

## Поверхностные спиновые волны в пространственно неоднородных пленках феррошпинелей

Г.С. Бадртдинов, Л.А. Митлина

Самарский государственный технический университет  
443100, Российская Федерация, г. Самара  
ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены особенности в амплитудно-частотных характеристиках макета типа линии задержки в касательно намагниченных пленках марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей. Рассчитаны волновые числа, фазовые и групповые скорости, коэффициенты затухания магнитостатических волн. Общим наблюдаемым эффектом для пленок феррошпинелей является «осцилляции прохождения» в амплитудно-частотных характеристиках магнитостатических волн с изменением частоты. Изменения в амплитудно-частотных характеристиках связаны с эффектами резонансного взаимодействия дипольных и обменных волн. Показано, что глубина и число обменных минимумов в амплитудно-частотных характеристиках пленок различного состава зависят от величины обменного взаимодействия, констант поверхностной анизотропии и параметров закрепления спинов на свободной поверхности и межслойной границе.

*Ключевые слова:* пленки феррошпинелей, дипольные и обменные спиновые волны, поверхностная анизотропия, постоянные неоднородного обмена.

### Введение

Стремительный прогресс в области электроники вызывает необходимость разработки новых материалов и устройств, в которых реализуется возможность использования преимуществ высокочастотных волн. Монокристаллические пленки феррошпинелей представляют интерес в качестве волноведущих структур для СВЧ-устройств на спиновых волнах [1; 2]. Они также обладают необходимыми свойствами для спинтроники: имеют высокую температуру Кюри 500–600 К [3], достаточно высокую намагниченность насыщения 3000–5000 Гс [2] и обладают полупроводниковыми свойствами. Носители тока (s-электроны) сильно взаимодействуют со спинами частично заполненных d-оболочек магнитных ионов. [3]. В области температуры Кюри наблюдается «размытость» магнитного превращения на температурной зависимости намагниченности насыщения. «Размытость» магнитного превращения с энергетической точки зрения свидетельствует о невозможности одновременной минимизации энергии всех обменных связей, т. е. о наличии в магнитной системе неоднородных состояний. Неоднородные состояния в пленках феррошпинелей могут быть связаны с отклонением от стехиометрии химического состава, а также с их наноструктурной неоднородностью [4].

При температурах ниже точки Кюри образование спин-электронных комплексов возможно в магнитных пленках в быстро переменных полях при частотах  $\omega \sim 10^9 \text{ с}^{-1}$ , т. е. в спин-волновой области [5].

В работах [6–8] рассмотрены спектры поглощения, полученные на ЭПР-спектрометре, в касательно намагниченных пленках феррошпинелей. Установлено, что общим наблюдаемым эффектом является осцилляции затухания магнитостатических колебаний с изменением частоты. Особенности в затухании являются характерным признаком резонансного взаимодействия дипольных и обменных волн.

Цель данной работы – определить влияние обменного взаимодействия и констант поверхностной анизотропии на распространение поверхностных волн Деймона – Эшбаха в пленках феррошпинелей различного химического состава.

### 1. Объекты и методы исследования

Для исследования были выбраны пленки толщиной  $d \sim 15\text{--}30$  мкм исходного состава  $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ , а также  $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , выращенные методом химических транспортных реакций на сколах (001) плоскости окиси магния.

По данным микроструктурного анализа [3], проведенного на микроанализаторе Самеса, и

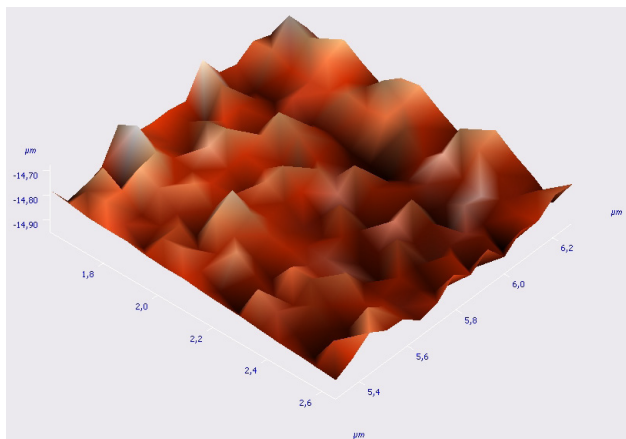


Рис. 1. Рельеф АСМ-пленки исходного химического состава  $\text{Mn}_{0,65}\text{Fe}_{2,35}\text{O}_4$

