

04,05,06

## Сравнительное исследование магнитоэлектрического эффекта в монокристаллах $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ и $\text{HoGa}_3(\text{VO}_3)_4$

© А.Л. Фрейдман, А.А. Дубровский, В.Л. Темеров, И.А. Гудим

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Красноярск, Россия

E-mail: fss4@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 5 сентября 2017 г.)

Проведено сравнительное исследование магнитоэлектрических свойств и магнитострикции монокристаллов  $\text{HoGa}_3(\text{VO}_3)_4$  и  $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ . Эти соединения проявляют очень схожие по абсолютным величинам и качественному поведению магнитодиелектрический и обратный магнитоэлектрический  $ME_E$ -эффекты, что указывает на слабое влияние иона немагнитного металла. Напротив, магнитострикция оказалась в три раза больше в галоборате по сравнению с алюмоборатом. Также наблюдается отличие качественного поведения магнитострикции: в случае Al-содержащего бората на зависимости от магнитного поля наблюдается максимум магнитострикции в области 70 кОе при  $T = 4.2$  К, в то время как магнитострикция галобората не имеет максимума и не насыщается в поле 140 кОе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-38-00245 и 16-32-00163), а также при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-48-243040.

DOI: 10.21883/FTT.2018.03.45553.258

### 1. Введение

Материалы, проявляющие магнитоэлектрический эффект, благодаря их перспективности с точки зрения различных приложений электроники, являются одной из главных тем физики твердого тела. Однако для их реального использования необходимо иметь такие материалы, в которых большой магнитоэлектрический эффект проявляется при комнатных температурах. На данный момент исследования носят фундаментальный характер и направлены на выявление общих закономерностей и механизмов магнитоэлектрического эффекта, поняв которые, можно будет строить целенаправленный поиск материалов.

Одной из групп монокристаллических магнитоэлектриков, привлекающих значительное внимание, являются бораты с общей формулой  $RM_3(\text{VO}_3)_4$ , где R — редкоземельный ион или Y, M — Al, Ga, Sc, Fe, Cr. В рамках данной группы соединений максимальная величина магнитоэлектрического эффекта была обнаружена в  $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ . Данный кристалл не принадлежит к мультиферроикам, так как в нем отсутствует магнитное упорядочение вплоть до самых низких температур, и тем не менее он проявляет гигантский магнитоэлектрический эффект. Ввиду того что в  $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$  есть лишь один магнитный ион  $\text{Ho}^{3+}$ , и отсутствует магнитное упорядочение, данное соединение можно рассматривать как модельный магнитоэлектрик.

В литературе наблюдается путаница, связанная с ориентацией образцов. Симметрия исследуемых кристаллов описывается пространственной группой  $R32$ . При этом в работах [1–3] допущена ошибка ориентации [4]. Во всех трех работах используется ортогональная система

координат с осями  $x$ ,  $y$ ,  $z$  или  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , где  $z(c)$  — кристаллографическая ось третьего порядка, ось  $x(a)$  — кристаллографическая ось второго порядка, а ось  $y(b)$  образует перпендикуляр к осям  $x$  и  $z$  и не является кристаллографической. Для правильной интерпретации данных в этих работах следует сделать замену  $x \leftrightarrow y$  (или  $a \leftrightarrow b$ ).

При приложении магнитного поля вдоль направления  $x$  помимо продольной компоненты  $P_{xx}$  возможно также появление полярizations и вдоль направления  $y$ , т.е.  $P_{yx}$ . Что касается компоненты  $P_{xx}$ , то такие данные можно найти в работе [5], компонента  $P_{yx}$  приведена в работах [1,2], однако ввиду допущенной ошибки в ориентации кристалла  $P_{yx}$  на самом деле является компонентой  $P_{xy}$ . Таким образом, в трех работах [1,2,5] измерения полярizations в монокристалле  $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$  проводились в одном и том же направлении  $x$ . В свете вышесказанного можно заключить, что в литературе наблюдается большой разброс экспериментальных данных. Численные значения электрической полярizations  $P_x$  при различных направлениях магнитного поля  $H$  приведены в таблице.

