

Особенности расщепления крамерсовых дублетов Nd^{3+} в антиферромагнитном кристалле $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ во внешнем магнитном поле

С.Л. Гнатченко, И.С. Качур, В.С. Курносов, В.Г. Пирятинская

*Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркина НАН України
пр. Науки, 47, г. Харків, 61103, Україна
E-mail: piryatinskaya@ilt.kharkov.ua*

А.В. Малаховский, И.А. Гудим

*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, г. Красноярск, 660036, Россия*

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2019 г., опубликована онлайн 26 июня 2019 г.

Проведены исследования спектров оптического поглощения легкоплоскостного антиферромагнетика $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ в области перехода $^4I_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ иона Nd^{3+} в диапазоне температур 2–35 К во внешних магнитных полях напряженностью до 65 кЭ, направленных как вдоль оси C_3 , так и в базисной плоскости кристалла. Определены величины расщепления возбужденных состояний Nd^{3+} в обменном поле подсистемы Fe^{3+} , а также значения g -факторов состояний мультиплета $^2H_{11/2}$. Нетривиальные зависимости расщепления некоторых состояний Nd^{3+} в магнитном поле указывают на присутствие анизотропного Fe–Nd обменного взаимодействия для этих возбужденных состояний.

Ключевые слова: редкоземельный ферроборат, спектры поглощения, f - f переходы.

1. Введение

Кристалл $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ принадлежит к семейству редкоземельных тригональных ферроборатов с общей формулой $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ (R — редкоземельный элемент), которые интенсивно исследуются в последние годы. Интерес к редкоземельным ферроборатам связан главным образом с наличием у них мультиферроэлектрических свойств, предполагающих сосуществование магнитного, электрического и упругого упорядочения [1–4]. Магнитные свойства кристаллов семейства $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ довольно разнообразны, что обусловлено присутствием двух взаимодействующих магнитных подсистем. Обменное взаимодействие в подсистеме ионов железа определяет температуру магнитного упорядочения кристаллов, которая у большинства ферроборатов находится в диапазоне 30–40 К [5]. Редкоземельная подсистема приобретает магнитный момент благодаря обменному f - d взаимодействию с ионами железа. Подсистема ионов Fe^{3+} (основное состояние $^6S_{5/2}$) обладает довольно слабой магнитной анизотропией легкоплоскостного харак-

тера, которая обусловлена преимущественно диполь-дипольным взаимодействием. Редкоземельные ионы, как правило, обладают более сильной магнитной анизотропией, чем Fe^{3+} , и определяют тип магнитной структуры кристалла. Среди ферроборатов встречаются как легкоосные, так и легкоплоскостные антиферромагнетики; существуют представители семейства, в которых при изменении температуры происходит спонтанный фазовый переход от одного магнитного состояния к другому [6,7]. В некоторых ферроборатах были обнаружены неколлинеарные, а также несоразмерные [7–9] магнитные структуры. Все представители семейства $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ имеют кристаллическую структуру хантита, которая при высоких температурах описывается пространственной группой симметрии $R32$. С понижением температуры ряд ферроборатов обнаруживает структурный фазовый переход в более низкосимметричную фазу $P3_121$ [10].

Ферроборат неодима $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ сохраняет кристаллическую структуру $R32$, по крайней мере, до температуры 2 К [11–13]. Редкоземельный ион занимает позицию с локальной симметрией D_3 . При температуре

$T_N \approx 30\text{--}33$ К происходит антиферромагнитное упорядочение кристалла и формируется легкоплоскостная структура с ориентацией магнитных моментов Fe^{3+} и Nd^{3+} вдоль одной из трех осей второго порядка, лежащих в базисной плоскости кристалла [14,15]. Следует подчеркнуть, что структура коллинеарна, несмотря на многоподрешеточность (минимально 2 иона Nd^{3+} и 6 ионов Fe^{3+}) и низкую позиционную симметрию ионов Fe^{3+} (C_2). Три эквивалентных направления в кристалле соответствуют трем 120° эквивалентным магнитным доменам (без учета антиферромагнитного вырождения). Ниже температуры $T_{IC} = 13,5$ К происходит трансформация коллинеарной магнитной структуры в длиннопериодическую антиферромагнитную спираль, распространяющуюся вдоль оси C_3 , ориентация магнитных моментов при этом сохраняется в базисной плоскости [9,16]. При приложении магнитного поля перпендикулярно оси C_3 спиральная структура разрушается, и векторы антиферромагнетизма Nd и Fe подрешеток ориентируются в базисной плоскости перпендикулярно внешнему полю [16]; эта спиновая переориентация происходит в виде фазового перехода первого рода [17–19].

Спектры оптического поглощения $NdFe_3(BO_3)_4$ были подробно исследованы в спектральном диапазоне $1500\text{--}25000$ cm^{-1} при температурах от 4,2 до 300 К в работе [20]. Авторами произведен расчет волновых функций, энергий и g -факторов состояний Nd^{3+} в кристаллическом поле. Для ряда состояний было обнаружено расщепление крамеровских дублетов при магнитном упорядочении кристалла в результате обменного взаимодействия с подсистемой ионов железа. В частности, величина обменного расщепления основного состояния Nd^{3+} составляет $8,8$ cm^{-1} при температуре 4,2 К.

