

На правах рукописи

Лалетин Олег Николаевич

СПЕКТР СПИНОВЫХ И УПРУГИХ ВОЛН
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2007

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Игнатченко В.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
член-корреспондент РАН Никитов С.А.
(Институт радиотехники и электроники
РАН, г. Москва),

кандидат физико-математических наук,
доцент Булгаков Е.Н.
(Институт физики им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск).

Ведущая организация: Институт физики металлов УрО РАН
(г. Екатеринбург).

Защита состоится « 14 » декабря 2007 г. в 14.30 час. на заседании
диссертационного совета Д 003.055.02 при Институте физики им. Л.В.
Киренского СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок,
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института
физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан « 9 » ноября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Втюрин А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. В последние десятилетия как теоретически, так и экспериментально активно исследуются сверхрешетки – искусственно созданные мультислойные структуры (МС), в которых периодически изменяется какой-либо материальный параметр (диэлектрическая проницаемость для электромагнитных волн, плотность вещества для упругих волн и т.д.), а период модуляции такого параметра намного больше периода кристаллической структуры вещества. Так как спектр волн в МС имеет зонную структуру, аналогичную спектру волн в кристаллах, то МС часто называют фотонными, магнонными, фононными кристаллами и т.д., в зависимости от физической природы периодически неоднородного параметра. Для исследования в данной диссертационной работе были выбраны следующие актуальные задачи теории волнового спектра в МС: спектр спиновых, упругих и электромагнитных волн в МС с конечной толщиной границы между слоями и спектр магнитоупругих (МУ) волн в периодических МС с учетом эффектов, обусловленных статическими МУ и термоупругим взаимодействиями между слоями.

Постановка первой задачи обусловлена тем, что в работе [1] было теоретически показано, что ширины нечетных запрещенных зон в спектре спиновых волн, за исключением первой зоны, существенно зависят от толщины границы между слоями МС. В этой же работе было предложено использовать эти зависимости как теоретическую основу для измерения границ между слоями спектральными методами. Для реализации этой возможности требуется развитие теории в нескольких направлениях. В работе [1] расчет был проведен для спектра стоячих волн, в экспериментах с которыми исследуется непосредственно закон дисперсии волн. В экспериментах с бегущими волнами измеряются другие параметры – коэффициенты отражения и прохождения. Поэтому необходимо изучение случая распространяющихся волн. Кроме того, исследование в работе [1] было ограничено случаем нечетных запрещенных зон в спектре спиновых волн. Поэтому актуальными являются задачи исследования зависимостей ширин запрещенных зон – как четных, так и нечетных – в спектре спиновых, упругих и электромагнитных как стоячих, так и бегущих волн.

Постановка второй задачи обусловлена тем, что подавляющее большинство теоретических работ, рассматривающих распространение МУ волн в МС, посвящено поверхностным волнам, распространяющимся параллельно плоскости границ между слоями [2]. Теория распространения объемных МУ волн перпендикулярно слоям МС только начинает формироваться [3]. В работе [3] впервые показано, что в спектре МУ волн в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик должны возникать МУ резонансы, соответствующие пересечению дисперсионной кривой упругих волн с локальными частотами спин-волнового резонанса в ферромагнитном слое МС. Дальнейшее развитие теории таких объемных волн представляется также весьма актуальным.

Следует отметить, что во всех работах, посвященных исследованию спектра как поверхностных, так и объемных МУ волн, рассматривается распространение волн на фоне только первоначально созданной периодически-неоднородной структуры материальных параметров без учета статических периодических упругих напряжений, обусловленных спонтанным МУ основным состоянием. Поэтому является актуальным исследование спонтанного периодически-неоднородного МУ основного состояния, возникающего благодаря МУ и термоупругому взаимодействию между слоями МС.

Цель работы: развитие теории спектра волн в МС с произвольной толщиной границы между слоями и развитие теории спектра объемных МУ волн в МС, намагниченной перпендикулярно плоскости слоев.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи:**

1. Расчет зависимости ширин запрещенных зон и их положений в волновом спектре МС от толщины границы между слоями и номера зоны.
2. Исследование спонтанного периодически-неоднородного МУ основного состояния, возникающего благодаря МУ и термоупругому взаимодействиям между слоями МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик.
3. Исследование закона дисперсии объемных МУ волн, распространяющихся в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик, намаг-

ниченной перпендикулярно плоскости слоев. Исследование влияния МУ основного состояния на закон дисперсии.

4. Исследование закона дисперсии объемных МУ волн, распространяющихся в МС, состоящей из чередующихся слоев двух различных ферромагнетиков, намагниченных перпендикулярно плоскости слоев.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней

- рассчитаны зависимости ширин запрещенных зон и их положений в спектре спиновых, упругих и электромагнитных волн в МС с произвольной толщиной границы между слоями от толщины границы и номера зоны как для нечетных, так и для четных зон (для случая нечетных номеров зон ширины зон в спектре спиновых волн были получены ранее в работе [1]);
- предложен оригинальный вывод закона дисперсии в виде ряда по степеням амплитуды периодического возмущения;
- исследовано МУ основное состояние, которое возникает благодаря МУ и термоупругому взаимодействиям между слоями МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик;
- исследован закон дисперсии объемных МУ волн в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик, намагниченной перпендикулярно плоскости слоев, с учетом найденного МУ основного состояния;
- исследован закон дисперсии объемных МУ волн в МС ферромагнетик – ферромагнетик, намагниченной перпендикулярно поверхности слоев.