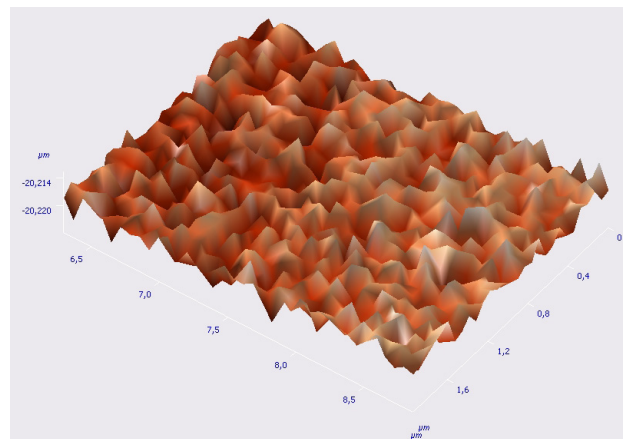


Рис. 2. Рельеф АСМ-пленки исходного химического состава  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$

рентгеноструктурного анализа, синтезированные образцы однофазны и имеют структуру феррошпинели.

По температурной зависимости термо-ЭДС [3] найдены энергии ионизации донора  $E_0 \sim 0,03$  эВ для пленок марганцевых феррошпинелей и  $E_0 \sim 0,07$  эВ для пленок магний-марганцевых феррошпинелей, что соответствует концентрации доноров  $\sim 10^{19}-10^{20} \text{ см}^{-3}$ , т. е. наблюдается отклонение от стехиометрии.

Для определения констант кристаллографической и констант одноосной магнитной анизотропии использовался метод вращательных моментов. Намагниченность насыщения измерялась методом магнетометра. Константа обменного взаимодействия оценивалась по температуре Кюри, полученной при исследовании температурной зависимости удельного сопротивления [3].

Константа обменного взаимодействия составила для пленок исходного химического состава

$$\text{MnFe}_2\text{O}_4 A_{\text{обм}} \sim 0,502 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1},$$

$$\text{Mn}_{0,65}\text{Fe}_{2,35}\text{O}_4 A_{\text{обм}} \sim 0,545 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1},$$

$$\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4 A_{\text{обм}} \sim 0,504 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1}.$$

В пленках феррошпинелей источниками локальных вариаций эффективного внутреннего магнитного поля, играющих роль центров рассеяния однородной прецессии, являются следующие неоднородности.

Для типичного феррита со структурой феррошпинели при нарушении строго периодического расположения ионов максимальное волновое число  $k_{\text{max}} \sim 2\pi / 200a$ , где  $a$  – расстояние между соседними ионами [9]. При расстоянии между ионами марганцевого феррита  $(3,1-5,4) \cdot 10^{-1} \text{ нм}$  для идеальной решетки волновое число  $k_{\text{max}} \sim (5,7-10,4) \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ .

Методом микроиндентирования [3] обнаружено, что поведение механических свойств поверхностного слоя отличается от поведения внутренних объемов материала. Микротвердость, микропрочность, глубина разупрочненного поверхностного слоя ( $h$ ) зависят от химического состава, размера блоков, типа дислокационной структуры. В частности, для пленок исходного химического состава  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$   $h \sim 1,6-2,5$  мкм, микропрочность  $\sim 0,5-0,82$  ГПа, а для  $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$   $h \sim 1,2-1,5$  мкм,  $\sim 0,32-0,47$  ГПа. По данным исследования кинетических явлений [3], пленкам феррошпинелей соответствует высокая плотность нелокализованных электронов  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . В связи с этим снижение микропрочности вблизи поверхности возможно за счет уменьшения прочности связей вследствие высокой кинетической энергии нелокализованных электронов.

Исследование рельефа поверхности пленок феррошпинелей методом сканирующей зондовой микроскопии полуконтактным методом [4] показало, что в области сканирования  $1000 \times 1000 \text{ нм}^2$  наблюдается наноструктурная неоднородность (рис. 1, 2).

Нанопирамидки радиусом 30–40 нм в основании могут создать скачки магнитной анизотропии на поверхности пленок. Высота рельефного поверхностного слоя зависит от химического состава, технологических условий роста и составляет  $L \sim 160-100 \text{ нм}$

Таким образом, пленки феррошпинелей можно представить состоящими из двух слоев: поверхностного слоя и основного слоя, различающихся локализацией электронов и магнитными характеристиками.

