

УДК 539.216.2:537.622.6

## МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ МОДЫ В КАСАТЕЛЬНО НАМАГНИЧЕННЫХ ПЛЁНКАХ ФЕРРОШПИНЕЛЕЙ

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

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

*Рассмотрены спектры поглощения в плёнках феррошпинелей, полученных методом химических транспортных реакций. Показано, что при исследовании спектра поглощения в плёнках марганцевых и магний-марганцевых ферритов, намагниченных параллельно поверхности, регистрируются дополнительные пики поглощения. Эти пики рассматриваются как магнитоэлектрические моды. По экспериментальным значениям намагниченности насыщения, констант кристаллографической анизотропии и магнитных полей наблюдаемых мод получены значения волновых чисел, групповых скоростей и параметров затухания. Наблюдается осцилляция затухания поверхностных магнитоэлектрических мод в зависимости от частоты. Показано, что частоты поверхностных мод лежат внутри интервала объёмных магнитоэлектрических мод, а параметры затухания зависят от константы поверхностной анизотропии, параметра закрепления спинов и длины волны колебаний магнитного момента.*

**Ключевые слова:** *плёнки феррошпинелей, спектры поглощения, магнитоэлектрические моды, параметры затухания поверхностных мод, константа поверхностной анизотропии.*

**Введение.** Одно из перспективных направлений создания устройств аналоговой обработки информации в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) состоит в использовании магнитоэлектрических волн (МЭВ), распространяющихся в ферритовых плёнках [1]. Дисперсионные свойства спиновых волн и эффективность их возбуждения в плёнках феррошпинелей и иттрий-железистого граната, применяемого для СВЧ-устройств, одинаковы [1, 2]. Высокая намагниченность и большие поля анизотропии в плёнках феррошпинелей делают перспективным их применение в верхней части их диапазона, включая миллиметровый диапазон частот [1–4].

Исследование ферромагнитного резонанса (ФМР) в плёнках феррошпинелей наряду с исследованием МЭВ [1–4] продолжает оставаться актуальным — оно даёт важную информацию о физических свойствах плёнок и протекающих в них спин-волновых процессах. В работах [5–7] исследовался спектр

ISSN: 2310-7081 (online), 1991-8615 (print); doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1263>

© 2014 Самарский государственный технический университет.

**Образец цитирования:** Л. А. Митлина, Г. С. Бадртдинов, Ю. В. Великанова, “Магнитоэлектрические моды в касательно намагниченных плёнках феррошпинелей” // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2014. № 2 (35). С. 168–179. doi: [10.14498/vsgtu1263](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1263).

**Сведения об авторах:** *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.

**E-mail addresses:** [physics@samgtu.ru](mailto:physics@samgtu.ru) (L.A. Mitlina), [gregori2000@mail.ru](mailto:gregori2000@mail.ru) (G.S. Badrtdinov), [juliavl@mail.ru](mailto:juliavl@mail.ru) (Yu.V. Velikanova, *Corresponding author*)

ФМР в 3-сантиметровом диапазоне длин волн в плёнках толщиной  $10 \div 30$  мкм марганцевых и литиевых феррошпинелей. Неоднородные моды в плёнках марганцевых ферритов [5], искажающие вид кривой ФМР, связываются с неоднородностью деформации плёнок. Спектры ФМР в плёнках многокомпонентных феррошпинелей на основе лития [6] согласуются с моделью объёмной неоднородности намагниченности.

В данной работе рассмотрено влияние химического состава на спектры поглощения, полученные на электронном парамагнитном резонансном (ЭПР) спектрометре, в монокристаллических плёнках марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей. Оцениваются величина константы поверхностной анизотропии и параметр закрепления спинов.

**1. Объекты и методы исследований.** Для исследования были выбраны плёнки толщиной  $d \sim (15 \div 30)$  мкм, выращенные методом химических транспортных реакций на сколах (001) плоскости окиси магния.

По данным микроструктурного анализа, проведённого на микроанализаторе *Samеsa*, и рентгеноструктурного анализа, синтезированные образцы однофазны и имеют структуру феррошпинели.

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

Константа обменного взаимодействия  $A_{\text{exch}}$  оценивалась по температуре Кюри [3], полученной из зависимости удельного сопротивления от температуры.

Одной из существенных характеристик плёнок феррошпинелей, полученных методом химических транспортных реакций, является их блочность и неоднородность деформации по толщине плёнок. В частности, градиент термических напряжений по толщине плёнок составляет  $\Delta\sigma_a \sim (3 \div 10)$  МПа и зависит от соотношения толщины плёнки и подложки.

Размер блоков, их разориентация зависят от химического состава и технологических условий. Разориентация блоков плёнки выше, чем подложек, где  $\theta \sim 3'$  [8], и увеличивается при изменении химического состава в сторону обогащения марганцем  $\theta \sim (10' \div 20')$ . Размеры блоков, по данным оптической микроскопии, составляют  $\theta \sim 10^{-2}$  см.

Методом сканирующей зондовой микроскопии исследовалось изменение рельефа поверхности плёнок, полученных при различных технологических условиях [9]. В области сканирования наблюдаются нанопирамидки (рис. 1).

Высота поверхностного слоя зависит от технологических условий роста и составляет  $(100 \div 160)$  нм.

