

Физика твёрдого тела

УДК 537.635:539.216.2

СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС В ПЛЁНКАХ ФЕРРОШПИНЕЛЕЙ, НАМАГНИЧЕННЫХ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПОВЕРХНОСТИ

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

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

E-mails: juliav1@mail.ru, gregori2000@mail.ru

Рассмотрены резонансные свойства плёнок феррошпинелей толщиной порядка $20 \div 30$ мкм, полученных методом химических транспортных реакций. Измерения выполнены при перпендикулярной ориентации плёнки относительно внешнего статического магнитного поля. Обнаружены наряду с однородным резонансом дополнительные пики поглощения, соответствующие поверхностным обменным спиновым волнам, локализованным на свободной поверхности плёнки. Определены константы поверхностной анизотропии, параметры закрепления спинов, волновые числа спин-волновых мод.

Ключевые слова: плёнки феррошпинелей, спин-волновой резонанс, поверхностные обменные спиновые волны, константы поверхностной анизотропии.

Введение. Возможность возбуждения стоячих спиновых волн (спин-волновой резонанс) однородным переменным магнитным полем предсказал Киттель [1] и экспериментально подтвердили Сиви и Танненвальт на плёнках пермаллоя [2]. Киттель первым обратил внимание на то, что в тонких ферромагнитных образцах существует сильная поверхностная анизотропия. Благодаря различиям поверхности и остальной части плёнки величина резонансного поля для поверхностных спинов отличается от поля образца. Эффективное поле, перпендикулярное поверхности плёнки, закрепляет на ней спиновые моменты. В такой плёнке могут быть возбуждены спиновые волны, которые обладают отличным от нуля волновым вектором, и поэтому система может поглощать высокочастотную энергию.

Расположение спин-волновых резонансных пиков в постоянном магнитном поле будет зависеть от форм энергии поверхностной анизотропии, от величины константы поверхностной анизотропии K_s , от отношения обменной энергии $A_{обм}$ к энергии поверхностной анизотропии [3–5]. Известны следующие формы поверхностной анизотропии [3]:

Людмила Александровна Митлина (д.ф.-м.н., профессор), каф. общей физики и физики нефтегазового производства. *Григорий Сайдашевич Бадртдинов*, аспирант, каф. общей физики и физики нефтегазового производства. *Юлия Владимировна Великанова* (к.ф.-м.н., доцент), каф. общей физики и физики нефтегазового производства. *Маргарита Рудольфовна Виноградова* (к.ф.-м.н., доцент), каф. общей физики и физики нефтегазового производства. *Инна Владимировна Никифорова*, аспирант, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

- поверхностная энергия одноосна (ось лёгкого намагничивания параллельна поверхности плёнки ($K_s > 0$) либо она параллельна нормали к плёнке ($K_s < 0$));
- поверхностная энергия однонаправленна (ось лёгкого намагничивания параллельна внутренней нормали к плёнке ($K_s > 0$) либо ось лёгкого намагничивания направлена по нормали к поверхности наружу ($K_s < 0$)).

Зависимость спектра спин-волнового резонанса в тонких магнитных плёнках от величины и вида поверхностной анизотропии теоретически исследована в работах [7–13]. Показано, что в плёночных образцах могут наблюдаться объёмные обменные и поверхностные спиновые волны. Обменные спиновые волны наблюдаются в граничных условиях с жёстко закреплёнными поверхностными спинами в случае, когда спины на поверхности свободны или когда поверхностные спины частично закреплены. Поверхностные спиновые волны возможны только в случае частичного закрепления поверхностных спинов.

