

УДК 537.9

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОБОРАТА ТЕРБИЯ

© 2014 г. **А. М. Кадомцева**¹, Ю. Ф. Попов¹, Г. П. Воробьев¹, А. П. Пятаков^{1,2}, А. К. Звездин²,
А. А. Мухин², В. Ю. Иванов², Л. Н. Безматерных³, И. А. Гудим³, В. Л. Темеров³

E-mail: mukhin@ran.gpi.ru

Проведены измерения магнитных и магнитоэлектрических свойств алюмобората тербия. Подобно ферроборату тербия он демонстрирует схожие температурные зависимости магнитоэлектрических эффектов, несмотря на различие эффективных магнитных полей, действующих на ионы редкой земли. Это подтверждает общее предположение об определяющей роли редкой земли в магнитоэлектрических свойствах боратов.

DOI: 10.7868/S0367676514020161

Открытие сильных магнитоэлектрических эффектов в новом классе мультиферроиков — редкоземельных ферроборатах $RFe_3(BO_3)_4$ [1, 2] стимулировало поиск магнитоэлектрических эффектов в изоструктурных составах, таких как редкоземельные алюмобораты $RAI_3(BO_3)_4$ [3–5], которые ранее привлекали внимание главным образом в связи с их оптическими и магнитооптическими свойствами [6, 7]. Несмотря на отсутствие магнитного упорядочения алюмобораты демонстрируют значительную электрическую поляризацию в сильных магнитных полях (для алюмобората гольмия магнитоиндуцированная поляризация превышает $3000 \text{ мКл} \cdot \text{м}^{-2}$ в поле $\sim 100 \text{ кЭ}$) [4]). Сравнение магнитоэлектрических свойств редкоземельных алюмоборатов и ферроборатов представляет большой интерес для понимания механизмов магнитоэлектрических взаимодействий, в частности роли редкоземельной и железной подсистем, а также поля обмена между ними.

В данной работе проведены измерения магнитных, магнитоэлектрических и магнитоупругих свойств алюмобората тербия. Выбор данного соединения обусловлен тем, что, подобно ферроборату тербия [8], он может обладать значительной магнитоэлектрической поляризацией при высоких температурах (вплоть до комнатных), что представляет интерес для практических приложений. Стоит отметить, что в более ранних ис-

следованиях данного соединения [5] магнитоиндуцированная поляризация не была обнаружена. Действительно, при низких температурах велика одноосная магнитная анизотропия иона Tb^{3+} , препятствующая реализации магнитоэлектрических свойств, но по мере роста заселенности возбужденных состояний с температурой растет их вклад в электрическую поляризацию.

Кристаллы $RAI_3(BO_3)_4$ были выращены методом спонтанной кристаллизации из растворов в расплавах. Магнитные измерения проводили на установке MPMS-5 (Quantum Design). Измерения магнитоэлектрических и магнитоупругих свойств проводили в импульсных магнитных полях до 250 кЭ в диапазоне температур от 4.2 до 300 К . Магнитострикцию измеряли с помощью кварцевого пьезодатчика.

На рис. 1 приведены кривые намагничивания алюмобората тербия при $H \parallel c$ и $H \parallel a$, а на вставке — температурные зависимости восприимчивости, измеренные вдоль тех же осей в $H = 1 \text{ кЭ}$. Огромная магнитная анизотропия при низких температурах ($\chi_c/\chi_a \sim 400$ при $T = 1.9 \text{ К}$) свидетельствует об изинговском характере иона Tb^{3+} . При намагничивании вдоль изинговской оси c при низких температурах насыщение достигается уже в полях порядка 20 кЭ , причем значение намагниченности в насыщении соответствует $\approx 8 \text{ мБ/Тб}$. В перпендикулярных оси c направлениях намагниченность много меньше, почти линейно зависит от магнитного поля и слабо зависит от температуры, что указывает на ее ванфлековское происхождение, т.е. обусловлено примешиванием в магнитном поле возбужденных состояний иона Tb^{3+} к основному.

На рис. 2 показаны полевые зависимости электрической поляризации вдоль a -оси при намагничивании вдоль b -оси. Как и в случае ферробо-

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет.

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва.

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск.