Параметр закрепления спинов  $d^s$  определяется значениями обменной константы  $\alpha_{\text{exch}}$ , безразмерной константы одноосной анизотропии  $\beta$  и толщины поверхностного слоя  $h$  [10]:

$$d^s = \beta h / \alpha_{\text{exch}},$$

где  $\alpha_{\text{exch}} = 2A_{\text{exch}}/M_s^2$  — обменная константа,  $\beta = 2K_U/M_s^2$  — безразмерная константа одноосной анизотропии,  $K_U$  — константа одноосной анизотропии,  $M_s$  — намагниченность насыщения. Длина волны колебания магнитного момента плёнок определяется выражением  $\lambda = \sqrt{\alpha_{\text{exch}}/\beta}$ .

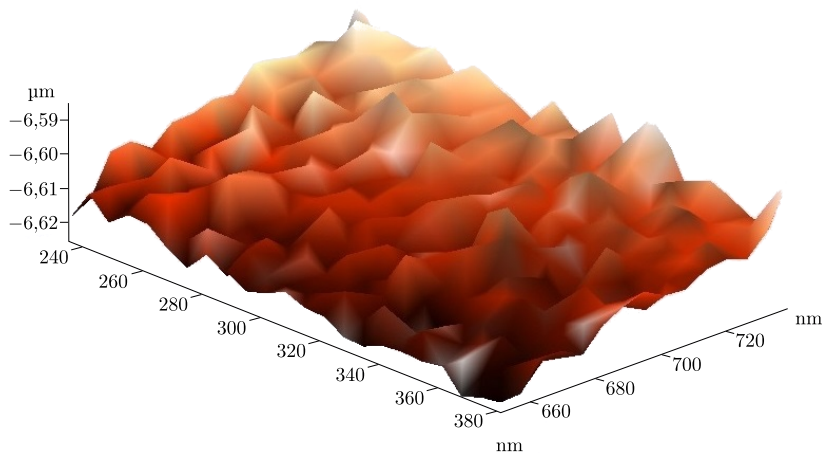


Рис. 1. Рельеф поверхности плёнки исходного состава  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , полученный на атомно-силовом микроскопе

[Figure 1. Surface topography of films with the initial  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_2\text{O}_4$  composition (from the data of atomic force microscopy)]

Толщина поверхностного слоя определялась из зависимости микротвёрдости от глубины внедрения индентора  $h \sim (1.5 \div 2.5)$  мкм [3]. Используя данные о величине нарушенного слоя на поверхности и определяя параметр закрепления спинов, можно вычислить константу поверхностной анизотропии [10], определяемую выражением  $K^s = d^s A_{\text{exch}}$ .

**2. Результаты эксперимента и их обсуждение.** Дисперсионная зависимость спектра магнитостатических мод при  $H \parallel \langle 100 \rangle$  выражается формулой [11]

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

где

$$\omega_M = 4\gamma\pi M_s, \quad \omega_H = \gamma(H + \beta M_s), \quad \beta = 2K_1/M_s,$$

$\gamma$  — гиромангнитное соотношение. Используя экспериментальные значения  $H_k$  (рис. 2, 3) на спектрах поглощения при касательном намагничивании, толщину плёнок  $d$ , намагничённость насыщения, константы кристаллографической анизотропии, можно получить значения волнового числа  $k'$ .

Чем выше градиент термических напряжений, тем большее число пиков наблюдается (см. рис. 2, 3).

На рис. 4, 5 представлены результаты расчета дисперсионной зависимости, полученные по формуле (1).

Для рассматриваемых плёнок отличаются диапазоны частот и границы изменения волновых чисел. Ширина области возбуждения магнитостатических мод  $\Delta f$  находится в соответствии с изменениями параметра затухания (табл. 1). Параметр затухания  $\alpha$  определяли по спектрам ФМР на частоте 9.35 ГГц. Чем больше параметр затухания и выше намагничённость насыщения, тем шире область возбуждения магнитостатических мод.

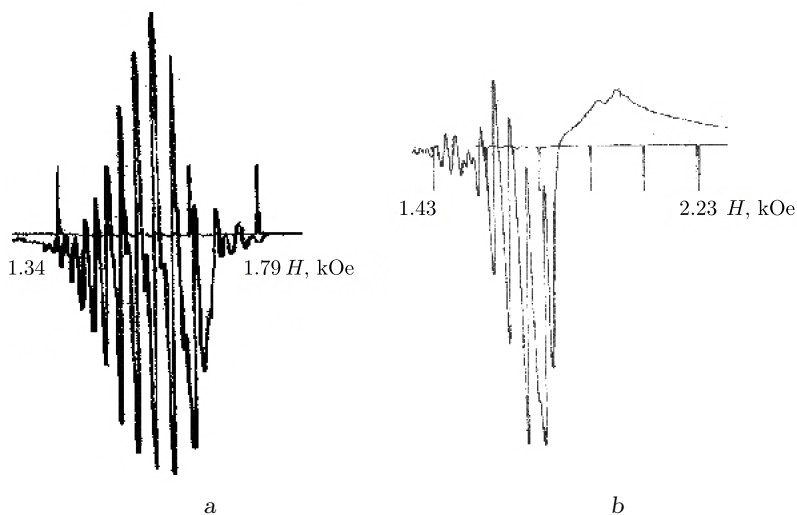


Рис. 2. Кривые резонансного поглощения в касательном поле плёнок состава  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$ : а) образец 1 ( $d \sim 34$  мкм,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 11$  МПа); б) образец 3 ( $d \sim 20$  мкм,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 6$  МПа)

