

# Физика твёрдого тела

УДК 537.635:539.216.2

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ОБМЕНА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЕЙМОНА–ЭШБАХА В ПЛЁНКАХ ФЕРРОШПИНЕЛЕЙ

*Л. А. Митлина, Г. С. Бадртдинов,  
Ю. В. Великанова, М. Р. Виноградова*

Самарский государственный технический университет,  
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: physics@samgtu.ru, gregori2000@mail.ru, juliavl@mail.ru

*Методом подвижного преобразователя проведены исследования закона дисперсии магнитостатических волн в плёнках марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей. Определены волновые числа, фазовые и групповые скорости магнитостатических волн. Обнаружено возбуждение спин-волновых волн в поверхностном слое плёнки. Рассчитаны волновые числа, параметры закрепления спинов, их частотные зависимости и константы поверхностной анизотропии.*

**Ключевые слова:** *плёнки феррошпинелей, магнитостатические волны, обменные спиновые волны, константы поверхностной анизотропии.*

**Введение.** Одно из перспективных направлений создания устройств аналоговой обработки информации в диапазоне сверхвысокочастотного излучения состоит в использовании магнитостатических волн (МСВ), распространяющихся в плёнках феррошпинелей [1].

Экспериментальный и теоретический анализ распространения МСВ в эпитаксиальных плёнках марганцевых феррошпинелей проведены в работах [2–5]. На основании анализа дисперсии затухания волн определены основные магнитные параметры исследованных образцов. В работах [6–8] рассматриваются особенности распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в плёнках магний-марганцевой феррошпинели. Согласно экспериментам дисперсионные свойства спиновых волн (СВ) и эффективность возбуждения в плёнках феррошпинелей ( $4\pi M_s \sim 3000 \div 5000$  Гс) и плёнок железо-иттриевого граната ( $4\pi M_s \sim 1750$  Гс) одинаковы. Однако с точки зрения применения в устройствах плёнки феррошпинелей имеют следующие преимущества: более высокие частоты достигаются при одних и тех же по-

---

*Людмила Александровна Митлина* (д.ф.-м.н., проф.), профессор, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

*Григорий Сайдашевич Бадртдинов*, ассистент, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

*Юлия Владимировна Великанова* (к.ф.-м.н., доц.), доцент, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

*Маргарита Рудольфовна Виноградова* (к.ф.-м.н., доц.), доцент, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

лях подмагничивания; полоса частот, в которой возбуждаются СВ, примерно в 7 раз шире.

В настоящей работе рассматриваются нелинейные явления, возникающие при распространении ПМСВ в плёнках марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей. Теория взаимодействия дипольных (поверхностных) и обменных (объёмных) спиновых волн в касательно намагниченной ферритовой плёнке для плёнок железо-иттриевого граната рассмотрена в работах [9, 10], в которых показано, что ПМСВ при достижении её амплитуды порогового значения приводит к параметрическому возбуждению новых волн в образце, а в многослойных ферритовых структурах возникновение спин-волновых мод связано с закреплением спинов на межслойной границе.

В работе [11] в плёнках феррошпинелей толщиной  $d \sim 20 \div 30$  мкм, намагниченных перпендикулярно поверхности в спектре поглощения, полученном на ЭПР-спектрометре, наряду с однородным резонансом обнаружены дополнительные пики поглощения, соответствующие поверхностным СВ с волновым числом  $k \sim 10^5$  см<sup>-1</sup>. Для различных составов  $Mn_xFe_{3-x}O_4$  получены следующие константы поверхностной анизотропии:  $K^s \sim 0,41 \div 1,11$  эрг·см<sup>-2</sup> и следующие длины волны колебаний намагниченности в направлении оси  $z$ :  $\lambda \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$  см. Это свидетельствует о существовании в плёнках феррошпинелей технологического поверхностного слоя, который может закреплять спины.

