

УДК 538.221

ПРИВЕДЕННЫЙ ПАРАМЕТР ЗАТУХАНИЯ ЛАНДАУ–ЛИФШИЦА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КОМПЕНСАЦИИ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

**В. В. Рандошкин, Д. М. Ксенофонтов, А. А. Мاستин, И. В. Рандошкин,
И. А. Сажин, Н. Н. Сысоев, И. С. Титов, П. С. Труханов**

(Центр гидрофизических исследований физического факультета)

E-mail: randoshkin_v@mail.ru

На основании результатов исследования статических и динамических свойств монокристаллических пленок феррит-гранатов (МПФГ) $(\text{Bi,R})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ вблизи точки компенсации момента импульса (КМИ) (здесь R — быстрорелаксирующий редкоземельный магнитный ион) определены приведенный параметр затухания Ландау–Лифшица и его температурная зависимость.

Введение

Феррит-гранаты являются трехподрешеточными ферромагнетиками, однако при описании их свойств, как правило, используют модель ферромагнетика [1], приписывая им суммарный магнитный момент

$$M = M_d + M_a + M_c \quad (1)$$

и эффективное значение гиромагнитного отношения

$$\gamma = \gamma_0 M/M_R. \quad (2)$$

Здесь M_d , M_a и M_c — магнитные моменты тетраэдрической (d -), октаэдрической (a -) и додекаэдрической (c -) подрешеток структуры граната, γ_0 — гиромагнитное отношение ионов Fe^{3+} , M_R — суммарный магнитный момент быстрорелаксирующих редкоземельных магнитных ионов. Заметим, что магнитные моменты ионов железа в d - и a -подрешетках направлены в противоположные стороны, а магнитные моменты редкоземельных ионов ориентированы антипараллельно суммарному магнитному моменту M_{Fe} ионов Fe^{3+} .

В точке компенсации магнитного момента (КММ), где M и, следовательно, намагниченность насыщения M_s равны нулю, эффективное значение гиромагнитного отношения также равно нулю. В точке компенсации момента импульса (КМИ), где суммарный магнитный момент медленно релаксирующих ионов Fe равен нулю, $\gamma \rightarrow \pm\infty$, а $M_s = M_R$.

Феррит-гранаты с КМИ получены в виде монокристаллических пленок, которые были выращены методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на подложках немагнитных гранатов [2–4].

Нестационарность начальной и заключительной стадий эпитаксиального роста пленок приводит к формированию переходных поверхностных слоев пленка/подложка и пленка/воздух, отличающихся по химическому составу и физическим параметрам

от основного объема пленки [3, 5, 6]. Толщина переходного поверхностного слоя пленка/подложка значительно возрастает вследствие процесса твердотельной диффузии [6]. Именно наличие переходных поверхностных слоев обуславливает достижение в пленках вблизи КМИ уокеровской предельной скорости движения доменных стенок (ДС) [3, 7, 8], предсказанной только для безграничного ферромагнетика [9, 10]. Заметим, что для тонких магнитных пленок с одноосной анизотропией скорость срыва стационарного движения ДС в несколько раз ниже уокеровской [1].

Движение магнитных моментов в ферромагнетиках описывают с помощью уравнения Ландау–Лифшица [11], в котором используют либо безразмерный параметр затухания Гильберта α , либо приведенный параметр затухания Ландау–Лифшица Λ [1]. Эти величины связаны соотношением

$$\alpha = \Lambda \gamma / M_s. \quad (3)$$

Параметр α определяет вид зависимости скорости ДС V от действующего магнитного поля H : при $\alpha < 1$ на кривой $V(H)$ имеются два линейных участка, разделенных нелинейным участком; при $\alpha > 1$ нелинейный участок отсутствует [1, 8–10]. С другой стороны, полагают, что параметр Λ не зависит от других параметров магнитного материала, а определяется только типом и концентрацией быстрорелаксирующих ионов, входящих в состав материала, причем все эти ионы дают аддитивный вклад в Λ [1, 3, 12]. В точке КМИ начальная подвижность ДС в Tm-содержащих МПФГ имеет максимум [13], что может указывать на наличие особенностей для приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица.