Научная и практическая ценность представленных в диссертации результатов определяется тем, что

- теоретическое исследование ширин запрещенных зон в МС с произвольной толщиной границы между слоями обобщает теорию, развитую ранее [1] для нечетных зон в спектре спиновых волн в магнетонных кристаллах, как на случай четных зон в спектре спиновых волн в магнетонных кристаллах, так и на случай зон любой четности в спектре упругих волн в фононных кристаллах и электромагнитных волн в фотонных кристаллах. Полученные результаты являются теоретиче-

ским обоснованием возможности измерений толщины границы между слоями МС в магнитных, фононных и фотонных кристаллах спектральными методами;

- развитая в работе теория МУ основного состояния, благодаря которой в эффективной магнитной энергии возникают три новых члена анизотропии, обусловленных МУ и термоупругими взаимодействиями между слоями МС, приводит к существенно новым зависимостям как квазистатических (коэрцитивная сила, поле насыщения), так и динамических (частота ФМР, эффективная спин-волновая жесткость и др.) характеристик МС от ее параметров и температуры. Поэтому рассчитанное в работе МУ основное состояние необходимо учитывать в последующих исследованиях как процессов намагничивания МС, так и процессов распространения волн в МУ МС;
- в процессе теоретического исследования спектра объемных МУ волн рассчитан ряд новых эффектов (перенормировка параметров спектра, обусловленная влиянием МУ основного состояния, расширение локальной частоты спиновых волн в узкую зону при совмещении МУ щели со щелью на границе зоны Бриллюэна МС, появление последовательности МУ щелей в МС ферромагнетик – ферромагнетик), которые могли бы стимулировать постановку соответствующих экспериментов.

Достоверность результатов определяется корректностью использования математического аппарата, контролируемостью применяемых приближений, а также правильностью предельных переходов к известным результатам. Результаты второй главы качественно подтверждены в последующих работах [4, 5].

Положения, выносимые на защиту:

1. Развитие теории спектра волн различной физической природы (спиновых, упругих, электромагнитных) для модели МС с произвольной толщиной границы между слоями.
2. Исследование МУ основного состояния в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик.
3. Развитие теории спектра объемных МУ волн, распространяющихся в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик, а также в МС, со-

ставленной из чередующихся слоев двух различных ферромагнетиков, для случая МС, намагниченных перпендикулярно плоскости слоев.

Апробация работы. Основные результаты данной работы были доложены и опубликованы в трудах конференций: Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (Krasnoyarsk, 2004), 11-я Всероссийская Научная Конференция Студентов-Физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 2005), Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 2005), International Symposium «Spin Waves 2007» (St. Petersburg, 2007), Euro-Asian Symposium «Magnetism on a Nanoscale» (Kazan, 2007), а также докладывались и обсуждались на конференции молодых ученых КНЦ СО РАН (Красноярск, 2007) и научных семинарах Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 6 печатных работах.

Отдельные этапы работы выполнялись при поддержке РФФИ (грант N. 04-02-16174), фонда некоммерческих программ «Династия», ККФН (гранты N. 12F0013С, 15G110, 16G073), а также Президента Российской Федерации (грант по программе «Государственная поддержка научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации», 6612.2006.3), ФЦНТП (гос. контракт N. 02.513.11.3259).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 106 страницах, включая 14 рисунков и списка литературы из 84 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В **первой главе** представлен обзор теоретических работ, посвященных теории спектра спиновых, упругих, электромагнитных и МУ волн в периодических МС. В последнем параграфе первой главы приводится постановка задачи.

Во **второй главе** рассчитываются зависимости ширин запрещенных зон и их положений в волновом спектре на границах зон Бриллюэна

от толщины границы между слоями МС, в которой периодическая модуляция $\rho(z)$ какого-либо материального параметра $A(z) = A[1 - \gamma\rho(z)]$, где A и γ – постоянная составляющая и относительная среднеквадратичная модуляция этого параметра, соответственно, пропорциональна эллиптическому синусу Якоби [1]:

$$\rho(z) = \kappa\sqrt{\mathbf{K}/(\mathbf{K} - \mathbf{E})} \operatorname{sn}(\pi z / 2d), \quad (1)$$

где $d = \pi l/8\mathbf{K}$ – толщина границы между слоями МС, l – период МС ($l/2 - d$ – толщина слоя), \mathbf{K} и \mathbf{E} – полные эллиптические интегралы первого и второго рода, соответственно, κ – модуль этих интегралов. В зависимости от величины модуля κ эта функция описывает как предельные случаи прямоугольного профиля ($\kappa = 1, d/l = 0$) и синусоидального профиля ($\kappa = 0, d/l = 1/4$), так и все промежуточные значения d/l . В работе предполагается малость амплитуды периодического возмущения. Волновое уравнение записывается в виде

$$d^2\mu / dz^2 + [v - \eta\rho(z)] = 0, \quad (2)$$

где выражения для переменной μ и параметров v и η различны для волн различной физической природы ($v \propto \omega - \omega_0$, где ω_0 – частота ФМР, для спиновых волн, $v \propto \omega^2$ для электромагнитных и упругих волн, параметр η пропорционален глубине модуляции профиля МС γ). Расчет положений и ширин зон выполнен двумя различными методами: приближенным аналитическим методом из частотной зависимости коэффициента отражения для распространяющихся волн и методом теории возмущений из точного выражения для закона дисперсии волн.