Существование поверхностных СВ связано с отличием интеграла обменного взаимодействия в поверхностном слое от интеграла обменного взаимодействия внутри образца. В плёнках марганцевых феррошпинелей наблюдается размытость магнитного превращения температурной зависимости намагниченности насыщения и удельного электросопротивления на  $\Delta T \sim 50$  К. Это означает, что обменное взаимодействие поверхностного слоя и слоёв внутри плёнки может различаться на  $\Delta A_{обм} \sim 0,06 \cdot 10^6$  эрг·см<sup>-1</sup>. Обменная связь слоёв должна привести к возникновению динамического закрепления спинов для тех спин-волновых мод, частоты которых достаточно близки к частоте резонанса поверхностной обменной волны. Обмен оказывает основное влияние на затухание ПМСВ, которое осциллирует в зависимости от намагничивающего поля или от частоты.

**1. Объекты и методы исследований.** Для исследования были выбраны плёнки исходного состава  $Mn_xFe_{3-x}O_4$ , с  $x = 1; 0,65$  и  $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$ , выращенные методом химических транспортных реакций на сколах (001)-плоскости окиси магния.

Микродифракционные исследования подтверждают ориентацию образцов: (001) [100] феррошпинели параллельна (001) [100] подложки.

Данные микроструктурного анализа, проведённые на микроанализаторе *Samcса*, и рентгеноструктурный анализ показывают, что синтезированные образцы однофазны и имеют структуру феррошпинели. Химический состав плёнок, полученных при температуре синтеза  $T_c \sim 1300$  К, соответствует  $x = 1,22$ .

Для определения констант кристаллографической анизотропии использовались методы ферромагнитного резонанса и вращательных моментов. Намагниченность насыщения измерялась методом магнетометра.

Константа обменного взаимодействия оценивалась по температуре Кюри,

полученной из зависимости удельного сопротивления от температуры. Константа обменного взаимодействия  $A_{обм}$  [7] для плёнок марганцевых феррошпинелей исходного состава с  $x = 1$  составила величину  $A_{обм} \sim 0,502 \cdot 10^{-6}$  эрг  $\cdot$  см $^{-1}$ , с  $x = 0,65$  — величину  $A_{обм} \sim 0,54 \cdot 10^{-6}$  эрг  $\cdot$  см $^{-1}$ , для плёнки магний-марганцевой феррошпинели — величину  $A_{обм} \sim 0,504 \cdot 10^{-6}$  эрг  $\cdot$  см $^{-1}$ . Исследования зависимости  $\ln \rho = f(1/T)$  для рассмотренных составов показало [12], что обменное  $s$ - $d$ -взаимодействие электронов проводимости с магнитными ионами  $\beta_0 \sim 0,2 \div 0,3$  эВ на порядок больше спин-спинового взаимодействия  $kT_k \sim 0,051 \div 0,054$  эВ.

По температурной зависимости термо-ЭДС [13] найдены энергии ионизации донора  $E_0 \sim 0,03$  эВ для плёнок марганцевых феррошпинелей и  $E_0 \sim 0,07$  эВ — для плёнки магний-марганцевой феррошпинели, что соответствует концентрации доноров ( $Fe^{2+}$ )  $\sim 10^{-19} \div 10^{-20}$  см $^{-3}$ , т.е. наблюдается отклонение от стехиометрии.

**2. Результаты эксперимента и их обсуждение.** Дисперсионные зависимости МСВ в касательно намагниченных плёнках феррошпинелей при внешнем магнитном поле  $H \parallel \langle 100 \rangle$  выражается формулой [4]

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

где  $\omega_M = 4\gamma\pi M_s$ ,  $\omega_H = \gamma(H - 2K_1/M_s)$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное соотношение. Частота ПМСВ находится в интервале

$$(\omega_H(\omega_H + \omega_M))^{1/2} < \omega < (\omega_H + \omega_M/2). \quad (2)$$

Для плёнок марганцевых феррошпинелей исходного состава с  $x = 1; 0,65$  при  $H \parallel \langle 100 \rangle$  на лабораторном макете линии задержки получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), представленные на рис. 1, при ширине антенны 20 мкм и расстоянии между антеннами 4 мм. Для плёнки  $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$  получены АЧХ, представленные на рис. 2, при расстоянии между антеннами 3 мм.

