

# Статические и динамические фотоиндуцированные магнитные эффекты в иттрий-железистом гранате с малой примесью ионов бария

© Н.В. Воробьева<sup>¶</sup>, Р.З. Халилов

Институт физики молекул и кристаллов Российской академии наук,  
450075 Уфа, Россия

(Получена 12 сентября 2011 г. Принята к печати 18 октября 2011 г.)

В монокристаллах иттрий-железистого граната с малой примесью бария при 78–100 К прямые измерения фотоиндуцированного изменения магнитострикционных деформаций не соответствуют изменению констант магнитострикции. Это отнесено к значительному фотоиндуцированному изменению начального состояния в этом образце вследствие перераспределения (при освещении) заряда между катионами ферромагнитной октаэдрической подрешетки. В этом же образце измерена и рассчитана температурная зависимость фотоиндуцированной дезаккомодации магнитной проницаемости, характеризующей начальное, размагниченное состояние. Показана смена электронного механизма явления при переходе к комнатным температурам. Сделан вывод о перспективности использования таких образцов для перемагничивания светом.

## 1. Введение

Иттрий-железистый гранат,  $Y_3Fe_5O_{12}$ , — ферримагнитный диэлектрик, который при незначительном легировании проявляет свойства полупроводника. Активация светом избыточного заряда в окрестностях дефектов приводит к фотомагнитным превращениям — физические свойства кристалла после освещения изменяются [1]. При этом электрическое сопротивление кристалла остается очень высоким. Иттрий-железистый гранат (ИЖГ) с малой примесью бария интересен тем, что при значительных фотоиндуцированных изменениях таких характеристик, как магнитострикция [2], кубическая анизотропия [3], при температурах 78–100 К не происходит видимого фотоиндуцированного перестраивания доменной структуры. Этим ИЖГ(Ва) отличается от других исследуемых фотомагнитных кристаллов. Основным изучаемым эффектом для большинства фотомагнитных образцов является как раз фотоиндуцированное перестраивание доменной структуры [4] в связи с возможным применением этого эффекта в устройствах магнитной памяти. В то же время в ИЖГ(Ва) при 78–100 К после освещения происходит изменение структуры доменной границы [5] и уменьшение константы динамической магнитоупругой связи [6]. К тому же именно такой кристалл проявляет свойства высокотемпературного фотомагнетизма по динамике магнитной проницаемости [7].

В данной работе для ИЖГ(Ва) исследуются особенности фотоиндуцированных изменений магнитострикции, а также фотоиндуцированные изменения динамики магнитной проницаемости. На основании полученных результатов прогнозируется возможность практического использования этого материала.

## 2. Образцы и методика исследований

Основные результаты были получены на монокристаллических (110)-пластинах. Исследовались монокристаллы  $Y_3Fe_5O_{12}$ , выращенные из растворителей  $BaO-B_2O_3$  (образцы ИЖГ(Ва)) [8]. Концентрация примесных ионов очень мала: аналитически удастся обнаружить только наличие примесных ионов.

Для изучения фотоиндуцированных изменений магнитострикции проводились мостовым методом, пленочными хромовыми тензорезисторами, сформированными на поверхности монокристаллических образцов с помощью фотолитографии. Образец находился в криостате на холодном пальце или прямо погружался в жидкий азот. Для повышения температуры в низковакуумный криостат опускался резистор-нагреватель, а температура столика с образцом контролировалась термопарой. Для измерений непосредственно в жидком азоте была сконструирована система с жесткой фиксацией подводных проводов, держателем образца и светодиодами. Длины волн воздействующего света составляли 0.8–1.1 мкм.

Для измерения магнитной проницаемости из монокристаллов изготавливались кольца с однородным прямоугольным сечением толщиной 0.1–0.3 мм. Ориентация монокристаллов ИЖГ производилась на рентгеновской установке ДРОН-3. Блок-схема установки для измерения динамической магнитной проницаемости показана в работе [9].

