

# Влияние диамагнитных примесей на магнитную восприимчивость бората железа

© С.Р. Бойдедаев, Б.Ю. Соколов

Национальный университет Узбекистана им. Улугбека,  
700174 Ташкент, Узбекистан

E-mail: optic@nuuz.uzsci.net

(Поступила в Редакцию 11 марта 2008 г.  
В окончательной редакции 14 апреля 2008 г.)

Магнитооптическим методом исследована низкочастотная магнитная восприимчивость монокристалла  $\text{FeVO}_3$  допированного диамагнитными ионами Mg. Показано, что введение в состав этого легкоплоскостного слабого ферромагнетика ионов Mg приводит к возникновению при низкой температуре сильной внутривоскостной магнитокристаллической анизотропии, а также к заметному различию вида полевых зависимостей магнитной восприимчивости, полученных при ориентации магнитного поля вдоль разных направлений в базисной плоскости кристалла. Обнаруженные особенности полевой зависимости магнитной восприимчивости исследованного кристалла связываются с перестройкой его магнитной структуры в процессе намагничивания.

PACS: 75.30.Kz, 75.30.Gv

## 1. Введение

Борат железа ( $\text{FeVO}_3$ ) — практически единственный из прозрачных в видимой области спектра кристаллов, имеющий спонтанный магнитный момент при комнатной температуре. Сочетание этих свойств делает  $\text{FeVO}_3$  перспективным материалом для использования в качестве активной среды в элементарной базе различных приборов прикладной магнитооптики. Обычно введение в состав магнетика небольшого количества диамагнитных примесей не оказывает существенного влияния на тип его магнитного упорядочения. Однако в случае  $\text{FeVO}_3$  это не так. Как показано в [1,2], при замещении в составе этого легкоплоскостного слабого ферромагнетика части ионов Fe диамагнитными ионами Mg в области температур  $T < 130$  К при намагничивании вблизи некоторых выделенных в „легкой“ плоскости направлений происходит перестройка магнитной структуры кристалла  $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$  — на фоне состояния со слабым ферромагнетизмом возникает магнитная сверхструктура. Эта структура может быть представлена статичной спиновой волной, в которой азимут локального вектора ферромагнетизма  $\mathbf{m}$  осциллирует около направления средней намагниченности при смещении вдоль направления приложенного магнитного поля  $\mathbf{H}$ . Очевидно, что магнитные свойства  $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$  в основной (однородной) и неколлинеарной магнитных фазах должны заметно различаться. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния перестройки магнитной структуры этого кристалла на его магнитную восприимчивость.

## 2. Образцы и методика измерений

Для экспериментов использовался тот же образец монокристалла  $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$  (содержание Mg ~ 0.1 wt.%),

на котором были выполнены исследования в [1,2]. Образец представлял собой плоскопараллельную пластинку толщиной  $\approx 60 \mu\text{m}$  с поперечными размерами  $\sim 3$  mm, развитые грани которой совпадали с плоскостью легкого намагничивания (с базисной плоскостью).

Исследовалась полевая зависимость низкочастотной магнитной восприимчивости  $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$  при ориентации намагничивающего поля вдоль различных направлений в базисной плоскости кристалла. Измерения магнитной восприимчивости проводились при  $T = 80$  К магнитооптическим методом с использованием излучения He–Ne-лазера с длиной волны  $\lambda \approx 0.63 \mu\text{m}$ . В эксперименте в плоскости образца наряду с постоянным прикладывалось слабое переменное (изменяющееся по гармоническому закону) магнитное поле с амплитудой  $h \approx 0.3$  Oe ( $\mathbf{h} \parallel \mathbf{H}$ ) и частотой  $f = 25$  Hz и измерялась величина отношения  $\Delta I/I \propto \partial\alpha/\partial H$ , где  $\Delta I$  и  $I$  — соответственно переменная и постоянная составляющие интенсивности света, прошедшего систему поляризатор–образец–анализатор,  $\alpha$ -угол фарадеевского вращения [2]. Поскольку в борате железа вектор  $\mathbf{m}$  лежит в базисной плоскости, эффект Фарадея возможен лишь при отклонении направления светового луча от нормали к плоскости образца (от оси  $C_3$ ). В этом случае угол  $\alpha$  определяется проекцией вектора средней намагниченности  $\mathbf{M}$  на направление распространяющегося в кристалле света. Поэтому в экспериментах образец ориентировался так, чтобы ось  $C_3$  составляла с направлением света угол  $\psi \sim 10^\circ$ , а векторы  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{h}$  лежали в плоскости образца в плоскости падения. Величина угла падения, а следовательно, и проекция  $\mathbf{M}$  на направление светового луча ограничивались тем, что в силу оптической двуосности кристалла при  $\psi > 10^\circ$  становится заметным влияние на поляризацию распространяющегося в образце света кристаллического двупреломления, проявляющееся в зависимости формы измеряемого сигнала