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Рассмотрим результаты распространения магнитостатических волн в пленках феррошпинелей методом движущего преобразователя (рис. 3, 4). Для пленок исходного состава  $Mn_xFe_{3-x}O_4$  с  $x = 1; 0,65$  при  $\vec{H} \parallel \langle 100 \rangle$  получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) при ширине антенны 20 мкм и расстояниями между антеннами 4 мм на лабораторном макете линии задержки (ЛЗ).

Для пленок исходного состава  $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$  АЧХ макета линии задержки получены при расстоянии между антеннами 3 мм.

Дисперсионная зависимость спектра поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) при  $\vec{H} \parallel \langle 100 \rangle$  выражается формулой [10]

$$\omega^2 = \left( \omega_H + \frac{1}{2} \omega_M \right)^2 - \frac{\omega_M^2}{4} \exp(-2k'd), \quad (1)$$

где  $\omega_H = \gamma(H + \beta M_S)$ ;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\beta$  – безразмерная константа анизотропии;  $\beta = 2K_1 / M_S^2$ ;  $M_S$  – намагниченность насыщения;  $K_1$  – первая константа кристаллографической анизотропии;  $\omega_M = \gamma 4\pi M_S$ ;  $k'$  – волновое число;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $d$  – толщина пленки. Частота ПМСВ находится в интервале

$$\sqrt{\omega_H (\omega_H + \omega_M)} < \omega < \omega_H + \frac{\omega_M}{2}. \quad (2)$$

Используя экспериментальные данные намагниченности насыщения, первой константы магнитной анизотропии, параметров магнитного поля, мы нашли значения  $\omega_M$  и  $\omega_H$ , что позволило определить частотный диапазон (2) распространения ПМСВ (табл. 1) и сравнить его с частотным диапазоном, полученным из АЧХ канала МСВ (рис. 1, 2). Соотношение (2) выполняется для  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  рассматриваемых пленок.

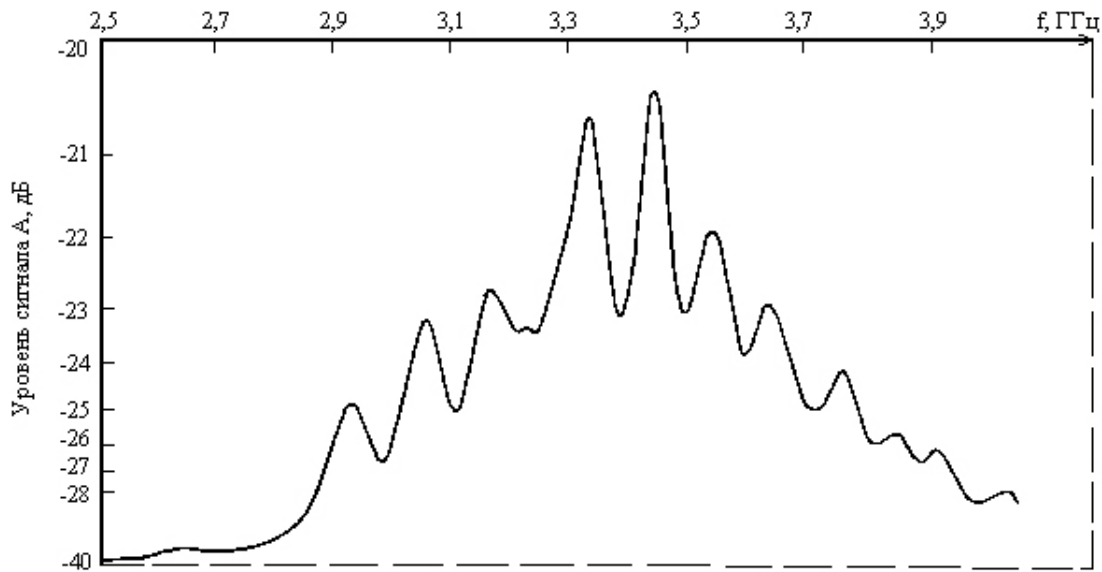


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика ПМСВ для пленок исходного состава  $MnFe_2O_4$  толщиной 17 мкм;  $H = 400$  Э