Первые исследования оптических спектров кристалла во внешнем магнитном поле проведены в [21]. В поперечной зеемановской геометрии в области оптического перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ в Nd^{3+} обнаружено нетривиальное поведение интенсивностей поляризованных компонент крамерсова дублета $15971\text{--}15978$ cm^{-1} . Как было показано, наблюдаемый эффект является отражением сложной картины эффективных магнитных полей, под действием которых находится ион Nd^{3+} . Эти поля являются суперпозицией внешнего и внутреннего обменного полей, причем последнее имеет различную величину и направление для основного и оптически возбужденного состояний иона Nd^{3+} .

Магнитные свойства иона, находящегося в оптически возбужденном состоянии, а также свойства его ближайшего кристаллического окружения могут существенно отличаться от таковых для невозбужденных ионов кристалла. Исследование спектров во внешних магнитных полях дает возможность выявить особенности возбужденных состояний ионов [22–24].

В работе [20] для группы линий поглощения ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ в $NdFe_3(BO_3)_4$ отсутствуют сведения о расщеплении состояний при магнитном упорядочении кристалла. В то же время исследование низкотемпературных спектров, проведенное нами [21], показывает, что некоторые из состояний обнаруживают значительное расщепление в обменном поле. Кроме того, все состояния мультиплета ${}^2H_{11/2}$ обладают довольно большими значениями продольных или поперечных компонент g -фактора [20]. Благодаря этим особенностям данная группа переходов может служить в некотором роде «модельной» для изучения поведения спектров в магнитных полях. В настоящей работе представлены температурные зависимости спектров поглощения $NdFe_3(BO_3)_4$ в области переходов ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ при $T \leq T_N$, а также исследования спектров во внешних магнитных полях, ориентированных как вдоль кристаллографической оси C_3 , так и в базисной плоскости кристалла.

2. Методика эксперимента

Монокристаллы $NdFe_3(BO_3)_4$ выращивали из раствора–расплава по методике, описанной в [25]. Для измерения спектров поглощения использовали образцы в форме плоскопараллельных пластинок толщиной $0,2\text{--}0,7$ мм, ориентированных перпендикулярно или параллельно кристаллографической оси третьего порядка.

Для исследования спектров поглощения использовали спектральный прибор ДФС-13; регистрацию света осуществляли с помощью линейки светочувствительных диодов, входящей в состав многоканального оптического анализатора. Спектральное разрешение в исследуемой области составляло около $0,5$ cm^{-1} . Спектры поглощения записывали при распространении света перпендикулярно оси C_3 и направлении вектора E световой волны параллельно (π -спектры) или перпендикулярно оси C_3 (σ -спектры), а также при распространении света вдоль оси C_3 (α -спектры).

Магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом типа катушек Гельмгольца, который вместе с образцом находился в сверхтекучем гелии. Запись спектров в магнитном поле производили при температуре 2 К.

3. Температурная зависимость спектров поглощения света $NdFe_3(BO_3)_4$ в области оптического перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ иона Nd^{3+}

Состояния иона Nd^{3+} (электронная конфигурация $4f^3$) в кристаллическом поле симметрии D_3 представляют собой крамеровские дублеты, преобразующиеся по двузначным неприводимым представлениям Γ_4 и $\Gamma_{5,6}$. Основной мультиплет ${}^4I_{9/2}$ расщеплен в тригональном поле на пять крамеровских дублетов: $3\Gamma_4 + 2\Gamma_{5,6}$, при этом нижайший уровень имеет симметрию Γ_4 [20]. Первый возбужденный уровень обладает энергией 65 cm^{-1} ,

