


Рис.4.Схема МК с магнитострикцией.

Дисперсионное соотношение для магнитоупругих волн в МК с магнитострикцией выглядит следующим образом:

$$\left[D_0 - \frac{V(\omega_H + \omega_M)k_0^2}{D_{el0}} \right] \left[D_{-1} - \frac{V(\omega_H + \omega_M)k_{-1}^2}{D_{el-1}} \right] - \frac{\omega_M^4}{4} \delta^2 k_0 k_{-1} = 0, \quad (3)$$

где $D_0 = \left(-\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2}{2} k_0 d_0\right)$ - дисперсионное соотношение, описывающее прямую МСВ; $D_{-1} = \left(-\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2}{2} k_{-1} d_0\right)$ - дисперсионное соотношение, описывающее обратную МСВ, $D_{el_0} = \left(-\omega^2 + v_{\perp}^2 k_0^2\right)$ - дисперсионное соотношение, описывающее прямую упругую поперечную волну вдоль направления H_0 ; $D_{el_{-1}} = \left(-\omega^2 + v_{\perp}^2 k_{-1}^2\right)$ - дисперсионное соотношение, описывающее обратную упругую поперечную волну вдоль направления H_0 ; $V = \frac{\gamma B_2^2}{M_0 \rho}$ - параметр связи магнитостатических и упругих волн, B_2 - коэффициент магнитострикции, $d_0 = d_1 + \frac{(d_1 - d_2)(L - b_1)}{L}$ - эффективная толщина МК; $\delta = \frac{d_1 - d_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi(L - b_1)}{L}\right)$, $k_{-1} = -k_0 + 2kb$, $kb = \frac{\pi}{L}$ - брэгговское волновое число; $v_{\perp} = \frac{c}{\rho}$, скорость упругой волны, c - модуль упругости, ρ - плотность.

На основе дисперсионного соотношения (3) проводился расчет дисперсионных характеристик МУВ в исследуемой структуре.

33-1- образована за счёт взаимодействие прямой и встречной МСВ;

33-2- образована за счёт взаимодействие прямой (встречной) МСВ и встречной (прямой) упругой волны (УВ);

33-3- образована за счёт взаимодействие прямой и встречной УВ.

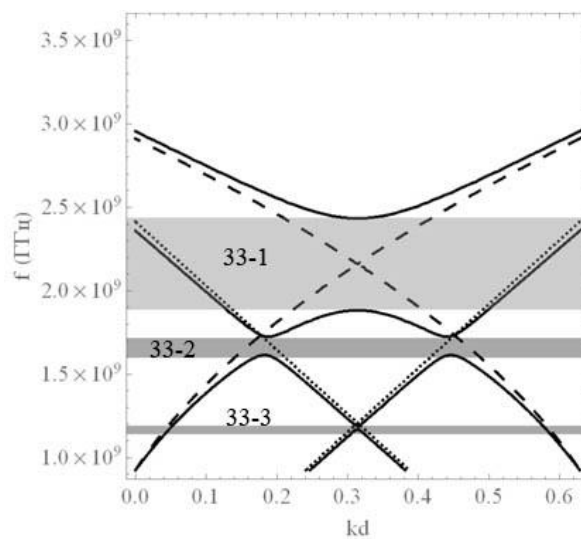


Рис.5. Дисперсионная характеристика МУВ в МК с магнитострикцией.