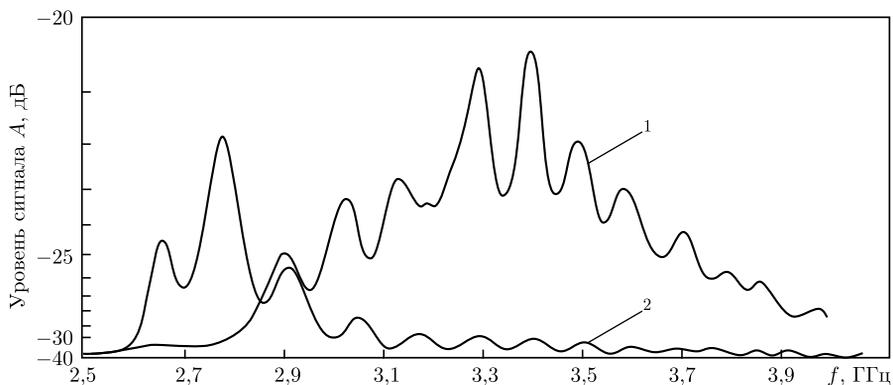


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики поверхностных магнитостатических волн для плёнок марганцевых феррошпинелей: 1)  $x = 1$ ,  $d = 17$  мкм,  $H = 400$  Э; 2)  $x = 0,65$ ,  $d = 14,5$  мкм,  $H = 460$  Э

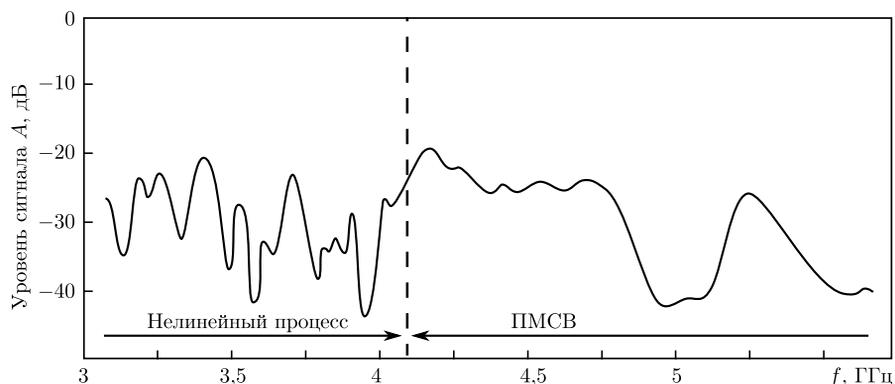


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики поверхностных магнитостатических волн для плёнки магний-марганцевой феррошпинели ( $h = 15$  мкм;  $H = 400$  Э)

Таблица 1

**Характеристики плёнок и ширина частотной полосы прохождения сигнала МСВ**

Состав	$d$ , мкм	$4\pi M_s$ , Гс	$K_1 \cdot 10^{-4}$ , эрг/см <sup>3</sup>	$H_a$ , Э	$H$ , Э	$f_{\max}$ , ГГц		$f_{\min}$ , ГГц	
						теор.	эксп.	теор.	эксп.
$MnFe_2O_4$	17	3140	2,4	96	400	4,96	4,00	2,34	2,78
$Mn_{0,65}Fe_{2,35}O_4$	14,5	2888	3,6	157	460	4,37	3,93	1,84	2,58
$Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$	15	4949	4,3	152	400	7,44	6,50	2,70	3,50

Из спектров ферромагнитного резонанса в трёхсантиметровом диапазоне длин волн для рассматриваемых плёнок были определены первая константа кристаллографической анизотропии  $K_1$ , намагниченность насыщения  $M_s$ . Это позволило определить частотный диапазон распространения ПМСВ (табл. 1) и сравнить с частотным диапазоном, полученным из АЧХ канала ПМСВ.

