

05,11

## Магнитооптические свойства феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в окрестности температуры магнитной компенсации

© Б.Ю. Соколов<sup>1</sup>, М.З. Шарипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный университет Узбекистана им. Улугбека, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Бухарский инженерно-технологический институт, Бухара, Узбекистан

E-mail: optic@nuuz.uzsci.net

(Поступила в Редакцию 22 октября 2013 г.)

Проведены экспериментальные исследования магнитооптической восприимчивости и петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея, сопровождающих процесс технического намагничивания феррита-граната  $Tb_3Fe_5O_{12}$ , в температурной области вблизи точки магнитной компенсации этого ферримагнетика  $T_c = 249$  К. Обнаружено, что в процессе технического намагничивания при приближении температуры к  $T_c$  скорость движения доменных границ растет, а магнитооптическая восприимчивость имеет локальные максимумы справа и слева от  $T_c$ . Отмеченные особенности магнитооптических свойств  $Tb_3Fe_5O_{12}$  связываются с резонансом собственной частоты колебаний доменных границ кристалла с частотой знакопеременного магнитного поля. Показано, что используемая теоретическая модель магнитного резонанса доменных границ позволяет непротиворечиво описать (на качественном уровне) выявленные закономерности изменения эффекта Фарадея в  $Tb_3Fe_5O_{12}$  вблизи  $T_c$ .

### 1. Введение

Известно, что вблизи температуры магнитной компенсации  $T_c$  многие физические свойства (теплоемкость, модуль Юнга, частота ферромагнитного резонанса и др.) редкоземельных ферритов-гранатов (РЗФГ) резко меняются [1]. В подавляющем большинстве посвященных данному вопросу работ исследования свойств РЗФГ в окрестности  $T_c$  были выполнены в условиях магнитного насыщения кристалла (в монодоменном состоянии образца) [1]. Отчасти это вызвано тем, что согласно некоторым теоретическим представлениям, доменная структура (ДС) в кристаллах РЗФГ при  $T \rightarrow T_c$  исчезает (см., например, [2,3]) и, следовательно, в окрестности  $T_c$  не оказывает влияния на их физические свойства. Однако в [4] на примере тонкой монокристаллической пластинки феррита-граната  $Tb_3Fe_5O_{12}$  показано, что при  $T \approx T_c$  устойчивая ДС сохраняется во внешнем магнитном поле напряженностью до  $H \approx 3 \div 5$  Ое.

Очевидно, что в слабом магнитном поле, когда в кристалле существует ДС, изменение физических свойств РЗФГ при  $T \rightarrow T_c$  может существенно усложниться. Поскольку именно область слабых магнитных полей наиболее актуальна в плане практического использования этих ферримагнетиков, были проведены экспериментальные исследования влияния ДС на магнитооптические свойства феррита-граната  $Tb_3Fe_5O_{12}$  в температурной области в окрестности точки его магнитной компенсации ( $T_c = 249$  К [5]), результаты которых приведены далее.

### 2. Методика эксперимента и образцы

Для экспериментов использовался тот же образец монокристалла  $Tb_3Fe_5O_{12}$ , на котором были выполнены исследования в [4]: образец имел форму плоскопараллельной пластинки с поперечными размерами  $\approx 2 \times 3$  мм<sup>2</sup> толщиной  $\approx 100$  мкм, вырезанной так, чтобы ее развитые поверхности составляли угол  $\approx 10^\circ$  с кристаллографической плоскостью (111). Такая ориентация кристалла позволила получить образец с наиболее простой с точки зрения интерпретации экспериментальных результатов полосовой  $180^\circ$  ДС „коттоновского“ типа: векторы спонтанного магнитного момента  $\mathbf{M}_s$  в соседних доменах антипараллельны друг другу, а доменные границы (ДГ) ориентированы вдоль проекции одной из кристаллографических осей  $\langle 111 \rangle$  на плоскость образца; при изменении температуры ширина доменов изменяется путем перескоков ДГ из одного метастабильного положения в другое, при этом в процессе нагрева—охлаждения образца наблюдается температурный гистерезис периода его ДС (подробнее см. [4]).