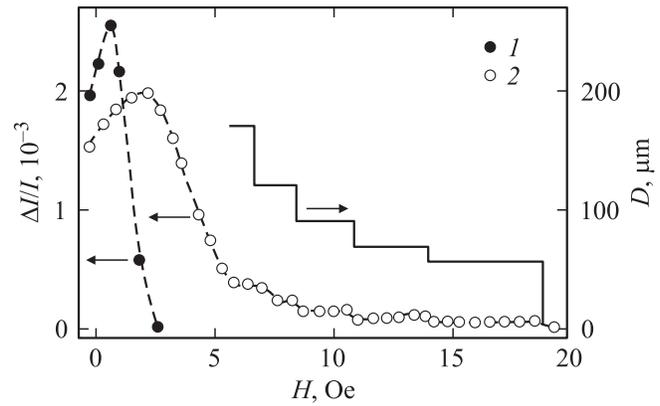
$\Delta I$  от величины  $\psi$ . Использование метода синхронного детектирования первой гармоники фотоэлектрического сигнала полностью исключило влияние на результаты измерений величины  $\Delta I$  четных по отношению к инверсии вектора  $\mathbf{M}$  магнитооптических эффектов (магнитного линейного двупреломления и магнитного линейного дихроизма), изменяющихся с частотой  $2f$ , а ориентация плоскости поляризации падающего на образец света в плоскости падения света к минимуму вклад этих эффектов в  $I$ . Выбранные условия эксперимента позволяют с достаточно высокой точностью считать  $\Delta I/I \propto \partial M/\partial H$  [2]. Экспериментальная установка позволяла проводить измерения фотоэлектрического сигнала  $\Delta I/I$  (фотоприемником служил ФЭУ-62) с относительной ошибкой  $\sim 3\%$ , при этом минимально детектируемая величина отношения  $\Delta I/I$  в основном определялась шумами переменной составляющей светового сигнала и была равна  $\sim 10^{-6}$ .

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Из результатов работ [1,2] известно, что неколлинеарная магнитная структура кристалла  $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$  возникает в магнитной поле, ориентированном вблизи трех направлений в базисной плоскости, перпендикулярных направлениям осей второго порядка. Поэтому исследования зависимости  $\Delta I/I(H)$  были выполнены при ориентации  $\mathbf{H}$  вдоль направления, перпендикулярного направлению одной из осей  $C_2$ , и для сравнения результатов — при  $\mathbf{H} \parallel C_2$  (ориентация осей второго порядка в базисной плоскости образца определялась по методике, описанной в [2]). Зависимости  $\Delta I/I$  от  $H$ , полученные при этих ориентациях направления намагничивания, показаны на рисунке. Кривая  $\Delta I/I(H)$  при  $\mathbf{H} \perp C_2$  получена при повороте образца вокруг оси  $C_2$  на угол  $\psi \approx 10^\circ$ , вторая кривая — при повороте образца на тот же угол вокруг перпендикулярного этой оси направления.

С помощью многочисленных экспериментальных исследований установлено, что в магнитном отношении номинально чистый (беспримесный) кристалл  $\text{FeBO}_3$  практически изотропен в „легкой“ плоскости (при  $T = 77\text{ K}$  эффективное поле внутривосстановленной гексагональной анизотропии  $H_a < 1\text{ Oe}$  [3]). Однако, как видно из рисунка, зависимости  $\Delta I/I(H)$ , полученные при разной ориентации  $\mathbf{H}$ , существенно отличаются друг от друга. Это, очевидно, означает, что допирование бората железа ионами  $\text{Mg}$  приводит к возникновению сильной магнитокристаллической анизотропии в его базисной плоскости.