Значения  $f_{\max}$  и  $f_{\min}$ , рассчитанные по формуле (2), не совпадают с экспериментальными. Поскольку волновое число  $k' < 0$ , должно выполняться соотношение  $\omega_{\max} < \omega_{дЭ}$ , где  $\omega_{дЭ} = \omega_H + \omega_M/2$  — частота Деймона—Эшбаха, что и наблюдается для рассматриваемых плёнок ( $f_{\max} = \omega_{\max}/(2\pi)$ ).

Полученные результаты позволили из уравнения (1) оценить волновые числа  $k'$ , групповые скорости  $v_{гр} = d\omega/dk'$  и фазовые скорости  $v_{ф}$  в указанных диапазонах волн (табл. 2).

Групповые скорости ПМСВ для исходного состава  $x = 1; 0,65$  составили соответственно  $v_{гр} \sim 4,6 \cdot 10^7$  см/с и  $3,2 \cdot 10^7$  см/с, время задержки сигнала МСВ  $\tau = L/v_{гр} \sim 8,7$  нс и 12,5 нс, где  $L$  — расстояние между антеннами. Оценки дают более высокие значения  $\tau$ , чем в работе [5], где для тех же составов плёнок время задержки сигнала МСВ определялось с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-23 на частоте  $1 \div 4$  ГГц. Эти измерения показали, что для плёнок  $MnFe_2O_4$  толщиной  $\sim 20$  мкм задержка по частотному диапазону возбуждения МСВ изменяется от 5 до 10 нс.

Плёнки магний-марганцевой феррошпинели с более высокой намагниченностью насыщения  $M_s \sim 394$  Гс имеют наибольший диапазон волновых чисел и диапазон частоты (рис. 2) при распространении ПМСВ в поле  $H \sim 400$  Э (см. табл. 2), групповая скорость  $v_{гр} \sim 3 \cdot 10^7$  см/с,  $\tau \sim 10,3$  нс.

**Волновые числа и фазовые скорости плёнок феррошпинелей**

MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , H = 400 Э							
Частота, ГГц	2,38	2,70	3,03	3,34	3,66	3,98	
k', см <sup>-1</sup>	8,92	30,61	61,97	99,35	155,18	225,87	
v <sub>ф</sub> · 10 <sup>-8</sup> , см/с	16,9	5,49	3,00	2,10	1,40	1,1	
Mn <sub>0,65</sub> Fe <sub>2,35</sub> O <sub>4</sub> , H = 460 Э							
Частота, ГГц	2,38	2,70	3,03	3,34	3,66	3,98	
k', см <sup>-1</sup>	52,2	86,8	150,2	208,6	344,0	503,7	
v <sub>ф</sub> · 10 <sup>-8</sup> , см/с	2,87	1,95	1,27	1,00	0,66	0,49	
Mg <sub>0,25</sub> Mn <sub>0,75</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , H = 400 Э							
Частота, ГГц	3,5	4,0	4,5	4,9	5,5	6,0	6,5
k', см <sup>-1</sup>	6,45	72,9	112	184	267	391	655
v <sub>ф</sub> · 10 <sup>-9</sup> , см/с	2,9	3,9	2,5	1,7	1,3	0,96	0,62

Коэффициенты затухания в соответствии с уравнением

$$k'' = \frac{\gamma \Delta H_k (1 + \omega_M / (2\omega_H))}{v_{гр}}$$

с увеличением частоты плёнок марганцевых феррошпинелей исходного состава с  $x = 1$  изменялись на величину  $\Delta k'' \sim 12,4 \div 5,9$  и на величину  $\Delta k'' \sim 34,2 \div 17,8$  с  $x = 0,65$ ; для плёнки магний-марганцевой феррошпинели — на величину  $\Delta k'' \sim 40,7 \div 20,4$ . Наибольшее затухание и осцилляции в затухании наблюдаются для плёнок магний-марганцевых феррошпинелей, содержащих концентрацию доноров ( $\text{Fe}^{2+}$ )  $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Из анализа АЧХ принятого сигнала видно, что в спектре ПМСВ возникает нелинейность принятого сигнала. Нелинейность проявляется в возникновении модуляций, положение которых по частоте хорошо описывается выражением для частот спин-волнового резонанса. Из рис. 1, 2, можно определить частоты и интервалы между частотами синхронизма дипольных и обменных волн [10].