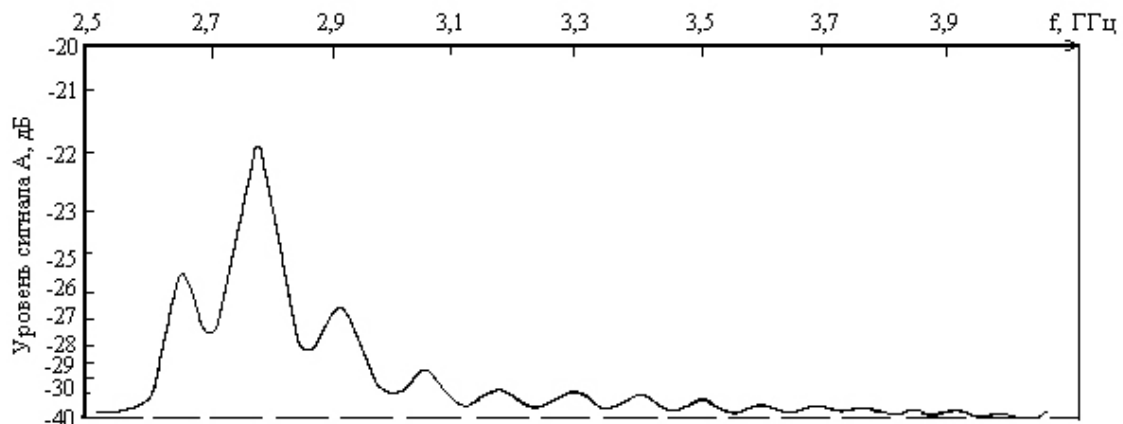


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика ПМСВ для пленок исходного состава  $Mn_{0,65}Fe_{2,35}O_4$  толщиной 14,5 мкм;  $H = 460$  Э

Таблица 1

Характеристики пленок феррошпинелей и ширина частотной полосы прохождения сигнала МСВ

Исходный химический состав	$4\pi M_S$ , Гс	$K_1 \cdot 10^{-4}$ , эрг $\cdot$ см $^{-3}$	$\sqrt{\omega_H (\omega_H + \omega_M)}$ , ГГц	$\omega_H + \omega_M/2$ , ГГц	Эксперимент	
					$\omega_{\min}$ , ГГц	$\omega_{\max}$ , ГГц
MnFe $_2$ O $_4$	3140	2,4	14,7	27,63	14,95	24,99
Mn $_{0,65}$ Fe $_{2,35}$ O $_4$	2888	3,6	11,76	28	16,33	24,49
Mg $_{0,25}$ Mn $_{0,75}$ Fe $_2$ O $_4$	4940	4,3	18,99	47,44	27,2	40,82

Таблица 2

Изменения компонентов тензора магнитной проницаемости, волновых чисел, фазовых скоростей распространения МСВ и коэффициентов затухания

Исходный состав	$\Delta\mu$	$\Delta\mu_a$	$\Delta k'$ , см $^{-1}$	$\Delta v_\phi \cdot 10^{-8}$ , см/с	$\Delta k''$ , см $^{-1}$
MnFe $_2$ O $_4$	0,26–0,66	– 3,93–2,26	8,9–226	16,9–1,1	5,9–12,4
Mn $_{0,65}$ Fe $_{2,35}$ O $_4$	0,49–0,78	– 3,19–2,06	52,2–504	2,9–0,5	17,8–34,2
Mg $_{0,25}$ Mn $_{0,75}$ Fe $_2$ O $_4$	0,44–2,12	– 3,54–5,77	72,9–655	2,9–0,6	24–40,7

Полученные результаты позволили из уравнения (1) оценить волновые числа  $k'$ , групповые скорости  $\frac{d\omega}{dk'} = v_{гр}$  и фазовые скорости  $v_\phi = \frac{\omega}{k'}$  (табл. 2) в указанном диапазоне частот.

Групповые скорости ПМСВ для образца 1 и 2 составили соответственно  $v_{2р} \sim 4,6 \cdot 10^7$  см/с и  $3,2 \cdot 10^7$  см/с, время задержки сигнала МСВ  $\tau \sim \frac{L}{v_{гр}}$ , где  $L$  – расстояние между антеннами,  $\tau \sim 8,7$  нс и  $\tau \sim 12$  нс.