В плёнках марганцевых феррошпинелей толщиной порядка $1000 \div 5000 \text{ \AA}$, выращенных в плоскости (001) окиси магния, на частоте 35,2 ГГц наблюдались объёмные и поверхностные спиновые волны [14–19]. В работе [14] дан количественный анализ спектра СВР на основе теории, предполагающей модель поверхностной неоднородности. В работе [16] обнаружены два вида поверхностных обменных волн, локализованных на границе «плёнка – подложка» и свободной поверхности плёнки. В работе [15] для состава $\text{Mn}_{0,4}\text{Fe}_{2,6}\text{O}_4$ при $2A_{\text{обм}}/M_s \approx 1,3 \times 10^{-9} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$, где M_s – намагниченность насыщения, получены данные о феноменологическом параметре закрепления поверхностных спинов. При перпендикулярной ориентации магнитного поля параметр закрепления спинов на границе раздела «плёнка – подложка» равен примерно $-6,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, на свободной поверхности плёнки – примерно $0,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Однако для феррошпинелей и окиси магния (ионов Mg^{2+}) характерны коэффициенты диффузии $D \approx 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре синтеза 1000°C , что соответствует глубине диффузионной зоны порядка \sqrt{Dt} даже при получении плёнки в течение одной секунды толщиной 1000 \AA . То есть рассматриваемые образцы [14–19] должны относиться к магний-марганцевому ферриту. В данной работе рассматривается влияние химического состава и технологии синтеза на величину константы поверхностной анизотропии, параметра обменного взаимодействия, параметра закрепления спинов. Проводится анализ дополнительных пиков поглощения при ферромагнитном резонансе из существующих теорий.

1. Объекты и методы исследований. Для исследования были выбраны плёнки исходного состава $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ с $x = 0,1$ (образец № 1); $0,65$ (образец № 2); $1,23$ (образец № 3) и многокомпонентного феррита лития с добавками марганца Mn, титана Ti, висмута Bi и цинка Zn, выращенные методом химических транспортных реакций на сколах (001) плоскости окиси магния.

По данным микроструктурного анализа, проведённого на микроанализаторе Самеса, и рентгеноструктурного анализа синтезированные образцы исходного состава $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ однофазны и имеют структуру феррошпинели. Для химического состав плёнок, полученных при температуре синтеза $T_c \approx 1300 \div 1370 \text{ К}$, характерно значение $x = 1,22$, при этом постоянная решётки $a \approx 8,521 \div 8,538 \text{ \AA}$. Химическому составу плёнок, полученных при $T_c \approx 1100 \div 1200 \text{ К}$, соответствуют $x = 1,23$, $a \approx 8,522 \div 8,540 \text{ \AA}$.

Намагниченность насыщения измерялась с помощью магнитометра. Константа обменного взаимодействия плёнок оценивалось по температуре Кюри T_K , полученной из зависимости удельного сопротивления от температуры.

Рельеф поверхности на участке плёнки получен методом атомно-силовой микроскопии.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение. Рассмотрим (рис. 1) спектр ферромагнитного резонанса для плёнок толщиной примерно 30 нм для состава $Mn_{1,22}Fe_{1,78}O_4$ (образец № 1) и $Mn_{0,78}Fe_{2,22}O_4$ (образец № 2).

В плёнках марганцевого феррита, намагниченных нормально к поверхности, помимо однородности прецессии наблюдаются дополнительные пики поглощения. Для образца № 1, выращенного при температуре 1330 К, скорости роста 0,06 нм/с и скорости охлаждения 5 град/с, наблюдаются дополнительные пики поглощения со стороны слабых полей относительно основного резонанса. Амплитуда пиков убывает по мере уменьшения поля. Для образца № 2, выращенного при температуре 1330 К, недосыщении кислорода $P_{НС1}/P_{возд} \approx 0,66$, скорости роста 0,05 нм/с и скорости охлаждения 3,6 град/с, также наблюдаются дополнительные пики поглощения со стороны слабых полей относительно основного резонанса. Амплитуда пиков возрастает по мере уменьшения поля, что свидетельствует о поверхностной природе дополнительных пиков [3]. Если предположить, что основным механизмом закрепления спинов на поверхности плёнки является поверхностная анизотропия, то возможны два предельных случая. В случае, если $\lambda \ll (d^s)^{-1}$, спины на поверхности плёнки свободны. Здесь $\lambda \approx \sqrt{\alpha/\beta^s}$ — длина волны колебаний намагниченности в направлении оси z [6], $\alpha = 2A_{обм}/M_s^2$ — параметр обменного взаимодействия, $d^s = \beta h/\alpha$ — феноменологический параметр закрепления спинов (β — безразмерная константа одноосной анизотропии, h — толщина поверхностного слоя [6]). Если $\lambda \gg (d^s)^{-1}$, то спины на поверхности жёстко закреплены.