Из приведенных в таблице значений можно заключить, что в этих трех работах наблюдается совершенно различная картина не только по абсолютной величине электрической полярizations, но и по соотношению между электрической полярizations при различных направлениях магнитного поля в рамках одной работы  $|P_{xx}|/|P_{xy}|/|P_{xz}|$ . В нашей работе [1] соотношение между магнитоэлектрическими  $ME_H$ - и  $ME_E$ -откликами на приложение магнитного поля вдоль различных направлений также различно.

Тем не менее во всех трех работах качественное поведение полярizations  $P(H)$  очень схоже. Ввиду того

Экспериментальные данные  $P_{xi}(H_i)$ ,  $i = x, y, z$ 

$P_{xx}, \mu\text{C}/\text{m}^2$ ( $H_x = 60 \text{ kOe}$ )	$P_{xy}, \mu\text{C}/\text{m}^2$ , ( $H_y = 60 \text{ kOe}$ )	$P_{xz}, \mu\text{C}/\text{m}^2$ ( $H_z = 60 \text{ kOe}$ )	$ P_{xx} / P_{xy} / P_{xz} $	$\beta_{xx}/\beta_{xy}/\beta_{xz}$	$T, \text{K}$
1200 [1]	-800 [1]	-	1.5/1/-	0.45/1/-	4.2
1600 [5]	-3150 [5]	1580 [5]	0.5/0.1/0.5		5
3500 [2]	-3800 [2]	135 [2]	0.9/1/0.03		5

что в работах используются идентичные методы измерения  $P(H)$ , можно заключить, что отличие обусловлено образцами монокристаллов  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , на которых проводились измерения. Как было показано в работе [6], в монокристаллах  $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$  наблюдается двойникование, заключающееся в отличии направления вращения цепочек призм  $\text{DyO}_6$  в кристалле, — существуют правовинтовые и левовинтовые домены. Возможно, подобное двойникование, которое носит случайный характер, имеет место и в монокристаллах  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , что и обуславливает разницу в экспериментальных данных, однако до сих пор считалось, что  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  не склонен к двойникованию.

Настоящая работа направлена на выяснение влияния атома немагнитного металла на магнитоэлектрический эффект в соединении  $\text{HoM}_3(\text{BO}_3)_4$ . С этой целью мы провели сравнительное исследование между монокристаллами  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ .

## 2. Экспериментальная часть

Монокристаллы галобората гольмия  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  были выращены методом из раствора-расплава. В настоящей работе используется ортогональная система координат  $(x, y, z)$ , где  $x$  и  $z$  совпадают с кристаллографическими направлениями  $a$  и  $c$  соответственно, а направление  $y$  перпендикулярно плоскости  $xz$ . Образцы для исследований вырезали в форме прямоугольных пластинок, перпендикуляр к плоскости пластинки совпадает с осью  $x$ .

Для измерений диэлектрической проницаемости и  $ME_E$ -эффекта на грани образцов наносили проводящий клей на эпоксидной основе. Диэлектрическую проницаемость исследовали с помощью измерения емкости LCR-метром Agilent E4980A Precision LCR Meter,  $ME_E$ -эффект измеряли по методу, предложенному Астровым [7], на собранной установке [8].