## 3. Результаты и их обсуждение

Измерялись зависимости величины магнитострикционной деформации  $\Delta L/L$  от значения внешнего магнитного поля  $H$  (полевые зависимости) при ориентации тензорезистора вдоль  $\langle 111 \rangle$  и вдоль  $\langle 100 \rangle$  до и после

<sup>¶</sup> E-mail: vnv@anrb.ru

Результаты измерений и расчетов магнитострикции для иттрий-железистого граната с примесью Ва

Направление измерения	$\Delta L/L, 10^{-5}$	$\lambda_H, 10^{-5}$	$\lambda_{\langle 111 \rangle}, 10^{-5}$	$\Delta L/L, 10^{-5}$	$\lambda_H, 10^{-5}$	$\lambda_{\langle 111 \rangle}, 10^{-5}$
	до освещения			после освещения		
111	-0.9	-1.66	-0.76	-0.65	-1.41	-0.76
001	0.22	0.23	0.01	0.2	0.24	0.04

Направление измерения	$\lambda_{111}, 10^{-5}$		$\lambda\sigma, 10^{-5}$		$\lambda_{100}, 10^{-5}$	
	до освещения	после освещения	до освещения	после освещения	до освещения	после освещения
111	-0.73	-0.63	-1.42	-1.17	-	-
001	-	-	-	-	0.23	0.24

Примечание. В таблице частично использованы данные [10] для ориентации  $\langle 111 \rangle$ .

освещения (рис. 1). Также измерялись изменения магнитострикционной деформации при повороте внешнего магнитного поля в плоскости образца (угловые зависи-

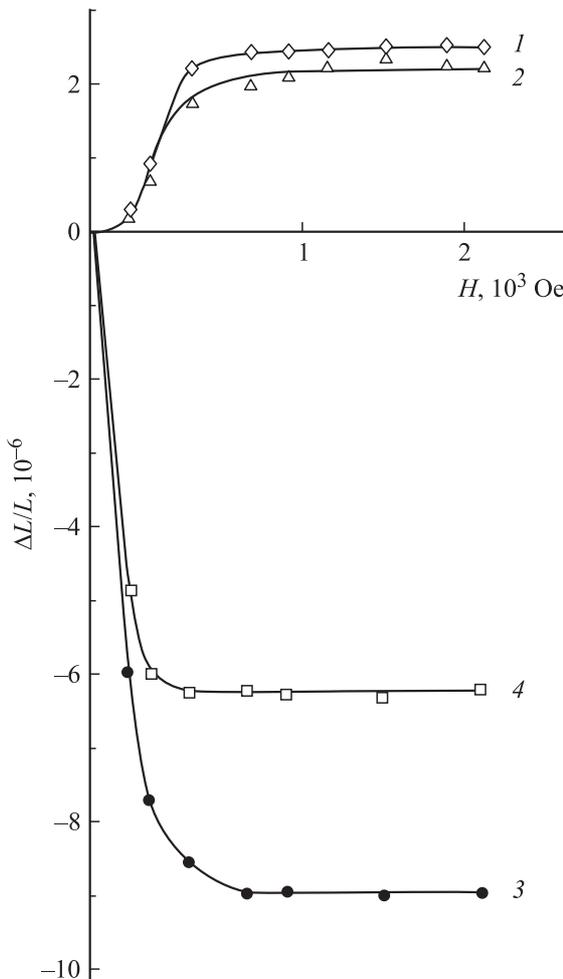


Рис. 1. Полевые зависимости магнитострикционной деформации для образца иттрий-железистого граната с примесью Ва, измеренные в направлении [001] при 78 К (кривые 1, 2) и в направлении [111] при 100 К (кривые 3, 4). Кривые 1, 3 — до воздействия света; 2, 4 — после освещения; 1, 2 — при H, направленном по [001]; 3, 4 — при H, направленном по [111].

мости). Угловые зависимости дают возможность полностью исключить влияние на магнитострикцию неопределенности доменной ориентации в начальном размагниченном состоянии. В работах [2,10] была показана возможность расчета фотоиндуцированного изменения констант магнитострикции, основанная на обсчете угловых зависимостей.