[Figure 2. Resonant absorption curves of the  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  film in the tangential field. Here case (a) shows sample No. 1 ( $d \sim 34$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 11$  MPa) and case (b) shows sample No. 3 ( $d \sim 20$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 6$  MPa)]

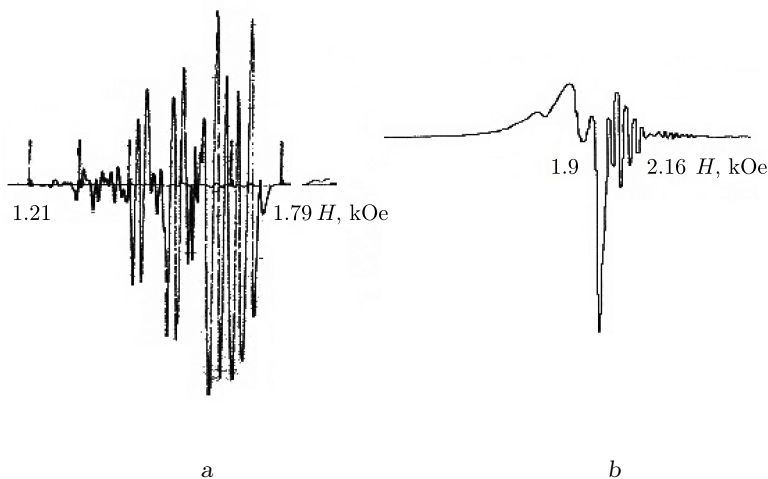


Рис. 3. Кривые резонансного поглощения в касательном поле плёнок состава  $\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (а) и  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (б): а) образец 2 ( $d \sim 30$  мкм,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 9.7$  МПа); б) образец 4 ( $d \sim 15$  мкм,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 3$  МПа)

[Figure 3. Resonant absorption curves of the  $\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  film (case a, sample No. 2) and  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  film (case b, sample No. 4) in the tangential field. Here case (a) shows sample No. 2 ( $d \sim 30$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 9.7$  MPa) and case (b) shows sample No. 4 ( $d \sim 15$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta\sigma_\alpha \sim 3$  MPa)]

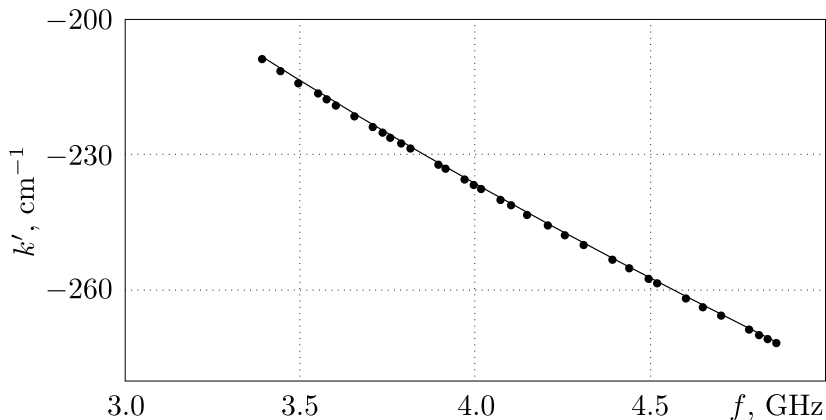


Рис. 4. Дисперсионная зависимость магнитостатических мод для плёнки состава  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  (образец 1;  $4\pi M_s \sim 2788$  Гс,  $K_1 = 3.8 \cdot 10^4$  эрг·см $^{-3}$ ,  $K_U = 5.6 \cdot 10^3$  эрг·см $^{-3}$ )

[Figure 4. Dispersion dependence of the magnetostatic modes for the  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  film (sample No. 1;  $4\pi M_s \sim 2788$  Gs,  $K_1 = 3.8 \cdot 10^4$  erg·cm $^{-3}$ ,  $K_U = 5.6 \cdot 10^3$  erg·cm $^{-3}$ )]

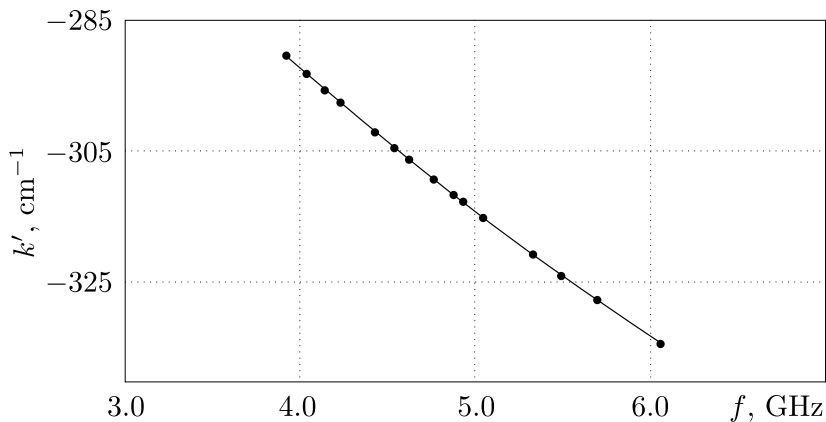


Рис. 5. Дисперсионная зависимость магнитостатических мод для плёнки состава  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (образец 4;  $4\pi M_s \sim 4949$  Гс,  $K_1 = 4.3 \times 10^4$  эрг·см $^{-3}$ ,  $K_U = 1.5 \cdot 10^4$  эрг·см $^{-3}$ )

