

УДК 537.611

## ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПО МАГНЕТИЗМУ

© 2019 г. В. В. Смирнов<sup>1,2</sup>, О. М. Алыкова<sup>1</sup>\*, М. Ф. Булатов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Астраханский государственный университет”, Астрахань, Россия

<sup>2</sup>Каспийский институт морского и речного транспорта филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Волжский государственный университет водного транспорта”, Астрахань, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “МИРЭА – Российский технологический университет”, Москва, Россия

\*E-mail: olga-alykova@mail.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

На основании известных соотношений модели Нееля о подрешеточном строении ферромагнитных соединений проведен расчет намагниченности насыщения монокристаллических пленок феррит-граната различного состава. Остальные параметры пленок рассчитывались на основании теории полосовых доменов и теории стабильности цилиндрических магнитных доменов. Предлагаемый материал носит учебный характер и предназначен для использования на практических занятиях при изучении магнетизма. Приведенная задача в практике Астраханского государственного университета предлагается студентам специальностей 22.03.01 “Материаловедение и технологии материалов” при изучении дисциплины “Физика магнитных материалов”, 03.03.02 “Физика” при изучении дисциплин “Общая физика”, раздел “Электричество и магнетизм” и дисциплины “Магнитные свойства вещества”, а также студентам специальности 13.03.02 “Электроэнергетика и электротехника” при изучении дисциплины “Магнитные измерения”.

DOI: 10.1134/S036767651907038X

Монокристаллические пленки феррит гранатов (МПФГ) являются средой, чрезвычайно удобной как для фундаментальных исследований, так и для прикладного использования [1]. Развитая теория [2, 3] позволяет использовать данную среду и для решения учебных задач, связанных с расчетом параметров сложных магнитных систем.

Рассмотрим решение задачи: рассчитать основные параметры МПФГ состава  $\text{Sm}_{0.41}\text{Lu}_{2.07}\text{La}_{0.52}\text{Ga}_{0.58}\text{Fe}_{4.42}\text{O}_{12}$ , полученные данные сравнить с экспериментальными.

Намагниченность насыщения гранатов  $M_s$  может быть записана через намагниченности отдельных подрешеток:

$$M_s = N_a M_a - N_d M_d + N_c M_c,$$

где  $N_d$ ,  $N_a$ ,  $N_c$  – количество подрешеток типа  $d$ ,  $a$ ,  $c$  соответственно в единице объема граната.

Намагниченности отдельных подрешеток определяются алгебраической суммой магнитных моментов ионов  $\text{Fe}^{3+}$  (равен  $5.92 \mu_B$ , здесь  $\mu_B$  – магнетон Бора) или  $\text{Re}^{3+}$  и окружающих его ионов кислорода  $\text{O}^{2-}$ . Так как магнитный момент иона

кислорода  $\text{O}^{2-}$  равен нулю, то намагниченность подрешетки равна магнитному моменту иона, расположенному в пустоте подрешетки.

Для определения намагниченности насыщения граната необходимо знать количество подрешеток каждого типа  $a$ ,  $d$ , и  $c$  в единице объема граната.

Определить это значение можно, зная количество подрешеток в элементарной ячейке и объем этой ячейки. Количество подрешеток в элементарной ячейке равно количеству ионов находящихся в пустотах этих подрешеток.

Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц  $\text{Re}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и содержит 160 атомов:  $n_{\text{O}}$  – 96 атомов кислорода;  $n_c$  – 24 иона  $\text{Re}^{3+}$ , принадлежащих додекаэдрической подрешетке  $c$ ;  $n_a$  – 16 ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , принадлежащих октаэдрической подрешетке  $a$ ;  $n_d$  – 24 иона  $\text{Fe}^{3+}$ , принадлежащих тетраэдрической подрешетке  $d$ .

Объем элементарной ячейки  $V_{\text{эл}} = a^3$ , где  $a$  – постоянная решетки (у гранатов изменяется в пределах от 1.22 до 1.26 нм). Возьмем среднее значение 1.24 нм.

Тогда количество подрешеток в единице объема граната найдем как произведение количества ионов в элементарной ячейке, умноженное на количество элементарных ячеек, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$ .

$$N_c = n_c \times \frac{V}{V_{\text{эл}}}, \quad N_d = n_d \times \frac{V}{V_{\text{эл}}}, \quad N_a = n_a \times \frac{V}{V_{\text{эл}}},$$

где  $V = 1 \text{ м}^3$ .

$$\text{Тогда } M_s = \frac{V}{V_{\text{эл}}} \times (n_a M_a - n_d M_d + n_c M_c). \quad (1)$$

Вычислим намагниченность насыщения пленки феррит-граната состава  $\text{Sm}_{0.65}\text{Lu}_{0.27}\text{Tm}_{1.2}\text{Y}_{0.82}\text{Gd}_{0.24}\text{Al}_{0.2}\text{Fe}_{4.8}\text{O}_{12}$ .