Для всех рассматриваемых плёнок выполняется условие $\lambda \gg (d^s)^{-1}$, т. е. условие жёсткого закрепления спинов (табл. 1). Здесь также приведены $K_s =$

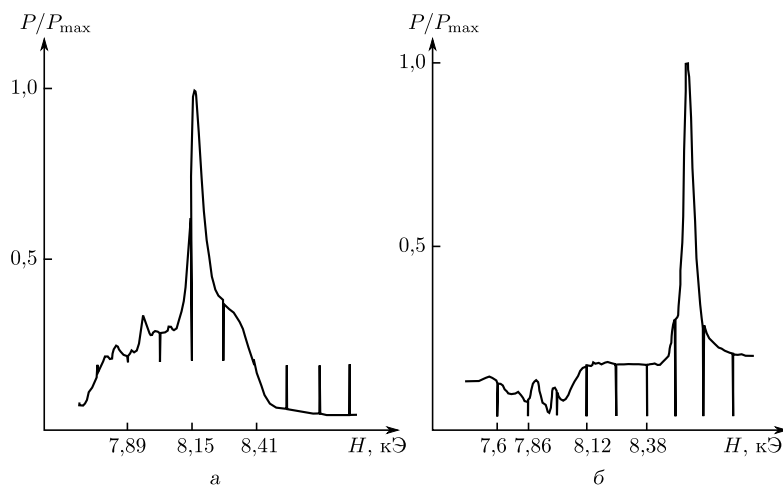


Рис. 1. Спектр ферромагнитного резонанса в плёнках, намагниченных перпендикулярно поверхности: а) образец № 1, б) образец № 2

Параметры плёнок марганцевого феррита

№ образца	λ , см	$(d^s)^{-1}$, см	K_s , эрг·см ⁻²	α , см ⁻²	k_n^p , см ⁻¹	k_n^a , см ⁻¹
1	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$4,96 \cdot 10^{-7}$	1,11	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$7,49 \cdot 10^5$	$7,92 \cdot 10^5$
2	$26,3 \cdot 10^{-6}$	$12,6 \cdot 10^{-7}$	0,41	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$8,78 \cdot 10^5$	$9,07 \cdot 10^5$
3	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$7,19 \cdot 10^{-7}$	0,76	$1,98 \cdot 10^{-11}$	$7,96 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^5$

$= A_{\text{обм}} d^s$ — константа поверхностной анизотропии и k_n^p, k_n^a — волновые числа, полученные для антисимметричных условий [6] расчётным и экспериментальным путём соответственно.

Толщина поверхностного слоя определялась из зависимости микротвёрдости от глубины внедрения индентора [20].

Известно, что для симметричных граничных условий, когда параметр закрепления спинов одинаков на обеих поверхностях плёнки, дисперсионное соотношение для перпендикулярно намагниченной плёнки запишется в виде [6]:

$$\omega = \gamma [H - (4\pi - \beta)M_s + \alpha k_n^2 M_s].$$

В соответствии с данной формулой волновое число может быть определено как

$$k_n^2 = \frac{H_n - H_0 + (4\pi - \beta)M_s}{\alpha M_s},$$

где H_0 — значения поля однородного резонанса, H_n — резонансное поле моды. Для антисимметричных граничных условий, если на различных поверхностях плёнки спины закреплены не одинаково, дисперсионное соотношение запишется в виде