Особенно заметным различие характера полученных зависимостей  $\Delta I/I(H)$  становится при приближении намагниченности образца к насыщению (см. рисунок). Известно, что в достаточно сильном магнитном поле,



Полевые зависимости магнитооптической восприимчивости  $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ , полученные при двух ориентациях намагничивающего поля  $\mathbf{H} \parallel C_2$  (1) и  $\mathbf{H} \perp C_2$  (2). Сплошная ломаная линия — полевая зависимость пространственного периода модуляции азимутального угла вектора ферромагнетизма в неколлинеарной магнитной фазе кристалла.  $T = 80\text{ K}$ . Штриховые кривые проведены для облегчения визуального восприятия графиков.

когда процесс смещения доменных границ уже закончен и намагниченность растет в основном за счет дополнительного поворота вектора  $\mathbf{M}$  к направлению  $\mathbf{H}$ , магнитная восприимчивость магнетика уменьшается пропорционально  $1/H^3$  (см., например, [4]). Такому поведению магнитной восприимчивости отвечает правая от максимума (спадающая) часть кривой  $\Delta I/I(H)$ , полученной при  $\mathbf{H} \parallel C_2$ . В то же время при  $\mathbf{H} \perp C_2$  в области относительно высоких полей величина  $\Delta I/I$  слабо зависит от  $H$ , причем зависимость  $\Delta I/I(H)$  имеет немонотонный (ступенчатый) вид. Как уже отмечалось, при этой ориентации намагничивающего поля происходит перестройка магнитной структуры  $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ , поэтому наблюдаемое при  $\mathbf{H} \perp C_2$  нетривиальное поведение зависимости  $\Delta I/I(H)$  можно связать с особенностью процесса намагничивания неколлинеарной магнитной фазы исследуемого кристалла.

Согласно результатам, полученным в [1,2,5], в области полей существования неколлинеарной магнитной структуры  $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$  (при  $T = 80\text{ K}$  в интервале  $5 \leq H \leq 18\text{ Oe}$ ) проекция локального вектора  $\mathbf{m}$  на направление  $\mathbf{H}$  определяется как

$$m_x = m \cos \beta \approx m(1 - \beta^2/2), \quad (1)$$

где

$$\beta = \beta_0 \cos 2\pi x/D,$$

$\beta_0$  — амплитуда угла отклонения вектора  $\mathbf{m}$  от  $\mathbf{H} \perp C_2$  (величина угла  $\beta_0$  зависит от  $H$  и составляет  $\sim 10-5^\circ$  [1,2,5]),  $x$  — текущая координата вдоль направления приложенного поля,  $D$  — период модуляции, причем величина  $D$  с ростом поля уменьшается скачкообразно, что на графике зависимости  $D$  от  $H$ , представленном на рисунке [1], показано в виде ступенек.

Интегрирование (1) по пространственной переменной позволяет представить среднюю намагниченность кристалла (в линейном по  $\beta^2$  приближении) в виде  $M \approx mr(1 - \beta_0^2/4)$ , откуда

$$\Delta I/I \propto \partial M/\partial H \approx \frac{1}{2} mr\beta_0 \partial\beta_0/\partial H, \quad (2)$$

где  $r$  — линейный размер кристалла в направлении  $x$ .

Из (2) следует, что немонотонное снижение магнитной восприимчивости кристалла может возникнуть только при немонотонном (скачкообразном) уменьшении угла между векторами  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{H}$ . Из сравнения зависимостей  $D(H)$  и  $\Delta I/I(H)$  при  $\mathbf{H} \perp C_2$  видно, что скачки магнитной восприимчивости и периода  $D$  наблюдаются примерно при одних и тех же значениях  $H$ . Следовательно, можно заключить, что процесс намагничивания неколлинеарной магнитной фазы кристалла  $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$  происходит путем одновременного скачкообразного уменьшения пространственного периода модуляции и величины азимутального угла, задающего отклонение локального вектора ферромагнетизма от направления  $\mathbf{H}$ .

## Список литературы

- [1] Б.Ю. Соколов. ЖЭТФ **126**, 472 (2004).
- [2] Б.Ю. Соколов. ФТТ **47**, 1818 (2005).
- [3] Х.Г. Богданов, В.А. Голенищев-Кутузов, Л.И. Медведев, М.И. Куркин, Е.А. Туров. ЖЭТФ **95**, 613 (1989).
- [4] С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Мир, М. (1987). 420 с.
- [5] Б.Ю. Соколов. ФТТ **47**, 252 (2005).