Минимальным порогом обладают обменные спиновые волны с частотой, близкой к половине частоты ПМСВ, и волновым вектором, существенно превышающем величину, обратную толщине плёнки.

Волновые вектора  $k_+$  и  $k_-$  спиновой волны с частотой  $\omega$  определяются из соотношения [14]

$$k_{\pm}^2 = \frac{1}{2\alpha_{обм}\epsilon_0} \left( -(\epsilon_1 - \epsilon_2) + \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + 4\omega^2} \right), \quad (3)$$

где  $\epsilon_0 = \gamma M_s$ ,  $\epsilon_1 = 4\gamma\pi M_s + \gamma(H + \beta M_s)$ ,  $\epsilon_2 = \gamma(H + \beta M_s)$ ,  $\beta = 2K_1/M_s^2$ ,  $\alpha_{обм} = 2A_{обм}/M_s^2$ .

Значение  $k_-$  всегда мнимое для любых  $\omega$ ,  $k_+$  является мнимым при  $\omega < \sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}$  и действительным при  $\omega > \sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}$ .

Для рассматриваемых плёнок экспериментальные частоты  $\omega < \sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}$ , следовательно,  $k_+$  — мнимый.

Анализ, проведённый по формуле (3), показал, что у рассматриваемых образцов спиновые волны имеют волновые числа  $|k_+| \sim 10^5$  см<sup>-1</sup> и частоты, удовлетворительно совпадающие с расчётными  $f_{max}/2$  и  $f_{min}/2$  (табл. 2).

Таблица 3

**Волновое число и частотная зависимость параметров закрепления спинов**

Состав	$\delta f$ , ГГц	$\delta k_+  \cdot 10^{-5}$ , см <sup>-1</sup>	$\delta d^s$ , см <sup>-1</sup>	$\delta L$ , нм
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2,7 ÷ 3,8	4,4 ÷ 6,9	-(36,0 ÷ 2,7)	2596 ÷ 170
Mn <sub>0,65</sub> Fe <sub>2,35</sub> O <sub>4</sub>	2,7 ÷ 3,9	4,5 ÷ 6,9	-(36,0 ÷ 3,0)	1510 ÷ 91
Mg <sub>0,25</sub> Mn <sub>0,75</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3,1 ÷ 3,9	3,1 ÷ 3,8	-(23,6 ÷ 3,3)	1223 ÷ 163

С уменьшением частоты волновой вектор обменных спиновых волн уменьшается.

Расстояние между частотами сателлитов в спектре ПМСВ составляет 81 ÷ 262 МГц. Изменение волнового числа  $\delta|k_+|$ , величины поверхностного слоя  $\delta L$  в диапазоне частот  $\delta f$  и частотная зависимость параметра закрепления спинов на межфазной границе  $\delta d^s$ , найденные из спектров ПМСВ, представлены в табл. 3.

Согласно [14], зависимость между эффективным параметром закрепления спинов на поверхности плёнки и волновым числом  $k_+$  принимает вид

$$k_+ \operatorname{tg}(k_+ L/2) = -d^{s*}. \quad (4)$$

На низких частотах ( $\omega \ll 2\pi M_s$ ) эффективное закрепление спинов оказывается малым:

$$d^{s*}/d^s = \left( \frac{\omega}{4\gamma\pi M_s} \right)^2 \ll 1. \quad (5)$$

При этом волновой вектор  $k_+$  будет близок к значениям  $k_z = \pi p/L$ . С использованием этого соотношения, из значений  $k_+$  и  $p$  были определены величины поверхностного слоя, им соответствующие.