$$H = \frac{\omega}{\gamma} + (4\pi - \beta)M_s - \alpha k_n^2 M_s.$$

В соответствии с данной формулой волновое число имеет вид

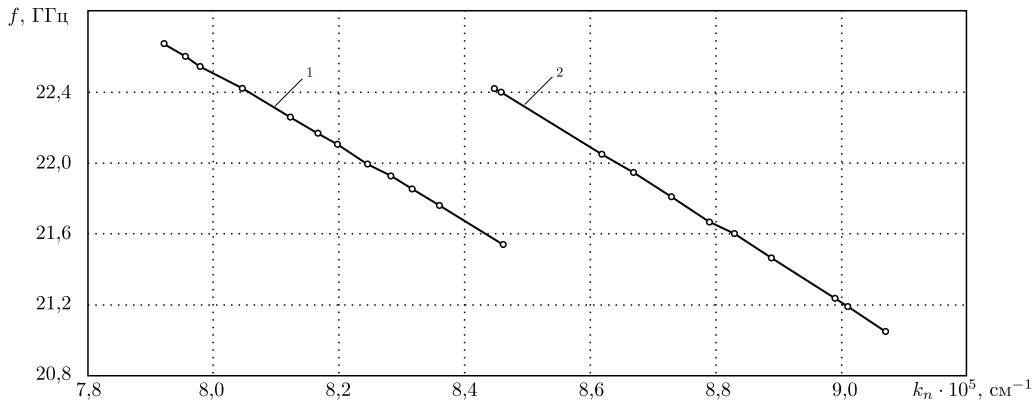
$$k_n^2 = \frac{(4\pi - \beta)M_s + H_0 - H_k}{\alpha M_s}.$$

С использованием экспериментальных значений поля однородного резонанса H_0 и поля дополнительных пиков поглощения H_n (см. рис. 1), значений намагниченности насыщения M_s , параметра обменного взаимодействия α и константы одноосной анизотропии β получены расчётные значения волнового числа для симметричных и антисимметричных условий (табл. 2) и построены дисперсионные зависимости для рассматриваемых образцов (рис. 2).

Если ось лёгкого намагничивания поверхностной анизотропии параллельна поверхности плёнки, то по данным работы [6] при $H \gg 4\pi M_s$ однородность основного состояния может быть нарушена. Главный пик спин-волнового резонанса в этом случае соответствует возбуждению поверхностной моды. Частота этой моды равна нулю при $H = 4\pi M_s - \alpha k_n^2 M_s$. Подставив в это выражение значение M_s, α , получим значение k_n , удовлетворительно совпадающее с k_n^p , рассчитанным по формуле для антисимметричных условий.

Таблица 2

Параметры плёнок состава $Mn_xFe_{3-x}O_4$					
H_n , Э	$H_0 - H_n$, Э	$k_n^p \cdot 10^{-5}$, $см^{-1}$		f , ГГц	$\delta\omega \cdot 10^{-8}$ ГГц
		антисимметричные условия	симметричные условия		
Образец № 1					
8085,4	86,1	7,922	7,677	22,66	
8060,0	111,5	7,957	7,640	22,59	4,47
8038,7	132,8	7,870	7,609	22,53	3,75
7995,2	176,3	8,047	7,545	22,41	7,65
7939,6	231,9	8,124	7,462	22,25	9,78
7907,0	264,5	8,168	7,414	22,16	5,73
7884,0	287,5	8,199	7,379	22,10	4,05
7847,9	323,0	8,248	7,325	21,99	6,35
7820,9	350,0	8,285	7,284	21,92	4,70
7795,0	376,5	8,319	7,244	21,85	4,56
7763,0	408,5	8,362	7,195	21,76	5,63
7686,0	485,5	8,464	7,750	21,54	13,52
Образец № 2					
7511,5	969,6	9,07	6,27	21,05	
7563,7	917,5	9,01	6,36	21,19	9,18
7581,8	899,4	8,99	6,39	21,24	3,18
7660,6	820,5	8,89	6,53	21,46	13,87
7708,6	772,6	8,83	6,61	21,60	8,43
7735,2	746,0	8,79	6,65	21,67	4,68
7785,2	695,9	8,73	6,74	21,81	8,81
7835,3	645,9	8,67	6,82	21,95	8,81
7869,4	611,8	8,62	6,87	22,05	5,99
7994,5	486,7	8,46	7,07	22,40	22,01
8001,9	479,3	8,45	7,08	22,42	1,31

Рис. 2. Зависимость волнового числа k_n от частоты f для образцов № 1 и № 2 при антисимметричных условиях