Выражения для магнитострикции правильных кубических монокристаллов [11,12] дают возможность объяснить полученные данные с учетом напряженного состояния образца. Но этого недостаточно для совместного описания угловых и полевых зависимостей. Так, при измерениях по [001] константа кубической магнитострикции  $\lambda_{100}$  после освещения несколько возрастает (см. таблицу), а значение  $\Delta L/L$  однозначно уменьшается (рис. 1). Следовательно, для полного описания магнитострикции в образце надо рассматривать фотоиндуцированные изменения как по начальному состоянию ( $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ ), так и по конечному, насыщенному в направлении поля состоянию ( $\lambda_H$ ). Изменения по конечному состоянию определяются изменением констант магнитострикции, рассчитанных из угловой зависимости, а по начальному — первоначальным распределением магнитных фаз и напряжений в образце. Измеряемая в полевой зависимости величина  $(\Delta L/L) = \lambda_H - \lambda_{\langle 111 \rangle}$ , где  $\lambda_{\langle 111 \rangle}$  — магнитострикция начального состояния;  $\lambda_H$  — магнитострикция конечного, насыщенного состояния (см. таблицу);  $\lambda\sigma$  — дополнительный параметр, учитывающий упругие напряжения в образце [2,10]. Учет начального состояния необходим по причине неидеальности образца, т.е. наличия поверхностных доменов, возможного отклонения ориентации фаз от „легкого“ тригонального направления, а также неэквивалентностью различных тригональных направлений в реальном образце.

Для направления измерения магнитострикции [001] время засветки 10 мин белым светом в магнитном поле. В других условиях возможен иной результат [13]. Для этого направления измерения первоначальное состояние можно определить из соотношений  $(\Delta L/L)^{001} = \lambda_{100} - \lambda'_{\langle 111 \rangle}$ , где  $\lambda'_{\langle 111 \rangle}$  — первоначальное состояние для

измерения в направлении  $[001]$ ,  $\lambda_H = \lambda_{100}$ . Для направления  $[111]$  первоначальное состояние можно определить из соотношения  $(\Delta L/L)^{111} = \lambda_{111} + (2/3)\lambda\sigma - \lambda_{\langle 111 \rangle}$ , где  $\lambda_{\langle 111 \rangle}$  — первоначальное состояние для магнитострикции, измеряемой в направлении  $[111]$ ,  $\lambda_H = \lambda_{\langle 111 \rangle} + (2/3)\lambda\sigma$ .

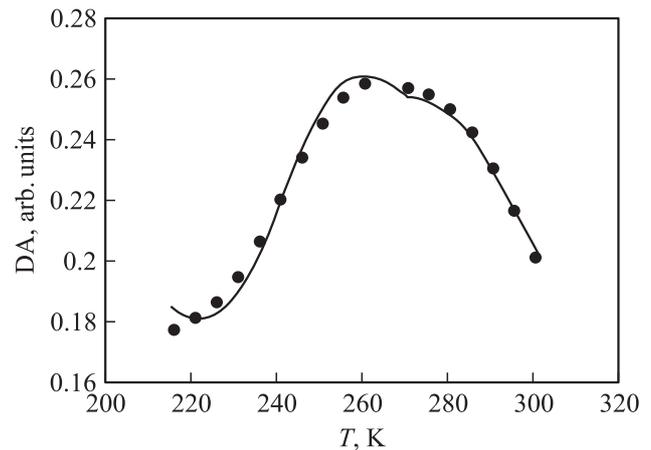
В отличие от большинства фотомангнитных монокристаллов видимого перестроения доменной структуры в результате воздействия света в ИЖГ(Ba) при низких температурах не наблюдается. Возникновение в результате первоначального освещения в октаэдрических кластерах ионов  $\text{Fe}^{4+}$  при температурах 78–100 К изменяет упругие напряжения в кристалле, симметрию направлений типа  $\langle 111 \rangle$ , что влияет на магнитострикцию образца. Однако экспериментально показано, что в реальном образце именно измерения в направлении типа  $\langle 100 \rangle$  являются наиболее чувствительными к эквивалентности „легких“ направлений типа  $\langle 111 \rangle$ , так как даже небольшие изменения симметрии „легких“ осей вследствие освещения в насыщающем магнитном поле приводят к заметному сдвигу кривой угловой зависимости. Из приведенных данных следует, что после освещения по направлению  $[001]$  возникает некоторое первоначальное растяжение. По направлению  $[111]$  в результате освещения первоначальное состояние не изменяется.