Первый подход основывается на анализе частотной зависимости коэффициента отражения $R(\omega)$ электромагнитной волны от полубесконечной МС в отсутствие в ней затухания. Для такой ситуации существование на дисперсионных кривых запрещенных зон проявляется в появлении полосы частот полного отражения с $R = 1$ вблизи частот, для которых длина волны удовлетворяет условию Брэгга: $\omega\varepsilon^{1/2}/c = mq/2$, где ε – диэлектрическая проницаемость, $q = 2\pi/l$, $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер брэгговского резонанса. Используя метод модифицированной теории связанных волн (МТСВ) [6] для описания распространения волн, из условия $R = 1$ найдены выражения для частот ω_m^\pm , ограничивающих m -ю

запрещенную зону в спектре электромагнитных (или упругих) волн, с точностью до γ^3 для произвольной периодической модуляции $\rho(z)$:

$$\frac{\omega_m^\pm \sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{mq}{2} \left[1 + \frac{\gamma^2}{8} + \frac{\gamma^3}{16} \left(\pm |\rho_m| + \sum_{n+p \neq 0} \rho_n \rho_p \rho_{-n-p} \right) \right. \\ \left. \pm \frac{1}{2} \left| \gamma \rho_m + \gamma^2 \frac{m}{8} \sum_n \frac{\rho_{m-n} \rho_n}{n} + \gamma^3 \left(\pm \frac{|\rho_m|}{4} \sum_n \frac{m-n}{n} \rho_{m-n} \rho_n + S_m \right) \right| \right], \quad (3)$$

где ρ_n – коэффициенты ряда Фурье периодической функции $\rho(z)$,

$$S_m = \sum_{n \neq -p} \rho_n \rho_p \rho_{m-n-p} (m-2n)/8(n+p) + \sum_{n,p} \rho_n \rho_p \rho_{m-n-p} (m^2/8np + 1/12).$$

Второй подход к определению ширин зон и их положений основывается на рассмотрении закона дисперсии $v(k)$. В работе предложен оригинальный вывод закона дисперсии в виде ряда по степеням амплитуды периодического возмущения. В результате получено уравнение

$$v - v_n - \eta^2 \sum_{n_1 \neq n} \frac{\rho_{n-n_1} \rho_{n_1-n}}{v - v_{n_1}} - \eta^3 \sum_{n_1 \neq n} \sum_{n_2 \neq n, n_1} \frac{\rho_{n-n_1} \rho_{n_1-n_2} \rho_{n_2-n}}{(v - v_{n_1})(v - v_{n_2})} - \dots = 0, \quad (4)$$

где $v_n = (k - nq)^2$, k – волновое число. Уравнение (4) было получено ранее в работе [7] другим методом, однако при этом была допущена неточность, связанная с неучетом в суммах запретов вида $n_i \neq n_{i-1}$. Методом теории возмущений из точного выражения для закона дисперсии (4) были рассчитаны частоты v_m^\pm , ограничивающие m -ю запрещенную зону в спектре спиновых волн на границах зон Бриллюэна ($k = mq/2$), с точностью до η^3 для произвольной периодической модуляции $\rho(z)$:

$$v_m^\pm = v_0 + \eta^2 \sum_{n \neq m} \frac{\rho_{-n} \rho_n}{v_0 - v_n} + \eta^3 \left(\mp |\rho_m| \sum_{n \neq m} \frac{\rho_{-n} \rho_n}{(v_0 - v_n)^2} + \sum_{n \neq m} \sum_{p \neq m, n} \frac{\rho_{-n} \rho_{n-p} \rho_p}{(v_0 - v_n)(v_0 - v_p)} \right) \\ \pm \left| \eta \rho_m + \eta^2 \sum_{n \neq m} \frac{\rho_{m-n} \rho_n}{v_0 - v_n} \right. \\ \left. + \eta^3 \left(\mp |\rho_m| \sum_{n \neq m} \frac{\rho_{m-n} \rho_n}{(v_0 - v_n)^2} + \sum_{n \neq m} \sum_{p \neq m, n} \frac{\rho_{m-n} \rho_{n-p} \rho_p}{(v_0 - v_n)(v_0 - v_p)} \right) \right|. \quad (5)$$

Используя выражения для коэффициентов ρ_n ряда Фурье функции (1), зависящие от толщины границы между слоями d , с помощью (3) были

рассчитаны зависимости ширин зон $\Delta\omega_m = \omega_m^+ - \omega_m^-$ от d/l в спектре электромагнитных (или упругих) волн (рис. 1). Зависимости $\Delta v_m = v_m^+ - v_m^-$ от d/l , соответствующие спиновым волнам, приведены на рис. 2. На обоих графиках ширины щелей нормированы к ширине первой запрещенной зоны МС с синусоидальным профилем. Качественный характер зависимостей $\Delta\omega_m(d)$ и $\Delta v_m(d)$ совпадает: ширины щелей первых двух зон практически не зависят от d и резко уменьшаются с ростом d для всех последующих зон (для случая нечетных зон подобная закономерность в спектре спиновых волн была получена ранее в работе [1]). Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что имеется качественно различный характер зависимостей ширин щелей от номера зоны m для случаев электромагнитных и спиновых волн, который проявляется наиболее резко для прямоугольного профиля модуляции. Ширина нечетных зон при $d/l = 0$ для электромагнитных (и, соответственно, упругих) волн слабо убывает с ростом m (рис. 1а). Ширина нечетных зон для спиновых волн с ростом m резко уменьшается (как $1/m$ при пренебрежении эффектами порядка η^3 , см. рис. 2а). Еще более значительны различия между зависимостями от m ширин четных зон. Если для спиновых волн Δv_m убывает с ростом m как $1/m^2$ (рис. 2b), то для электромагнитных волн $\Delta\omega_m$ возрастает пропорционально m (рис. 1b).