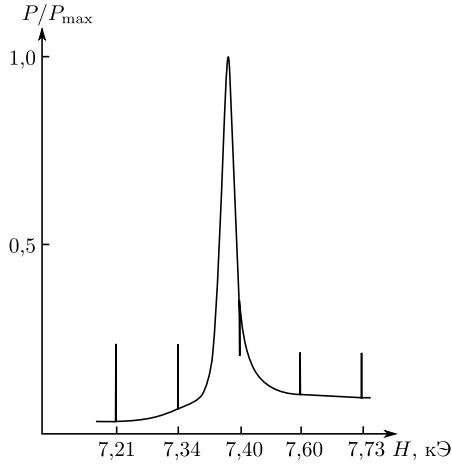


Рис. 3. Спектр ферромагнитного резонанса образца № 3, намагниченного перпендикулярно поверхности

Отметим, что для образца № 2 выполняется $K_s < A_{\text{обм}} k_n$ ($0,41 < 1,06$), а для образца № 1 — $K_s > A_{\text{обм}} k_n$ ($1,11 > 0,79$). Возможно, это служит причиной различного характера распределения интенсивности дополнительных пиков поглощения для этих плёнок (см. рис. 1).

Для плёнки $\text{Mn}_{1,22}\text{Fe}_{1,78}\text{O}_4$ толщиной 20 мкм (образец № 3), выращенной со скоростью охлаждения 10 град/с, не наблюдается дополнительных пиков поглощения (рис. 3). Это может означать, что $d_s = 0$ и без поверхностного закрепления спинов внешним высокочастотным однородным полем возбуждается только одна мода однородной прецессии.

Как известно [11], в плёночных образцах можно выделить серии резонансов, отличающихся числом полувольт n на толщине плёнки (толщинные серии), и серии резонансов, отличающихся числом полувольт N в плоскости плёнки (плоскостные серии). Частотные раздвижки наиболее интенсивных резонансов (с малым n и N) в толщинных сериях имеют порядок $\delta\omega_d = (2\pi\omega_i\alpha')/d^2$, а в плоскостных сериях — $\delta\omega_L = (\omega_i\alpha')/L$. Здесь $\omega_i = 4\pi\gamma M_s$, γ — гиромагнитное отношение, d — толщина плёнки, L — характерный размер образца в плоскости плёнки. Приведённые оценки для $\delta\omega_d$ и $\delta\omega_L$ справедливы, если $L \gg d$. Необходимо также, чтобы спины были закреплены хотя бы на одной из поверхностей.

Расчётные частотные раздвижки для образца № 1 ($M_s \approx 222$ Гс, $\alpha \approx 2,03 \times 10^{-11}$ см², $L \approx 0,4$ см, $\omega_m \approx 49,07 \cdot 10^5$ Гц): $\delta\omega_d \approx 6,8 \cdot 10^6$ Гц, $\delta\omega_L \approx 3,8 \times 10^8$ Гц. Расчётные частотные раздвижки для образца № 2 ($M_s \approx 258$ Гс, $\alpha \approx 1,64 \cdot 10^{-11}$ см², $L \approx 0,5$ см, $\omega_m \approx 57,03 \cdot 10^9$ Гц): $\delta\omega_d \approx 6,5 \cdot 10^5$ Гц, $\delta\omega_L \approx 3,42 \times 10^8$ Гц.

Из сравнения расчётных значений $\delta\omega_d$ и $\delta\omega_L$ и экспериментальных значений частотных раздвижек $\delta\omega \approx 10^8$ Гц (см. табл. 2) можно сделать вывод, что в спектрах ферромагнитного резонанса рассматриваемых образцов (см. рис. 1) наблюдаются плоскостные серии. Это свидетельствует о существовании вблизи внешней поверхности исследуемых плёнок технологического поверхностного слоя, который может закреплять спины.

Исследование топографии поверхности на зондовом микроскопе обнаруживает неоднородность структуры в наноструктурном диапазоне 120 ÷ 140 нм (рис. 4). Такой слой может быть связан с окислением феррошпинелей и иметь намагниченность меньше основного слоя. Дополнительный слой объясняет наличие антисимметричных граничных условий [7, 10, 18] и экспериментальные значения волновых чисел k порядка 10^{-5} см⁻¹.