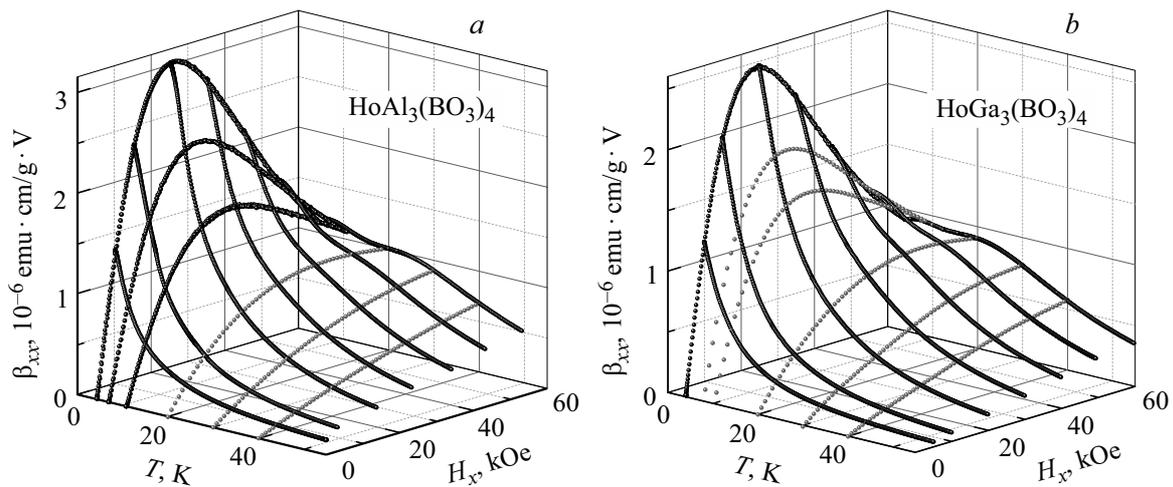
Магнитострикция монокристалла  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  была измерена в Польше, во Вроцлаве, в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур с помощью емкостного dilatометра на установке со сверхпроводящим соленоидом Oxford Cryogenic по известной схеме [9]. Емкость фиксировали прибором Andeen Hagerling 2500A. Магнитострикция  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  была измерена на разработанном нами емкостном dilatометре, адаптированном для криостата измерительной системы PPMS QD [10].

## 3. Результаты и обсуждение

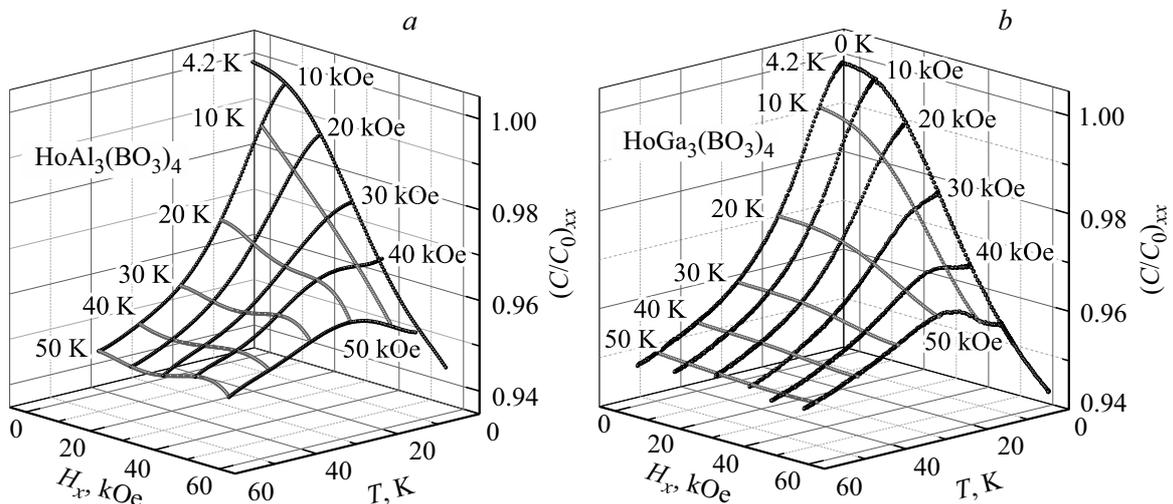
Как и в случае алюмобората гольмия [1], магнитоэлектрический  $ME_E$ -отклик галобората оказался линейным по электрическому полю, т.е. изменение намагниченности кристалла пропорционально приложенному электрическому полю  $\Delta M_{ij} = \beta_{ij} E_j$ , где  $\Delta M_{ij}$  — амплитуда изменения магнитного момента образца вдоль направления  $i$  при приложении электрического поля  $E_j$  вдоль направления  $j$ . Второй гармоники магнитоэлектрического эффекта, квадратичной по электрическому полю  $\Delta M_{ij} = \gamma_{ij} E_j^2$ , которая наблюдалась в ферроборате самария [11], обнаружено не было. На рис. 1 приведены зависимости восприимчивости магнитоэлектрического  $ME_E$ -эффекта для монокристаллов  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (a) и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (b). Как видно из приведенных графиков, качественное поведение магнитоэлектрического  $ME_E$ -эффекта обоих соединений практически идентично, однако по величине магнитоэлектрической  $ME_E$ -восприимчивости  $\beta_{xx}$  в алюмоборате гольмия оказалась больше, чем в галлоборате, но отличие в величине невысоко и составляет  $\sim 15\%$ . В то же время опубликованные данные о  $ME_H$ -эффекте в этих соединениях показали более значительное отличие в поляризации  $\Delta P(H)$ . В работе [3], которая посвящена исследованию монокристалла  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ , приведены значения поляризации  $\Delta P_{yx}(H)$ , однако ввиду допущенной ошибки ориентации, в действительности приведенные в работе значения ( $\Delta P_{ba}$  по обозначениям работы [3]) относятся к  $\Delta P_{xy}(H)$ , и в поле 90 кОе величина магнитоэлектрической поляризации составляет  $-1000 \mu\text{C}/\text{m}^2$  при температуре 5 К, когда поляризация в алюминий-содержащем борате достигает значения  $-5000 \mu\text{C}/\text{m}^2$  при тех же условиях [2], т.е. отличается в пять раз. Столь различное поведение  $ME_E$ - и  $ME_H$ -эффектов при замещении ионов  $\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Ga}^{3+}$  может говорить о различном влиянии доменной структуры на прямой и обратный магнитоэлектрические эффекты.