Для изучения влияния ДС на магнитооптические свойства  $Tb_3Fe_5O_{12}$  вблизи  $T_c$  были исследованы две магнитооптические характеристики кристалла, непосредственно связанные с реализующейся доменной конфигурацией, — температурная зависимость начальной магнитооптической восприимчивости и петли магнитного гистерезиса эффекта Фарадея (ЭФ).

В рамках двухподрешеточной модели РЗФГ при нормальном падении света на плоскость образца спонтан-

ный ЭФ в  $Tb_3Fe_5O_{12}$  может быть представлен в виде [6]

$$\varphi = \pm(aM_{Fe} \cos \theta_1 + bM_R \cos \theta_2)l. \quad (1)$$

Здесь  $a$  и  $b$  — зависящие от частоты света магнитооптические коэффициенты,  $M_{Fe}$  и  $M_R$  соответственно спонтанные магнитные моменты железной и РЗ подрешеток (в коллинеарной магнитной фазе кристалла векторы  $\mathbf{M}_{Fe}$  и  $\mathbf{M}_R$  антипараллельны друг другу),  $\theta_1, \theta_2$  — углы, образованные векторами  $\mathbf{M}_{Fe}$  и  $\mathbf{M}_R$  с нормалью к плоскости образца (в нашем случае в отдельном домене образца углы  $\theta_1, \theta_2 \approx \pm 80^\circ$ ),  $l$  — толщина образца; знак плюс перед скобкой относится к области температур выше, а знак минус — к области температур ниже  $T_c$ . Очевидно, что при наличии в образце  $180^\circ$  ДС при засветке его площади, значительно превышающей площадь отдельного домена, ЭФ будет определяться так:

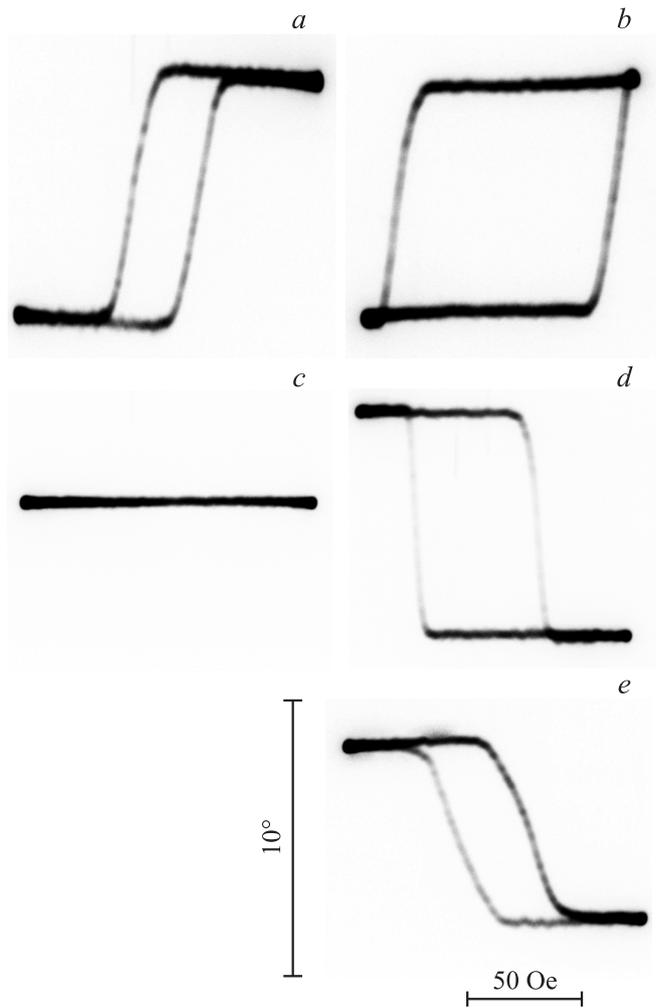
$$\Phi = \varphi(S_+ - S_-) \propto \varphi x, \quad (2)$$

где  $S$  — засвеченная площадь образца,  $S_+$  и  $S_-$  — площади доменов с противоположной ориентацией вектора  $\mathbf{M}_s$ ,  $x$  — среднее смещение ДГ под действием  $H$  относительно положения равновесия.