[Figure 5. Dispersion dependence of the magnetostatic modes for the  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  film (sample No. 4;  $4\pi M_s \sim 4949$  Gs,  $K_1 = 4.3 \cdot 10^4$  erg·cm $^{-3}$ ,  $K_U = 1.5 \cdot 10^4$  erg·cm $^{-3}$ )]

Таблица 1

Границы изменения волновых чисел, ширина области возбуждения магнитостатических мод плёнок феррошпинелей (данные ФМР при  $f = 9.75$  ГГц) [Frequency Range of Magnetostatic Mode Excitation in Ferrosipinel Films and Extinction Coefficients (Ferromagnetic Resonance (FMR) Data at  $f = 9.75$  GHz)]

№ [Serial number of the sample]	Исходный состав [Chemical composition of the films]	$4\pi\omega_M$ , GHz	$\alpha \cdot 10^{-2}$	$\Delta f$ , GHz	$\Delta k$ , $\text{cm}^{-1}$	$\Delta\lambda$ , $\mu\text{m}$
1	$\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$	49.1	1.05	1.18	44(251÷207)	244 ÷ 303
2	$\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$	57.0	1.08	1.46	63(271÷208)	231 ÷ 301
3	$\text{Mn}_{1.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_4$	49.7	1.12	1.62	72(282÷213)	228 ÷ 294
4	$\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_2\text{O}_4$	87.1	3.20	2.17	94(335÷290)	187 ÷ 217

Таблица 2

Границы частот поверхностных магнитостатических мод  
[Frequency Range of Surface Magnetostatic Modes]

Serial number of the sample	$\omega \cdot 10^{-10}$ , Hz	$ \mu $	$\text{tg } \varphi$	$\varphi$	$\omega_H \cdot 10^{-10}$ , Hz	$\omega_C \cdot 10^{-10}$ , Hz
1	2.688	4.28	2.069	$64^\circ 10'$	2.33	2.74
2	3.208	4.42	2.101	$64^\circ 30'$	2.80	3.23
3	2.821	3.03	1.741	$60^\circ 08'$	2.14	2.93
4	3.45	9.65	3.105	$72^\circ 10'$	3.07	3.49

Таблица 3

Коэффициент поверхностной анизотропии и среднее значения коэффициентов затухания ПМСМ  
[Coefficients of Surface Anisotropy and Average SMSM Extinction Coefficients]

Serial number of the sample	$K^s$ , $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\lambda \cdot 10^{-6}$ , cm	$k''$ , $\text{cm}^{-1}$	$f$ , GHz	$d^s \cdot 10^{-6}$ , $\text{cm}^{-1}$
1	1.11	4.96	$1.25 \div 2.30$	$3.8 \div 4.4$	2.02
2	0.41	26.3	$1.45 \div 1.75$	$3.5 \div 4.5$	0.79
3	0.76	10.6	$3.20 \div 8.40$	$2.5 \div 3.3$	1.39
4	2.57	5.8	$1.87 \div 6.26$	$4.0 \div 5.5$	6.34

В касательно намагниченной плёнке перпендикулярно магнитному полю распространяются поверхностные магнитостатические моды (ПМСМ), частоты которых лежат в интервале

$$\omega_0 < \omega < \omega_{\text{DE}} = \omega_H + \omega_M/2,$$

где  $\omega_{\text{DE}}$  — частота Деймона—Эшбаха, а параллельно магнитному полю — обратные объёмные магнитостатические моды (ОМСМ) в частотном диапазоне

$$\omega_H < \omega < \omega_0, \quad (2)$$

где  $\omega_0 = [\omega_H(\omega_H + \omega_M)]^{1/2}$ . ПМСМ ожидаются в плёнках ниже однородного резонанса, ОМСМ будут располагаться выше однородного резонанса. Для всех рассматриваемых составов объёмные магнитостатические моды находятся в частотном диапазоне (1). Объёмные волны существуют только при диагональной компоненте тензора магнитной проницаемости  $\mu < 0$ . Расчёт по формуле [12]

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

показывает, что  $\mu < 0$  для всех рассматриваемых образцов во всём диапазоне (1) наблюдаемых поверхностных магнитостатических мод (рис. 6).

Для поверхностных мод, когда  $\mu \leq 0$ , т. е. при  $\mu \leq \text{tg}^2 \varphi = \omega_H/\omega_M$ , магнитостатические моды наблюдаются в диапазоне частот [12]

$$\omega_H \leq \omega \leq \omega_C = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H \omega_M \cos^2 \varphi}.$$

Определив угол между векторами  $k'$  и  $H$ , получим согласие экспериментальных данных с диапазоном частот поверхностных магнитостатических мод, наблюдаемых ниже однородного резонанса (см. табл. 2).