Расчет диагональной компоненты тензора магнитной проницаемости по формуле [11]

$$\mu = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}$$

показывает, что  $\mu > 0$  во всем диапазоне наблюдаемых магнитостатических мод (рис. 1, 2) для рассматриваемых образцов, недиагональная компонента тензора  $\mu_a = (\omega_M \omega) / (\omega_H^2 - \omega^2)$  меньше нуля (табл. 2).

Пленки исходного состава Mg $_{0,25}$ Mn $_{0,75}$ Fe $_2$ O $_4$  с более высокой намагниченностью насыщения  $M_S \sim 394$  Гс имеют наибольший диапазон волновых чисел (табл. 2) в диапазоне частоты 4,0–6,5 ГГц при распространении ПМСВ в поле  $H_0 \sim 400$  Э, групповую скорость  $v_{гр} \sim 3 \cdot 10^7$  см/с,  $\tau \sim 10,3$  нс.

Рассмотрим влияние состава (табл. 2) на коэффициенты затухания магнитостатических волн ( $k''$ ) в пленках феррошпинелей. При малых потерях ( $k'' \ll k'$ ) параметр затухания магнитостатических волн находится по формуле [10]

$$\omega_\tau = \omega_r \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_M}{\omega_H} \right),$$

где  $\omega_r$  – параметр диссипации.

Параметр затухания определяется  $k''$  и групповой скоростью  $\omega_\tau = v_{гр} k''$ . Полуширина резонансной кривой ( $\Delta H_k$ ) связана с параметром диссипации  $\omega_r$  соотношением  $\omega_r = \gamma \Delta H_k$ .

Из указанных выражений следует формула для расчета  $k''$ :

$$k'' = \frac{\gamma \Delta H_k \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_M}{\omega_H} \right)}{v_{гр}} \omega_\tau. \quad (3)$$

Наибольшее затухание, согласно формуле (3), наблюдается для пленок Mg-Mn феррита (табл. 2), содержащих концентрацию доноров (Fe $^{2+}$ )  $\sim 10^{20}$  см $^{-3}$ .

Из анализа АЧХ принятого сигнала видно, что в спектре ПМСВ возникает нелинейность принятого сигнала. Нелинейность АЧХ в пленках ЖИГ [12] проявлялась в возникновении модуляции, положение которых хорошо описывается для частот спин-волнового резонанса.

Для оценки возможности возбуждения обменных спиновых волн в рассматриваемых пленках феррошпинелей рассмотрим параметры закрепления спинов на межслойной границе поверхностного слоя и основной части пленки, а также закрепления спинов на свободной поверхности.

Параметр закрепления спинов ( $d^S$ ) рассчитывается по значениям обменной константы ( $\alpha_{обм}$ ),

Таблица 3

Константа одноосной анизотропии, параметр обменного взаимодействия, радиусы обменного и дипольного взаимодействия, параметр закрепления спинов на межслойной границе

Исходный состав	$K_U \cdot 10^{-3}$ , эрг/см <sup>3</sup>	$\alpha_{обм} \cdot 10^{11}$ , см <sup>-1</sup>	$\beta^S \cdot 10^2$	$R_{обм} \cdot 10^5$ , см	$R_m \cdot 10^3$ , см	$d^S \cdot 10^{-5}$ , см
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2	1,6	6,45	1,58	4,42	8
Mn <sub>0,65</sub> Fe <sub>2,35</sub> O <sub>4</sub>	1,2	2,1	4,5	2,14	2,19	3,42
Mg <sub>0,25</sub> Mn <sub>0,75</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	15	0,66	19,3	20,3	2,78	4,4