Зависимость магнитооптической восприимчивости  $\chi = \partial\Phi/\partial H$  от  $T$  и зависимость угла  $\Phi$  от  $H$  были исследованы по стандартной интенсивностной методике в переменном магнитном поле, изменяющемся по гармоническому закону с частотой  $\nu = 25$  Hz. В экспериментах измерялась величина отношения  $\Delta I/I$ , где  $\Delta I$  и  $I$  соответственно переменная и постоянная составляющие интенсивности света, прошедшего систему поляризатор-образец-анализатор при ориентации осей пропускания поляризатора и анализатора под углом  $45^\circ$  друг к другу. В этом случае (с учетом незначительной величины измеряемых углов  $\Phi$ )  $2\Phi = \Delta I/I$  [7], следовательно  $\Delta I(H)/I = 2\Phi(H)$ , а  $\Delta I/(IH_0) \approx \chi$  (на начальном участке кривой технического намагничивания), где  $H_0$  — амплитуда переменного магнитного поля. Для намагничивания образца использовалось магнитное поле напряженностью  $H \leq 60$  Oe, создаваемое парой катушек Гельмгольца; в качестве источника света применялась галогеновая лампа накаливания.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 показан ряд осциллограмм петель магнитного гистерезиса ЭФ, полученных в процессе нагрева образца от минимально достижимой в эксперименте  $T = 85$  K при ориентации вектора  $\mathbf{H}$  в плоскости образца вдоль среднего направления ДГ при различной температуре, из которых видно, что при  $T \rightarrow T_c$  ширина петли гистерезиса растет, однако в непосредственной близости к  $T_c$  петля схлопывается, превращаясь в горизонтальную прямую. „Схлопнутая“ петля гистерезиса ЭФ наблюдается в интервале  $248 \leq T \leq 250$  K. Таким образом, за исключением этого температурного интервала используемое в эксперименте переменное магнитное

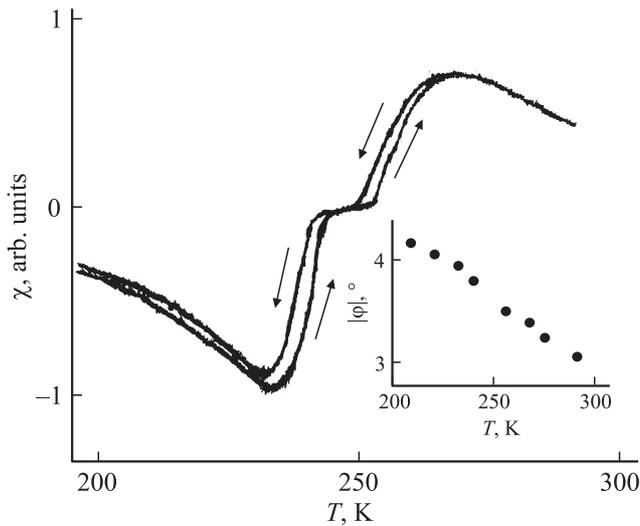


**Рис. 1.** Осциллограммы петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея в исследованном образце, полученные при разной температуре: 200 (a), 241 (b), 249 (c), 260 (d) и 280 K (e).

поле амплитудой  $H_0 = 60$  Oe создает условие полного перемагничивания образца во всей исследованной области  $200 \leq T \leq 295$  K.<sup>1</sup>

На рис. 2 представлена температурная зависимость магнитооптической восприимчивости исследованного образца, полученная в магнитном поле амплитудой 0.2 Oe (вектор  $\mathbf{H}$  лежит в плоскости образца и направлен вдоль среднего направления ДГ). Там же (на вставке) приводится температурная зависимость спонтанного ЭФ, определенная на основе исследований петель магнитного гистерезиса. Как видно из рис. 2, при  $T \rightarrow T_c$  сначала величина  $\chi$  растет, достигая некоторого максимального значения, после чего резко падает

<sup>1</sup> При охлаждении образца от комнатной температуры общее поведение петель гистерезиса ЭФ аналогично представленному на рис. 1 с той лишь разницей, что интервал температур, в котором наблюдается „схлопнутая“ петля, сдвинут вниз примерно на 3 K. Очевидно, что этот температурный гистерезис связан с отмечавшейся выше необратимостью смещения ДГ образца в процессе его нагрева-охлаждения.