Зависимость эффективного параметра закрепления от частоты имеет вид

$$d^{s*} = \frac{d^s}{2} \left( 1 - \left( 1 + (2\omega/\omega_M)^2 \right)^{-1/2} \right). \quad (6)$$

Из зависимостей (4)–(6) следует, что параметр закрепления спинов  $d^s$  изменяется от частоты  $\omega$  в пределах от  $10^6$  см<sup>-1</sup> до  $10^5$  см<sup>-1</sup> и имеет отрицательный знак.

Константа поверхностной анизотропии  $K^s \sim d^s A_{\text{обм}}$  составляет по спектрам МСВ  $\sim 1,2 \div 1,9$  эрг/см<sup>-2</sup>, что по порядку величины удовлетворительно совпадает с  $K^s$ , определённой по величине одноосной анизотропии в плёнках и глубине поверхностного слоя при микроиндентировании [11].

Для рассматриваемых плёнок феррошпинелей полярный угол  $\theta$  между  $k'$  и  $k_+$  составляет величину  $\sin \theta = |k'|/|k_+| \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$ , поэтому можно считать, что параметрические обменные спиновые волны распространяются вдоль постоянного магнитного поля.

Минимальная толщина поверхностного слоя  $L_{\text{min}}$ , соответствующая спин-волновым модам, согласуется с глубиной рельефа АСМ, обнаруженного методом сканирующей зондовой микроскопии [11]. Величина  $L_{\text{max}}$  соответствует толщине поверхностного слоя, измеренного по зависимости микротвёрдости от глубины внедрения индентора [7].

**Выводы.** Изменение величины  $\Delta k''$  затухания ПМСВ от химического состава плёнок находится в соответствии с зависимостью концентрации доноров, определённой методом термо-ЭДС. Чем выше концентрация  $\text{Fe}^{2+}$ , тем больше величина изменения затухания ПМСВ от частоты.

Нелинейность АЧХ свидетельствует о параметрической нестабильности первого порядка, при котором ПМСВ возбуждают обменные спиновые волны. Эти волны распространяются вдоль направления магнитного поля. Волновые числа обменных спиновых волн  $|k_{\pm}| \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ .