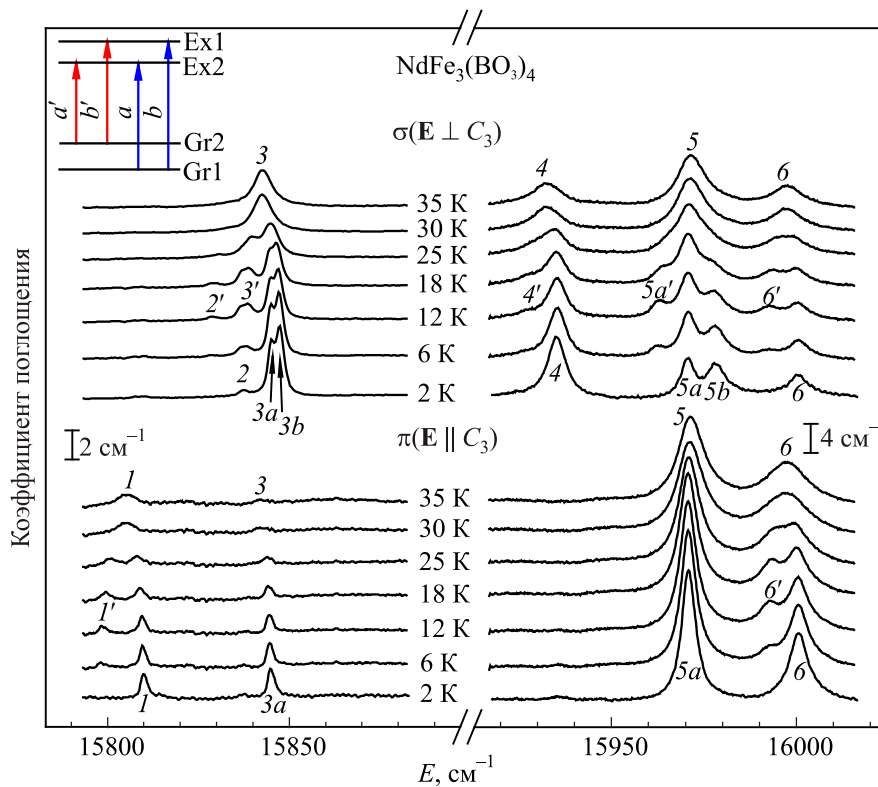


Рис. 1. Спектры поглощения света $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ в области оптического перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ в Nd^{3+} при различных температурах. На вставке — схема переходов между компонентами расщепления в обменном поле основного и возбужденного крмерсовых дублетов.

поэтому в исследуемом интервале температур ($T \leq T_N$) в спектрах наблюдаются переходы только с основного уровня. Исследуемый в настоящей работе мультиплет ${}^2H_{11/2}$ расщепляется в кристаллическом поле симметрии D_3 на 6 крмерсовых дублетов следующим образом: ${}^2H_{11/2} \rightarrow 4\Gamma_4 + 2\Gamma_{5,6}$.

На рис. 1 представлены спектры поглощения, соответствующие оптическим переходам ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ в σ - и π -поляризациях при различных температурах в диапазоне $T \leq T_N$. Все шесть возможных переходов наблюдаются в спектре. Они носят электродипольный характер, что подтверждается совпадением спектров в σ - и α -поляризациях. В соответствии с правилами отбора в симметрии D_3 (табл. 1), переходы $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_4$ должны наблюдаться как в σ -, так и в π -поляризации, а переходы $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_{5,6}$ — только в σ -поляризации. В табл. 2 приведены энергии наблюдаемых переходов в сравнении с рассчитанными в [20] и их симметричная идентификация на основании поляризационных правил отбора.

Таблица 1. Правила отбора для электродипольных переходов в кристаллическом поле симметрии D_3

	$E_{1/2}(\Gamma_4)$	$E_{3/2}(\Gamma_{5,6})$
$E_{1/2}(\Gamma_4)$	$\pi, \sigma(\alpha)$	$\sigma(\alpha)$
$E_{3/2}(\Gamma_{5,6})$	$\sigma(\alpha)$	π

При температурах $T < T_N$ некоторые из крмерсовых дублетов, как и основной дублет, испытывают расщепление за счет обменного взаимодействия с подсистемой железа; при этом может наблюдаться до четырех переходов, как показано на схеме (вставка к рис. 1). При температуре 2 К наблюдаются переходы только с нижайшего подуровня основного дублета. При повышении температуры до 6 К появляются также переходы с возбужденного подуровня основного дублета, отмеченные «штрихом» на схеме и в спектрах (рис. 1); их интенсивность растет с повышением температуры.

Наибольшее значение обменного расщепления в возбужденном состоянии (около $7,5 \text{ см}^{-1}$) обнаруживает переход «5» (линии $5a, 5b$ при $T = 2 \text{ К}$). Из-за близости этого значения к величине расщепления основного дублета ($8,8 \text{ см}^{-1}$) переходы $5a$ и $5b'$ имеют близкие энергии. В результате в спектрах ниже T_N наблюдается расщепление линии «5» только на три компоненты.

Сложность идентификации перехода «2» связана с тем, что его энергия практически совпадает с энергией «горячего» перехода «3'». Разделить эти переходы в спектрах при $T \geq 6 \text{ К}$ не представляется возможным. Однако факт наблюдения линии «2» уже при 2 К свидетельствует о том, что это отдельный переход с нижайшего подуровня основного дублета. Это же подтверждается появлением при повышении температуры линии «2'», которую отделяет от «3» около 16 см^{-1} ;

Таблица 2. Параметры оптических переходов с основного дублета Γ_4 ($^4I_{9/2}$) иона Nd^{3+} на подуровни мультиплета $^2H_{11/2}$ в $NdFe_3(BO_3)_4$, рассчитанные в [20] и полученные из эксперимента

№ линии	Энергия, cm^{-1} (расчет)	Энергия, cm^{-1} при 35К	Симметрия	g_{\perp} (расчет)	g_{\parallel} (расчет)	g_{\perp} (эксп.)	g_{\parallel} (эксп.)	$\Delta E_0, cm^{-1}$ при 2 К
1	15835	15805	Γ_4	3,7268	5,798	2,21	7,06	3
2	15861	15837 (при 2 К)	$\Gamma_{5,6}$	0	7,931		7,3	1,2–1,8
3	15862	15842	Γ_4	3,482	4,435	1,94	5,07	2,5
4	15946	15932	$\Gamma_{5,6}$	0	5,084	0	4,57	
5	15957	15971	Γ_4	5,259	0,430	5,65	0	7,5
6	15991	15997	Γ_4	1,083	9,728	0	11,58	0