**Рис. 2.** Температурная зависимость начальной магнитооптической восприимчивости исследованного образца (скорость нагрева/охлаждения образца  $\approx 0.2$  K/s). Стрелками указано направление изменения температуры. На вставке: температурная зависимость спонтанного эффекта Фарадея в исследованном образце.

практически до нуля; причем значение  $\chi \approx 0$  наблюдается в достаточно широком интервале температур, уменьшающемся (как показал эксперимент) с увеличением амплитуды переменного поля. Поскольку в интересующей нас температурной области спонтанный ЭФ линейно зависит от  $T$  (см. вставку на рис. 2), можно считать, что характер зависимости  $\chi(T)$  определяется немонотонным изменением средней величины смещения ДГ из положения равновесия под действием  $H$  при изменении температуры.

#### 4. Обсуждение экспериментальных результатов

Известно, что намагничивание магнетика во внешнем поле  $H$  определяется двумя основными механизмами — смещением ДГ и вращением вектора  $M_s$ . Обычно считается, что при  $T \approx T_c$  ДС не играет существенной роли в процессе технического намагничивания РЗФГ: намагничивание или перемагничивание кристалла осуществляется за счет однородного вращения  $M_s$  (см., например, [8]). В этом случае коэрцитивная сила соответствует полю, при котором состояние с вектором  $M_s$ , направленным против вектора  $H$ , становится неустойчивым, и при  $H \parallel \langle 111 \rangle$  определяется как [8]

$$H_c = 4K/(3M_s), \quad (3)$$

где  $K$  — константа магнитной анизотропии.

Зависимости  $K(T)$  и  $M_s(T)$  для  $Tb_3Fe_5O_{12}$  в интересующей нас температурной области хорошо известны, что позволяет сравнить вытекающую из (3)

зависимость  $H_c(T)$  с результатами, полученными при исследованиях петель магнитного гистерезиса ЭФ. Так, например, при  $T = 260$  K  $M_s \approx 47$  G [5,9],  $K \approx 8500$  erg/cm<sup>3</sup> [9,10]. Подставляя эти значения в (3), получим  $H_c \approx 240$  Oe, что примерно в 8 раз превышает величину коэрцитивной силы образца, наблюдаемую при  $T = 260$  K экспериментально (см. рис. 1, d), причем при  $T \rightarrow T_c$  это различие между результатами эксперимента и расчета по (3) (с использованием данных по температурной зависимости  $K$  [9,10] и  $M_s$  [5,9]) еще больше увеличивается. Очевидно, что существенное превышение рассчитанных значений  $H_c$  над данными измерений означает, что модель однородного вращения  $M_s$  не соответствует экспериментальной ситуации. Следовательно, в нашем случае поле зародышеобразования доменов новой магнитной фазы оказывается значительно меньше поля анизотропии, и процесс технического намагничивания исследованного образца в низкочастотном магнитном поле в окрестности точки магнитной компенсации в основном определяется смещением ДГ.

Если определить среднюю скорость движения ДГ в поле  $H$  как  $V = d/\tau$ , где  $d$  — средняя ширина доменов,  $\tau$  — время перемагничивания ( $\tau$  пропорционально котангенсу угла наклона ниспадающего (возрастающего) участка петли к оси абсцисс, рис. 1), то на основании рис. 1 (с учетом относительно слабой температурной зависимости  $d$ , см. рис. 1 из [4]) можно заключить, что наблюдаемое постепенное изменение формы петли гистерезиса ЭФ от „классической“ к прямоугольной обусловлено ростом скорости движения ДГ при  $T \rightarrow T_c$ .

Отметим, что увеличение скорости движения ДГ при приближении температуры к точке компенсации, а также наличие локальных максимумов магнитооптической восприимчивости справа и слева от  $T_c$  (рис. 2), несколько неожиданно, поскольку давление  $P = 2M_sH$ , оказываемое магнитным полем на ДГ, при  $T \rightarrow T_c$  монотонно уменьшается.