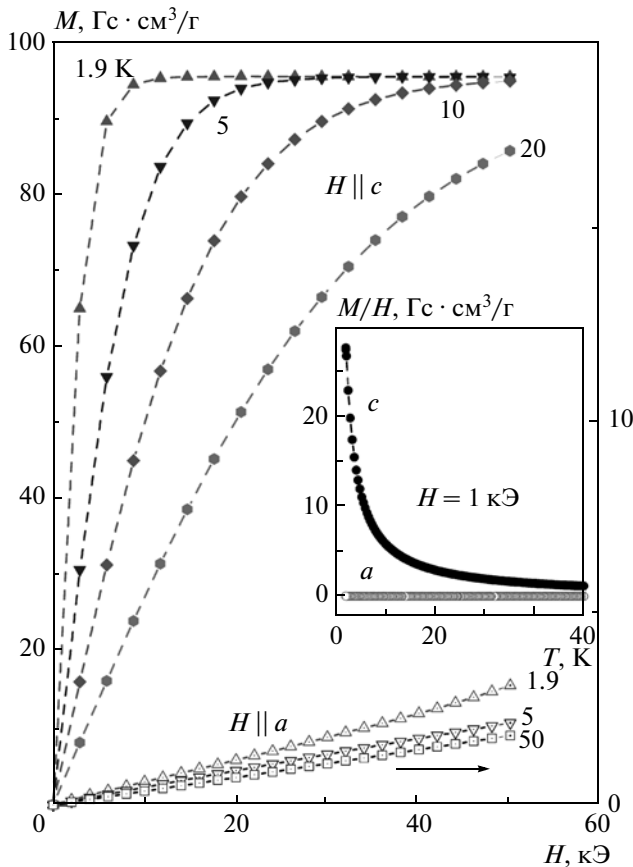


Рис. 1. Кривые намагничивания $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ вдоль оси c (левая шкала) и вдоль оси a (правая шкала). На вставке – температурная зависимость восприимчивости в $H = 1$ кЭ.

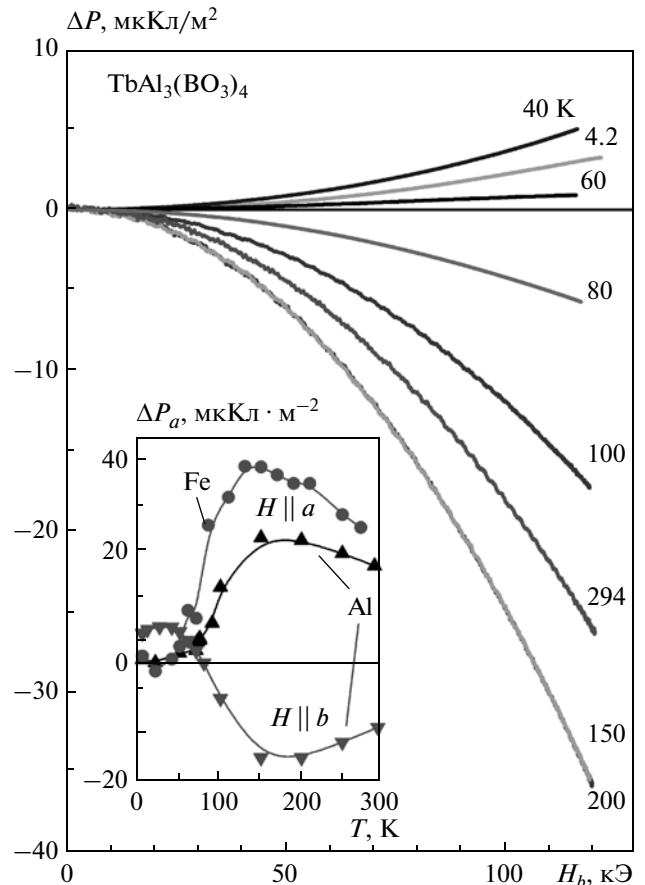


Рис. 2. Полевые зависимости электрической поляризации $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$, индуцируемой вдоль оси a магнитным полем $H \parallel b$ при разных температурах. На вставке – температурные зависимости P_a алюмо- и ферробората Tb в $H = 100$ кЭ, приложенного вдоль осей a и b .

