

PACS: 71.70.-d, 75.10.Dq, 75.30.Et, 76.30.-v

А.А. Прохоров<sup>1</sup>, Л.Ф. Черныш<sup>2</sup>, А.Д. Прохоров<sup>2</sup>

## СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРА ЭПР ИОНА $\text{Er}^{3+}$ В КРИСТАЛЛАХ $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$

<sup>1</sup>Institute of Physics AS CR, Prague, Czech Republic

<sup>2</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 4 мая 2020 года

*Представлены результаты исследования основного состояния ионов эрбия в кристаллах  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Спектр ЭПР иона  $\text{Er}^{3+}$ , который замещает ионы иттрия в кристалле и расположен в слегка искаженной призме из шести ионов кислорода, измерялся в диапазонах 3 см и 8 мт. Определены параметры спинового гамильтониана, описывающего сильно анизотропное поведение спектра:  $g_{\parallel} = 1.269$  (1),  $g_{\perp} = 9.34$  (6),  $A_{\parallel} = 47.7$  (5) МГц,  $A_{\perp} = 320$  (9) МГц. Механизм спин-решеточной релаксации Орбаха–Аминова, приводящий к уширению линий ЭПР, позволил определить энергию ближайшего возбужденного состояния в спектре иона  $\text{Er}^{3+}$ , равную  $65 \text{ cm}^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** электронный парамагнитный резонанс, мультиферроик, редкая земля, алюмоборат, галлоборат, спиновый гамильтониан

### Введение

Современное научное и прикладное материаловедение требует появления новых материалов с желаемой комбинацией функциональных свойств, а также улучшения и оптимизации физических параметров и структурных качеств известных материалов. Редкоземельные бораты известны хорошими люминесцентными и нелинейно-оптическими свойствами, высокой термической, химической и механической стабильностью. Слабо взаимодействующие легирующие ионы редкоземельных элементов способствуют тому, что бораты являются основой компактных лазеров. Интерес к малогабаритным лазерам с накачкой светодиодами зелено-синего спектра стимулирует исследования новых твердотельных лазерных систем на основе нелинейных кристаллов [1–3]. Возможное легирование кристаллов как редкоземельными ионами, так и ионами группы железа делает их привлекательными объектами с точки зрения магнетизма, поскольку взаимодействие двух магнитных подсистем приводит к ряду особенностей магнитных свойств. Например, взаимодействие между ионами железа в квазиодномерных цепочках  $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$  приводит к антиферромагнитному упорядочению при 37 К, а взаимодействие с редкоземельной подсистемой отвечает за спин-переориен-

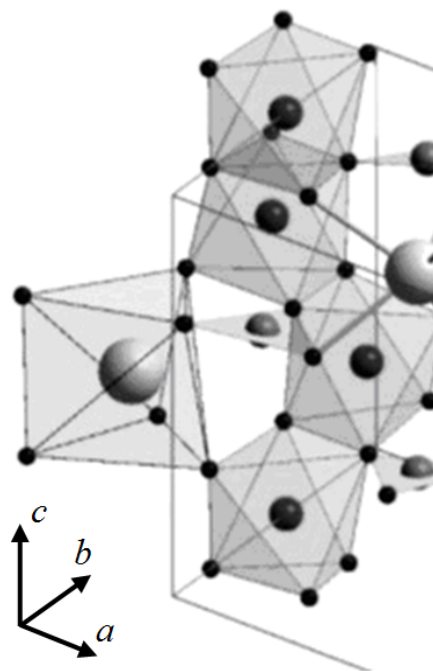
тационный переход при 10 К [4,5]. В кристаллах  $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$  при температуре 0.4 К наблюдался фазовый переход в магнитоупорядоченную фазу [6]. В кристаллах  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$  обнаружен гигантский магнитоэлектрический эффект, что позволяет отнести их к разряду мультиферроиков [7,8]. Серия работ посвящена исследованию спектров ЭПР в боратах алюминия [9–21].