Найдем  $n_c M_c$  для  $\text{Sm}_{0.65}\text{Lu}_{0.27}\text{Tm}_{1.2}\text{Y}_{0.82}\text{Gd}_{0.24}$ .

$$n_c M_c = n_{\text{Sm}} M_{\text{Sm}} + n_{\text{Lu}} M_{\text{Lu}} + n_{\text{Tm}} M_{\text{Tm}} + n_{\text{Y}} M_{\text{Y}} + n_{\text{Gd}} M_{\text{Gd}}.$$

Из работы [2]

$$M_{\text{Sm}} = 0.72 \mu_B, \quad M_{\text{Lu}} = 0, \quad M_{\text{Tm}} = 7 \mu_B, \\ M_{\text{Y}} = 0, \quad M_{\text{Gd}} = 7 \mu_B.$$

$$n_c = n_{\text{Sm}} + n_{\text{Lu}} + n_{\text{Tm}} + n_{\text{Y}} + n_{\text{Gd}} = 24,$$

где  $n_{\text{Sm}}, n_{\text{Lu}}, n_{\text{Tm}}, n_{\text{Y}}, n_{\text{Gd}}$  – число ионов Sm, Lu, Tm, Y и Gd в элементарной ячейке. Найдем эти значения, решив следующие пропорции:

$$\frac{n_{\text{Sm}}}{0.65} = \frac{n_c}{3}, \quad n_{\text{Sm}} = 0.65 \times \frac{n_c}{3} = 5.2.$$

$$\text{Аналогично } \frac{n_{\text{Lu}}}{0.27} = \frac{n_c}{3}, \quad n_{\text{Lu}} = 0.27 \times \frac{n_c}{3} = 2.16,$$

$$\frac{n_{\text{Tm}}}{1.2} = \frac{n_c}{3}, \quad n_{\text{Tm}} = 1.2 \times \frac{n_c}{3} = 9.6,$$

$$\frac{n_{\text{Y}}}{0.82} = \frac{n_c}{3}, \quad n_{\text{Y}} = 0.82 \times \frac{n_c}{3} = 6.56,$$

$$\frac{n_{\text{Gd}}}{0.24} = \frac{n_c}{3}, \quad n_{\text{Gd}} = 0.24 \times \frac{n_c}{3} = 1.92.$$

Далее находим  $n_d M_d$  и  $n_a M_a$ .

В случае, когда замещение железа отсутствует,  $n_d = 24$  и  $n_a = 16$ , а  $M_d$  и  $M_a$  равны магнитному моменту иона  $\text{Fe}^{3+}$ . Когда замещение присутствует, необходимо учитывать, что ионы  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Ge}^{3+}$  замещают  $\text{Fe}^{3+}$  в тетраэдрической подрешетке  $d$  [2]:

$$n_d M_d = n_{\text{Fe}} M_{\text{Fe}} + n_{\text{Al}} M_{\text{Al}},$$

где  $M_{\text{Fe}} = 5.92 \mu_B$ ,  $M_{\text{Al}} = 0$ .

$$n_d = n_{\text{Fe}} + n_{\text{Al}} = 24,$$

где  $n_{\text{Fe}}, n_{\text{Al}}$  – число ионов Fe и Al в элементарной ячейке. Найдем эти значения, решив следующие пропорции:

$$\frac{n_{\text{Fe}}}{3 - 0.2} = \frac{n_d}{3}, \quad n_{\text{Fe}} = 2.8 \times \frac{n_c}{3} = 22.4,$$

$$\frac{n_{\text{Al}}}{0.2} = \frac{n_d}{3}, \quad n_{\text{Al}} = 0.2 \times \frac{n_c}{3} = 1.6.$$

Подставляя найденные значения в формулу (1), получим  $M_s = 176.97 \text{ кА/м}$  для данного состава пленки.

Так находится намагниченность насыщения при абсолютном нуле температуры. При данной температуре магнитные моменты ориентированы параллельно и антипараллельно друг другу. С повышением температуры направления магнитных моментов меняются и намагниченности подрешеток убывают по законам, которые аппроксимируются выражениями (2)–(4).

$$M_c: f(x) = 1.12 \left(1 + \frac{T}{T_N}\right)^{-4.93}, \quad (2)$$

$$M_a: f(x) = 1.18 \left(1 - \frac{T}{T_N}\right)^{0.323}, \quad (3)$$

$$M_d: f(x) = 1.2 \left(1 - \frac{T}{T_N}\right)^{0.349}, \quad (4)$$

где  $T_N$  – температура Нееля.

С учетом температурной зависимости выражение (1) запишется в конечном виде:

$$M_s = \frac{V}{V_{\text{эл}}} \times \left( n_a M_a \times 1.18 \left(1 - \frac{T}{T_N}\right)^{0.323} - n_d M_d \times 1.2 \left(1 - \frac{T}{T_N}\right)^{0.349} + n_c M_c \times 1.12 \left(1 + \frac{T}{T_N}\right)^{-4.93} \right).$$

Значение намагниченности  $M_s$  для состава  $\text{Sm}_{0.65}\text{Lu}_{0.27}\text{Tm}_{1.2}\text{Y}_{0.82}\text{Gd}_{0.24}\text{Al}_{0.2}\text{Fe}_{4.8}\text{O}_{12}$  с  $T_N = 529 \text{ К}$  при  $T = 300 \text{ К}$  составило  $112.76 \text{ кА/м}$ . Экспериментальное значение намагниченности данной пленки  $M_s = 102.8 \text{ кА/м}$  [1].