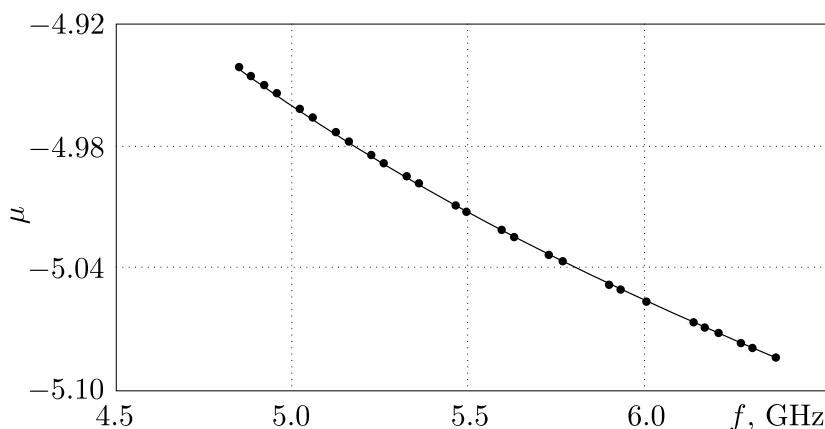


Рис. 6. Зависимость диагональной компоненты тензора магнитной проницаемости от частоты для плёнки состава  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  (образец 1)

[Figure 6. Frequency dependence of the diagonal components of the magnetic permeability tensor for the  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  film (sample No. 1)]

Такие волны существуют в связанных структурах с разными намагниченностями слоёв [13]. Объёмные волны в системе из двух ферромагнетиков имеют объёмный характер только в первом ферромагнетике, во втором они экспоненциально убывают при удалении от поверхности, поэтому частоты поверхностных волн в такой системе всегда лежат внутри интервала частот объёмных магнитостатических мод.

При магнитостатических колебаниях групповая скорость может быть вычислена согласно [15]

$$v_{\text{gr}} = \frac{d\omega}{dk} = 4\sqrt{2} \frac{(\omega_{\text{DE}} - \omega)^{3/2}c}{\sqrt{\omega_M \omega_{\text{DE}} \sqrt{1 - \varepsilon}}},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $c$  — скорость света. Групповая скорость магнитостатических колебаний меньше скорости света, что свидетельствует о существовании дополнительного (немагнитного) механизма затухания таких волн.

Групповая скорость  $v_{\text{gr}}$  имеет порядок  $10^7 \div 10^8$  см/с (рис. 7, 8), что не противоречит групповой скорости для тех же составов, определённых для ПМСВ методом подвижного преобразователя [2–4].

Рассмотрим затухание магнитостатических колебаний плёнок, спектры поглощения которых изображены на рис. 2 и 3. При этом параметр затухания магнитостатических волн исходя из соотношений, приведённых в работах [11, 14], может быть рассчитан по формуле

$$k'' = \gamma \Delta H_k (1 + 2\omega_M / \omega_H) / v_{\text{gr}} \ll k'.$$

На рис. 9 представлен спектр потерь поверхностных магнитостатических мод (ПМСМ) для плёнки состава  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (образец 4). Для всех рассматриваемых образцов наблюдается осцилляция затухания ПМСМ в зависимости от частоты.

Картина осцилляций затухания зависит от обменной константы  $\alpha_{\text{exch}}$ , величины поверхностной анизотропии  $K^s$ , параметра закрепления спинов  $d^s$  и длины колебания магнитного момента  $\lambda$  (табл. 3). С увеличением параметров  $K^s$ ,  $d^s$  и уменьшением параметров  $\alpha_{\text{exch}}$ ,  $\lambda$  количество осцилляций уменьшается, а глубина осцилляций возрастает (рис. 9).

Диапазон изменения коэффициента затухания от частоты является наибольшим для плёнки  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  (образец 3) и для плёнок исходного состава  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (образец 4). По данным исследования ферромагнитного резонанса, этим образцам соответствует эффективный параметр спектроскопического расщепления  $q_{\text{eff}} \sim 2.12$  и  $q_{\text{eff}} \sim 2.22$ , что косвенно указывает на присутствие в них ионов  $\text{Fe}^{2+}$  [16]. Данные для констант поверхностной анизотропии  $K^s$  рассматриваемых химических составов (см. табл. 3) не противоречат данным для плёнок других материалов [10], где указываются значения  $K^s \sim 0.1 \div 2$  эрг·см<sup>-2</sup>.

**Закключение.** В результате проведённых исследований было установлено следующее:

- при касательном намагничивании в плёнках марганцевых и магний-марганцевых феррошпинелей наблюдаются магнитостатические колебания с волновым вектором  $k' \sim 10^2$  см<sup>-1</sup> и групповой скоростью  $v_{\text{gr}} \sim (10^7 - 10^8)$  см/с;



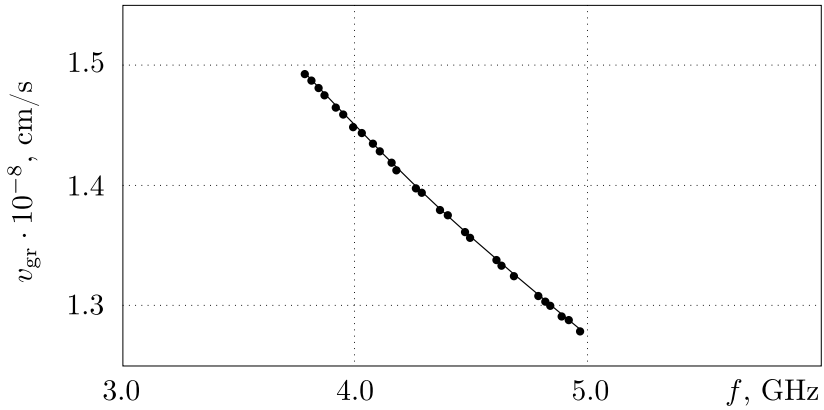


Рис. 7. Зависимость групповой скорости от частоты для плёнки состава  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  (образец 1)