Кристаллы  $\text{ReGa}_3(\text{BO}_3)_4$ , которые, по данным работ [22–26], относятся к той же пространственной группе  $R32$ , что и алюмобораты, изучены значительно меньше. Недавно был обнаружен большой магнитоэлектрический эффект в кристаллах  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  [27], который сравним с аналогичным эффектом в алюмоборате гольмия. Таким образом, исследование различных свойств  $\text{ReGa}$ -боратов представляет интерес не только в познавательном плане, но и с точки зрения практического применения в области лазерной и нелинейной оптики и спинтроники.

В настоящей работе представлены результаты исследования магнитных свойств основного состояния ионов  $\text{Er}^{3+}$ , легирующих кристаллы  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  методом ЭПР.

### Образцы и методика эксперимента

Кристаллы семейства боратов, такие как  $\text{ReM}_3(\text{BO}_3)_4$  (где  $\text{Re}$  – редкоземельный металл или иттрий, а  $\text{M}$  – трехвалентные ионы  $\text{Al}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Cr}$ ) кристаллизуются в структуре хангита  $\text{CaMg}_3(\text{BO}_3)_4$  с пространственной группой  $R32$ . На рис. 1 показан фрагмент кристаллической структуры  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Элементарная ячейка бората алюминия содержит  $Z = 3$  формульных единиц. Координационные многогранники  $\text{Y}^{3+}$ ,  $\text{Ga}^{3+}$  и  $\text{B}^{3+}$  представляют собой соответственно тригональные призмы, октаэдры и треугольники, образованные атомами кислорода. Редкоземельные ионы расположены вдоль оси  $C_3$  в слегка искаженных призмах с верхними треугольниками, повернутыми относительно нижних. Ионы  $\text{Ga}^{3+}$  находятся в кислородных октаэдрах, которые связаны по краям, образуя скрученные столбцы вдоль оси  $C_3$ . Атомы  $\text{B1}$  и  $\text{B2}$  расположены в кислородных треугольниках двух типов:  $\text{B1}$  – в треугольниках, перпендикулярных тройным осям и чередующихся с  $\text{Y}$ -призмами;  $\text{B2}$  –

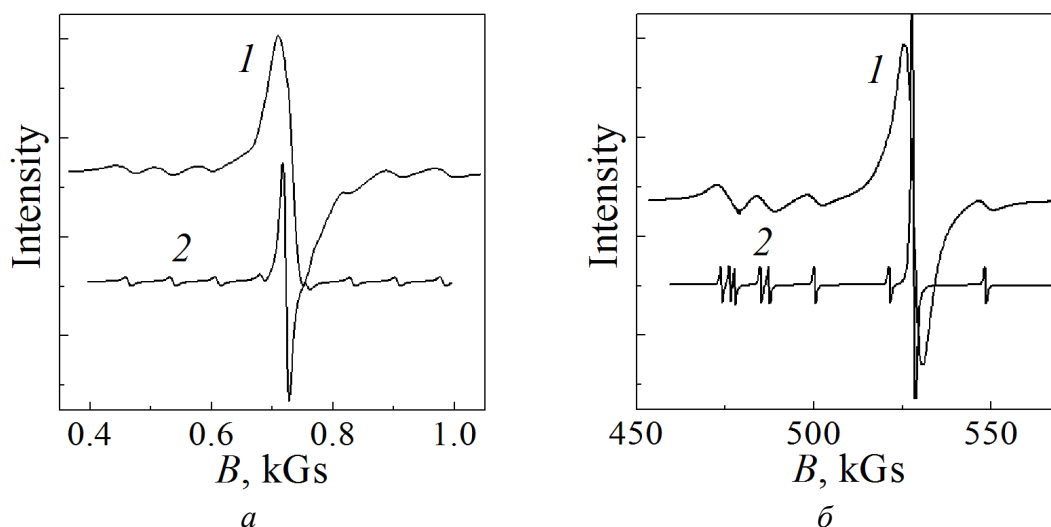


**Рис. 1.** Фрагмент кристаллической структуры кристалла  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Ион  $\text{Y}^{3+}$  находится в треугольной призме, ионы  $\text{Ga}^{3+}$  – в слегка искаженном октаэдре

в треугольниках, соединяющих витые столбцы Ga-октаэдров. Кристаллы  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ , легированные 0.2%  $\text{Er}^{3+}$ , были получены путем спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. В качестве растворителя использовали  $\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ . Рост происходил за счет охлаждения раствора от 900 до 700°C со скоростью 2°C в час. В результате были получены прозрачные ограненные кристаллы размером 0.5–1 mm. Спектры ЭПР измеряли в X- и Q-диапазонах при температурах 5–30 K.