Основными статическими магнитными параметрами МПФГ являются средняя равновесная ширина лабиринтных (полосовых) доменов в отсутствие поля смещения  $\omega = P_0/2$  ( $P_0$  – равновесный период), характеристическая длина  $l$ , намагниченность насыщения  $M_s$ , поле коллапса ЦМД  $H_0$  и поле эллиптической неустойчивости  $H_2$ . Удобным для измерения параметром является начальная магнитная восприимчивость

$$x_0 = (dm/dH)_{m=0},$$

где  $m$  – намагниченность пленки, находящейся в поле  $H$ .

Таблица 1

| Состав  | $M_s$ , кА/м |             | $H_0$ , кА/м |             | $Q$     |             | $K_u$ , кДж/м <sup>3</sup> |             | $A$ , пДж/м |             |
|---|--------------|-------------|--------------|-------------|---------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
|   | Тео-рия      | Эксперимент | Тео-рия      | Эксперимент | Тео-рия | Эксперимент | Тео-рия                    | Эксперимент | Тео-рия     | Эксперимент |
| $Sm_{0.41}Lu_{2.07}La_{0.52}Ga_{0.58}Fe_{4.42}O_{12}$ | 74.5         | 76.4        | 35.16        | 36.2        | 1.67    | 1.8         | 6.6                        | 6.68        | 2.46        | 2           |

Любой их этих параметров можно рассчитать, зная всего три параметра из следующих наборов: 1)  $H_0, w, h$ ; 2)  $H_0, H_2, h$ ; 3)  $H_0, H_2, x_0h$ ; 4)  $H_0, x_0h, h$ ; 5)  $H_2, x_0h, h$ ; 6)  $M, h, l$ ; Теория полосовых доменов позволяет определить зависимости  $l/h$  от  $P_0/h, x_0$  от  $P_0/h, x_0$  и  $w/h$  от  $l/h$ .

Для расчета параметров используют эмпирические соотношения. В интервале  $2 \leq P_0/h \leq 4$  с точностью до 0.3%:

$$l/h = (rP_0^2/\pi^3h^2)[1.0518 - (1 + 2\pi h\sqrt{\varepsilon/P_0})] \times \exp(-2\pi h\sqrt{\varepsilon/P_0}), \tag{5}$$

$$l/h = (rP_2^2/\pi^3h^2) \times \left[ 0.65735 - \sum_{n=1}^2 \sin^2(0.75n\pi\sqrt{\varepsilon/P_2}) \right], \tag{6}$$

$$H_{cm}/M = 1/2 + (rP_2/\pi^2h) \times \left[ -0.91596 + \exp(-2\pi h\sqrt{\varepsilon/P_2}) \right], \tag{7}$$

где  $r = 2/(1 + \sqrt{\varepsilon})$ ;  $\varepsilon = 1 + 1/Q$ ;  $P_2$  – период полосовых доменов при  $\frac{m}{M} = 0.5$

Формула (5) была приведена к виду:

$$\frac{l}{h} e^{6.28hP_0^{\frac{1}{2}}A} = \frac{0.1036P_0^2 - 12.56hP_0^2A}{30.96h^2(1 + A)}, \tag{8}$$

$$A = \sqrt{1 + \frac{1}{Q}}, \tag{9}$$

где  $Q$  – фактор качества.

По формуле (7) была рассчитана намагниченность насыщения  $M_s$  для 20 МПФГ различного состава [4]. В табл. 1 приведено сравнение теории с экспериментом. Экспериментальные данные были взяты из справочника [1]. Результаты расчета остальных параметров пленки состава  $Sm_{0.41}Lu_{2.07}La_{0.52}Ga_{0.58}Fe_{4.42}O_{12}$  и сравнение их с экспериментальными данными приведено в табл. 1.

Приведенная задача в практике Астраханского государственного университета предлагается студентам специальностей 22.03.01 “Материаловедение и технологии материалов” при изучении дисциплины “Физика магнитных материалов”, 03.03.02 “Физика” при изучении дисциплин “Общая физика”, раздел “Электричество и магнетизм” и дисциплины “Магнитные свойства вещества”, а также студентам специальности 13.03.02 “Электроэнергетика и электротехника” при изучении дисциплины “Магнитные измерения”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балбашов А.М. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.
2. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М.: Мир, 1987.
3. Круничка С. Физика ферритов. Ч. 1. М.: Мир, 1976.
4. Смирнов В.В., Алькова О.М., Безниско Е.И., Курамшин К.В. // VI Межд. конф. “Фотоника и информационная оптика”: Сб. научн. труд. (Москва, 2017). С. 504.