Целью настоящей работы являлось исследование приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица в МПФГ $(\text{Bi,R})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ (R^{3+} — быст-

рорелаксирующий магнитный редкоземельный ион) с одноосной магнитной анизотропией вблизи точки КМИ.

Эксперимент

МПФГ $(\text{Bi,R})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ были выращены методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на основе $\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5$ на подложках с ориентацией (111) [4]. Одноосная магнитная анизотропия в процессе роста таких пленок наводится для ионов Tm^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} и Eu^{3+} (в случае ионов Pr^{3+} и Nd^{3+} индуцируется анизотропия типа «легкая плоскость» [3, 14]). МПФГ с $\text{R} = \text{Yb}$, Tm и Er выращивали на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (ГГГ), с $\text{R} = \text{Ho}$ и Dy — на подложках $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (СГГ), с $\text{R} = \text{Tb}$ — на подложках $(\text{Gd,Ca})_3(\text{Mg,Zr,Ga})_5\text{O}_{12}$ (ГКМЦГГ), с $\text{R} = \text{Eu}$ — на подложках $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (НГГ).

Параметры МПФГ измеряли стандартными методами [5, 15]. В работе приводятся результаты исследования образцов, параметры которых сведены в табл. 1, где x — содержание быстрорелаксирующего редкоземельного иона, h — толщина пленки, l — характеристическая длина материала, H_K — поле одноосной магнитной анизотропии, T_N — температура Нееля, μ — начальная (линейная) подвижность ДС, $V_{\text{ср}}$ — скорость ДС, при которой заканчивается начальный линейный участок зависимости $V(H)$, V_{max} — максимальная скорость, измеренная в эксперименте.

Скорость ДС в МПФГ измеряли методом перемещения [16] с помощью установки высокоскоростной фотографии [17]. Этот метод по сравнению, например, с методами динамического коллапса и расширения ЦМД [5, 18] обеспечивает

наибольшую точность измерений, независимость их результатов от предыстории образца и постоянство действующего магнитного поля при движении ДС. О близости к точке КМИ судили по протяженности начального линейного участка зависимости $V(H)$ [4]. По наклону этого участка находили начальную подвижность ДС μ .

Расчет параметров

Начальная подвижность ДС описывается соотношением [1, 9, 10]

$$\mu = (\gamma/\alpha)\Delta_0 = \Lambda^{-1}M_s\Delta_0, \quad (4)$$

где $\Delta_0 = (A/K_u)^{1/2}$ — параметр ширины ДС, A — константа обменного взаимодействия, K_u — константа одноосной магнитной анизотропии, связанная с H_K соотношением

$$H_K = 2K_u/M_s. \quad (5)$$

Из соотношений (4) и (5) вытекает

$$\Lambda = \mu^{-1}(2AM_s/H_K)^{1/2}. \quad (6)$$

Константу обменного взаимодействия в МПФГ находили, измеряя температуру Нееля T_N [5, 15]:

$$A = A_0(T_N - T)/(T_{N0} - T), \quad (7)$$

где $A_0 = 3.7 \cdot 10^{-7}$ эрг/см и $T_{N0} = 560$ К — константа обменного взаимодействия и температура Нееля для $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ соответственно.

Намагниченность насыщения определяли, измерив поле коллапса цилиндрических магнитных доменов H_0 [5, 15]:

$$4\pi M_s = H_0 \left[1 + 3l/4h - (3l/h)^2/2 \right]^{-1}. \quad (8)$$

Таблица 1

Параметры МПФГ $\text{Bi}_{3-x}\text{R}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ с ориентацией (111) при комнатной температуре