### Спектр ЭПР иона $\text{Er}^{3+}$ в кристаллах $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$

Трехвалентный ион  $\text{Er}^{3+}$  имеет электронную конфигурацию  $4f^{11}$ , в которой самым нижним по энергии является мультиплет  $^4I_{15/2}$ . Поскольку  $f$ -оболочка содержит нечетное число электронов, в кристаллическом поле  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  происходит расщепление мультиплета на восемь крамеровских дублетов, на самом нижнем из которых наблюдается сигнал ЭПР. На рис. 2,а

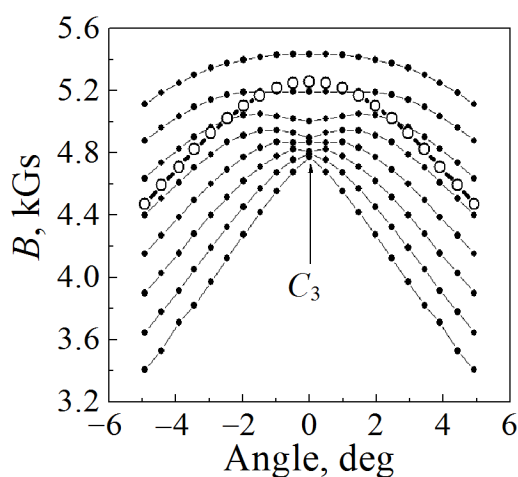


**Рис. 2.** Спектры ЭПР иона  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  для  $B \perp C_3$  (а) и  $B \parallel C_3$  (б): 1 – экспериментальный, 2 – рассчитанный на основе параметров, приведенных в таблице, с шириной линии 10 Gs

показан спектр  $\text{Er}^{3+}$  в ориентации, когда магнитное поле направлено перпендикулярно оси  $C_3$ . Спектр состоит из центральной интенсивной линии поглощения, относящейся к четным изотопам эрбия, и восьми линий сверхтонкой структуры, вызванной взаимодействием электронного спина с магнитным моментом собственного ядра (спин 7/2) нечетного изотопа  $^{167}\text{Er}$  (естественная распространенность – 22.82%). Спектр сильно анизотропный. На рис. 2,б показан спектр в ориентации, когда магнитное поле параллельно оси  $C_3$ . Поведение в магнитном поле может быть описано спиновым гамильтонианом с эффективным спином  $S = 1/2$  [28]:

$$H = \beta S g \mathbf{B} + S A I, \quad (1)$$

где  $\beta$  – магнетон Бора;  $S$ ,  $I$  – операторы соответственно электронного и ядерного спина;  $g$  – фактор спектроскопического расщепления;  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции;  $A$  – тензор сверхтонкого взаимодействия. Ядра эрбия кроме магнитного дипольного момента имеют небольшой квадрупольный момент, но в пределах точности эксперимента он не проявлялся, поэтому члены, описывающие взаимодействие с квадрупольным моментом, не включены в спиновый гамильтониан. На рис. 2 наряду с экспериментальными записями спектров показаны спектры, рассчитанные с помощью программы EasySpin [29] по параметрам, приведенным в таблице. Зависимости сверхтонких компонент от угла вблизи оси  $C_3$  представлены на рис. 3. Необычное поведение сверхтонких компонент спектра обусловлено большой анизотропией  $g$ -фактора.