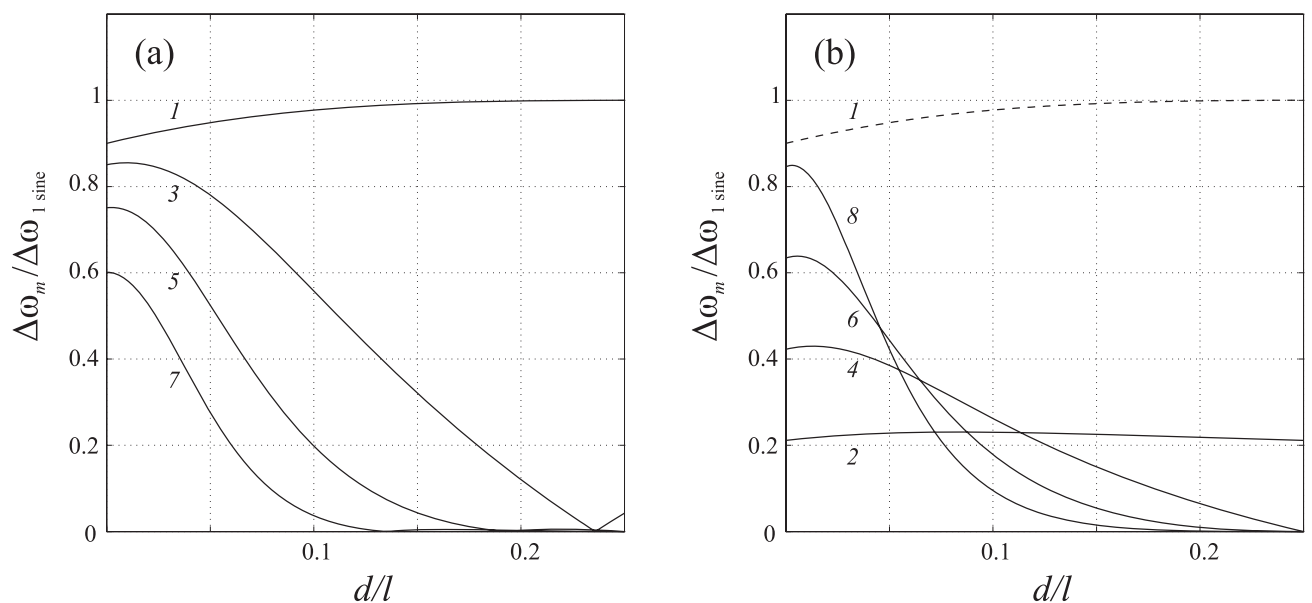


Рис. 1. Зависимости ширин щелей $\Delta\omega_m$ на краю m -й зоны Бриллюэна от d/l для нечетных (а) и четных (б) зон при $\gamma = 0.15$. Значения m указаны у соответствующих кривых. Пунктиром на рис. 1b показана ширина щели первой зоны.

