

# Антиферромагнитный резонанс в кристалле $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$

А.Н. Блудов, Ю.А. Савина, М.И. Кобец, В.А. Пащенко, С.Л. Гнатченко

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: bludov@ilt.kharkov.ua*

Н.Н. Кузьмин, В.В. Мальцев, Н.И. Леонюк

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 119991, Россия*

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2018 г., опубликована онлайн 27 марта 2018 г.

Проведены экспериментальные исследования АФМР в монокристалле  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  в диапазоне частот 17–38 ГГц при температуре 4,2 К. Определена величина энергетической щели в спектре спиновых волн ( $25,5 \pm 0,5$ ) ГГц. Показано, что высокочастотные свойства гадолиниевого хромобората хорошо описываются в рамках модели двухподрешеточного антиферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость».

Проведено експериментальні дослідження АФМР в монокристалі  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  в діапазоні частот 17–38 ГГц при температурі 4,2 К. Визначено величину енергетичної щілини у спектрі спинових хвиль ( $25,5 \pm 0,5$ ) ГГц. Показано, що високочастотні властивості гадолінієвого хромоборату добре описуються в рамках моделі двохпідґраткового антиферромагнетика з анізотропією типу «легка площина».

PACS: 75.50.Ee Антиферромагнетики;  
76.50.+g Антиферромагнитный резонанс.

Ключевые слова: гадолиниевый хромоборат, антиферромагнетик, антиферромагнитный резонанс.

Гадолиний-хромовый борат  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  принадлежит к семейству боратов с общей химической формулой  $\text{RM}_3(\text{VO}_3)_4$  (где R — лантаноид или Y, а M — Al, Ga, Sc, Fe или Cr), представители которого привлекают внимание исследователей на протяжении нескольких десятилетий [1–5]. Такой интерес обусловлен их необычными оптическими, магнитными и магнитоэлектрическими свойствами. Редкоземельно-хромовые представители довольно хорошо исследованы при помощи рамановской и ИК спектроскопии [6,7]. Также опубликованы некоторые сведения о магнитных и оптических свойствах самариевого [8], неодимового [8,9] и европиевого [10] боратов этой группы. Магнитная восприимчивость монокристалла  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  проанализирована в работе [11]. Магниторезонансные же свойства редкоземельно-хромовых боратов остаются практически неизученными, несмотря на то, что резонансная методика с успехом применялась при исследовании редкоземельных ферроборатов [12–14].

Соединение  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  имеет кристаллическую структуру минерала хантита  $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$  с пространственной группой  $R32$  и параметрами:  $a = 9,482(7)$  Å и  $c = 7,482(5)$  Å,  $Z = 3$  [6,7]. В работе [11] было показано, что гадолиниевый хромоборат упорядочивается антиферромагнитно при  $T_N = 7$  К, а при  $T > 10$  К его магнитные свойства изотропны, что характерно для ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $g$ -факторы которых близки к  $g = 2,00$ . Также было обнаружено проявление низкой размерности в магнитной восприимчивости кристалла. Сделано предположение, что для  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  характерна магнитная анизотропия типа «легкая плоскость».

Цель данной работы — исследование магнитного резонанса в монокристалле  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  в магнитоупорядоченном состоянии, определение величины щели в спектре спиновых волн и эффективного  $g$ -фактора, а также по данным о частотно-полевой зависимости (ЧПЗ) мод антиферромагнитного резонанса (АФМР) сделать вывод о типе магнитной анизотропии в этом соединении.

Инконгруэнтно плавящиеся кристаллы  $GdCr_3(VO_3)_4$  получены из раствора в расплаве в результате спонтанного зародышеобразования по методике, описанной в работе [6]. Исследуемый образец представляет собой монокристалл черного цвета с естественной огранкой и размерами порядка  $1 \times 1 \times 1$  мм. Никакой дополнительной обработки (термической или механической) образца не проводилось. Ориентация кристаллографических осей образца определялась методом Лауэ.

Исследования полевых зависимостей спектров АФМР в монокристалле  $GdCr_3(VO_3)_4$  проводились в частотном диапазоне 17–38 ГГц на стандартном спектрометре при температуре 4,2 К. В качестве активного элемента в спектрометре использовался прямоугольный резонатор с волной  $H_{01n}$ . В экспериментах использовалась как параллельная ( $H \parallel h$ ), так и перпендикулярная ( $H \perp h$ ) поляризация магнитного поля ( $h$ ) СВЧ излучения. Получены спектры АФМР для двух ориентаций внешнего магнитного поля: вдоль кристаллографической оси  $c$  ( $H \parallel c$ ) и перпендикулярно ей ( $H \perp c$ ). Погрешность ориентации образца составляла не более  $0,5^\circ$ .