В магномом кристалле с магнитострикцией имеет место гибридизация УВ и МСВ и формирование запрещенных зон. Основным механизмом формирования запрещенных зон является взаимодействие прямых и встречных волны. В отличие от МК без магнитострикции в такой структуре формируется три запрещенные зоны – основная ЗЗ-1 (за счёт взаимодействия прямой МСВ и обратной МСВ) и две гибридных (одна из них ЗЗ-2 за счёт взаимодействия прямой УВ и встречной МСВ, вторая ЗЗ-3 за счёт взаимодействия прямой УВ и встречной УВ). Причем частотный интервал существования дополнительных зон более узкий, чем для основной ЗЗ. Положение и ширина запрещенных зон определяется как магнитными и упругими свойствами МК, а также величиной магнитного поля. При увеличении значения намагниченности насыщения ЗЗ-1 поднимается по частоте и увеличивается по ширине. ЗЗ-2 сужается и поднимается по частоте. ЗЗ-3 остается неизменной. На основе полученных результатов показана возможность управления шириной и положением запрещенных зон в полосе возбуждения МСВ при изменении плотности МК, который определяет связь между МСВ и УВ. В частности, при изменении плотности ФП дополнительные зоны могут образовываться как ниже, так и выше частотного интервала основной зоны. При увеличении внешнего магнитного поля ЗЗ-1 и ЗЗ-2 поднимаются по частоте. Ширина ЗЗ-1 остается неизменной. ЗЗ-2 при этом сужается. Третья ЗЗ так же сужается, а ее частота остается постоянной.

Заключение. В структуре ФП-СЭ имеет место гибридизация ЭМВ распространяющейся в сегнетоэлектрике и МСВ распространяющейся в ферромагнитной пленке, что приводит к расталкиванию дисперсионных характеристик в области гибридизации. Размер область гибридизации зависит от коэффициента связи, толщины СЭ, величины диэлектрической проницаемости, намагниченности насыщения, внешнего магнитного поля.

В структуре МК-СЭ периодическое изменение толщины пленки приводит к появлению запрещенных зон, в отличие от одиночного МК, в

структуре МК-СЭ образуется 2 запрещенные зоны. Основная зона образуется за счёт взаимодействия прямой и встречной МСВ, дополнительная запрещенная зона образуется от взаимодействия прямой ЭМВ и встречной МСВ. Показана возможность управления характеристиками зон с помощью электрического и магнитного поля, а также зависимость характеристик запрещенных зон от намагниченности насыщения МК и параметров СЭ таких как толщина, диэлектрической проницаемости.

В МК с магнитострикцией в результате взаимодействия магнитостатической и упругой волн формируются 3 запрещенные зоны. Основная ЗЗ образуется за счёт прямой и встречной МСВ и дополнительные ЗЗ образуются за счёт взаимодействия прямой (встречной) УВ и встречной (прямой) МСВ, а также прямой и встречной УВ. Характеристики зон зависят от величины поля и свойств ферромагнитного материала, таких как намагниченность насыщения и плотность.

Таким образом, на основе результатов бакалаврской работы можно заключить, что взаимодействие и гибридизация разного типа волн (магнитостатических, электромагнитных, упругих) в периодических магнитных средах приводит к увеличению количества запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса и позволяет эффективно управлять характеристиками запрещенных зон.

Список литературы

1. А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский. Магнитостатические волны в электронике СВЧ. // Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1993.
2. В.Б. Анфиногенов и др. Резонансное взаимодействие обратных объемных магнитостатических волн с замедленными электромагнитными волнами в структурах феррит-сегнетоэлектрик // ЖТФ. 1990. Т. 60.с. 114-117.
3. В. Е. Демидов, В. А. Калиникос. Дипольно-обменные гибридные электромагнитные спиновые волны // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, вып. 3. с. 23-28.

4. М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, С.А. Никитов. Управление запрещёнными зонами в слоистой структуре магнотонный кристалл-сегнетоэлектрик//Радиотехника и электроника. 2014. №5.с. 510-516
5. М.А. Морозова, О.В. Матвеев, Ю.П. Шараевский, С.А. Никитов Управление запрещёнными зонами в слоистой структуре магнотонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнотонный кристалл//Физика твердого тела, 2016, Т. 58, вып. 2. с. 266-272.
6. Гуляев Ю.В., П.Е. Зильберман. Спинволновая электроника. Сер. Радиоэлектроника и связь, Москва: Знание, 1988.
7. А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. Москва: Наука, 1994.
8. Белов К. П. //Магнитострикционные явления, Физика. 1998. Т. 5. с.1-10.