следовательно, она не может быть связана с переходом на уровни «3» с какого-либо возбужденного уровня. В то же время интервал $E_2 - E_2'$ составляет приблизительно $8,8 cm^{-1}$, очевидно, что линия «2'» — это переход с верхней компоненты основного дублета на уровень «2». Кроме того, как будет показано дальше, поведение линий «2» и «3» в магнитных полях существенно различается.

4. Спектры поглощения во внешних магнитных полях $\mathbf{H} \parallel C_3$ и $\mathbf{H} \perp C_3$

Исследования в магнитных полях проводили при температуре 2 К, при которой в спектрах присутствуют исключительно переходы с нижнего подуровня обменно-расщепленного основного дублета Nd^{3+} . На рис. 2 представлена серия спектров в зависимости от напряженности магнитного поля, направленного вдоль оси C_3 . Спектры записывались в неполяризованном свете при $\mathbf{k} \parallel C_3$ (α - спектры). В магнитном поле, направленном перпендикулярно оси C_3 кристалла, в области пе-

рехода $^4I_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ возникает значительный дихроизм поглощения света в базисной плоскости [21]. Поэтому при исследованиях в поле $\mathbf{H} \perp C_3$ свет направлялся вдоль оси C_3 , и спектры регистрировались в двух поляризациях в базисной плоскости: $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$ и $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ (рис. 3). На рис. 4 приводятся полевые зависимости энергий компонент расщепления линий 1-6 в магнитных полях $\mathbf{H} \parallel C_3$ и $\mathbf{H} \perp C_3$.

Как уже упоминалось, из шести состояний мультиплета $^2H_{11/2}$ два имеют симметрию $\Gamma_{5,6}$. Из поляризационных свойств линий мы предположили, что этим состояниям соответствуют переходы «2» и «4». Состояния типа $\Gamma_{5,6}$ не должны расщепляться в магнитном поле, направленном в базисной плоскости (из соображений симметрии $g_{\perp} \equiv 0$). Действительно, в спектрах $\mathbf{H} \perp C_3$ линия «4» не обнаруживает расщепления вплоть до максимальных значений поля, но при 60 кЭ наблюдается очень незначительное несовпадение частот этой линии в поляризациях $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$ и $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ (рис. 3(б)).

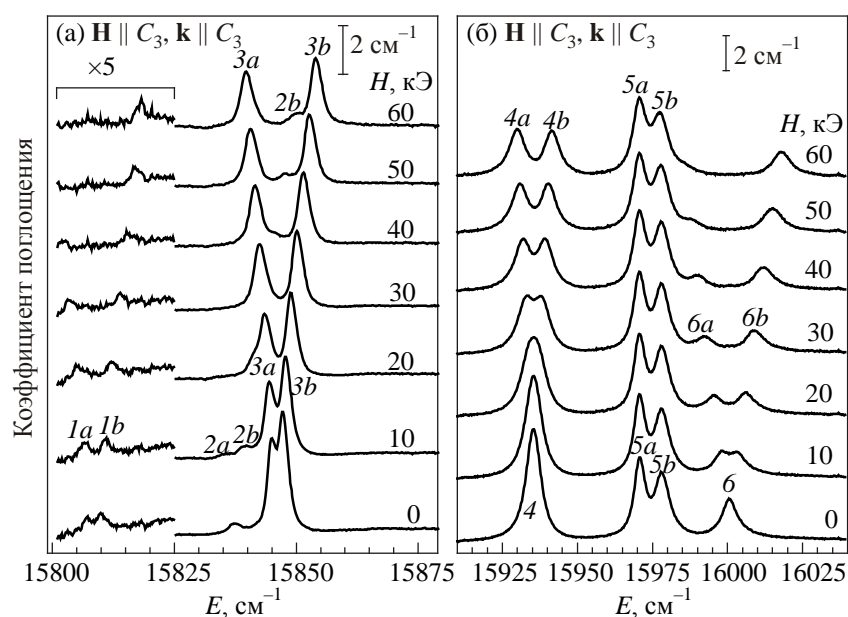


Рис. 2. Спектры поглощения $NdFe_3(BO_3)_4$ во внешнем магнитном поле $\mathbf{H} \parallel C_3$ при $T = 2$ К.