**Рис. 3.** Угловая зависимость резонансных полей ЭПР спектра  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  вблизи оси  $C_3$ : • – резонансные линии от нечетного изотопа  $^{167}\text{Er}$ ; ○ – угловая зависимость четного изотопа;  $T = 15 \text{ K}$

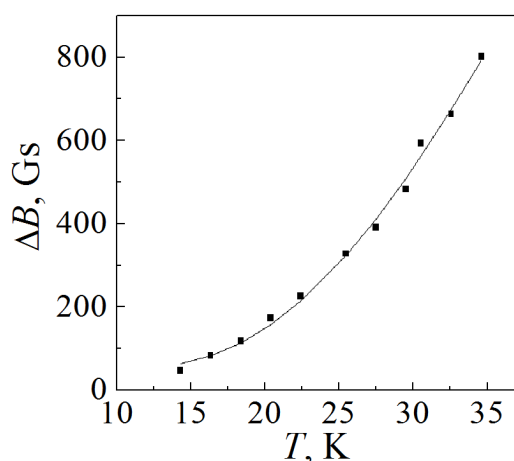
Таблица

**Параметры спинного гамильтониана иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллах  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ,  $\text{EuAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ,  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$**

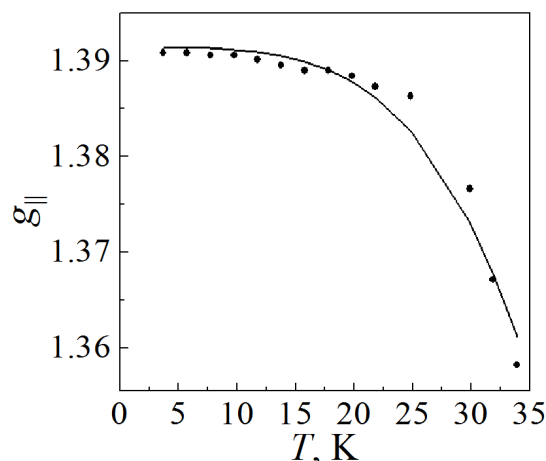
Кристаллы	Параметры $\text{Er}^{3+}$				
	$g_{\parallel}$	$g_{\perp}$	$A_{\parallel}$	$A_{\perp}$	$g_{\parallel}A_{\perp}/g_{\perp}A_{\parallel}$
$\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$	1.331(3)	9.301(5)	47.1(5)	318.7(8)	0.98
$\text{EuAl}_3(\text{BO}_3)_4$	1.315(3)	9.327(5)	46.3(5)	318.5(8)	
$\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$	1.269 (1)	9.34 (6)	47.7 (5)	320.9(8)	

Экспериментально определенные параметры гамильтониана приведены в таблице, в которой указаны данные [30] для двух изоморфных алюмоборатов  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{EuAl}_3(\text{BO}_3)_4$ . Соотношение  $g_{\parallel}A_{\perp}/g_{\perp}A_{\parallel}$  близко к единице, что свидетельствует об очень незначительном влиянии вышележащих мультиплетов иона  $\text{Er}^{3+}$ . Действительно, согласно данным работы [31] ближайший возбужденный мультиплет  $^4I_{13/2}$  отстоит от основного на  $6600 \text{ cm}^{-1}$ .

Редкоземельные ионы, у которых незаполненная  $4f$ -оболочка, сильно связаны с колебаниями решетки (кроме иона  $Gd^{3+}$  с конфигурацией  $4f^5$ ). В результате они имеют короткие времена спин-решеточной релаксации, и спектры ЭПР от них фиксируются только при низкой температуре. Зависимость ширины линии от температуры дает возможность определить времена спин-решеточной релаксации и установить ее механизмы. Измерения температурной зависимости ширины линии были проведены в ориентации, когда внешнее магнитное поле параллельно оси  $C_3$ . Ширину линии измеряли по расстоянию между экстремальными значениями производной линии поглощения.



**Рис. 4.** Зависимость ширины линии ЭПР ионов  $Er^{3+}$  в  $YGa_3(BO_3)_4$  от температуры в ориентации  $B||C_3$ ;  $\Delta B = 68.2 + 11.6 \cdot 10^3 \exp(-65/kT)$



**Рис. 5.** Температурная зависимость  $g_{||}$  спектра ЭПР иона  $Er^{3+}$  в кристалле  $YGa_3(BO_3)_4$ . Сплошная линия пропорциональна  $T^4$

Зависимость ширины линии от температуры в ориентации  $B||C_3$  представлена на рис. 4. Область наблюдения ограничена 35 К. Зависимость хорошо описывается экспоненциальной функцией  $\Delta B = 68.2 + 11.6 \cdot 10^3 \exp(-65/kT)$ .