Расчитаем дипольную и обменную энергию в единицах длины для рассматриваемых образцов при $n = 1$. Дипольная энергия $L_{\text{дип}} \sim d(\sqrt{4\pi M_0/H_0})$, обменная $L_{\text{обм}} \sim (d^2/n^2)\sqrt{2/(\pi\alpha)}$ [11]. При указанных выше параметрах для

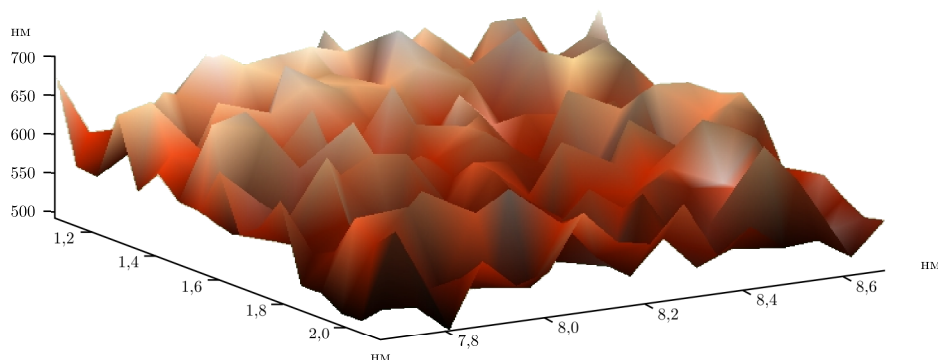


Рис. 4. Топография поверхности плёнок исходного состава MnFe_2O_4 (данные атомно-силовой микроскопии)

образцов № 1 и № 2 имеем $L_{\text{дип}} \approx 1,8 \cdot 10^{-2} \div 1,9 \cdot 10^{-2}$ см, $L_{\text{обм}} \approx 1,74 \div 1,77$ см, т. е. $L_{\text{дип}} < L_{\text{обм}}$. Величина $q \sim \pi/L_{\text{дип}} \approx 1,7 \cdot 10^3 \div 1,69 \cdot 10^3$ см $^{-1}$, $k_c \sim \sqrt{q}^4 \sqrt{2\pi/\alpha} \approx 3,1 \cdot 10^4 \div 3,26 \cdot 10^4$ см $^{-1}$, где q — компонента волнового вектора, k_c — волновой вектор при приближении к переходному слою. В переходном слое плотности дипольной и обменной энергии должны быть величинами одного порядка.

Воспользовавшись данными переходного слоя из эксперимента по микротвердости $L_{\text{пов}} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ см, получим, что $k_c L_{\text{пов}} \approx 6$, т. е. условие $k_c L_{\text{пов}} > 1$ выполнено.

Таким образом, результаты эксперимента дают основание предполагать [11], что исчезновение резонансов высших толщинных мод связано с осцилляциями волновых функций на толщине переходного слоя. То есть в условиях данного эксперимента дополнительные пики в спектре ферромагнитного резонанса объясняются спин-волновым резонансом в поверхностном слое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kittel C. Excitation of Spin Waves in a Ferromagnet by a Uniform RF Field // *Phys. Rev.*, 1958. Vol. 110, no. 6. Pp. 2139–2139.
2. Seavey M. H. Jr., Tannenwald P. E. Direct Observation of Spin-Wave Resonance // *Phys. Rev. Lett.*, 1958. Vol. 1, no. 5. Pp. 168–169.
3. Soohoo R. F. Magnetic Thin Films. New York, Evanston, London: Harper & Row, 1965. 316 pp.; русск. пер.: Суху Р. Магнитные тонкие плёнки. М.: Мир, 1967. 422 с.
4. Ахиезер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.; англ. пер.: Akhiezer A. I., Bar'yakhtar V. G., Peletminskii S. V. Spin Waves / North-Holland Series in Low Temperature Physics. Vol. 1. North-Holland, Amsterdam: Interscience (Wiley), 1968. 369 pp.
5. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 378 с.; англ. пер.: Gurevich A. G., Melkov G. A. Magnetization oscillations and waves. Boca Raton: CRC Press, 1996. 464 pp.
6. Саланский Н. М., Ерухимов М. Ш. Физические свойства и применения магнитных плёнок. Новосибирск: Наука (Сибирск. отд.), 1975. 224 с. [Salanskiy N. M., Erukhimov M. S. Physical Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films. Novosybirsk: Nauka, 1975. 224 pp.]
7. Михайловский С. С., Саланский Н. М. Основная мода спектра спин-волнового резонанса в ферромагнитных плёнках, намагниченных нормально поверхности // *Изв. АН*