[Figure 7. Frequency dependence of the group velocity for the  $\text{Mn}_{1.22}\text{Fe}_{1.78}\text{O}_4$  film (sample No. 1)]

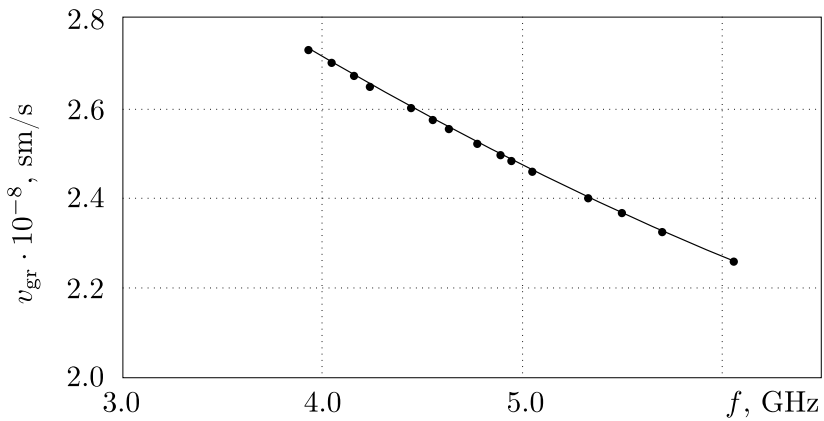


Рис. 8. Зависимость групповой скорости от частоты для плёнки состава  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (образец 4)

[Figure 8. Frequency dependence of the group velocity for the  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  film (sample No. 4)]

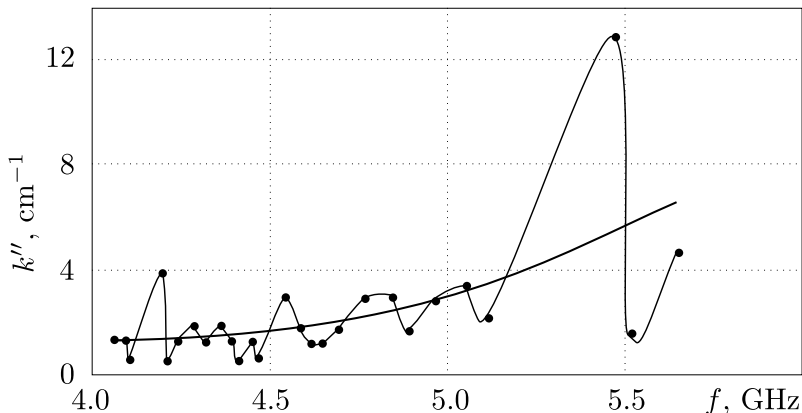


Рис. 9. Зависимость декремента ПМСМ от частоты для плёнки исходного состава  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  (образец 4;  $\alpha_{\text{exch}} = 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ )

[Figure 9. Frequency dependence of the surface magnetostatic modes (SMSM) decrement for the film with initial  $\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$  composition (sample No. 4;  $\alpha_{\text{exch}} = 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ )]

- частоты поверхностных мод лежат внутри интервала объёмных магнитостатических мод, поскольку во всём диапазоне наблюдаемых мод диагональная компонента магнитной проницаемости отрицательна;
- в зависимости от частоты наблюдаются осцилляции затухания ПМСМ, картина осцилляций затухания зависит от обменной константы  $\alpha_{\text{exch}}$ , величины поверхностной анизотропии  $K^s$ , параметра закрепления спинов  $d^s$  и длины колебания магнитного момента  $\lambda$ ;
- наибольший диапазон затухания ПМСМ в зависимости от частоты наблюдается в плёнках, имеющих  $q_{\text{eff}} \sim 2,22$ ,  $\alpha_{\text{exch}} \sim 10^{-12} \text{ см}^2$ , что характерно для содержания в них ионов  $\text{Fe}^{2+}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. В. Б. Анфиногенов, С. Л. Высоцкий, Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Г. Т. Казаков, А. В. Луговской, А. В. Миряхин, А. М. Медников, Б. П. Нам, Ю. Ф. Никитов, Ю. П. Огрин, Н. И. Ползиков, А. О. Раевский, А. Г. Сухарев, А. Г. Темирязов, М. П. Тихомирова, В. В. Тихонов, Ю. А. Филимонов, А. С. Хе, “Устройства на основе спиновых волн для обработки радиосигналов в диапазоне частот 50 МГц–20 ГГц” // *Радиотехника*, 2000. № 8. С. 6–14; V. B. Anfinogenov, S. L. Vysotskiy, Yu. V. Gulyayev, P. E. Zil’berman, G. T. Kazakov, A. V. Lugovskoy, A. V. Miryakhin, A. M. Mednikov, B. P. Nam, Yu. F. Nikitov, Yu. P. Ogrin, N. I. Polzikov, A. O. Rayevskiy, A. G. Sukharev, A. G. Temiryazev, M. P. Tikhomirova, V. V. Tikhonov, Yu. A. Filimonov, A. S. Khe, “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. В. Б. Анфиногенов, Л. А. Митлина, А. Ф. Попков, А. А. Сидоров, В. Г. Сорокин, В. В. Тихонов, “Магнитостатические волны в плёнках феррошпинели” // *Физика твёрдого тела*, 1988. Т. 30, № 7. С. 2032–2039. [V. B. Anfinogenov, L. A. Mitlina, A. F. Popkov, A. A. Sidorov, V. G. Sorokin, V. V. Tikhonov, “Magnetostatic waves in a ferrosphenel film”, *Fizika Tverdogo Tela*, 1988, vol. 30, no. 7, pp. 2032–2039 (In Russian)].
3. Л. А. Митлина, Ю. В. Великанова, М. Р. Виноградова, Г. С. Бадртдинов, “Затухание спиновых колебаний и волн в плёнках феррошпинелей” // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2005. № 34. С. 82–90 doi: [10.14498/vsgtu341](https://doi.org/10.14498/vsgtu341). [L. A. Mitlina,