Величина  $\Delta = 65 \text{ cm}^{-1}$  указывает на наличие в энергетическом спектре иона уровня энергии, который участвует в релаксации Орбаха–Аминова. Кроме уширения линии ЭПР наблюдается уменьшение  $g$ -фактора от температуры, которое представлено на рис. 5.

### Обсуждение результатов

Экспериментальные значения  $g$ -факторов (таблица), судя по близким к единице соотношениям  $g_{||}A_{\perp}/g_{\perp}A_{||}$ , определяются смешиванием состояний внутри мультиплета  $^4I_{15/2}$  для иона  $Er^{3+}$ , а влияние вышележащих мультиплетов очень мало. Ввиду симметрии  $D_3$ , в которой находятся ионы  $Er^{3+}$ , гамильтониан кристаллического поля содержит операторы  $O_4^3$ ,  $O_6^3$  и  $O_6^6$ , смешивающие волновые функции и отличающиеся на числа 3 и 6. В работе

[32] по известным параметрам кристаллического поля были вычислены  $g$ -факторы основного дублета иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , которые оказались равными  $g_{\parallel} = 1.216$  и  $g_{\perp} = 9.558$ . Полученные экспериментальные значения в изоморфных кристаллах близки к расчетным величинам.

Наряду с уширением линии ЭПР при увеличении температуры наблюдается сдвиг ее в более высокие поля, т.е. происходит уменьшение  $g$ -факторов. Впервые такое явление было обнаружено в спектре иона  $\text{Dy}^{3+}$  в кристалле  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  [33]. На рис. 5 показана зависимость  $g_{\parallel}$  от температуры для иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Изменение магнитного момента основного состояния вызвано примешиванием возбужденных состояний через совместное действие зеемановского и орбитально-решеточного взаимодействий. Температурная зависимость сдвига линии ЭПР пропорциональна

$T^4 \int_0^{\theta/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$  в модели Дебая [34,35]. Так как температура Дебая для исследуемого кристалла равна 322 К [20,21], множитель при  $T^4$  в используемом интервале температур практически не изменяется. При расчете температурного сдвига линии ЭПР необходимо учитывать возбужденные состояния редкоземельного иона. Чем меньше энергетическое расстояние до возбужденных уровней, тем больше температурный вклад. В исследуемом ионе ближайшие возбужденные состояния расположены довольно близко. На рис. 5 представлена подгоночная кривая, пропорциональная  $T^4$ . Как видно, она достаточно хорошо описывает наблюдаемую температурную зависимость  $g$ -фактора.

### Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование статических и динамических характеристик ионов  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллах  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Определены  $g$ -факторы и константы сверхтонкого взаимодействия. Соотношение  $g_{\perp}A_{\perp}/g_{\parallel}A_{\parallel}$  близко к единице, что свидетельствует об очень незначительном влиянии состояний возбужденных мультиплетов. Уширение линий поглощения при повышении температуры связано с сильным спин-фононным взаимодействием. Спин-решеточная релаксация хорошо интерпретируется с помощью процессов Орбаха–Аминова. Наблюдается уменьшение  $g$ -фактора при повышении температуры, которое обусловлено спин-фононным взаимодействием, пропорциональным  $T^4$ .

1. X. Chen, Z. Luo, D. Jaque, J.J. Romero, J.G. Sole, Y. Huang, A. Jiang, C. Tu, J. Phys.: Condens. Matter **13**, 1171 (2001).
2. D. Jaque, O. Enguita, J. Garsia Sole, A.D. Jiang, Z.D. Luo, Appl. Phys. Lett. **76**, 2176 (2000).
3. A. Brenier, C. Tu, Z. Zhu, B. Wu, Appl. Phys. Lett. **84**, 2034 (2004).
4. A.D. Balaev, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, V.L. Temerov, S.G. Ovchinnikov, S.A. Kharlamova, J. Magn. Magn. Mater. **258–259**, 532 (2003).