Таким образом, наши измерения показали, что магнитоэлектрический  $ME_E$ -эффект практически не изменяется при замещении Al на Ga в парамагнитном оксидборате гольмия, что указывает на слабое влияние иона немагнитного металла на магнитоэлектрический эффект.

На рис. 2 показаны графики зависимости магнитоэлектрического эффекта от приложенного магнитного поля  $H$  и температуры  $T$ . Магнитное поле приклады-



**Рис. 1.** Магнитоэлектрическая  $ME_E$ -восприимчивость монокристаллов алюмобората гольмия [1]  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (a) и галобората гольмия  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (b) как функция магнитного поля  $H_x$  и температуры. Черным цветом обозначены экспериментальные данные, серым — данные, полученные spline-аппроксимацией.

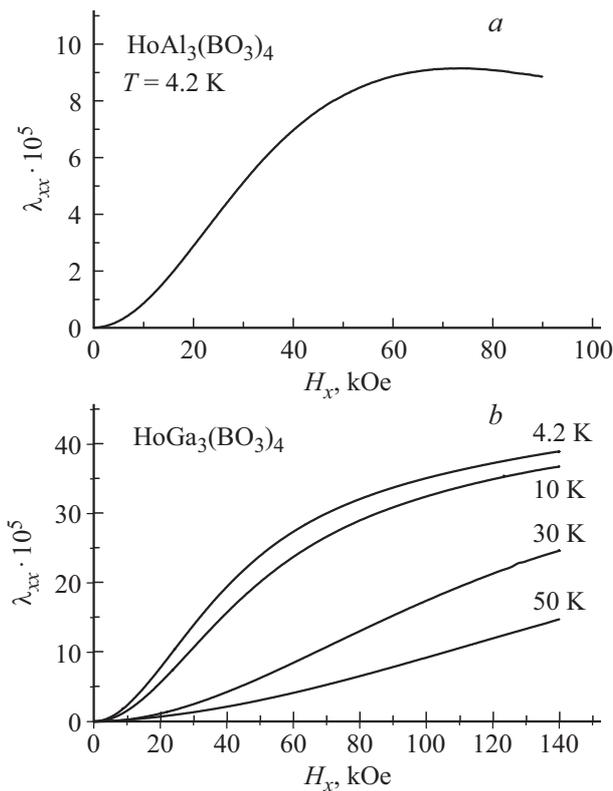


**Рис. 2.** Зависимость продольного магнитоэлектрического эффекта монокристаллов  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  [1] (a) и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (b) от температуры  $T$  и магнитного поля  $H_x$ . Черным цветом обозначены экспериментальные данные, серым — данные, полученные spline-аппроксимацией.