На рис. 1 представлена серия спектров поглощения СВЧ излучения в монокристалле  $GdCr_3(VO_3)_4$  на частотах от 17 до 38 ГГц ( $H \perp h$ ) при ориентациях внешне-

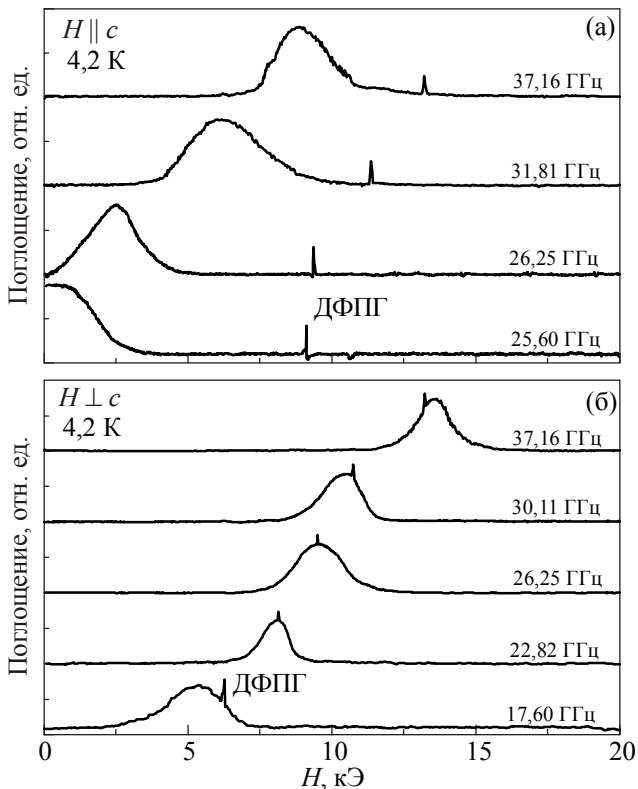


Рис. 1. Спектры поглощения АФМР в монокристалле  $GdCr_3(VO_3)_4$  в диапазоне частот 17–38 ГГц при 4,2 К и ориентациях магнитного поля  $H \parallel c$  (а) и  $H \perp c$  (б). Узкая линия соответствует сигналу от эталонного образца дифенилпикрилгидразила (ДФПГ).

го магнитного поля  $H \parallel c$  (а) и  $H \perp c$  (б). Для ориентации магнитного поля вдоль оси  $c$  кристалла была обнаружена одна линия АФМР, выходящая из щели  $\Delta$  величиной  $(25,5 \pm 0,5)$  ГГц. Резонансное поле этой линии нелинейно растет при увеличении частоты излучения, приближаясь к резонансному полю поглощения эталонного образца дифенилпикрилгидразила (ДФПГ) с изотропным  $g$ -фактором  $g = 2,0032$ . В частотном интервале ниже щели никаких резонансных линий поглощения при  $H \parallel c$  и  $H \perp h$ ,  $H \parallel h$  не обнаружено. При ориентации магнитного поля  $H \perp c$  (рис. 1(б)) во всем частотном интервале также наблюдалась только одна линия АФМР. Резонансное поле этой линии увеличивается с увеличением частоты СВЧ излучения и практически совпадает с резонансным полем эталонного образца. Только для самых низких частот наблюдается заметная разница между резонансными полями образца и эталона. Все резонансные линии удовлетворительно описываются функцией Лоренца и имеют ширину от 1 до 2,5 кЭ.

На основании экспериментальных результатов построена частотно-полевая зависимость мод АФМР монокристалла  $GdCr_3(VO_3)_4$ , представленная на рис. 2. Для анализа ЧПЗ воспользуемся простой моделью для коллинеарного двухподрешеточного антиферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость» [15]. При  $H \parallel c$  мода АФМР  $v_{\parallel}$  будет описываться следующим выражением:

$$\left(\frac{v_{\parallel}}{\gamma}\right)^2 = \left(\frac{\Delta}{\gamma}\right)^2 + H^2, \quad (1)$$

где  $\gamma = g\mu_B/h$  — гиромагнитное отношение ( $g$  — эффективный  $g$ -фактор иона  $Cr^{3+}$ ,  $\mu_B$  — магнетон Бора,