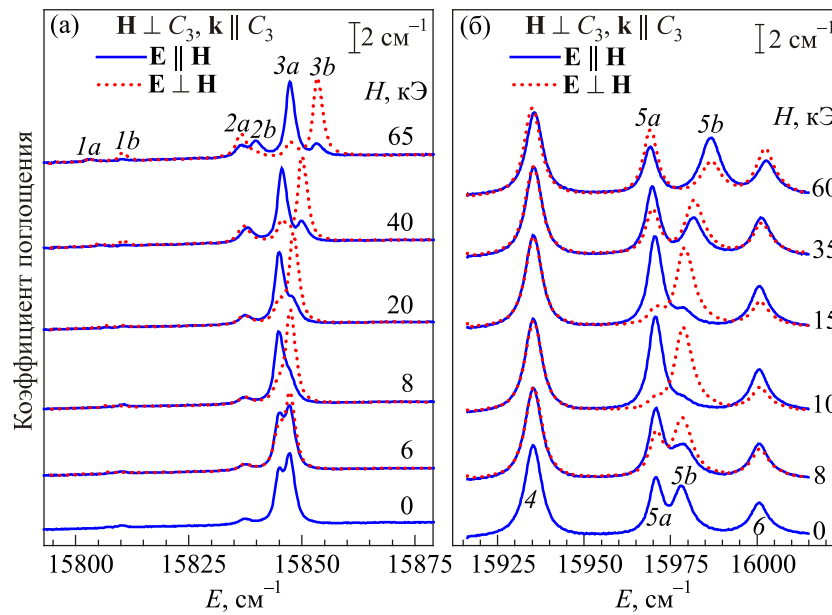


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Спектры поглощения $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ во внешнем магнитном поле $\mathbf{H} \perp C_3$ в двух поляризациях в базисной плоскости кристалла. $T = 2$ К.

Это может указывать на небольшое расщепление состояния «4». Что касается линии «2», в сильных полях ($H > 40$ кЭ) она испытывает небольшое, но вполне заметное расщепление (рис. 3(a)).

Имеется еще одна линия, которая не обнаруживает расщепления в поле $\mathbf{H} \perp C_3$ — линия «б» (рис. 3(б)), но это, по-видимому, обусловлено малостью поперечной компоненты g -фактора состояния «б» (согласно расчету [20] $g_{\perp} = 1,083$). Эта линия идентифицируется в [20] как переход $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_4$, и это явно следует из ее поляризационных свойств.

5. Расщепление состояний симметрии Γ_4 во внешнем магнитном поле

При приложении магнитного поля в базисной плоскости кристалла при 2 К в поле $H_{sf} \approx 9$ кЭ происходит спин-переориентационный фазовый переход от длиннопериодической спирали к состоянию, аналогичному спин-флоп фазе, когда векторы антиферромагнетизма ионов Nd^{3+} и Fe^{3+} ориентируются в базисной плоскости перпендикулярно направлению внешнего поля. Ион неодима испытывает одновременное действие двух по-

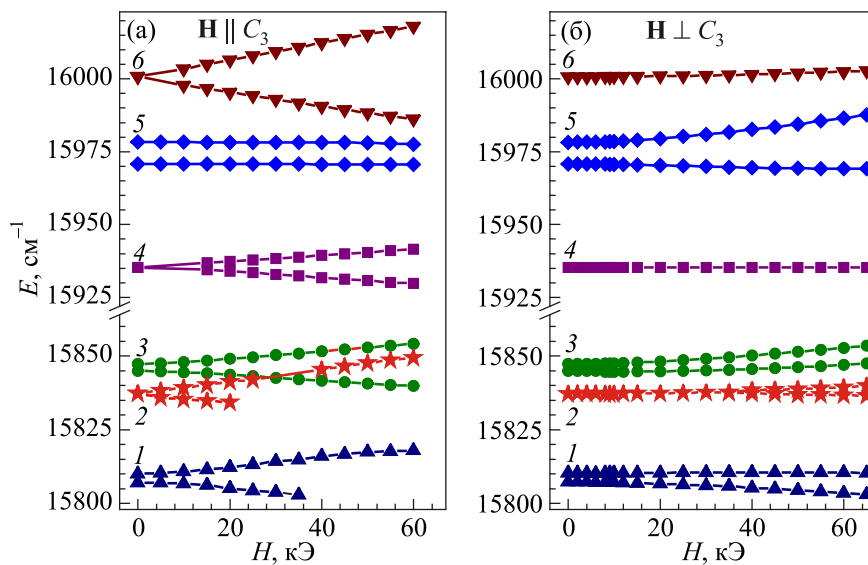


Рис. 4. Зависимости энергий компонент дублетов 1–6 от напряженности магнитного поля, направленного вдоль кристаллографической оси C_3 и перпендикулярно ей.

лей: обменного, направленного вдоль направления магнитных моментов железа, и внешнего. Эти поля при $H > H_{sf}$ можно считать взаимно перпендикулярными (в исследуемом диапазоне полей скосом магнитных моментов железа можно пренебречь из-за большого обменного Fe–Fe взаимодействия [26,27]). Поэтому расщепление кramerсовых дублетов Nd^{3+} в поле $\mathbf{H} \perp C_3$ может быть описано формулой

$$\Delta E_{\perp} = \mu_B g_{\perp} (H_{\text{Fe}}^2 + H^2)^{1/2} = (\Delta E_0^2 + \mu_B^2 g_{\perp}^2 H^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где H_{Fe} — эффективное обменное поле для данного возбужденного состояния, $\Delta E_0 = \mu_B g_{\perp} H_{\text{Fe}}$ — начальное (обменное) расщепление дублета при $H = 0$. Строго говоря, эта формула применима при $H = 0$ и $H > H_{sf}$.