вали вдоль направления  $x$  кристалла, в эксперименте измеряли электрическую емкость между двумя гранями образца, нормаль к которым также совпадала с осью  $x$ . Как видно, замещение ионов  $\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Ga}^{3+}$  не приводит к существенным отличиям в поведении диэлектрической проницаемости при приложении магнитного поля, что также указывает на слабое влияние иона немагнитного металла в соединении  $\text{HoM}_3(\text{BO}_3)_4$  на связь между магнитными и электрическими свойствами.

Также нами были проведены измерения магнитострикции (рис. 3). Обнаруженная в  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  магнитострикция превосходит таковую в  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  [5] более чем в три раза, что тем не менее не приводит к увеличению магнитоэлектрической поляризации [3]. Измерения магнитострикции соединений  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  были проведены на различном оборудова-

нии, в первом случае использовали экспериментальную установку, описанную в работе [9], во втором — недавно собранный нами dilatometer [10]. Как видно из графиков, полученные результаты разительно отличаются друг от друга, несмотря на схожесть соединений между собой. Результаты измерений магнитострикции  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  хорошо согласуются с результатами, опубликованными в работе [5], однако благодаря более широкому диапазону доступных магнитных полей стало открыто поведение магнитострикции  $\lambda_{aa}$  после 70 кОе, где наблюдается уменьшение магнитострикции по мере увеличения магнитного поля. Подобное поведение наблюдалось в этом соединении при иной ориентации измерений магнитострикции,  $\lambda_{xz}$ , когда магнитное поле прикладывали вдоль оси третьего порядка  $z$ , а деформацию кристалла измеряли вдоль направления  $x$  [5].



**Рис. 3.** Продольная магнитострикция  $\lambda_{xx}$  монокристаллов  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (a) и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (b).

Как показали наши измерения, соединения  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  обладают схожими магнитоэлектрическими свойствами, это касается и магнитоэлектрического  $ME_E$ -эффекта, и магнитодиэлектрического эффекта, что находится в некотором противоречии с данными по  $ME_H$ -эффекту, опубликованными в работах [2,3], согласно которым магнитоэлектрическая поляризация в соединении  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  в пять раз превосходит поляризацию в  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Возможно, расхождение в экспериментальных результатах объясняется тем, что в исследованиях использовали различные образцы монокристаллов. Ситуацию также осложняет двойникование, обнаруженное в работе [6] на монокристалле  $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$ , которое может иметь место и в исследованных парамагнитных алюмо- и галоборатах. На это указывает расхождение экспериментальных результатов в опубликованных работах, что было показано выше (см. таблицу).

Интересной выявленной особенностью также является отличие поведения магнитострикции. В то время как продольная относительная деформация  $\lambda_{xx}$  в  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  достигает своего максимума в поле  $\sim 70$  кОе, в  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  магнитострикция не насыщается и продолжает увеличиваться по мере увеличения поля вплоть до 140 кОе, что справедливо, по крайней мере, для температуры 4.2 К. По абсолютной величине магнитострикция в поле  $\sim 70$  кОе оказалась

больше в  $\sim 3$  раза в случае галобората по сравнению с алюмоборатом. Тем не менее столь большая величина магнитострикции не приводит к увеличению магнитоэлектрического эффекта.

Стоит также упомянуть о путанице в кристаллографических направлениях, которая коснулась и нашей предыдущей работы, посвященной исследованию  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  [1]. Ввиду допущенной ошибки те размышления, которые касаются микроскопического механизма формирования магнитоэлектрического эффекта, требуют корректировки. Однако мы считаем, что общая идея механизма возникновения магнитоэлектрического эффекта в данном соединении остается верной. Она заключается в том, что магнитоэлектрический эффект возникает вследствие несферичности электронной  $4f$ -подоболочки редкоземельного иона  $\text{Ho}^{3+}$ . Ввиду сильной спин-орбитальной связи намагничивание образца происходит не только за счет изменения распределения спинового момента по направлениям, но также и за счет изменения распределения орбитального момента. Последнее означает, что также изменяется и распределение электронной плотности  $4f$ -подоболочки. Таким образом, в процессе намагничивания образца изменяется степень перекрытия  $4f$ -орбитали редкоземельного иона и орбиталей кислорода. Это является причиной возникновения дополнительных кулоновских сил и приводит к магнитострикции и смещениям ионов, что сопровождается возникновением поляризации.