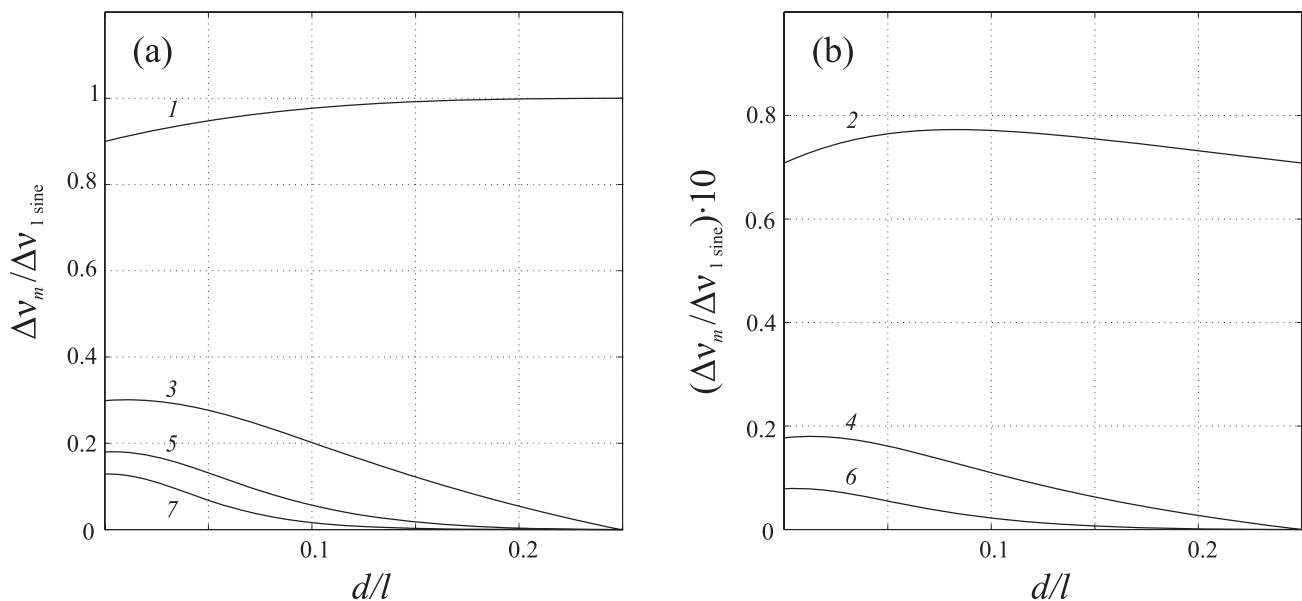


Рис. 2. Зависимости ширины щелей Δv_m на краю m -й зоны Бриллюэна от d/l для нечетных (а) и четных (б) зон при $\eta/q^2 = 0.1$. Значения m указаны у соответствующих кривых. Обращаем внимание на отличие масштабов оси ординат рисунков 2а и 2б.

Рассчитанные в диссертации зависимости ширины как четных, так и нечетных зон и их положений в спектре от толщины границы для спиновых, упругих и электромагнитных волн существенно расширяют теоретическое обоснование возможности развития экспериментальных методов измерения толщины границы в МС спектральными методами (идея такой возможности была впервые высказана в работе [1]).

В **третьей главе** исследуется МУ основное состояние, которое спонтанно возникает благодаря МУ и термоупругому взаимодействиям между слоями МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик. Под термином «магнитоупругое основное состояние» мы будем понимать здесь равновесные значения спонтанных статических упругих напряжений, которые возникают благодаря МУ и термоупругому взаимодействиям между слоями МС, и соответствующую этим напряжениям равновесную ориентацию вектора намагниченности \mathbf{M}_0 при заданной ориентации магнитного поля \mathbf{H} и заданной температуре T . Мы принимаем, что метод изготовления МС соответствует ситуации отсутствия упругих напряжений, обусловленных взаимодействием между слоями МС при температуре $T = T_0 + \Delta T$ и однородной ориентации векторов намагниченности \mathbf{M} в плоскости магнитных слоев. Исследование или использование МС проводится во внешнем магнитном поле \mathbf{H} при температуре

T , отличных от поля и температуры изготовления T_0 .

В результате решения статической МУ задачи получено, что в магнитной части энергии МС спонтанно возникают три новых члена эффективной магнитной анизотропии. Соответствующее эффективное магнитное поле имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0^{(e)} = & \mathbf{H} + \mathbf{H}_{0m} \\ & + \left[\frac{2(\lambda_1 + \mu_1)S_1\mu_2l_2}{3K_1\mu_1} \gamma^2 M_0^2 + \frac{(S_0 - 2\Delta L\mu_1l_1)\mu_2l_2}{S_0\mu_1\bar{\mu}l} \gamma^2 M_{0z}^2 - \frac{2\gamma\bar{\kappa}\Delta T}{3} \right] \mathbf{M}_0 \\ & - \frac{\mu_2l_2}{\mu_1\bar{\mu}l} \gamma^2 M_0^2 M_{0y} \mathbf{j} - \frac{2S_1\mu_2l_2}{S_0\mu_1\bar{\mu}l} \gamma^2 M_{0z}^3 \mathbf{I} + \frac{6K_1K_2\Delta\kappa\Delta T\mu_2l_2}{S_0} \gamma M_{0z} \mathbf{I}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь \mathbf{H}_{0m} – размагничивающее поле, γ – параметр МУ связи, l_1 и l_2 – толщины магнитного и немагнитного слоев ($l = l_1 + l_2$ – период МС), λ_n и μ_n – упругие параметры магнитного ($n = 1$) и немагнитного ($n = 2$) слоев, $\Delta\kappa$ – разность коэффициентов теплового расширения слоев, $S_0, S_1, K_1, K_2, \bar{\kappa}, \bar{\mu}$ – величины, сложным образом зависящие от параметров МС, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{I}$ – орты координатных осей. Четвертое и пятое слагаемые в этом выражении обусловлены МУ взаимодействием между слоями МС и представляют собой анизотропию типа легкая плоскость xz и анизотропию типа легкая плоскость xu , соответственно. Шестой член обусловлен термомагнитным взаимодействием между слоями МС и представляет собой анизотропию с осью вдоль оси z . Эта анизотропия может иметь как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от знаков $\Delta\kappa, \Delta T$ и γ . Все три члена анизотропии зависят от соотношения между толщинами слоев.

Полученное МУ основное состояние обладает следующими свойствами. При перемагничивании МС однородным вращением магнитного момента в магнитном поле \mathbf{H} , лежащем в плоскости слоев вдоль оси x , проекция $M_{0x}(H)$ обладает прямоугольной петлей гистерезиса с коэрцитивной силой H_c , определяемой выражением:

$$H_c = \mu_2 l_2 \gamma^2 M_0^3 / \mu_1 \bar{\mu} l. \quad (7)$$

При наложении \mathbf{H} в плоскости слоев вдоль оси y проекция $M_{0y}(H)$ изменяется по безгистерезисной кривой намагничивания $M_{0y}/M_0 = H/H_m^{(y)}$, где поле магнитного насыщения $H_m^{(y)}$ совпадает по величине с H_c . При

наложении поля вдоль оси z проекция M_{0z} изменяется по нелинейной безгистерезисной кривой намагничивания. Поле магнитного насыщения $H_m^{(z)}$ отличается в этом случае от $4\pi M_{0z}$ на величину суммы полей МУ и термоупругой эффективных анизотропий. Оценки показывают, что обе эти эффективные анизотропии могут быть величинами одного порядка.