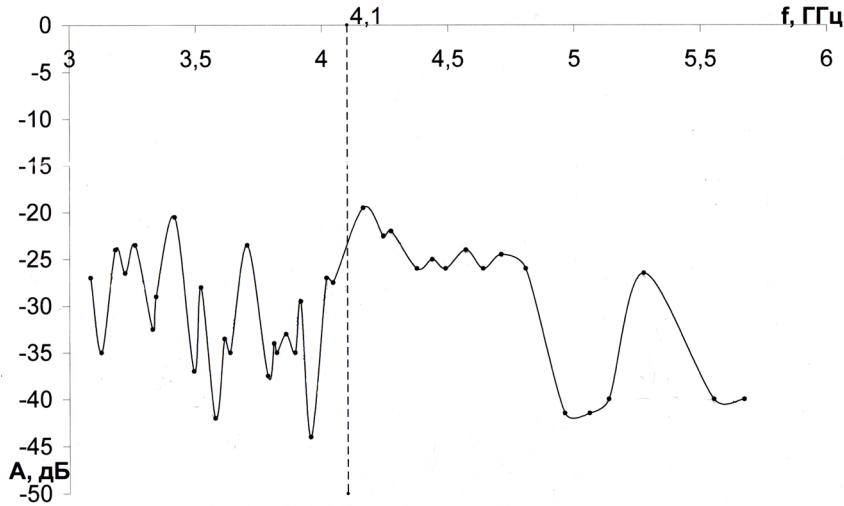


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ПМСВ для пленок исходного состава Mg<sub>0,25</sub>Mn<sub>0,75</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> толщиной 15 мкм;  $H = 400$  Э

безразмерной константы одноосной анизотропии ( $\beta$ ) и толщины поверхностного слоя ( $h$ ) [13]:

$$d^S = \beta^S h / \alpha_{обм},$$

где  $\alpha_{обм} = 2A_{обм}/M_S^2$  – обменная константа;  $\beta^S = 2K_U/M_S^2$  – безразмерная константа одноосной анизотропии;  $K_U$  – константа одноосной анизотропии;  $M_S$  – намагниченность насыщения. Толщина поверхностного слоя ( $h$ ) для пленок различного химического состава получена по зависимости микротвердости от глубины внедрения индентора [3].

Используя данные о величине нарушенного слоя на поверхности и определив параметр закрепления спинов, можно подсчитать константу поверхностной анизотропии [13]:  $K^S = d^S A_{обм}$ . Константа поверхностной анизотропии составляет по спектрам МСВ  $\sim 0,4-2,21$  эрг  $\cdot$  см<sup>-2</sup>, что по порядку величины удовлетворительно совпадает с  $K^S$ , определенной из анализа спектров поглощения для рассматриваемых пленок феррошпинелей, полученных на ЭПР-спектрометре [5].

Для пленок с блочной структурой эффективный радиус обменного взаимодействия, согласно [13],

равен  $R_{обм} \sim \sqrt{\alpha_{обм}/\beta^S}$ . Радиус обменного взаимодействия для рассматриваемых пленок составляет  $10^{-5}-10^{-6}$  см, обменная константа для марганцевых пленок  $\sim 10^{-11}$  см<sup>2</sup>, для магний-марганцевых пленок  $\alpha_{обм} \sim 10^{-12}$  см<sup>2</sup> (табл. 3).

Радиус магнитодипольного взаимодействия равен [13]

$$R_m = \frac{M_S d}{H_A},$$

где  $d$  – толщина пленки;  $M_S$  – намагниченность насыщения;  $H_A$  – поле анизотропии. Используя данные по намагниченности насыщения, полей анизотропии для указанных пленок при частоте 9,75 ГГц, получены радиусы магнитодипольного взаимодействия  $\sim 10^{-3}$  см.

Примем частоту «глубоких провалов» на АЧХ (рис. 3–5) за частоту резонансного взаимодействия ПМСВ со спин-волновыми модами, считая что они являются частотами синхронизма дипольных и обменных волн [14].

Волновое число для обменных спиновых волн (СВ) с частотой  $\omega$  продольно намагниченной пленки найдем, согласно [13]:

$$k_{\pm}^2 = \frac{1}{2\alpha_{обм}\gamma M_S} \left[ -\omega_M \pm \sqrt{\omega_M^2 + 4\omega^2} \right]. \quad (4)$$

Таблица 4

Волновые числа обменных СВ, параметры закрепления спинов на свободной поверхности, толщина слоя возбуждения и закрепления обменных СВ, константа поверхностной анизотропии

Исходный состав	$k_+ \cdot 10^{-5}$ , см <sup>-1</sup>	$d^S \cdot 10^{-5}$ , см <sup>-1</sup>	$L$ , нм	$K^S$ , эрг · см <sup>-2</sup>	$h_{\text{закр}}$ , нм
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2,7–3,7	– 24–1,6	2596–170	0,4	330
Mn <sub>0,65</sub> Fe <sub>2,35</sub> O <sub>4</sub>	4,5–6,9	– 36–2,7	1510–91	0,184	102
Mg <sub>0,25</sub> Mn <sub>0,75</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3,1–3,8	– 23,6–3,3	1223–163	2,21	1030

Анализ, проведенный по формуле (4), показал, что для рассматриваемых образцов спиновые волны имеют действительные волновые числа  $k_+ \sim 10^5$  см<sup>-1</sup> (табл. 4).