№ образца	R	x^*	h , мкм	l , мкм	$4\pi M_s$, Гс	H_K , Э	T_N , К	μ , м/(с Э)	$V_{\text{ср}}$, м/с	V_{max} , м/с	$\Lambda \cdot 10^{-7}$, Э ² с/рад
1	Tm	2.14	1.7	0.83	120	840	385	10.8	1180	1500	0.49
2	Tm	2.14	3.8	1.18	124	2450	373	5.0	...	320	0.58
3	Tm	2.14	2.3	0.97	123	830	384	8.5	...	710	0.62
4	Yb	2.00	9.5	0.48	128	750	383	1.65	180	240	3.4
5	Tb	1.75	9.0	0.18	446	1800	365	0.44	...	310	13.7
6	Tb	1.75	6.6	0.20	277	2000	426	0.43	...	316	14.6
7	Ho	1.95	8.8	0.15	271	900	354	0.60	...	172	10.1
8	Dy	2.16	11.0	0.13	433	740	343	0.66	...	160	11.4
9	Er	2.33 (2.32)	2.9	0.45	212	1490	391	1.7	540	720	3.2
10	Er	2.33 (2.45)	2.8	0.51	232	1470	385	1.5	...	680	3.7
11	Eu	2.12	4.1	0.51	195	2300	359	4.5	650	1510	0.75
12	Eu	2.12	6.0	0.50	176	2240	361	4.3	655	1490	0.77
13	Eu	2.12 (2.06)	4.4	1.1	140	2810	397	3.5	...	1460	0.75

*) В скобках приведены измеренные значения x .

Значение l находили по данным результатов измерений равновесной ширины полосовых доменов w и толщины пленки h [5, 15].

Поле одноосной магнитной анизотропии принимали равным значению постоянного магнитного поля, приложенного в плоскости пленки, при котором исчезает контраст доменной структуры.

Определение химического состава

Химический состав некоторых МПФГ $\text{Bi}_{3-x}\text{R}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ определяли методом рентгеновского микроанализа. В частности, образец № 9 имеет состав $\text{Bi}_{0.65}\text{Er}_{2.32}\text{Fe}_{3.52}\text{Ga}_{1.48}\text{O}_{12}$, образец № 10 — $\text{Bi}_{0.55}\text{Er}_{2.45}\text{Fe}_{3.50}\text{Ga}_{1.50}\text{O}_{12}$, образец № 13 — $\text{Bi}_{0.94}\text{Eu}_{2.06}\text{Fe}_{3.52}\text{Ga}_{1.48}\text{O}_{12}$. Таким образом, вблизи точки КМИ содержание галлия в МПФГ составляет $y = 1.5$. Следовательно, часть ионов Ga^{3+} входит в a -подрешетку, а химическую формулу запишем в виде $\{\text{Bi}_{3-x}\text{R}_x\}[\text{Fe}_{2-u}\text{Ga}_u](\text{Fe}_{3-v}\text{Ga}_v)\text{O}_{12}$.

В тех случаях, когда микроанализ не проводился, содержание быстрорелаксирующих ионов рассчитывали для точки КМИ из условия согласования параметров решетки пленки и подложки с использованием правила Вегарда [5]. При этом полагали, что составы МПФГ в точках КМИ и КМИ не сильно различаются, поскольку такие пленки могут быть получены из одного и того же раствора-расплава при одинаковых условиях синтеза (температура роста, скорость вращения подложки, время роста) [19]. Из уравнений

$$u + v = y, \quad (9)$$

$$2 - u = 3 - v \quad (10)$$

получаем $u = 0.25$, т.е. почти 17% ионов Ga^{3+} входит в октаэдрическую подрешетку.

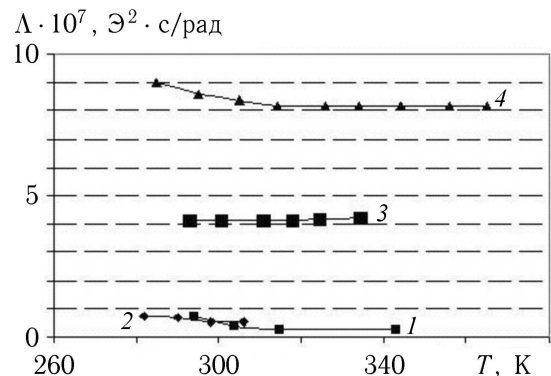
Результаты и обсуждение

Рассчитанные с помощью соотношения (6) значения Λ приведены в табл. 1. Поскольку все быстрорелаксирующие ионы дают аддитивный вклад в Λ , зная x и Λ , находили значения приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица для $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (табл. 2). Для сравнения в табл. 2 приведены также значения Λ , измеренные методом ферромагнитного резонанса (ФМР) на объемных образцах $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с небольшими добавками ионов R^{3+} . Из табл. 2 видно, что во всех экспериментах для объемных образцов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, легированных Yb, вычисленное значение Λ для $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ меньше, чем полученное в настоящей работе. В случае Tm, Er, Ho и Eu, наоборот, в настоящей работе получены меньшие значения приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица для незамещенного феррит-граната, чем по данным ФМР.