Аналогично, в случае $\mathbf{H} \parallel C_3$ внешнее и обменное поля также можно считать взаимно перпендикулярными и расщепление описывается формулой

$$\Delta E_{\parallel} = \mu_B (g_{\perp}^2 H_{\text{Fe}}^2 + g_{\parallel}^2 H^2)^{1/2} = (\Delta E_0^2 + \mu_B^2 g_{\parallel}^2 H^2)^{1/2}. \quad (2)$$

На рис. 5 приведены зависимости расщепления линии «3» в магнитных полях $\mathbf{H} \parallel C_3$ и $\mathbf{H} \perp C_3$, а также кривые, соответствующие их аппроксимации выражениями (1) и (2). Наилучшее совпадение экспериментальных данных и расчета получается при следующих значениях параметров: $g_{\perp} = 1,94$; $g_{\parallel} = 5,07$; $\Delta E_0 \approx 2,5 \text{ см}^{-1}$; $H_{\text{Fe}} \approx 28 \text{ кЭ}$.

При отсутствии начального обменного расщепления формулы (1) и (2) переходят в линейную зависимость. Именно такое поведение обнаруживает линия «б» при $\mathbf{H} \parallel C_3$ (см. вставку к рис. 5). Согласно теоретическому расчету [20], это состояние имеет наибольший продольный g -фактор в мультиплете ${}^2H_{11/2}$ ($g_{\parallel} = 9,728$); полученное нами в эксперименте значение составляет $g_{\parallel} = 11,58$.

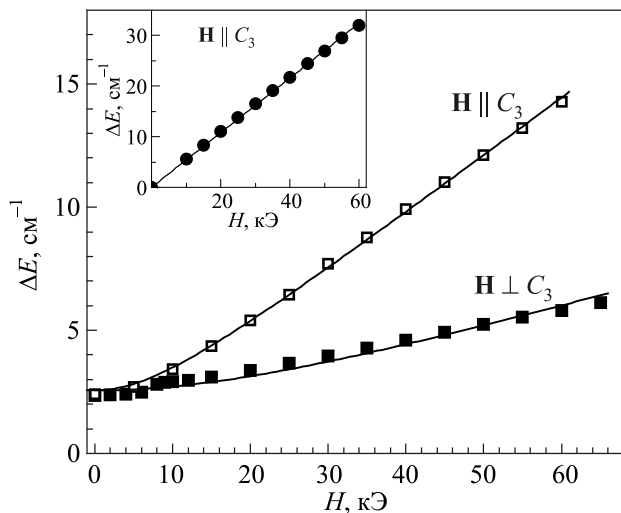


Рис. 5. Зависимость величины расщепления дублета «3» от напряженности внешнего магнитного поля. На вставке — полевая зависимость расщепления дублета «б» при $\mathbf{H} \parallel C_3$. Точки — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация формулами (1) и (2).

Полевые зависимости расщеплений линий «1» и «5» имеют вид, аналогичный зависимостям линии «3», и хорошо описываются формулами (1) и (2). В табл. 2 приведены полученные значения g -факторов состояний в сравнении с рассчитанными в [20], а также их обменные расщепления ΔE_0 при $H = 0$, $T = 2 \text{ К}$.

В работе [21] сообщалось об эффекте «перекачки» в магнитном поле $\mathbf{H} \perp C_3$ интенсивностей поляризованных компонент дублета «5». Аналогичный эффект наблюдается также и на компонентах обменно-расщепленного дублета «3» (рис. 3(а)).

6. Особенности поведения состояний симметрии $\Gamma_{5,6}$ во внешнем магнитном поле

Поведение в магнитных полях линий, соответствующих переходам $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_{5,6}$, не удастся описать зависимостями (1) и (2), предполагающими, что обменное поле для возбужденных состояний направлено, как и в основном состоянии, в базисной плоскости вдоль направлений моментов железа. На рис. 6 представлена полевая зависимость расщепления линии «4» для $\mathbf{H} \parallel C_3$. Эта зависимость принципиально иная, чем у линий «1», «3» и «5». В одноионном приближении, которым мы пользуемся, такое поведение наиболее простым образом можно объяснить предположением, что \mathbf{H}_{Fe} и \mathbf{H} не строго перпендикулярны между собой. Введем угол α между \mathbf{H}_{Fe} и осью C_3 и представим \mathbf{H}_{Fe} как сумму двух компонент — вдоль оси C_3 ($\mathbf{H}_{\text{Fe}\parallel}$) и в базисной плоскости ($\mathbf{H}_{\text{Fe}\perp}$). Тогда

$$\begin{aligned} \Delta E_{\parallel} &= \mu_B (g_{\parallel}^2 (H + H_{\text{Fe}\parallel})^2 + g_{\perp}^2 H_{\text{Fe}\perp}^2)^{1/2} = \\ &= \mu_B (g_{\parallel}^2 (H + H_{\text{Fe}} \cos \alpha)^2 + g_{\perp}^2 H_{\text{Fe}}^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}, \quad (3) \end{aligned}$$