В **четвертой главе** развивается теория спектра объемных МУ волн, распространяющихся в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик, а также в МС, составленной из чередующихся слоев двух различных ферромагнетиков. Исследуется случай магнитного поля, равновесной ориентации вектора намагниченности и волнового вектора, ориентированных перпендикулярно плоскости слоев. Для нахождения закона дисперсии используется метод, основанный на теореме Флоке.

В первом параграфе **четвертой главы** получен аналитически закон дисперсии объемных МУ волн, распространяющихся в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик на фоне МУ основного состояния, рассчитанного в **третьей главе**, в виде

$$P_2 \cos^2 Kl + P_1 \cos Kl + P_0 = 0, \quad (8)$$

где K – волновое число МУ волн, распространяющихся в МС, P_2 , P_1 и P_0 – многочлены относительно всех параметров МС, зависящие от частоты ω , но не содержащие волновое число K . В целом выражение (8) содержит несколько тысяч слагаемых. Численное исследование закона дисперсии показывает, что общий вид волнового спектра и его основные особенности – возникновение серии МУ резонансов – качественно соответствуют результатам, впервые полученным для этой ситуации в работе [3], и не меняются как при учете МУ основного состояния, так и без такого учета. Однако, проведенный нами учет МУ основного состояния привел к существенно другим зависимостям коэффициентов в законе дисперсии МУ волн и в формуле для частоты ФМР от толщин слоев МС, материальных параметров этих слоев и температуры. Например, частота ФМР, следующая из общего закона дисперсии при $K = 0$, имеет вид

$$\omega_0 = g \left(H - 4\pi M_0 + \frac{\gamma^2 M_0^3 \mu_2 l_1}{\mu_1 (\mu_2 l_1 + \mu_1 l_2)} - \frac{2\gamma^2 M_0^3 S_1 \mu_2 l_2}{S_0 \mu_1 \bar{\mu} l} + \frac{6K_1 K_2 \Delta k \Delta T \mu_2 l_2}{S_0} \gamma M_0 \right)^{1/2}$$

$$\times \left(H - 4\pi M_0 + \frac{\gamma^2 M_0^3 \mu_2 l_1}{\mu_1 (\mu_2 l_1 + \mu_1 l_2)} - \frac{\gamma^2 M_0^3 (2S_1 - S_0) \mu_2 l_2}{S_0 \mu_1 \bar{\mu} l} + \frac{6K_1 K_2 \Delta k \Delta T \mu_2 l_2}{S_0} \gamma M_0 \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Частота ФМР содержит в общем случае как все три новых члена эффективной магнитной анизотропии, обусловленных МУ основным состоянием, так и перенормированный изотропный МУ член, существующий также и в однородном ферромагнетике [8].

Впервые рассмотрена ситуация совмещения какого-либо из МУ резонансов со щелью на границе зоны Бриллюэна МС. В этом случае МУ взаимодействие приводит как к модификации дисперсионного закона на краях запрещенной зоны, так и к расширению локализованного спин-волнового уровня в разрешенную зону, лежащую внутри запрещенной зоны (рис. 3). Для больших длин волн в окрестности первого МУ резонанса уравнение для закона дисперсии принимает простую форму, аналогичную уравнению для закона дисперсии связанных магнитостатических и упругих волн в однородном ферромагнетике, однако входящие в него параметры – эффективная частота ФМР, эффективная скорость звука и параметр МУ связи – зависят теперь от магнитных, упругих и геометрических характеристик обоих типов слоев; дисперсия, обусловленная обменным взаимодействием, в МУ волнах в МС ферромагнетик – немагнитный диэлектрик отсутствует.

Во втором параграфе **четвертой главы** рассмотрена МС,

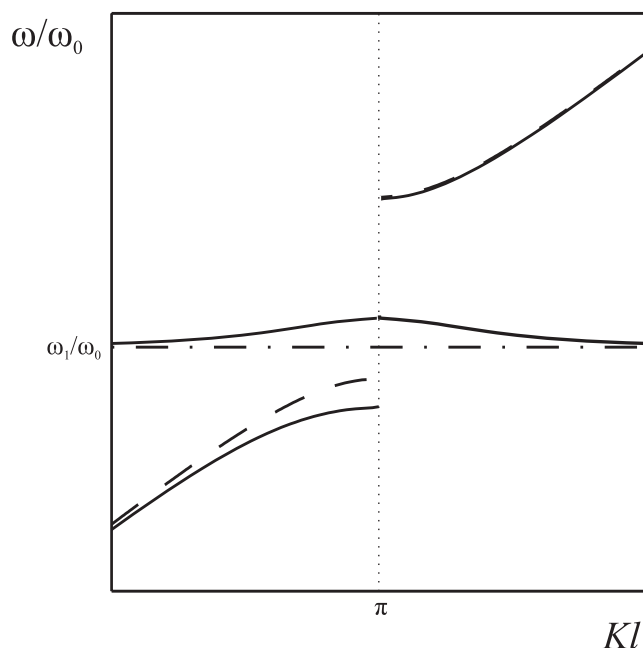


Рис. 3. Модификация закона дисперсии МУ волн (сплошная кривая) при совмещении частоты первой спин-волновой моды (штрихпунктирная прямая) с запрещенной зоной, соответствующей границе первой зоны Бриллюэна. Закон дисперсии упругих волн в МС при отсутствии МУ взаимодействия показан штриховой кривой.