Возникновение особенностей в АЧХ плёнок феррошпинелей связано с закреплением спинов на межфазной границе между поверхностным слоем и плёнкой. Параметр закрепления спинов  $d^s$  с увеличением частоты изменяется на порядок с  $10^6$  до  $10^5 \text{ см}^{-1}$  и имеет отрицательный знак. Константа поверхностной анизотропии  $K^s$  из анализа спектров МСВ  $\sim 1,2 \div 1,9 \text{ эрг/см}^{-2}$  не противоречит значениям, полученным из спектров поглощения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анфиногенов В. Б., Высоцкий С. Л., Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Казаков Г. Т., Луговской А. В., Мuryахин А. В., Медников А. М., Нам Б. П., Никитов Ю. Ф., Огрин Ю. П., Ползиков Н. И., Раевский А. О., Сухарев А. Г., Темирязов А. Г., Тихомирова М. П., Тихонов В. В., Филимонов Ю. А., Хе А. С. Устройства на основе спиновых волн для обработки радиосигналов в диапазоне частот 50 МГц–20 ГГц // *Радиоэлектроника*, 2000. № 8. С. 6–14; англ. пер.: Anfinogenov V. B., Vysotskiy S. L., Gulyayev YU. V., Zil'berman P. E., Kazakov G. T., Lugovskoy A. V., Miryakhin A. V., Mednikov A. M., Nam B. P., Nikitov YU. F., Ogrin Yu. P., Polzikov N. I., Rayevskiy A. O., Sukharev A. G., Temiryazev A. G., Tikhomirova M. P., Tikhonov V. V., Filimonov YU. A., Khe A. S. Spin-wave based devices for processing radio signals in the frequency range 50 MHz–20 GHz // *Radio and communications technology*, 2000. Vol. 5, no. 8. Pp. 4–12.
2. Анфиногенов В. Б., Зильберман П. Е., Митлина Л. А., Сидоров А. А., Тихонов В. В. Наблюдение и распространение магнитостатических волн плёнках феррошпинели // *Письма в журнал технической физики*, 1986. Т. 12, № 6. С. 996–999. [Anfinogenov V. B., Zil'berman P. E., Mitlina L. A., Sidorov A. A., Tikhonov V. V. Observation of magnetostatic wave propagation in a ferrosipinel films // *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1986. Vol. 12, no. 6. Pp. 996–999].
3. Анфиногенов В. Б., Зильберман П. Е., Митлина Л. А., Сидоров А. А., Тихонов В. В. Магнитостатические волны в плёнках феррошпинели / В сб.: *Спиновые явления техники СВЧ*: Тез. докл. региональной конференции. Краснодар, 1987. С. 37–38. [Anfinogenov V. B., Zil'berman P. E., Mitlina L. A., Sidorov A. A., Tikhonov V. V. Magnetostatic waves in a ferrosipinel films / In: *Spin phenomena in microwave technology*. Krasnodar, 1987. Pp. 37–38].
4. Анфиногенов В. Б., Митлина Л. А., Попков А. Ф., Сидоров А. А., Сорокин В. Г., Тихонов В. В. Магнитостатические волны в плёнках феррошпинели // *Физика твёрдого тела*, 1988. Т. 30, № 7. С. 2032–2039. [Anfinogenov V. B., Mitlina L. A., Popkov A. F., Sidorov A. A., Sorokin V. G., Tikhonov V. V. Magnetostatic waves in a ferrosipinel film // *Fizika Tverdogo Tela*, 1988. Vol. 30, no. 7. Pp. 2032–2039].
5. Сорокин В. Г., Лавренов А. А. Магнитостатические волны в монокристаллических плёнках марганцевого феррита // *Микроэлектроника и полупроводниковые приборы*, 1989. № 3. С. 85–95. [Sorokin V. G., Lavrenov A. A. Magnetostatic waves in single-crystal films of manganese ferrite // *Mikroelektronika i poluprovodnikovyye pribory*, 1989. no. 3. Pp. 85–95].
6. Митлина Л. А., Великанова Ю. В., Ерендеев Ю. П., Ляшенко С. В., Сидоров А. А., Кривошеева Е. В. Анализ характеристик МСВ, распространяющихся в ферритовых плёнках // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004. № 27. С. 25–