Можно видеть, что изменения магнитострикции и других параметров (например, отмеченное в работе [6] изменение динамического магнитоупругого взаимодействия) в ИЖГ(Ba) при низких температурах существенны. Значительные изменения по начальному состоянию доказывают, что фотоиндуцированные процессы, суть которых есть фотовозбуждение, активация и перенос неравновесного электрического заряда в ИЖГ(Ba), являются весьма заметными. В то же время фотоиндуцированной переориентации доменов не наблюдается. Это означает, что поле старта для спиновой переориентации в таком образце значительно. Для фотоиндуцированного изменения доменного состояния при низких температурах надо больше энергии, чем для изменения других параметров. Поэтому вопрос доменной переориентации в таких кристаллах требует более подробного исследования. Исследование динамических эффектов является более тонким и чувствительным инструментом для индикации состояния доменной структуры по сравнению со статическими эффектами. Наиболее чувствительной характеристикой динамики доменной структуры является дезаккомодация магнитной проницаемости.

В монокристаллическом иттрий-железистом гранате с малой примесью ионов бария (ИЖГ(Ba)) получены кривые температурного изменения дезаккомодации магнитной проницаемости до и после воздействия света [9]. Измерялась температурная зависимость дезаккомодации (DA):

$$DA = \frac{\mu_{t_1} - \mu_{t_2}}{\mu_{t_2}},$$

где  $\mu_{t_1}, \mu_{t_2}$  — магнитная проницаемость в момент времени  $t_1, t_2$ . Здесь  $t_1 = 0.8$  с,  $t_2 = 24$  с, отсчитанные от



**Рис. 2.** Температурная зависимость дезаккомодации (DA) магнитной проницаемости образца иттрий-железистого граната с примесью Ba после освещения. Точки — эксперимент, линия — расчет для двух интервалов энергии активации.

момента завершения размагничивания переменным магнитным полем в  $10^3$  Э, убывающим в течение 40 с. Дезаккомодация измерялась для монокристаллов ИЖГ(Ba), охлажденных в темноте (рис. 2). Кривая на рис. 2 получена для образца, охлажденного в темноте, а затем подвергнутого воздействию света в течение 10 мин.

На температурной зависимости дезаккомодации для образца до освещения видно два максимума — при 150 и при 250 К. После освещения остается один максимум — при 250 К [9].

Высокотемпературный пик дезаккомодации магнитной проницаемости (рис. 2) отнесен к перераспределению фотовозбужденных электронов между ионами кислорода, в то время как низкотемпературный, который исчезает после освещения, к переносу заряда между катионами железа в октаэдрической подрешетке. Кривая на рис. 2 получена как расчет фотоактивационных процессов. Изменение времени релаксации определялось как  $\tau = \tau_0 \exp(-E/kT)$ . Здесь  $k$  — постоянная Больцмана,  $E$  — энергия активации процесса,  $\tau_0$  — некоторая постоянная. Расчет выполнен для двух гауссовых пиков разной интенсивности и хорошо совпадает с экспериментальными значениями.

Для дезаккомодации магнитной проницаемости расчет, основанный на моделировании болцмановского процесса фотоактивации, дает хорошее совпадение с экспериментальными значениями при понижении температуры вплоть до 220 К. Ниже этой температуры расчетные значения не совпадают с экспериментальными, так как процесс переноса электрона между ионами кислорода в решетке ИЖГ является достаточно высокоэнергетическим, он не имеет места при низких температурах. Перенос же заряда между катионами железа, который является причиной фотоиндуцированных магнитных явлений при более низких температурах, вероятно, имеет более сложный характер. Он связан с

коллективными явлениями в магнитной подрешетке и не моделируется простым гауссовым распределением.

Следует отметить, что процессы фотоиндуцированного перестраивания доменной структуры в других образцах иттрий-железистого граната наблюдались при низких температурах вплоть до 220 К [14]. Это показывает, что спиновая переориентация в таких образцах тесно связана с явлениями катион-катионного переноса заряда. Фотоиндуцированный перенос заряда между анионами кислорода для них не фиксировался.

Однако для фотоиндуцированного перестраивания доменной структуры важно само наличие фотоизменяемых дефектов, а не их принадлежность [10]. К тому же кислород — участник косвенных обменных процессов в иттрий-железистых гранатах [15]. Это дает основание полагать, что, несмотря на отсутствие низкотемпературного фотоиндуцированного перестраивания доменной структуры, именно ИЖГ(Ва) является очень перспективным материалом для получения фотоиндуцированного перестраивания доменной структуры при комнатной температуре.