Мы предполагаем, что ионная поляризация в семействе боратов играет ключевую роль и значительно больше электронной, так как в диапазоне частот 200–400 GHz в точке Нееля не наблюдается каких-либо аномалий диэлектрической проницаемости, а магнитодиэлектрический эффект наблюдается лишь на невысоких частотах [12], что справедливо, по крайней мере, для монокристалла  $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ .

Что касается обратного магнитоэлектрического  $ME_E$ -эффекта, при приложении электрического поля происходит смещение ионов кислорода относительно иона гольмия за счет пьезоэлектрического эффекта, что приводит к изменениям в штарковской структуре и в распределении заселенностей различных уровней энергии, т.е. изменяется суммарный магнитный момент образца во внешнем магнитном поле. Этот эффект проявляется лишь во внешнем магнитном и электрическом полях для данного соединения, так как оно не принадлежит к пьезомагнетикам, таким как например  $\text{Sr}_2\text{O}_3$ , где возможно возникновение магнитного момента без приложения внешнего магнитного поля.

В работе [13] была предпринята попытка обнаружения смещения ионов  $\text{Ho}^{3+}$  относительно кислородного окружения методами элементно-ориентированного рентгеновского анализа, которая не дала положительных результатов. Для объяснения последнего сделаем оценку смещения иона  $\text{Ho}^{3+}$  относительно кислородного окружения, достаточного для достижения поляризации, наблюдаемой в эксперименте. При этом будем полагать,

что поляризация является следствием смещения исключительно иона  $\text{Ho}^{3+}$ , при этом кислородная призма не искажается.

Для оценки смещения иона  $\text{Ho}^{3+}$  следует рассматривать смещение, удовлетворяющее результирующей поляризации  $P = \sqrt{P_{xx}^2 + P_{yx}^2 + P_{zx}^2}$ , либо  $P = \sqrt{P_{xy}^2 + P_{yy}^2 + P_{zy}^2}$ . Однако ввиду отсутствия данных по  $P_{yy}$  и  $P_{zy}$ , рассмотрим смещение иона только вдоль направления  $x$  при приложении магнитного поля вдоль  $y$ , так как величина поляризации  $P_{xy}$  является максимальной в рамках опубликованных экспериментальных данных.

Электрическая поляризация есть дипольный момент единицы объема вещества. Для определения смещения иона  $\text{Ho}^{3+}$  рассмотрим элементарную ячейку. Так как в положении равновесия в отсутствие магнитного поля дипольный момент ячейки равен нулю (кристалл не является сегнетоэлектриком), поляризация будет определяться смещением лишь ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при приложении магнитного поля. Тогда электрическая поляризация определится выражением

$$P_x = \frac{1}{V} \sum q_i \Delta x_i, \quad (1)$$

где суммирование ведется лишь по ионам  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $V$  — объем элементарной ячейки,  $q$  — заряд редкоземельного иона,  $x$  — его смещение. Ввиду наличия оси симметрии третьего порядка вклады всех трех ионов гольмия, находящихся в эквивалентных позициях симметрии в элементарной ячейке, будут одинаковы. Каждая из них имеет заряд, равный трем зарядам электрона  $e$ . Поэтому из выражения (1) находим смещение иона  $\text{Ho}^{3+}$

$$\Delta x = \frac{P_x V}{9e}. \quad (2)$$

При величине электрической поляризации  $P_{xy} = -5240 \mu\text{C}/\text{m}^2$ , полученной в поле  $H_y = 90 \text{ kOe}$  в работе [2], оценка дает смещение редкоземельного иона  $\Delta x \approx 0.02 \text{ \AA}$ . При этом максимальное изменение расстояния между атомом кислорода треугольной призмы и ионом гольмия составляет  $\Delta R = R_0 - \sqrt{(X_0 - \Delta x)^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \approx 0.016 \text{ \AA}$ , где  $R_0$  — расстояние между ионами кислорода и гольмия в несмещенном положении;  $X_0$ ,  $Y_0$  и  $Z_0$  — координаты атома кислорода с началом системы координат, совпадающей с положением несмещенного иона  $\text{Ho}^{3+}$ . Таким образом, если предположить, что электрическая поляризация обусловлена исключительно смещением иона гольмия, то максимальное изменение расстояния  $\text{Ho}-\text{O}$  будет составлять всего 0.7%. В работе [13], в которой была сделана попытка зафиксировать изменение этого расстояния методом XAFS, показано отсутствие смещения иона гольмия относительно ближайшего кислородного окружения, возможно, из-за ограничения в точности методики, так как изменение расстояния в 0.7% зафиксировать сложно.