- Yu. V. Velikanova, M. R. Vinogradova, G. S. Badrtdinov, "Damping of spin fluctuations and waves in spinel ferrite films", *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2005, no. 34, pp. 82–90 (In Russian)].
4. Л. А. Митлина, Г. С. Бадртдинов, Ю. В. Великанова, М. Р. Виноградова, "Влияние неоднородного обмена на распространение поверхностных волн Деймона–Эшбаха в плёнках феррошпинелей" // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2012. № 4(29). С. 171–179 doi: [10.14498/vsgtu1086](https://doi.org/10.14498/vsgtu1086). [L. A. Mitlina, G. S. Badrtdinov, Yu. V. Velikanova, M. R. Vinogradova, "The influence of inhomogeneous exchange on the propagation of surface Damon–Eshbach waves in the ferros spinels films", *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2012, no. 4(29), pp. 171–179 (In Russian)].
  5. Л. А. Митлина, А. А. Сидоров, А. Д. Харламов, "Неоднородные моды ФМР в плёнках марганцевых феррошпинелей" // *Изв. вузов. Физика*, 1987. № 11. С. 57–61; L. A. Mitlina, A. A. Sidorov, A. D. Kharlamov, "Nonuniform FMR modes in manganese ferros spinel films", *Sov. Phys. J.*, 1987, vol. 30, no. 11, pp. 952–956 doi: [10.1007/BF00898517](https://doi.org/10.1007/BF00898517).
  6. Л. А. Митлина, В. И. Козлов, А. Л. Васильев, А. А. Сидоров, "Магнитные свойства пленок феррошпинелей многокомпонентных составов" // *Электронная техника. Серия 6: Материалы*, 1985. № 2 (201). С. 37–40. [L. A. Mitlina, V. I. Kozlov, A. L. Vasil'yev, A. A. Sidorov, "The magnetic properties of multicomponent ferros spinels films", *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 6: Materialy*, 1985, no. 2 (201), pp. 37–40 (In Russian)].
  7. Л. И. Громова, Ю. Ф. Мирошников, А. Д. Харламов, "Магнитные свойства монокристаллических пленок ферритов" / *Физика и техника магнитных явлений*. Куйбышев: КГПИ, 1986. С. 25–29. [L. I. Gromova, Yu. F. Miroshnikov, A. D. Kharlamov, "The magnetic properties of ferros spinel single-crystal films", *Fizika i tekhnika magnitnykh yavleniy* [Physics and technology of magnetic phenomena], Kuybyshev, KGPI, 1986, pp. 25–29 (In Russian)].
  8. О. Г. Алавердова, Л. П. Коваль, И. Ф. Михайлов, Я. М. Фукс, Л. А. Митлина, В. В. Молчанов, "Неоднородность деформации и субструктура эпитаксиальных слоев  $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4/MgO$ " // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы*, 1982. Т. 18, № 6. С. 1020–1024. [O. G. Alaverdova, L. P. Koval', I. F. Mikhaylov, Ya. M. Fuks, L. A. Mitlina, V. V. Molchanov, "Heterogeneity of deformation and substructure of epitaxial layers for  $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4/MgO$ ", *Izv. Akad. Nauk SSSR. Neorgan. Mater.*, 1982, vol. 18, no. 6, pp. 1020–1024 (In Russian)].
  9. Л. А. Митлина, В. В. Молчанов, Г. С. Бадртдинов, И. В. Никифорова, Е. А. Косарева, "Закономерности формирования эпитаксиального слоя феррошпинелей" // *Изв. вузов. Физика.*, 2012. Т. 55, № 4. С. 53–60; L. A. Mitlina, V. V. Molchanov, G. S. Badrtdinov, I. V. Nikiforova, E. A. Kosareva, "Mechanisms of formation of an epitaxial ferros spinel layer", *Rus. Phys. J.*, 2012, vol. 55, no. 4, pp. 400–408 doi: [10.1007/s11182-012-9826-1](https://doi.org/10.1007/s11182-012-9826-1).
  10. Н. М. Саланский, М. Ш. Ерухимов, *Физические свойства и применения магнитных плёнок*. Новосибирск: Наука, 1975. 220 с. [N. M. Salansky, M. Sh. Erukhimov, *Fizicheskiye svoystva i primeneniya magnitnykh plenok* [Physical properties and application of magnetic films], Novosibirsk, Nauka, 1975, 220 pp. (In Russian)]
  11. А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*. М.: Наука, 1994. 454 с.; A. G. Gurevich, G. A. Melkov, *Magnetization Oscillations and Waves*, Boca Raton, New York, London, Tokyo, CRC Press, 1996, x+445 pp.
  12. А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский, *Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот*. Саратов: Саратов. ун-т, 1993. 312 с. [A. V. Vashkovsky, V. S. Stal'machov, Yu. P. Sharaevsky, *Magnitostaticheskiye volny v elektronike sverkhvysokikh chastot* [Magnetostatic waves in microwave electronics], Saratov, Saratov Univ., 1994, 312 pp. (In Russian)]
  13. Б. Н. Филиппов, "Спиновые волны в слоистых ферромагнитных средах" // *Физика металлов и металловедение*, 1970. Т. 29, № 6. С. 1131–1136. [B. N. Filippov, "Spin waves in layered ferromagnetic media", *Fizika Metallov i Metallovedeniye*, 1970, vol. 29, no. 6, pp. 1131–1136 (In Russian)].