- СССР. Сер. физ., 1972. Т. 36, № 7. С. 1496–1498. [Mikhaylovskiy S. S., Salanskiy N. M. The main mode spectrum of spin-wave resonance in ferromagnetic films perpendicular magnetized to its plane // *Izv. AN SSSR. Ser. Fiz.*, 1972. Vol. 36, no. 7. Pp. 1496–1498].
8. Корчагин Ю. А., Набатов А. В., Фиш Г. И., Хлебопрос Р. Г., Чеканова Л. А., Чистяков Н. С. Влияние поверхностных условий на спектр спиновых волн в тонкой магнитной плёнке // *Физ. мет. и металловед.*, 1973. Т. 35, № 1. С. 196–199. [Korchagin Yu. A., Nabatov A. V., Fish G. I., Khlebopros R. G., Chekanova L. A., Chistyakov N. S. The influence of surface conditions on spin-wave spectrum in thin magnetic film // *Fiz. Met. Metalloved.*, 1973. Vol. 35, no. 1. Pp. 196–199].
 9. Корчагин Ю. А., Хлебопрос Р. Г., Чистяков Н. С. Спектр спин-волнового резонанса в тонком ферромагнитном слое и смешанными граничными условиями // *Физика твёрдого тела*, 1972. Т. 14, № 7. С. 2121–2123. [Korchagin Yu. A., Khlebopros R. G., Chistyakov N. S. Spin-wave resonance spectrum in a thin ferromagnetic layer with mixed boundary conditions // *Fizika tverdogo tela*, 1972. Vol. 14, no. 7. Pp. 2121–2123].
 10. Корчагин Ю. А., Хлебопрос Р. Г., Чистяков Н. С. Спин-волновой резонанс в магнитных плёнках с дополнительными поверхностными слоями // *Физ. мет. и металловед.*, 1972. Т. 34, № 6. С. 1303–1305. [Korchagin Yu. A., Khlebopros R. G., Chistyakov N. S. Spin-wave resonance spectrum of magnetic films with additional surface layers // *Fiz. Met. Metalloved.*, 1972. Vol. 34, no. 6. Pp. 1303–1305].
 11. Помялов А. В., Зильберман П. Е. Магнитные резонансы в малых тонкоплёночных образцах железиттриевого граната // *Радиотехника и электроника*, 1986. № 1. С. 94–101. [Potyulov A. V., Zil'berman P. E. Magnetic resonance in small thin-film samples of yttrium iron garnet // *Radiotekhnika i elektronika*, 1986. no. 1. Pp. 94–101].
 12. Барьяхтар В. Г., Клепиков В. Ф., Соболев В. Г. Спиновые волны в плёнках с магнитными дефектами // *Физика твёрдого тела*, 1971. Т. 13, № 12. С. 3517–3522. [Bar'yakhtar V. G., Klepikov V. F., Sobolev V. G. Spin waves in magnetic films with defects // *Fizika tverdogo tela*, 1971. Vol. 13, no. 12. Pp. 3517–3522].
 13. Филипов Б. Н. Спиновые волны в слоистых ферромагнитных средах // *Физ. мет. и металловед.*, 1970. Т. 29, № 6. С. 1131–1136. [Filipov B. N. Spin waves in layered ferromagnetic media // *Fiz. Met. Metalloved.*, 1970. Vol. 29, no. 6. Pp. 1131–1136].
 14. Паршин А. С., Чистяков Н. С. Поверхностные спиновые волны в монокристаллических плёнках марганцевого феррита // *Физика твёрдого тела*, 1976. Т. 18, № 1. С. 58–61. [Parshin A. S., Chistyakov N. S. Surface spin waves in monocrystalline manganese ferrite films // *Fizika tverdogo tela*, 1976. Vol. 18, no. 1. Pp. 58–61].
 15. Паршин А. С., Чистяков Н. С. Ориентационная зависимость спектра спин-волнового резонанса в тонких монокристаллических плёнках марганцевого феррита / В сб.: *Высокочастотные свойства магнитных плёнок*. Красноярск, 1978. С. 48–55. [Parshin A. S., Chistyakov N. S. Orientation dependence of the spectrum of spin-wave resonance in thin monocrystalline manganese ferrite films / In: *High-Frequency Properties of Magnetic Films*. Krasnoyarsk, 1978. Pp. 48–55].
 16. Паршин А. С., Чистяков Н. С. Объёмные и поверхностные спиновые волны в монокристаллических плёнках марганцевого феррита // *Физика твёрдого тела*, 1978. Т. 3, № 11. С. 3513–3515. [Parshin A. S., Chistyakov N. S. Bulk and surface spin waves in monocrystalline manganese ferrite films // *Fizika tverdogo tela*, 1978. Vol. 3, no. 11. Pp. 3513–3515].
 17. Иванов В. Д., Калинин Б. А., Рыбинский О. А., Чарторижский Д. Н. Спин-волновой резонанс в тонких монокристаллических плёнках марганцевого феррита // *Физика твёрдого тела*, 1972. № 14. С. 653–655. [Ivanov V. D., Kalinikos B. A., Rybinskiy O. A., Chartorizhskiy D. N. Spin-wave resonance in thin monocrystalline manganese ferrite films // *Fizika tverdogo tela*, 1972. no. 14. Pp. 653–655].
 18. Baszyński J., Frait Z. Spin-wave resonance in thin monocrystalline ferrite films // *Phys. Stat. Sol. (B)*, 1976. Vol. 73, no. 2. Pp. K85–K88.
 19. Šimšová J., Maryško M., Suk K. Spin wave modes in single crystal manganese ferrite films // *Phys. Stat. Sol. (A)*, 1976. Vol. 38, no. 2. Pp. K163–K166.