5. S.A. Kharlamova, S.G. Ovchinnikov, A.D. Balaev, M.F. Thomas, I.S. Lyubutin, A.G. Gavriluk, JETP **101**, 1098 (2005).
6. V.A. Bedarev, M.I. Pashchenko, M.I. Kobets, K.G. Dergachev, E.N. Khatsko, S.I. Gnatchenko, A.A. Zvyagin, T. Zajarniuk, A. Szewczyk, M.U. Gutowska, L.N. Bezmaternykh, V.L. Temerov, Low Temperature Physics **41**, 534 (2015).
7. K.-C. Liang, R.P. Chaudhury, B. Lorenz, Y.Y. Sun, L.N. Bezmaternykh, V.L. Temerov, C.W. Chu, Phys. Rev. **B83**, 180417(R) (2011).
8. А.И. Бегунов, А.А. Демидов, И.А. Гудим, Е.В. Еремин, Письма в ЖЭТФ **97**, 611 (2013).
9. A.A. Prokhorov, A.D. Prokhorov, L.F. Chernush, V.P. Dyakonov, H. Szymczak, A. Dejneka, Phys. Scr. **90**, 065804 (2015).
10. A.A. Prokhorov, L.P. Chernush, V. Babin, M. Buryi, D. Savchenko, J. Lancok, M. Nikl, A.D. Prokhorov, Opt. Mater. **66**, 428 (2017).
11. A.A. Prokhorov, L.F. Chernush, V.P. Dyakonov, H. Szymczak, A.D. Prokhorov, J. Magn. Magn. Mater. **420**, 285 (2016).
12. J.P.R. Wells, M. Yamaga, T.P.J. Han, M. Honda, J. Phys: Condens. Matter **15**, 539 (2003).
13. A.D. Prokhorov, E.E. Zubov, A.A. Prokhorov, L.F. Chernush, R. Minyakaev, V.P. Dyakonov, H. Szymczak, Phys. Status Solidi **B250**, 1331 (2013).
14. A.A. Prokhorov, J. Mater. Sci. **51**, 4762 (2016).
15. G. Wang, H.G. Gallagher, T.P.J. Han, B. Henderson, M. Yamaga, T. Yosida, J. Phys.: Condens. Matter **9**, 1649 (1997).
16. A. Watterich, P. Aleshkevych, M.T. Borowiec, T. Zajarniuk, H. Szymczak, E. Beregi, L. Kovacs, J. Phys.: Condens. Matter **15**, 3323 (2003).
17. A.D. Prokhorov, A.A. Prokhorov, L.F. Chernysh, P. Aleshkevich, V. Dyakonov, H. Szymczak, J. Magn. Magn. Mater. **326**, 162 (2013).
18. A.D. Prokhorov, A.A. Prokhorov, E.E. Zubov, L.F. Chernysh, V. Dyakonov, H. Szymczak, Low Temp. Phys. **40**, 730 (2014).
19. A.D. Prokhorov, A.A. Prokhorov, L.F. Chernush, R. Minyakaev, V.P. Dyakonov, H. Szymczak, Phys. Status Solidi **B251**, 201 (2014).
20. A.A. Prokhorov, L.F. Chernush, R. Minyakaev, A. Mazur, T. Zajarniuk, A. Szewczyk, V. Dyakonov, J. Lancok, A.D. Prokhorov, J. Alloys Compd. **765**, 710 (2018).
21. A.A. Prokhorov, L.F. Chernush, T.N. Melnik, R. Minikayev, A. Mazur, V. Babin, M. Nikl, J. Lancok, A.D. Prokhorov, Sci. Rep. **9**, 12787 (2019).
22. N.I. Leonyuk, L.I. Leonyuk, Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. **31**, 179 (1995).
23. L.I. Alshinskaya, N.I. Leonyuk, T.I. Timchenko, Krist. Tech. **14**, 897 (1979).
24. E.L. Belokoneva, L.I. Al'shinskaya, M.A. Simonov, N.I. Leonyuk, T.I. Timchenko, N.V. Belov, J. Struct. Chem. **19**, 332 (1978).
25. E. Beregi, A. Watterich, J. Madarász, M. Tóth, K. Polgár, J. Cryst. Growth **237–239**, 874 (2002).
26. E.Y. Borovikova, K.N. Boldyrev, S.M. Aksenov, E.A. Dobretsova, V.S. Kurazhkovskaya, N.I. Leonyuk, A.E. Savon, D.V. Deyneko, D.A. Ksenofontov, Opt. Mater. **49**, 304 (2015).
27. N.V. Volkov, I.A. Gudim, E.V. Eremin, A.I. Begunov, A.A. Demidov, K.N. Boldyrev, JETP Lett. **99**, 67 (2014).
28. С.А. Альтишлер, Б.М. Козырев, Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, Наука, Москва (1972).
29. S. Stoll, A. Schweiger, J. Magn. Reson. **178**, 42 (2006).