## 4. Заключение

Впервые проведены исследования обратного магнитоэлектрического эффекта в соединении  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ , измерен магнитоэлектрический эффект. Результаты измерений показали очень схожие магнитоэлектрические свойства с кристаллом  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ . Последнее утверждение находится в противоречии с результатами измерения прямого магнитоэлектрического эффекта, которые показали превышение величины магнитоэлектрической поляризации в пять раз в соединении  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  по сравнению с  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Последнее может быть объяснено различием образцов монокристаллов, используемых в измерениях.

Проведены измерения продольной магнитострикции в  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Магнитострикция в противовес магнитоэлектрической поляризации в соединении  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  оказалась больше в  $\sim 3$  раза. Кроме того, магнитострикция в этих соединениях имеет различный качественный вид. Так, в алюмоборате гольмия продольная магнитострикция  $\lambda_{xx}$  увеличивается по мере увеличения магнитного поля и достигает своего максимума при  $\sim 70 \text{ kOe}$ , однако затем начинает спадать с увеличением магнитного поля, в то время как в галоборате гольмия максимум магнитострикции не наблюдается, и в поле  $140 \text{ kOe}$  не наступает насыщения магнитострикции.

## Список литературы

- [1] A.L. Freydmann, A.D. Balaev, A.A. Dubrovskiy, E.V. Eremin, V.L. Temerov, I.A. Gudim. *J. Appl. Phys.* **115**, 174103 (2014).
- [2] А.И. Бегунов, А.А. Демидов, И.А. Гудим, Е.В. Еремин. *Письма в ЖЭТФ* **97**, 611 (2013).
- [3] Н.В. Волков, И.А. Гудим, Е.В. Еремин, А.И. Бегунов, А.А. Демидов, К.Н. Болдырев. *Письма в ЖЭТФ* **99**, 72 (2014).
- [4] В.Л. Темеров. Частное сообщение.
- [5] K.-C. Liang, R.P. Chaudhury, B. Lorenz, Y.Y. Sun, L.N. Bezmaternykh, V.L. Temerov, C.W. Chu. *Phys. Rev. B* **83**, 180417(R) (2011).
- [6] T. Usui, Y. Tanaka, H. Nakajima, M. Taguchi, A. Chainani, M. Oura, S. Shin, N. Katayama, H. Sawa, Y. Wakabayashi, T. Kimura. *Nature Mat.* **13**, 611 (2014).
- [7] Д.Н. Астров. *ЖЭТФ* **38**, 984 (1960).
- [8] А.Д. Балаев, А.Л. Фрейдман. *Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед.* **1**, 20 (2014).
- [9] V.I. Nizhankovskii. *Eur. Phys. J. B* **71**, 55 (2009).
- [10] А.Л. Фрейдман, С.И. Попков, С.В. Семенов, П.П. Турчин. *Письма в ЖТФ* **44**, 3, 79 (2018).
- [11] А.Л. Фрейдман, А.Д. Балаев, А.А. Дубровский, Е.В. Еремин, К.А. Шайхутдинов, В.Л. Темеров, И.А. Гудим. *ФТТ* **57**, 1334 (2015).
- [12] А.А. Мухин, Г.П. Воробьев, В.Ю. Иванов, А.М. Кадомцева, А.С. Нарижная, А.М. Кузьменко, Ю.Ф. Попов, Л.Н. Безматерных, И.А. Гудим. *Письма в ЖЭТФ* **93**, 305 (2011).
- [13] H. Zhang, T. Yu, Z. Chen, C.S. Nelson, L.N. Bezmaternykh, A.M.M. Abeykoon, T.A. Tyson. *Phys. Rev. B* **92**, 104108 (2015).