Для интерпретации полученных результатов обратимся к феноменологической теории движения ДГ во внешнем поле  $H$ . Следуя [11], для описания смещения ДГ в поле, изменяющемся со временем по гармоническому закону, воспользуемся уравнением

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} \alpha + kx = 2M_s H_0 \cos \omega t, \quad (4)$$

где  $m$  — масса единицы поверхности ДГ,  $\alpha$  — параметр вязкого трения (коэффициент затухания),  $k$  — постоянная возвращающей силы (коэффициент упругости),  $\omega$  — циклическая частота,  $t$  — время; вектор  $H$  параллелен направлению границ.

В установленном режиме вынужденных колебаний решение уравнения (4) хорошо известно — это гармоническое колебание ДГ с частотой  $\omega$  и амплитудой

$$X = X_0 [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2]^{-1/2}, \quad (5)$$

где  $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$  — собственная частота колебаний ДГ,  $2\beta = \alpha/m$ ,  $X_0 = 2M_s H_0/m$ ; откуда следует, что при

$\omega = (\omega_0^2 - 2\beta^2)^{1/2}$  (условие резонанса колебаний) амплитуда смещения ДГ под действием  $H$  достигает максимума  $X_{\max} = X_0/2\omega_0\beta$  (при  $\beta \ll 1$ ).

Отсутствие скачков Баркгаузена на полученной кривой  $\chi(T)$  (рис. 2) означает, что смещение ДГ под действием переменного магнитного поля амплитудой  $H_0 = 0.2$  Ое происходит обратимо, т.е. ДГ совершают гармонические колебания около своего положения равновесия. Следовательно, решение уравнения (4) в форме (5) может быть использовано для анализа экспериментальных результатов, полученных при исследованиях температурной зависимости магнитооптической восприимчивости  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  вблизи  $T_c$ .<sup>2</sup>

В случае  $180^\circ$ -ДГ блоховского типа ее масса (масса Деринга)  $m = 1/2\pi\Delta\gamma^2$ , где  $\Delta$  — ширина ДГ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение [11]. Для РЗФГ величина гиромагнитного отношения определяется формулой Киттеля [12]

$$\gamma = \gamma_{\text{Fe}} M_s / M_{\text{Fe}}, \quad (6)$$

где  $\gamma_{\text{Fe}}$  — гиромагнитное отношение для ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . С учетом (6) массу ДГ можно представить как

$$m = M_{\text{Fe}}^2 / 2\pi\Delta(\gamma_{\text{Fe}} M_s)^2, \quad (7)$$

что позволяет, используя (5) и (2), получить уравнение

$$F(T) = \frac{\chi(T)/\varphi(T)}{(\chi/\varphi)_{\max}} = \frac{\partial X/\partial H(T)}{\partial X_{\max}/\partial H} = \frac{M_s}{M_{\text{Fe}}} (A + B M_{\text{Fe}}^2 / M_s^2 + C M_{\text{Fe}}^4 / M_s^4)^{-1/2}, \quad (8)$$

где  $(\chi/\varphi)_{\max}$  — максимальное значение функции  $\chi(T)/\varphi(T)$ ,

$$A = (k^2 + \alpha^2 \omega^2) / 2\pi\alpha^2 k \Delta \gamma_{\text{Fe}}^2,$$

$$B = 2(\omega/2\pi\Delta\gamma_{\text{Fe}}^2)^2,$$

$$C = \omega^4 / 8\pi^3 \alpha^2 k \Delta^3 \gamma_{\text{Fe}}^6.$$

На рис. 3 рассчитанная по (8) зависимость  $\frac{\partial X/\partial H(T)}{\partial X_{\max}}/\partial H$  сравнивается с экспериментальной зависимостью  $F(T)$ , полученной на основе температурных зависимостей угла  $\varphi$  и магнитооптической восприимчивости  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , представленных на рис. 2 (при построении экспериментальной кривой  $F(T)$  в качестве  $T_c$  принята точка, соответствующая середине интервала температур, где  $\chi \approx 0$ , и использована зависимость  $\chi(T)$ , полученная при охлаждении образца). Расчеты по (8)