20. Митлина Л. А., Левин А. Е., Великанова Ю. В., Кривошеева Е. В., Виноградова М. Р. Влияние границ блоков на сопротивление деформации в эпитаксиальных феррошпинелях // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2003. № 19. С. 111–117. [Mitlina L. A., Levin A. E., Krivosheeva E. V., Velikanova Yu. V., Vinogradova M. R. The effect on the resistance to deformation in epitaxial ferrosipinels // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2003. no. 19. Pp. 111–117].

Поступила в редакцию 01/VIII/2011;
в окончательном варианте — 14/IX/2011.

MSC: 82D40; 82D25, 74K35

SPIN-WAVE RESONANCE IN FERROSPINEL FILMS MAGNETIZED PERPENDICULAR TO THE SURFACE

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

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

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

The resonance properties of ferrosipinel films 20–30 μm thick obtained by chemical transport reactions were considered. Measurements were performed for the perpendicular orientation of the film relative to the external static magnetic field. Along with a uniform additional resonance absorption peaks corresponding to surface exchange spin waves localized at the free surface of the film were found. The constants of the surface anisotropy, the parameters of the spin pinning, the wave numbers of spin-wave modes were determined.

Key words: ferrosipinel films, spin-wave resonance, exchange surface spin waves, surface anisotropy constants.

Original article submitted 01/VIII/2011;
revision submitted 14/IX/2011.

Ludmila N. Mitlina (Ph. D. (Phys. & Math.)), Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Gregori S. Badrtdinov*, Postgraduate Student, Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Yulia V. Velikanova*, Ph. D. (Phys. & Math.), Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Margarita R. Vinogradova*, Ph. D. (Phys. & Math.), Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production. *Inna V. Nikiforova*, Ph. D. (Postgraduate Student), Dept. of General Physics & Physics of Oil and Gas Production.