Отношение  $2K^S / K_1$  определяет толщину слоя закрепления спинов ( $h_{\text{закр}}$ ) на свободной поверхности, в котором осуществляется переход направления константы  $K^S$  от поверхностного в перпендикулярное. Толщина слоя закрепления спинов на свободной поверхности составляет 102–1030 нм.

Соотношение между эффективным параметром закрепления спинов на поверхности пленки и волновым числом  $k_+$ , когда ось поверхностной анизотропии перпендикулярна плоскости пленки, имеет вид [13]

$$k_+ \operatorname{tg} \frac{k_+ L}{2} = -d^{S*}. \quad (5)$$

На низких частотах  $\omega \ll 2\pi\gamma M_S$  эффективное закрепление оказывается малым:

$$\frac{d^{S*}}{d^S} = \left( \frac{\omega}{4\pi\gamma M_S} \right)^2 \ll 1. \quad (6)$$

При этом волновой вектор  $k_+$  будет близок к значениям  $k_z = \pi r / L$ .

Используя это соотношение из значений  $k_+$  и  $r$  была определена толщина слоя возбуждения, им соответствующая.

Минимальная толщина слоя возбуждения обменных спиновых волн  $L_{\min}$  (табл. 4) согласуется с глубиной рельефа АСМ, обнаруженного методом зондовой микроскопии. Максимальная толщина слоя возбуждения  $L_{\max}$  соответствует толщине поверхностного слоя, полученного по зависимости микротвердости от глубины внедрения индентора [3].

Зависимость эффективного параметра закрепления от частоты определяется соотношением

$$d^{S*} = \frac{d^S}{2} \left[ 1 - \left( 1 / \sqrt{1 + (2\omega / \omega_M)^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Из уравнений (5)–(7) следует, что параметр закрепления спинов на свободной поверхности изменяется от частоты и имеет отрицательный знак (табл. 4).

Таким образом, для поверхностного слоя рассматриваемых пленок толщиной 1,2–2,5 мкм выполняются антисимметричные граничные условия, поскольку спины на различных поверхностях слоя закреплены неодинаково. Модуляции на АЧХ пленок феррошпинелей (рис. 3, 4) могут быть связаны с зависимостью параметра закрепления спинов на свободной поверхности от частоты. Поверхностная анизотропия ( $K^S a$ , где  $a$  – постоянная решетки) на порядок меньше обменной ( $A_{\text{обм}}$ ).

Немонотонное изменение с частотой «глубоких провалов» в АЧХ пленок Mg<sub>0,25</sub>Mn<sub>0,75</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (рис. 5) свидетельствует о том, что обменная связь слоев дает основной вклад в закрепление спинов на межслойной границе, при этом  $K^S a$  одного порядка с  $A_{\text{обм}}$ . Расчетная глубина слоя закрепления спинов на поверхности (табл. 4) наибольшая для данного состава. Следует отметить, что при  $K^S a \leq A_{\text{обм}}$  [14] оба слоя участвуют в формировании спектра одновременно.

В квантовой теории спиновые волны трактуются как магноны, у которых соотношение между энергией и квазиимпульсом такое же, как и дисперсионное соотношение для спиновых волн. Спиновой волне с длиной  $\lambda = 2\pi / k$  может быть сопоставлено движение квазичастицы с эффективной массой  $m_{\text{эфф}} = \hbar k^2 / 2\omega$  (табл. 5).

Оценки показали, что с ростом частоты эффективная масса магнонов увеличивается. Отношение эффективной массы магнонов для пленок феррошпинелей к массе покоя электрона составляет 2,3–9,5. С увеличением эффективной массы магнона период осцилляций на АЧХ рассматриваемых пленок (рис. 3–5) и групповая скорость волн уменьшаются. Используя соотношение  $k_{\max} = \sqrt{\omega/\eta}$ , определим константы неоднородного обмена  $\eta$  и  $D$ , где  $D = \eta / \gamma$  [10].