Таблица 2
Приведенный параметр затухания $\Lambda \cdot 10^{-7} \text{ Э}^2 \text{ с/рад}$ для феррит-граната $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ по данным работы [1] (А–Г) и настоящей работы (Д)

R	А	Б	В	Г	Д
Yb	4.2	2.2	2.5	2.2	5.1
Tm	1.2	1.3	1.3	1.8	0.8
Er	7.0	8.5	7.8	5.5	4.4
Ho	42	—	58	29	15.5
Dy	26	—	26	11	15.8
Tb	48	—	142	16	24.3
Eu	2.1	2.2	1.9	1.3	1.1

Зная температурные зависимости статических магнитных параметров МПФГ $(\text{Bi}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, $(\text{Bi}, \text{Gd}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, $(\text{Bi}, \text{Eu})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ и $(\text{Bi}, \text{Er})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ [13], а также зависимости скорости ДС от действующего магнитного поля при разных температурах, для этих пленок определяли температурную зависимость приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица вблизи точки КМИ. Заметим, что температура КМИ составляет 315 К для МПФГ $(\text{Bi}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ и 306 К для МПФГ $(\text{Bi}, \text{Gd}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, а для Eu- и Er-содержащих пленок она лежала ниже комнатной температуры. Из рисунка видно, что приведенный параметр Ландау–Лифшица практически не зависит от температуры T и не имеет особенностей в точке КМИ. Аналогичная зависимость $\Lambda(T)$ получена ранее методом ФМР [12].



Температурная зависимость приведенного параметра затухания Ландау–Лифшица для МПФГ $(\text{Bi}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (1), $(\text{Bi}, \text{Gd}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (2), $(\text{Bi}, \text{Eu})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (3), $(\text{Bi}, \text{Er})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (4) вблизи точки КМИ

Выводы

Таким образом, в настоящей работе при исследовании свойств МПФГ вблизи точки КМИ показано, что:

1) зная статические параметры МПФГ и зависимость скорости ДС от действующего магнитного

поля вблизи точки КМИ, можно определить приведенный параметр затухания Ландау–Лифшица;

2) приведенный параметр затухания Ландау–Лифшица уменьшается с ростом температуры.

Литература

1. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М., 1982.
2. Randoshkin V.V. // Proc. SPIE. 1989. **1126**. P. 103.
3. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М., 1990.
4. Рандошкин В.В. Динамика доменных стенок в висмут-содержащих монокристаллических пленках феррит-гранатов: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. МГУ, 2003.
5. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихеева, Б.Н. Наумова. М., 1987.
6. Грошенко Н.А., Прохоров А.М., Рандошкин В.В. и др. // ФТТ. 1985. **27**, № 6. С. 1712.
7. Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1985. **42**, № 1. С. 34.
8. Рандошкин В.В. // ФТТ. 1995. **37**, № 3. С. 652.
9. Walker L.R. (не опублик.). Процит.: Dillon J.F., Jr. // Magnetism. Vol. III / Eds. G.T. Rado and H. Shul. N.Y., 1963. P. 450.
10. Slonczewski J.C. // Intern. J. Magn. 1972. **2**, N 1. P. 85.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Phys. Zs. der S.U. 1935. **8**, N 2. P. 153.
12. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. // ФТТ. 1989. **31**, № 10. С. 58.
13. Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. // ФТТ. 1990. **32**, № 1. С. 246.
14. Зюзин А.М., Радайкин В.В., Рандошкин В.В. // ФТТ. 1996. **38**, № 7. С. 2144.
15. Рандошкин В.В., Старостин Ю.В. // Радиоэлектроника за рубежом. 1982. № 18. С. 1.
16. Рандошкин В.В. // ПТЭ. 1995. № 2. С. 155.
17. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. // ПТЭ. 1985. № 5. С. 247.
18. Рандошкин В.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1996. **62**, № 9. С. 32.
19. Рандошкин В.В., Васильева Н.В., Сташун К.В., Сташун М.В. // Неорганические материалы. 1999. **35**, № 1. С. 1.

Поступила в редакцию
19.12.05