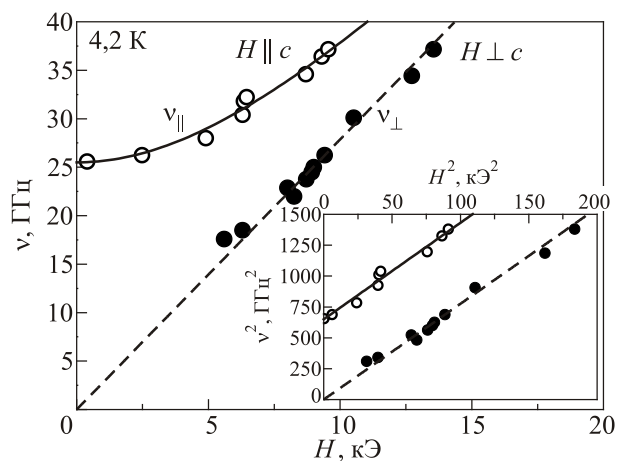


Рис. 2. Частотно-полевая зависимость спектра АФМР в монокристалле  $GdCr_3(VO_3)_4$  при  $H \parallel c$  ( $\circ$ ) и  $H \perp c$  ( $\bullet$ ),  $T = 4,2$  К. Сплошные и пунктирные линии — расчетные кривые, полученные в рамках модели для двухподрешеточного антиферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость». На вставке показана ЧПЗ спектра АФМР в координатах  $v^2(H^2)$ .

$h$  — постоянная Планка). Наилучшее совпадение с экспериментальными данными достигается при следующих значениях двух независимых параметров:  $\Delta = (25,5 \pm 0,5)$  ГГц и  $\gamma = (2,795 \pm 0,025)$  ГГц/кЭ. Расчетная кривая для этих параметров показана сплошной линией на рис. 2. Полученная из этого анализа оценка параметра  $\Delta$  полностью совпадает с экспериментально определенной величиной щели АФМР в нулевом магнитном поле. Используя величину параметра  $\gamma$ , можно получить оценку эффективного  $g$ -фактора, равную  $g = 2,00 \pm 0,01$ , что согласуется с литературными данными для иона  $\text{Cr}^{3+}$  [11,16].

При перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля ( $H \perp c$ ) модель для двухподрешеточного антиферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость» предсказывает наблюдение бесщелевой, линейной по полю, моды АФМР  $\nu_{\perp}$ , полевая зависимость которой описывается следующим выражением [15]:

$$\frac{\nu_{\perp}}{\gamma} = H. \quad (2)$$

Расчет показывает, что в этом случае значение параметра  $\gamma = (2,785 \pm 0,025)$  ГГц/кЭ практически совпадает с результатом, полученным при описании моды  $\nu_{\parallel}$ . Расчетная кривая для моды  $\nu_{\perp}$  показана пунктирной линией на рис. 2. Наблюдается хорошее согласие расчета с экспериментальными данными. На вставке приведена частотно-полевая зависимость мод АФМР в координатах  $\nu^2(H^2)$ . Видно, что в этих координатах экспериментальные данные для мод АФМР  $\nu_{\parallel}$  и  $\nu_{\perp}$  хорошо описываются линейными зависимостями с совпадающим наклоном. Зависимость для моды  $\nu_{\parallel}$  пересекает ось ординат в точке  $(\Delta)^2 = (25,5)^2$  ГГц<sup>2</sup>, в то время как прямая для  $\nu_{\perp}$  проходит через начало координат. Используемая для описания экспериментальных данных модель хорошо описывает частотно-полевые зависимости мод АФМР  $\nu_{\parallel}$  и  $\nu_{\perp}$  с разумными значениями параметров. Таким образом, можно сделать вывод, что монокристалл  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$  при температурах ниже  $T_N = 7$  К является антиферромагнетиком с анизотропией типа «легкая плоскость». Отсутствие других дополнительных линий в спектре АФМР указывает на то, что редкоземельная подсистема достаточно сильно связана с подсистемой ионов  $\text{Cr}^{3+}$  при помощи  $f$ - $d$ -взаимодействия и прецессирует с той же частотой.

На основании анализа экспериментальных данных по АФМР в монокристалле  $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$ , полученных в диапазоне частот 17–38 ГГц при ориентациях внешнего магнитного поля  $H \parallel c$  и  $H \perp c$  и температуре 4,2 К, можно сделать следующие выводы: гадолиниевый хромоборат в магнитоупорядоченном состоянии является антиферромагнетиком с анизотропией типа «легкая плос-

кость»; величина энергетической щели в спектре спиновых волн антиферромагнетика  $\Delta = (25,5 \pm 0,5)$  ГГц; эффективный  $g$ -фактор изотропен и близок к значению  $g = 2,00 \pm 0,01$ .