30. A.D. Prokhorov, A.A. Prokhorov, L.F. Chernysh, P. Aleshkevich, V. Dyakonov, H. Szymczak, J. Magn. Magn. Mater. **326**, 162 (2013).
31. M. Dammak, J. Alloys Compd. **393**, 51 (2005).
32. D. Jaque, J. Campany, Z.D. Luo, J. Garsía Solé, J. Phys.: Condens. Matter **9**, 9715 (1997).
33. M.T. Borowiec, V. Dyakonov, A. Prokhorov, Szymczak, Phys. Rev **B62**, 5834 (2000).
34. C.A. Bates, H. Szymczak, Phys. Status Solidi **B74**, 225 (1976).
35. C.A. Bates, H. Szymczak, Z. Phys. **B28**, 67 (1977).

A.A. Prokhorov, L.F. Chernysh, A.D. Prokhorov

## SUPER-FINE STRUCTURE OF EPR SPECTRUM OF $\text{Er}^{3+}$ IN THE CRYSTALS OF $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$

The results of the study of the ground state of erbium ions in the crystals of  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  are reported. The EPR spectrum of the  $\text{Er}^{3+}$  ion that substitutes yttrium, being located in a slightly distorted prism formed by six oxygen ions, is measured within the ranges of 3 cm and 8 mm. The parameters of spin Hamiltonian related to strongly anisotropic behavior of the spectrum are estimated:  $g_{\parallel} = 1.269$  (1),  $g_{\perp} = 9.34$  (6),  $A_{\parallel} = 47.7$  (5) MHz,  $A_{\perp} = 320$  (9) MHz. The mechanism of spin-lattice relaxation by Orbach–Aminov that results in widening of EPR lines allows evaluation of the energy of the nearest neighbor excited state in the spectrum of the  $\text{Er}^{3+}$  ion as  $65 \text{ cm}^{-1}$ .

**Keywords:** EPR, multiferroics, rare-earth, aluminum borates, gallium borates, spin Hamiltonian

**Fig. 1.** Fragment of the crystal structure of the  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal. The  $\text{Y}^{3+}$  ion is located in a triangular prism, the  $\text{Ga}^{3+}$  ions are located in a slightly distorted octahedron

**Fig. 2.** EPR spectrum of the  $\text{Er}^{3+}$  ion in  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  for  $B \perp C_3$  (a) and  $B \parallel C_3$  (b): 1 – experiment, 2 – calculated with using the parameters listed in the table; the linewidth is 10 Gs

**Fig. 3.** Angular dependence of the resonance fields of the EPR spectra of  $\text{Er}^{3+}$  in  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  in the vicinity of  $C_3$  axis: • – resonance lines of the odd isotope of  $^{167}\text{Er}$ ; ○ – angular dependence of the even isotope;  $T = 15 \text{ K}$

**Fig. 4.** Temperature dependence of the  $\text{Er}^{3+}$  ion line width in  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  in the orientation of  $B \parallel C_3$ ;  $\Delta B = 68.2 + 11.6 \cdot 10^3 \exp(-65/kT)$

**Fig. 5.** Temperature dependence of  $g_{\parallel}$  values obtained for  $\text{Er}^{3+}$  ions in the  $\text{YGa}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal. The solid line is proportional to  $T^4$