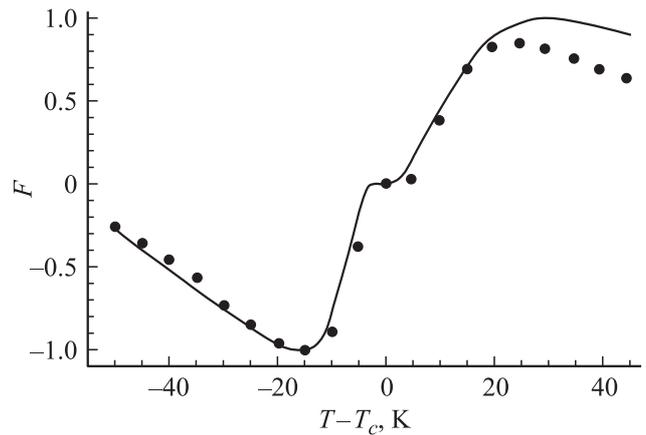


Рис. 3. Температурная зависимость величины  $F$ . Точки — эксперимент, сплошная линия — результат подгонки функции (8) к экспериментальным точкам.

были выполнены с использованием компьютерной программы нахождения функции правдоподобия и зависимостей  $M_{\text{Fe}}(T)$ ,  $M_s(T)$  из [5]. Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что рассчитанная зависимость  $\frac{\partial X/\partial H(T)}{\partial X_{\max}/\partial H}$  достаточно хорошо коррелирует с зависимостью  $\frac{\chi(T)/\varphi(T)}{(\chi/\varphi)_{\max}}$ , полученной экспериментально. Это позволяет заключить, что при  $T \rightarrow T_c$  возникают условия резонанса частоты колебаний ДГ в используемом в эксперименте переменном магнитном поле с частотой  $\omega = 2\pi\nu = 50\pi s^{-1}$ , чем и определяется немонотонное изменение величины  $\chi$  в зависимости от  $T$ . По имеющимся данным, собственные частоты колебаний ДГ в РЗФГ при комнатной температуре  $\sim 10^5$  Hz [13], однако из (7) видно, что вблизи  $T_c$  (при  $M_s \rightarrow 0$ )  $m \rightarrow \infty$  и, следовательно, собственная частота колебаний ДГ  $\omega_0 = (k/m)^{1/2} \rightarrow 0$  (результаты более детального исследования низкочастотного резонанса ДГ в  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при  $T \approx T_c$  опубликованы в [14]).

Что же касается отличия хода кривой от экспериментальных точек (в области  $T > T_c$ ), то следует учесть следующее: во-первых, на рис. 3 сравниваются между собой графики, полученные на основе четырех независимых экспериментов, — температурных зависимостей величин  $M_{\text{Fe}}$ ,  $M_s$ ,  $\varphi$  и  $\chi$ , — каждая из которых определена с некоторой экспериментальной ошибкой; во-вторых, величины параметров  $k$ ,  $\alpha$  и  $\Delta$  меняются с температурой, что не учитывалось при расчете.<sup>3</sup>

Возвращаясь к обсуждению температурной эволюции петель магнитного гистерезиса ЭФ в исследованном кристалле (рис. 1), учтем, что в реальном образце достаточно больших размеров основным параметром, определяющим положение ДГ, является пространственное распределение центров пиннинга (дислокации, немаг-

<sup>2</sup> В реальном кристалле ДГ закреплены на центрах пиннинга, а обратимые смещения ДГ в слабом переменном магнитном поле представляют собой колебания удаленных от центров пиннинга, относительно свободных участков границы: под действием внешнего поля эти участки смещаются в направлении, перпендикулярном вектору  $\mathbf{H}$ , выгибая плоскость ДГ. Поэтому при рассмотрении колебательного движения ДГ около положения равновесия под  $X$  в (5) следует понимать среднюю величину прогиба ее плоскости.

<sup>3</sup> В настоящее время не существует законченной микроскопической теории подвижности ДГ в РЗФГ [11], поэтому определить явный вид зависимостей  $k(T)$  и  $\alpha(T)$  не представляется возможным.