1. N.I. Leonyuk and L.I. Leonyuk, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* **31**, 179 (1995).
2. А.Н. Васильев, Е.А. Попова, *ФНТ* **32**, 968 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32**, 735 (2006)].
3. А.М. Кадомцева, Ю.Ф. Попов, Г.П. Воробьев, А.П. Пятаков, С.С. Кротов, К.И. Камилов, В.Ю. Иванов, А.А. Мухин, А.К. Звездин, А.М. Кузьменко, Л.Н. Безматерных, И.А. Гудим, В.Л. Темеров, *ФНТ* **36**, 640 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 511 (2010)].
4. K.-C. Liang, R.P. Chaudhury, B. Lorenz, Y.Y. Sun, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, V.L. Temerov, and C.W. Chu, *J. Phys.: Conf. Ser.* **400**, 032046 (2012).
5. E.Yu. Borovikova, K.N. Boldyrev, S.M. Aksenov, E.A. Dobretsova, V.S. Kurazhkovskaya, N.I. Leonyuk, A.E. Savon, D.V. Deyneko, and D.A. Ksenofontov, *Opt. Mater.* **49**, 304 (2015).
6. В.С. Куражковская, Е.А. Добрецова, Е.Ю. Боровикова, В.В. Мальцев, Н.И. Леонюк, *Журнал структурной химии* **52**, 721 (2011) [*J. Struct. Chem.* **52**, 699 (2011)].
7. E.Yu. Borovikova, E.A. Dobretsova, K.N. Boldyrev, V.S. Kurazhkovskaya, V.V. Maltsev, and N.I. Leonyuk, *Vibrational Spectroscopy* **68**, 82 (2013).
8. К.Н. Болдырев, Е.П. Чукалина, Н.И. Леонюк, *ФТТ* **50**, 1617 (2008) [*Phys. Solid State* **50**, 1681 (2008)].
9. E.A. Popova, N.I. Leonyuk, M.N. Popova, E.P. Chukalina, K.N. Boldyrev, N. Tristan, R. Klingeler, and B. Buchner, *Phys. Rev. B* **76**, 054446 (2007).
10. L. Gondek, A. Szytu, J. Przewonik, J. Zukrowski, A. Prokhorov, L. Chernush, E. Zubov, V. Dyakonov, R. Duraj, and Yu. Tyvanchuk, *J. Solid State Chem.* **210**, 30 (2014).
11. А.Н. Блудов, Ю.А. Савина, В.А. Пашенко, С.Л. Гнатченко, Н.Н. Кузьмин, В.В. Мальцев, Н.И. Леонюк, *ФНТ* **44**, 554 (2018) [*Low Temp. Phys.* **44**, No. 5 (2018)].
12. А.И. Панкрац, Г.А. Петраковский, Л.Н. Безматерных, О.А. Баюков, *ЖЭТФ* **126**, 887 (2004) [*JETP* **99**, 766 (2004)].
13. А.М. Кузьменко, А.А. Мухин, В.Ю. Иванов, А.М. Кадомцева, С.П. Лебедев, Л.Н. Безматерных, *ЖЭТФ* **140**, 131 (2011) [*JETP* **113**, 113 (2011)].
14. А.Н. Блудов, В.А. Пашенко, М.И. Кобец, В.А. Бедарев, Д.Н. Меренков, С.Л. Гнатченко, И.А. Гудим, *ФНТ* **44**, 185 (2018) [*Low Temp. Phys.* **44**, No. 2 (2018)].
15. А.Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*, Наука, Москва (1973).
16. А. Абрагам, Б. Блини, *Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов*, т. 1, Наука, Москва (1973).

Antiferromagnetic resonance in a  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal

A.N. Bludov, Yu.O. Savina, M.I. Kobets,  
V.A. Pashchenko, S.L. Gnatchenko, N.N. Kuzmin,  
V.V. Mal'tsev, and N.I. Leonyuk

Experimental AFMR studies of  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  single crystal in a frequency range 17–38 GHz at 4.2 K have been carried out. The energy gap in the spin wave spectrum has been determined as  $(25.5 \pm 0.5)$  GHz. It is

shown that the high-frequency properties of gadolinium chromium borate are well described in the frame of the model for a two-sublattice antiferromagnet with an easy-plane anisotropy.

PACS: 75.50.Ee Antiferromagnetics;  
76.50.+g Ferromagnetic, antiferromagnetic,  
and ferrimagnetic resonances; spin-wave resonance.

Keywords: gadolinium chromoborate, antiferromagnetic, antiferromagnetic resonance.