Таблица 5

Длина обменной спиновой волны, параметры неоднородного обмена, эффективная масса поверхностных магнонов

Исходный состав	$\lambda_{св} \cdot 10^5$ , см	$\eta$ , см <sup>2</sup> · с <sup>-1</sup>	$D \cdot 10^9$ , Гс · м <sup>2</sup>	$m_{эфф} \cdot 10^{27}$ , г
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2,32–1,79	0,189	10,7	2,1–2,85
Mn <sub>0,65</sub> Fe <sub>2,35</sub> O <sub>4</sub>	0,22–1,1	0,261	14,8	6,2–8,67
Mg <sub>0,25</sub> Mn <sub>0,75</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2,02–1,65	0,167	9,5	2,5–3,14

Анализируя данные расчета (табл. 3, 5), видим, что для пленок феррошпинелей параметры неоднородного обмена одного порядка с пленками ЖИГ [10].

### Заключение

В результате проведенных исследований было установлено:

– при касательном намагничивании монокристаллических пленок марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей на амплитудно-частотных характеристиках наблюдаются «осцилляции коэффициента прохождения» МСВ через пленку, которые свидетельствуют о резонансном взаимодействии поверхностных магнитостатических и обменных спиновых волн;

– при условии  $K^S a \leq A_{обм}$  влияние обменной связи будет наиболее заметным и приведет как к динамическому закреплению спинов на межслойной границе, так и к формированию единого спектра обменных волн структуры.

### Список литературы

1. Устройства на основе спиновых волн для обработки радиосигналов в диапазоне частот 50 МГц 20 ГГц / В.Б. Афиногенов [и др.] // Радиоэлектроника. 2000. № 8. С. 6–14.
2. Магнитостатические волны в пленках феррошпинелей / В.Б. Афиногенов [и др.] // ФТТ. 1988. Т. 30. № 7. С. 2032–2039.
3. Митлина Л.А. Физико-химические основы получения, дефектность структуры и свойства монокристаллических пленок феррошпинелей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2004. Вып. 30. С. 114–149.
4. Закономерности формирования эпитаксиального слоя феррошпинелей. / Л.А. Митлина [и др.] // Изв. вузов. Сер.: Физика. 2012. Т. 55. № 4. С. 53–60.
5. Кривоглаз М.А. Флуктуонные состояния электронов // УФН. 1973. Т. 11. Вып. 4. С. 617–654.
6. Спектры микроволновых колебаний в касательно намагниченных пленках феррошпинелей / Г.С. Бадртдинов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 4. С. 48–57.
7. Затухание магнитостатических мод в пленках феррошпинелей / Г.С. Бадртдинов [и др.] // Изв. вузов. Сер.: Физика. 2014. Т. 57. № 1. С. 1005–1110.
8. Влияние обменного взаимодействия на затухание магнитостатических колебаний в пленках феррошпинелей / Г.С. Бадртдинов [и др.] // Изв. вузов. Сер.: Физика. 2014. Т. 57. № 8. С. 10–15.
9. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1976. Т. 2. 504 с.
10. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 454 с.
11. Васьковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 315 с.
12. Гигантские осцилляции прохождения квазиповерхностной спиновой волны через тонкую пленку железно-иттриевого граната (ЖИГ) / Ю.В. Гуляев [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. Вып. 9. С. 600–603.
13. Саланский Н.М., Ерухимов М.М. Физические свойства и применение пленок. Новосибирск: Наука, 1975. 210 с.
14. Объемные магнитостатические волны в обменно связанных ферритовых пленках / С.Л. Высоцкий [и др.] // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 7. С. 97–110.

## Surface spin waves in spatially inhomogeneous films ferros spinels

G.S. Badrtdinov, L.A. Mitlina

Considered are the peculiarities in the amplitude – frequency characteristics of the type layout of the delay line in Ref magnetized films of manganese and magnesium-manganese ferros spinels. Calculated wave number, phase and group velocities, attenuation coefficients of magnetostatic waves. The overall effect observed for films of ferros spinels is «oscillations in the transmission» in the frequency response of the magnetostatic waves with changing frequency. Changes in frequency response associated with the effects of resonant interaction of dipole and exchange waves. It is shown that the depth and the number of exchange minimums in the quartermaster films of different composition depends on the magnitude of the exchange interaction, surface anisotropy constants and parameters of the spin pinning at the free surface and interlayer boundary.

*Keywords:* film ferros spinels, dipole and exchange spin waves, surface anisotropy, and the inhomogeneous exchange constant.