14. С. А. Вызулин, А. Э. Розенсон, С. А. Шех, “О спектре поверхностных магнитостатических волн в ферритовой плёнке с потерями” // *Радиотехника и электроника*, 1991. №4. С. 164–168; S. A. Vyzulin, A. E. Rosenson, S. A. Shekh, “The magnetostatic waves in ferrite film with losses”, *Microwave Theory and Techniques*, 1993, vol. 41, no. 6, pp. 1070–1073 doi: [10.1109/22.238528](https://doi.org/10.1109/22.238528).
15. М. И. Каганов, Н. Б. Пустыльник, Т. И. Шалаева, “Магноны, магнитные поляритоны, магнитостатические волны” // *УФН*, 1997. Т. 167, №2. С. 191–237 doi: [10.3367/UFNr.0167.199702d.0191](https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199702d.0191); M. I. Kaganov, N. B. Pustyl'nik, T. I. Shalaeva, “Magnons, magnetic polaritons, magnetostatic waves”, *Physics–Uspekhi*, 1997, vol. 40, no. 2, pp. 181–224 doi: [10.1070/PU1997v040n02ABEH000194](https://doi.org/10.1070/PU1997v040n02ABEH000194).
16. С. Крупи́чка, *Физика ферритов и родственных им магнитных окислов*. Т. 1. М.: Мир, 1971. 353 с. [S. Krupichka, *Fizika ferritov i rodstvennykh im magnitnykh okislov* [Physics of Ferrites and Related Magnetic Oxides], V. 1, Moscow, Mir, 1971, 353 pp. (In Russian)]

Поступила в редакцию 28/IX/2013;  
в окончательном варианте — 27/IV/2014;  
принята в печать — 23/V/2014.

MSC: 82D40; 82D25, 74K35

## MAGNETOSTATIC MODES IN TANGENTIALLY MAGNETIZED FERROSPINELS FILMS

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

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

*Absorption spectra of ferrosinzel films synthesized by the method of chemical transport reactions are considered. Using an EPR spectrometer, it is demonstrated that additional absorption peaks are recorded in the absorption spectra of manganese and magnesium-manganese ferrite films magnetized parallel to their surface. Interpreting these peaks as magnetostatic modes, the wave number, group velocity, and extinction coefficient are retrieved from experimental values of the saturation magnetization, crystallographic anisotropy constant, and magnetic field of the observed modes. The common effects typical of the ferrosinzel films are frequency oscillations of the surface mode extinction. Dependences of the extinction oscillation pattern on the surface anisotropy and wavelength of magnetic moment oscillations are established.*

**Keywords:** ferrosinzel films, absorption spectrums, magnetostatic modes, surface modes damping parameters, surface anisotropy constant.

Received 28/IX/2013;  
received in revised form 27/IV/2014;  
accepted 23/V/2014.

ISSN: 2310-7081 (online), 1991-8615 (print); doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1263>  
© 2014 Samara State Technical University.

**Citation:** L. A. Mitlina, G. S. Badrtdinov, Yu. V. Velikanova, “Magnetostatic Modes in Tangentially Magnetized Ferrosinzel Films”, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2014, no. 2 (35), pp. 168–179. doi: [10.14498/vsgtu1263](https://doi.org/10.14498/vsgtu1263). (In Russian)

**Authors Details:** *Ludmila N. Mitlina* (Dr. Phys. & Math. Sci), Professor, Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Gregori S. Badrtdinov*, Assistant, Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Yulia V. Velikanova*, Cand. Phys. & Math. Sci., Associate Professor, Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production.

**E-mail addresses:** [physics@samgtu.ru](mailto:physics@samgtu.ru) (L.A. Mitlina), [gregori2000@mail.ru](mailto:gregori2000@mail.ru) (G.S. Badrtdinov), [juliavl@mail.ru](mailto:juliavl@mail.ru) (Yu.V. Velikanova, *Corresponding author*)