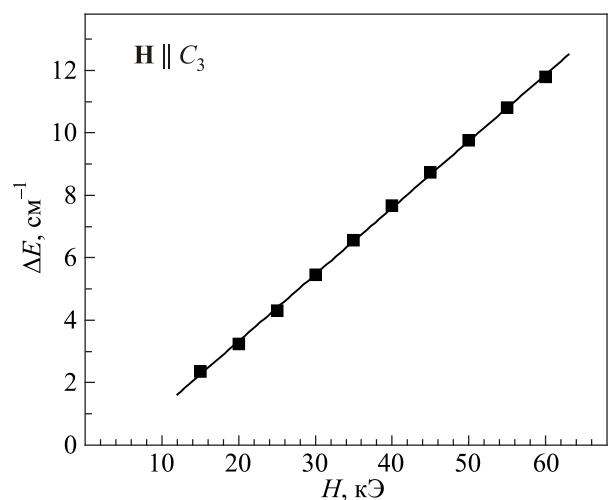


Рис. 6. Зависимость величины расщепления дублета «4» от напряженности внешнего магнитного поля $\mathbf{H} \parallel C_3$. Точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация зависимостью (3).

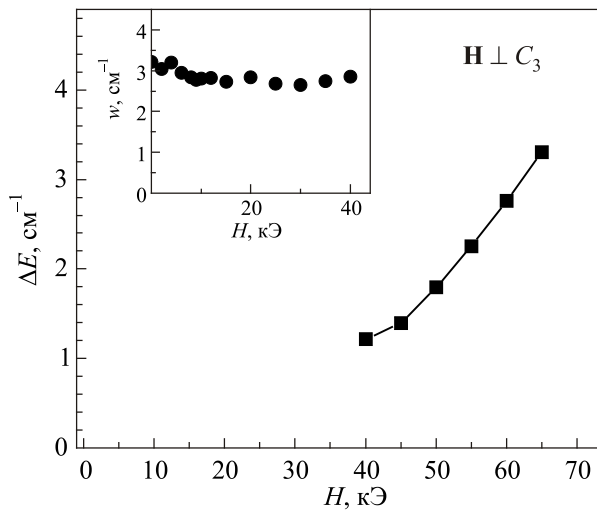


Рис. 7. Зависимость величины расщепления дублета «2» от напряженности внешнего магнитного поля $\mathbf{H} \perp C_3$. На вставке — полевая зависимость полуширины линии «2».

причем для данного состояния $g_{\perp} = 0$. Зависимость (3) хорошо описывает эксперимент при следующих значениях параметров: $g_{\parallel} = 4,57$; $H_{Fe} \cos \alpha = -4,4$ (однозначно определить параметры H_{Fe} и α невозможно).

Линия «2» очень малоинтенсивна и при $\mathbf{H} \parallel C_3$ можно наблюдать обе ее компоненты лишь в диапазоне полей 0–20 кЭ. Зависимость ее расщепления неплохо описывается выражением (2) со следующими значениями параметров: $g_{\parallel} \approx 7,3$; $\Delta E_0 \approx 1,8 \text{ см}^{-1}$. В поперечном поле ее расщепление становится заметным только в больших полях (рис. 3(а) и рис. 7). В диапазоне полей, где ее компоненты еще не разрешены, полуширина суммарного контура почти постоянна (см. вставку к рис. 7). По-видимому, в интервале полей 0–40 кЭ расщепление линии практически не изменяется. Так же как и в случае линии «4», полевую зависимость расщепления линии «2» при $\mathbf{H} \perp C_3$ не удастся адекватно описать выражением (1). Кроме того, экспериментальных данных для определения ее параметров недостаточно. Следует также отметить, что расщепление линии «2» как в продольном, так и в поперечном полях заметно отличается от расщепления линии «3», что подтверждает идентификацию «2» как отдельного уровня.

7. Заключение

В спектре поглощения света ферробората $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ обнаружены и идентифицированы все шесть переходов из основного состояния $^4I_{9/2}$ на уровни мультиплета $^2H_{11/2}$ иона Nd^{3+} . Определены величины расщепления кramerсовых дублетов Nd^{3+} в обменном поле подсистемы Fe^{3+} при магнитном упорядочении кристалла.

Проведены исследования спектров поглощения во внешних магнитных полях, направленных как вдоль

оси C_3 , так и в базисной плоскости кристалла при температуре 2 К. Установлено, что полевые зависимости расщеплений состояний симметрии Γ_4 хорошо описываются в предположении коллинеарности обменного поля направлению магнитных моментов Fe^{3+} . Характер расщепления состояний симметрии $\Gamma_{5,6}$ указывает на присутствие составляющей обменного поля вдоль направления C_3 , что может быть связано с проявлением анизотропии Fe–Nd обменного взаимодействия для возбужденных состояний. Получены экспериментальные значения g -факторов состояний мультиплета $^2H_{11/2}$, которые хорошо коррелируют с рассчитанными в [20].