нитные примесные включения и т. п.) в кристаллической решетке: с энергетической точки зрения выгодно, чтобы плоскость ДГ содержала центры пининга [15]. Следовательно, для начала свободного движения ДГ как целого внешнее магнитное поле должно превышать некоторое пороговое значение, определяющееся величиной поля пининга  $H_p$ . С учетом этого из (5) следует, что скорость ДГ

$$V = \partial x / \partial t = 2\omega M_s (H_0 - H_p) m^{-1} [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2]^{-1/2} \sin(\omega t + \delta), \quad (9)$$

где  $\delta$  — начальная фаза колебаний.<sup>4</sup>

К сожалению, недостаточная точность метода осциллографирования не позволяет определить зависимость  $V(T)$  непосредственно из анализа формы петель магнитного гистерезиса ЭФ. Однако, если считать, что центрами пининга ДГ являются микроскопические скопления немагнитных примесей, содержащихся в кристалле, то  $H_p \propto M_s$  [15], и следовательно, при  $T \rightarrow T_c$  поле  $H_p \rightarrow 0$ . В этом случае из (9) следует, что при приближении температуры к точке магнитной компенсации скорость движения ДГ должна расти, а в непосредственной близости к  $T_c$  должен (принимая во внимание вид температурной зависимости функции  $2M_s(H_0 - H_p)m^{-1}[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2]^{-1/2}$  (рис. 3)) существовать конечный интервал температур, где  $V = 0$  (т.е. в этом температурном интервале ДС образца не реагирует на внешнее поле  $H$  и, следовательно, угол  $\Phi = 0$ ). Именно такое изменение скорости смещения ДГ при  $T \rightarrow T_c$  вытекает из наблюдаемых экспериментально петель гистерезиса ЭФ (см. рис. 1).

Таким образом, предложенная модель смещения ДГ под действием низкочастотного магнитного поля позволяет (по крайней мере, на качественном уровне) непротиворечиво описать выявленные закономерности влияния ДС исследованного образца феррита-граната  $Tb_3Fe_5O_{12}$  на его магнитооптические свойства при переходе температуры через точку магнитной компенсации.

## Список литературы

- [1] К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. Наука, М (1979). 317 с.
- [2] В.Г. Барьяхтар, Д.А. Яблонский. ФТТ **16**, 8, 3511 (1974).
- [3] А.Н. Богданов, Д.А. Яблонский. ФТТ **22**, 3, 680 (1980).
- [4] Б.Ю. Соколов, М.Д. Талабов, М.З. Шарипов. ФТТ **55**, 2, 278 (2013).
- [5] M. Guilot, H. Le Gall. J. de Phys. **38**, 871 (1977).
- [6] Н.Ф. Харченко, В.В. Еременко, С.Л. Гнатченко, Л.И. Бельий, Э.М. Кабанов. ЖЭТФ **68**, 3, 1073 (1975).
- [7] М.М. Червинский, С.Ф. Глаголев, В.Б. Архангельский. Методы и средства измерений магнитных характеристик пленок. Энергоатомиздат, Л. (1990). 208 с.
- [8] Б.П. Горанский, А.К. Звездин. ЖЭТФ **57**, 2(8), 547 (1969).
- [9] Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Энергоатомиздат, М (1991). 1232 с.
- [10] К.П. Белов, А.К. Гапеев, Р.З. Левитин, А.С. Маркосян, Ю.Ф. Попов. ЖЭТФ **68**, 1, 241 (1975).
- [11] В.В. Волков, В.А. Боков. ФТТ **50**, 2, 193 (2008).
- [12] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 319 с.
- [13] В.С. Горнаков, Л.М. Дедух, В.И. Никитенко, В.Т. Сыногач. ЖЭТФ **90**, 2090 (1986).
- [14] Б.Ю. Соколов, М.З. Шарипов. ЖЭТФ **143**, 5, 895 (2013).
- [15] С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Мир, М. (1987). 420 с.

<sup>4</sup> Из рис. 1 видно, что вблизи  $T_c$  зависимость  $\Phi(t)$  имеет вид близкий к меандру с периодом  $\approx 2\pi/\omega$ , т.е. может быть представлена рядом Фурье:  $\Phi(t) = 1 + \frac{2c}{\pi} (\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots)$ , где  $c \propto \varphi X$ . Поэтому зависящий от  $t$  множитель в (9) следует рассматривать как первое приближение к реальной временной зависимости скорости движения ДГ.