32. [Mitlina L. A., Velikanova Yu. V., Ereendev Yu. P., Lyashenko S. V., Sidorov A. A., Krivosheeva E. V. Characterization of Magnetostatic Waves in Ferrite Films // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2004. Vol. 27. Pp. 25–32].
7. Митлина Л. А., Великанова Ю. В., Виноградова М. Р., Бадртдинов Г. С. Затухание спиновых колебаний и волн в плёнках феррошпинелей // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2005. № 34. С. 82–90. [Mitlina L. A., Velikanova Yu. V., Vinogradova M. R., Badrtidinov G. S. Damping of spin fluctuations and waves in spinel ferrite films // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2005. Vol. 34. Pp. 82–90].
8. Митлина Л. А., Великанова Ю. В. Влияние потерь на параметры поверхностных магнитостатических волн // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2006. № 42. С. 98–102. [Mitlina L. A., Velikanova Yu. V. Loss effect on magnetostatic surface waves // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2006. no. 42. Pp. 98–102].
9. Мелков Г. А., Шолом С. В. Параметрическое возбуждение спиновых волн поверхностной магнитостатической волной // *ЖЭТФ*, 1989. Т. 96, № 2(8). С. 712–719; англ. пер.: Melkov G. A., Sholom S. V. Parametric excitation of spin waves by a surface magnetostatic wave // *Sov. Phys. JETP*, 1989. Vol. 69, no. 2. Pp. 403–407.
10. Высокый С. Л., Казаков Г. Т., Филлимонов Ю. А., Мурашкин А. В. Объёмные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых плёнках // *ЖТФ*, 1998. Т. 68, № 7. С. 97–110; англ. пер.: Vysotskii S. L., Kazakov G. T., Filimonov Yu. A., Maryakhin A. V. Magnetostatic volume waves in exchange-coupled ferrite films // *Technical Physics*, 1998. Vol. 43, no. 7. Pp. 834–845.
11. Митлина Л. А., Бадртдинов Г. С., Великанова Ю. В., Виноградова М. Р., Никифорова И. В. Спин-волновой резонанс в плёнках феррошпинелей, намагниченных перпендикулярно поверхности // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2011. № 4(25). С. 125–133. [Mitlina L. A., Badrtidinov G. S., Velikanova Yu. V., Vinogradova M. R., Nikiforova I. V. Spin-wave resonance in ferrosinell films magnetized perpendicular to the surface // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2011. no. 4(25). Pp. 125–133].
12. Митлина Л. А., Колосова И. В., Харламов А. Д. Влияние термообработки на аномалии электропроводности в области температуры Кюри в эпитаксиальных феррошпинелях // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 1996. № 4. С. 145–152. [Mitlina L. A., Kolosova I. V., Kharlamov A. D. Influence of heat treatment on electric conductivity anomalies in Curie temperature zone in epitaxial ferrosinell // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 1996. no. 4. Pp. 145–152].
13. Митлина Л. А., Харламов А. Д., Колосова И. В., Левин А. Е. Структурные дефекты и явления переноса в эпитаксиальных феррошпинелях // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 1998. № 6. С. 46–54. [Mitlina L. A., Kharlamov A. D., Kolosova I. V., Levin A. E. Structural defects and transport phenomena in epitaxial spinel ferrite // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 1998. no. 6. Pp. 46–54].
14. Саланский Н. М., Ерухимов М. Ш. Физические свойства и применения магнитных плёнок. Новосибирск: Наука, 1975. 220 с. [Salansky N. M., Erukhimov M. Sh. Physical properties and application of magnetic films. Novosibirsk: Nauka, 1975. 220 pp.]

Поступила в редакцию 20/V/2012;  
в окончательном варианте — 14/X/2012.

MSC: 82D40; 82D25, 74K35

## **THE INFLUENCE OF INHOMOGENEOUS EXCHANGE ON THE PROPAGATION OF SURFACE DAMON–ESCHBACH WAVES IN THE FERROSPINELS FILMS**

*L. A. Mitlina, G. S. Badrtdinov, Yu. V. Velikanova, M. R. Vinogradova*

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia.

E-mails: physics@samgtu.ru, gregori2000@mail.ru, juliavl@mail.ru

*The law of magnetostatic waves dispersion in the manganese and magnesium-manganese ferrosinels films was investigated using the moving-transducer method. The wave numbers, phase and group velocities of magnetostatic waves are defined. The excitation of spin-wave waves in the surface layer of the film is found. The wave numbers, spin pinning options, their frequency dependences and surface anisotropy constants are calculated.*

**Key words:** *ferrosinels films, magnetostatic waves, exchange spin waves, surface anisotropy constant.*

Original article submitted 20/V/2012;  
revision submitted 14/X/2012.

---

*Ludmila N. Mitlina* (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor, of General Physics & Physics of Oil and Gas Production .

*Gregori S. Badrtdinov*, Assistant, of General Physics & Physics of Oil and Gas Production.  
*Yulia V. Velikanova* (Ph. D. (Phys. & Math.)), Associate Professor, of General Physics & Physics of Oil and Gas Production.

*Margarita R. Vinogradova* (Ph. D. (Phys. & Math.)), Associate Professor, Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production.