ратов, знаки продольного $\Delta P_a(H_a)$ и поперечного $\Delta P_a(H_b)$ эффектов при одинаковых температурах различаются, что находит свое объяснение в рамках анализа симметрии кристаллов, принадлежащих пространственной группе $R32$ [2]. Магнитоэлектрические зависимости имеют квадратичный характер, как и в других алюмоборатах [3–5], однако немонотонно зависят от температуры, вплоть до смены знака. Температурные зависимости поляризации вдоль a -оси в поле ~ 100 кЭ, направленном вдоль a -оси (символы \blacktriangle) и поле вдоль b -оси (символы \blacktriangledown) изображены на вставке к рис. 2. Как видно из рис. 2, магнитоиндуцированная поляризация имеет сравнительно малое, но отличное от нуля значение при низких температурах, затем с ростом T меняет знак и возрастает до величины ~ 25 мкКл/м² в области высоких температур, близких к комнатной. Там же для сравнения приведена аналогичная температурная зависимость магнитоэлектрической поляризации

для ферробората тербия (символы \bullet), которая демонстрирует похожее поведение.

Измерены также температурные зависимости продольной магнитострикции $\lambda_a(H_a)$, которые имеют похожий характер, меняя знак с ростом температуры. Следует заметить, что величина магнитострикции даже в полях ~ 100 кЭ крайне мала ($\sim 10^{-7}$), несмотря на увеличение заселенности возбужденных уровней с температурой.

Наблюдаемые особенности магнитоэлектрических свойств алюмоборатов и ферроборатов тербия можно объяснить тем, что в обоих классах соединений основной вклад в магнитоиндуцированную поляризацию вносят ионы Tb^{3+} , находящиеся во внешнем магнитном поле (и в обменном R -Fe-поле в случае ферробората). Принципиальную роль в формировании магнитоэлектрических свойств играет сильноанизотропный (изинговский) характер основного состояния иона Tb^{3+} в кристаллическом поле, который определяет малую (ванфлековскую) восприимчивость (намагниченность) в базисной

плоскости кристалла и соответственно малую индуцированную полем поляризацию. Наблюдаемое увеличение поляризации с ростом температуры, сопровождаемое также сменой знака, можно объяснить вкладом (причем другого знака) возбужденных состояний ионов Tb^{3+} по мере увеличения их заселенности. Характерные температуры (150–200 К), ниже которых наблюдается уменьшение поляризации при “вымораживании” этих состояний, соответствуют ближайшим возбужденным уровням Tb^{3+} в кристаллическом поле, которые, согласно оптическим данным [9] для $TbFe_3(VO_3)_4$, имеют энергию ~ 200 см $^{-1}$. С этими же особенностями основного состояния иона Tb^{3+} , по-видимому, связаны и малые значения наблюдаемой магнитострикции $\lambda_a(H_a)$, и смена ее знака с ростом температуры.

Таким образом, алюмоборат и ферроборат тербия, в которых имеет место схожий изинговский характер основного состояния иона Tb^{3+} , демонстрируют подобные температурные зависимости магнитоэлектрических эффектов, несмотря на различие эффективных магнитных полей, действующих на ионы редкой земли. Это подтверждает общее предположение об определяющей роли редкой земли в магнитоэлектрических свойствах боратов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 13-02-01093 и 12-02-01261.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Звездин А.К., Кротов С.С., Кадомцева А.М. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. С. 335.
2. *Кадомцева А.М., Попов Ю.Ф., Воробьев Г.П. и др.* // ФНТ. 2010. Т. 36(6). С. 640.
3. *Chaudhury R.P. et al.* // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. 220402(R).
4. *Liang K.-C. et al.* // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. 180417(R).
5. *Liang K.-C. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 400. 032046.
6. *Kellendonk F., Blasse G.* // J. Phys. Chem. Solids. 1982. V. 43. P. 481.
7. *Rubinstein C.B. et al.* // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. P. 2338.
8. *Звездин А.К., Кадомцева А.М., Попов Ю.Ф. и др.* // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. С. 80.
9. *Popova M.N., Stanislavchuk T.N., Malkin B.Z., Bezmaternykh L.N.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2012. V. 24. P. 196002.