#### 4. Заключение

В монокристаллических иттрий-железистых гранатах с малой примесью бария были исследованы статические и динамические фотоиндуцированные магнитные эффекты: фотоиндуцированные изменения магнитострикции и дезаккомодации магнитной проницаемости.

Для изменений магнитострикции показана роль фотоиндуцированного изменения начального размагниченного состояния.

Несмотря на разнообразие фотомангнитных процессов в данном образце, большое поле старта делает энергетически невыгодным фотоиндуцированное перестраивание доменной структуры при низких температурах. С помощью исследования дезаккомодации магнитной проницаемости показано, что механизм высокотемпературного фотомангнетизма для этого образца отличается от механизма низкотемпературных процессов. Связь процессов высокотемпературного фотомангнетизма (обмен зарядов между анионами кислорода) с механизмом косвенного обмена (обмен типа Fe—O—Fe) дает основания полагать, что высокотемпературное фотоиндуцированное перестраивание доменной структуры при правильно подобранных условиях может быть реализовано в образцах этого типа.

Авторы благодарят И.В. Владимирову за помощь при обсчете кривой дезаккомодации магнитной проницаемости.

#### Список литературы

- [1] В.Ф. Коваленко, Э.Л. Нагаев. УФН, **148**, 561 (1986).  
 [2] В.Г. Веселаго, Н.В. Воробьева, Р.А. Дорошенко. Письма ЖЭТФ, **45**, 402 (1987).

- [3] Р.А. Дорошенко, М.С. Сетченков, И.В. Владимиров, В.А. Тимофеева. ФТТ, **34**, 377 (1992).  
 [4] В.Ф. Коваленко, С.Н. Ляхимец. ФТТ, **26**, 3014 (1984).  
 [5] И.В. Владимиров, Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова. ФТТ, **40**, 694 (1998).  
 [6] Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин. ФТТ, **39**, 1081 (1997).  
 [7] R.A. Doroshenko, R.Z. Khalilov. JMMM, **221**, 345 (2000).  
 [8] В.А. Тимофеева. *Рост кристаллов из растворов-расплавов* (М., Наука, 1978).  
 [9] Р.З. Халилов, Н.В. Воробьева. Нанотехника, **1**, 103 (2009).  
 [10] Н.В. Воробьева. Кристаллография, **56**, 362 (2011).  
 [11] С.В. Вонсовский. *Магнетизм* (М., Наука, 1971)  
 [12] С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. *Ферромагнетизм* (Л., Физматгиз, 1948).  
 [13] Н.В. Воробьева. Нанотехника, **1**, 85 (2008).  
 [14] Р.А. Дорошенко, М.С. Сетченков. *Тез. докл. X Всес. школы-семинара "Новые магнитные материалы для микроэлектроники"* (Рига, 1986) ч. II, с. 304.  
 [15] С. Крупицка. *Физика ферритов и родственных им магнитных окислов* (М., Мир, 1976) т. 1.

Редактор Т.А. Полянская

### Static and dynamic photoinduced magnetic effects in yttrium iron garnet with minor doping of barium ions

N.V. Vorob'eva, R.Z. Khalilov

Institute of Molecule and Crystal Physics,  
 Russian Academy of Sciences,  
 450075 Ufa, Russia

**Abstract** At 78–100 K in the single crystals of the yttrium iron garnet with minor doping of barium ions, there has been found that the direct measurements of the photoinduced changes of the magnetostrictive strains do not correspond to the photoinduced changes of the magnetostrictive constants. The effect has been related to the considerable photoinduced change of the initial magnetic state of this substrate because of the redistribution of the electric charge between the cation of the ferromagnetic octahedral sublattice during the illumination. The temperature dependence has been measured and calculated for the photoinduced desaccomodation of the magnetic permeability. The desaccomodation of the magnetic permeability is the characteristic of the initial demagnetized state. The change of the electronic mechanism of the effect has been shown with the transfer to the room temperatures. The conclusion is draw about the prospects of the use of such materials for remagnetisation with help of light.