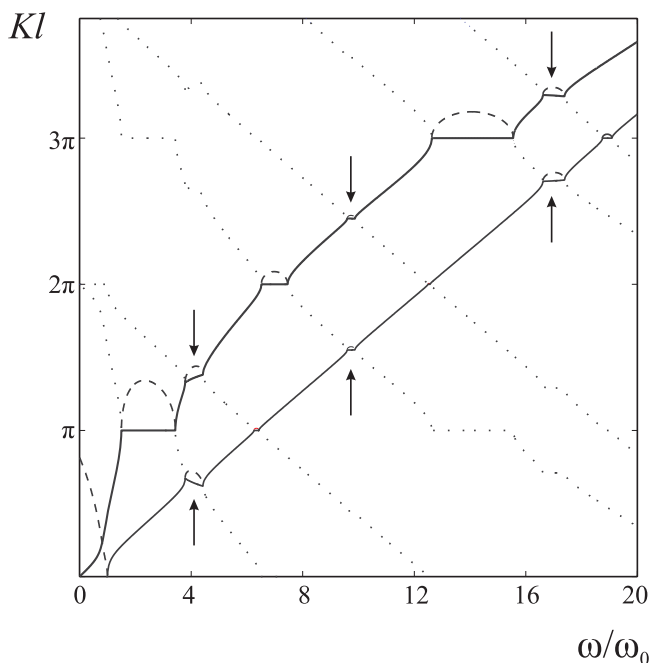


Рис. 4. Закон дисперсии МУ волн в МС, состоящей из чередующихся слоев двух ферромагнетиков, в схеме расширенных зон (сплошные кривые). Стрелками показаны щели в спектре, обусловленные совместным действием МУ связи и периодичностью системы. Пунктирными линиями изображены вспомогательные ветви закона дисперсии; штриховые кривые соответствуют мнимым компонентам волнового числа K .

состоящая из чередующихся слоев двух различных ферромагнетиков, изотропных по отношению к упругим и МУ свойствам. Оси легкого намагничивания в каждом слое направлены перпендикулярно плоскости слоев. В аналитическом виде получен закон дисперсии МУ волн в такой структуре в виде (8), но с другими значениями коэффициентов P_2 , P_1 и P_0 . Результат численного расчета закона дисперсии $K(\omega)$ представлен на рис. 4 в схеме расширенных зон. Видно, что наряду с обычными щелями в спектре на границах зон Бриллюэна, обусловленными периодичностью системы, и щелью в первой зоне Бриллюэна, обусловленной МУ связью, должны наблюдаться щели нового типа во всех последующих зонах Бриллюэна, обязанные своим происхождением МУ взаимодействию и периодичности системы. Рассмотрен ряд случаев, в которых выражение для закона дисперсии записывается в простом аналитическом виде: случай длинных волн, ситуация отсутствия МУ связи (когда МС представляет собой, по существу, две независимые МС, магнитную и упругую) и т.д.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Теоретически исследованы коэффициенты отражения и прохождения и законы дисперсии спиновых, упругих и электромагнитных волн в мультислойной структуре с произвольной толщиной границы между слоями. Для расчета коэффициентов отражения и прохождения волн

использован приближенный метод модифицированной теории связанных волн (МТСВ), для вывода закона дисперсии предложен оригинальный метод. Сравнение результатов двух методов позволило оценить точность метода МТСВ.

2. Рассчитаны зависимости ширин запрещенных зон и их положений в волновом спектре мультислойной структуры от толщины границы между слоями и номера зоны для спиновых, упругих и электромагнитных волн. Показано, что для первой и второй зон ширины зон слабо зависят от толщины границы, тогда как для всех последующих зон ширины зон уменьшаются с возрастанием толщины границы как для нечетных, так и для четных номеров зон (для случая нечетных номеров зон в спектре спиновых волн подобная закономерность была получена ранее в работе [1]). Рассчитанные в диссертации зависимости ширин зон от толщины границы существенно расширяют теоретическое обоснование возможности развития экспериментальных методов измерения толщины границы в мультислойной структуре спектральными методами.
3. Впервые исследовано периодическое магнитоупругое основное состояние, которое возникает благодаря магнитоупругому и термоупругому взаимодействиям между слоями мультислойной структуры ферромагнетик – немагнитный диэлектрик. Показано, что эти взаимодействия приводят к возникновению в эффективной магнитной энергии мультислойной структуры трех новых членов магнитоупругой и термоупругой анизотропии. Исследованы процессы перемагничивания мультислойной структуры, получены выражения для коэрцитивной силы и поля магнитного насыщения как функции соотношений между толщинами слоев, материальных параметров этих слоев и температуры.
4. Исследован аналитически и численно закон дисперсии объемных магнитоупругих волн в мультислойной структуре ферромагнетик – немагнитный диэлектрик. Показано, что учет магнитоупругого основного состояния приводит к существенно новым зависимостям коэффициентов в этом законе от толщин слоев мультислойной структуры, материальных параметров этих слоев и температуры. В частности, в формуле для частоты ферромагнитного резонанса появляются

ся члены, обусловленные магнитоупругой и термоупругой анизотропией, а также перенормируется известный ранее [8] изотропный магнитоупругий член.

5. Показано, что при совмещении какого-либо из магнитоупругих резонансов со щелью на границе зоны Бриллюэна мультислойной структуры магнитоупругое взаимодействие приводит как к модификации дисперсионного закона на краях запрещенной зоны, так и к расширению локализованного спин-волнового уровня в разрешенную зону, лежащую внутри запрещенной зоны.
6. Исследован аналитически и численно закон дисперсии объемных магнитоупругих волн в мультислойной структуре, состоящей из чередующихся слоев двух различных ферромагнетиков. Показано, что наряду с обычными щелями в спектре на границах зон Бриллюэна, обусловленными периодичностью системы, и щелью в первой зоне Бриллюэна, обусловленной магнитоупругой связью, должны наблюдаться щели нового типа, обязанные своим происхождением совместному действию двух факторов: магнитоупругому взаимодействию и периодичности системы.
7. Исследован ряд предельных случаев: переход от мультислойной структуры ферромагнетик – ферромагнетик к структуре ферромагнетик – немагнитный диэлектрик, предел отсутствия магнитоупругой связи, длинноволновой предел. Показано, что в длинноволновом пределе закон дисперсии для случая мультислойной структуры ферромагнетик – немагнитный диэлектрик имеет форму, аналогичную закону дисперсии связанных магнитостатических и упругих волн в однородном ферромагнетике: дисперсия, обусловленная обменным взаимодействием, отсутствует, а для случая структуры двух ферромагнетиков – форму, аналогичную закону дисперсии связанных спиновых и упругих волн. Входящие в эти законы параметры – эффективная частота ферромагнитного резонанса, эффективный параметр обменной жесткости и эффективная скорость упругих волн – зависят как от материальных, так и геометрических характеристик слоев.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ignatchenko V.A. and Laletin O.N. Magnetoelastic Ground State and Waves in Ferromagnet – Nonmagnetic Dielectric Multilayer Structure// Phys. Rev. B. – 2007. – V. 76, N. 10. – P. 104419-1-104419-11.
2. Игнатченко В.А., Лалетин О.Н. Магнитоупругие волны в многослойных структурах// Укр. физ. журн. – 2005. – Т. 50, Вып. 8А. – С. А150-А158.
3. Ignatchenko V.A., Laletin O.N. The Spectrum of Magnetoelastic Waves in Multilayer Structures// Phys. Met. Metallogr. – 2005. – V. 100, Suppl. 1. – P. S66-S68.
4. Игнатченко В.А., Лалетин О.Н. Волны в сверхрешетке с произвольной толщиной границы между слоями// ФТТ. – 2004. – Т. 46, Вып. 12. – С. 2216-2223.
5. Игнатченко В.А., Лалетин О.Н. Закон дисперсии волн в сверхрешетках с произвольной толщиной границы между слоями// Вестник КрасГУ. Сер. физ.-мат. науки. – 2004. – Вып. 5. – С. 21-30.
6. Игнатченко В.А., Лалетин О.Н. Распространение электромагнитных волн в одномерных сверхрешетках// Вестник КрасГУ. Сер. физ.-мат. науки. – 2003. – Вып. 3. – С. 9-17.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Ignatchenko V.A., Mankov Yu.I., Maradudin A.A. Wave spectrum of multilayers with finite thicknesses of interfaces// *Phys. Rev. B.* – 2000. – V. 62, N. 3. – P. 2181-2184.
2. Гуляев Ю.В., Дикштейн И.Е., Шавров В.Г. Поверхностные магнитоакустические волны в магнитных кристаллах в области ориентационных фазовых переходов// *УФН.*–1997.–Т.167,Вып.7.–С.735-750.
3. Беспятых Ю.И., Дикштейн И.Е., Мальцев В.П., Василевский В., Никитов С.А. Зонная структура спектра магнитоупругих волн в периодической системе магнитоупругих и упругих немагнитных слоев// *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, Вып. 9. – С. 1145-1152.
4. Кучко А.Н., Ткаченко В.С. Влияние структуры межслойных границ на спектр спиновых волн в магнетонном кристалле// *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2005. – Т. 27, Вып. 9. – С. 1157-1167.
5. Tkachenko V.S., Kruglyak V.V., Kuchko A.N. Spin waves in a magnonic crystal with sine-like interfaces// *JMMM.*–2006.–V.307,N.1.–P.48-52.
6. Мартынов Н.Н., Столяров С.Н. К теории распространения волн в периодических структурах// *КЭ.*–1978.–Т.5,Вып.8.–С.1853-1855.
7. Карпов С.Ю., Константинов О.В., Райх М.Э. Модифицированная теория возмущений для расчета зонной структуры в одномерном периодическом потенциале//*ФТТ.*–1980.–Т.22,Вып.11.–С.3402-3407.
8. Туров Е.А., Шавров В.Г. Об энергетической щели в ферро- и антиферромагнетиках, связанной с магнитоупругой энергией// *ФТТ.* – 1965. – Т. 7, Вып. 1. – С. 217-226.

Подписано в печать 06.11.2007.

Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1.

Усл. печ. л. 1. Тираж 70. Заказ № 53.

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН.

660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН.