А.В. Малаховский благодарит грант РФФИ № 19-02-00034 за поддержку.

1. А.К. Звездин, С.С. Кротов, А.М. Кадомцева, Г.П. Воробьев, Ю.Ф. Попов, А.П. Пятаков, Л.Н. Безматерных, Е.А. Попова, *Письма в ЖЭТФ* **81**, 335 (2005) [*JETP Lett.* **81**, 272 (2005)].
2. А.К. Звездин, Г.П. Воробьев, А.М. Кадомцева, Ю.Ф. Попов, А.П. Пятаков, Л.Н. Безматерных, А.В. Кувардин, Е.А. Попова, *Письма в ЖЭТФ* **83**, 600 (2006) [*JETP Lett.* **83**, 509 (2006)].
3. А.М. Кадомцева, Ю.Ф. Попов, Г.П. Воробьев, А.П. Пятаков, С.С. Кротов, К.И. Камиллов, 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. 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) [*JETP Lett.* **93**, 275 (2011)].
5. А.Н. Васильев, Е.А. Попова, *ФНТ* **32**, 968 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32**, 735 (2006)].
6. R.Z. Levitin, E.A. Popova, R.M. Chtsherbov, A.N. Vasiliev, M.N. Popova, E.P. Chukalina, S.A. Klimin, P.H.M. van Loosdrecht, D. Fausti, and L.N. Bezmaternykh, *Pis'ma v ZhETF* **79**, 531 (2004) [*JETP Lett.* **79**, 423 (2004)].
7. C. Ritter, A. Vorotynov, A. Pankrats, G. Petrakovskii, V. Temerov, I. Gudim, and R. Szymczak, *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 365209 (2008).
8. H. Mo, C.S. Nelson, L.N. Bezmaternykh, and V.T. Temerov, *Phys. Rev. B* **78**, 214407 (2008).
9. M. Janoschek, P. Fischer, J. Schefer, B. Roessli, V. Pomjakushin, M. Meven, V. Petricek, G. Petrakovskii, and L. Bezmaternykh, *Phys. Rev. B* **81**, 094429 (2010).
10. S.A. Klimin, D. Fausti, A. Meetsma, L.N. Bezmaternykh, P.H.M. van Loosdrecht, and T.T.M. Palstra, *Acta Crystallogr. B* **61**, 481 (2005).
11. J.A. Campá, C. Cascales, E. Gutiérrez-Puebla, M.A. Monge, I. Rasines, and C. Ruíz-Valero, *Chem. Mater.* **9**, 237 (1997).
12. D. Fausti, A.A. Nugroho, P.H.M. van Loosdrecht, S.A. Klimin, M.N. Popova, and L.N. Bezmaternykh, *Phys. Rev. B* **74**, 024403 (2006).

13. J.E. Hamann-Borrero, M. Philipp, O. Kataeva, M. v. Zimmermann, J. Geck, R. Klingeler, A. Vasiliev, L. Bezmaternykh, B. Büchner, and C. Hess, *Phys. Rev. B* **82**, 094411 (2010).
14. Е.А. Попова, Н. Тристан, Х. Хесс, Р. Клингелер, Б. Бюхнер, Л.Н. Безматерных, В.Л. Темеров, А.Н. Васильев, *ЖЭТФ* **132**, 121 (2007) [*JETP* **105**, 105 (2007)].
15. I.V. Golosovsky, A.K. Ovsyanikov, D.N. Aristov, P.G. Matveeva, A.A. Mukhin, M. Boehm, L.-P. Regnault, and L.N. Bezmaternykh, *J. Magn. Magn. Mater.* **451**, 443 (2018).
16. J.E. Hamann-Borrero, S. Partzsch, S. Valencia, C. Mazzoli, J. Herrero-Martin, R. Feyherherm, E. Dudzik, C. Hess, A. Vasiliev, L. Bezmaternykh, B. Büchner, and J. Geck, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 267202 (2012).
17. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, A.A. Zvyagin, I.A. Gudim, and V.L. Temerov, *Fiz. Niz. Temp.* **37**, 1269 (2011) [*Low Temp. Phys.* **37**, 1010 (2011)].
18. В.А. Бедарев, М.И. Пашенко, Д.Н. Меренков, Л.Н. Безматерных, В.Л. Темеров, *УФЖ* **57**, 650 (2012) [*Ukr. J. Phys.* **57**, 648 (2012)].
19. Д.В. Волков, А.А. Демидов, Н.П. Колмакова, *ЖЭТФ* **131**, 1030 (2007) [*J. Exp. Theor. Phys.* **104**, 897 (2007)].
20. M.N. Popova, E.P. Chukalina, T.N. Stanislavchuk, B.Z. Malkin, A.R. Zakirov, E. Antic-Fidancev, E.A. Popova, L.N. Bezmaternykh, and V.L. Temerov, *Phys. Rev. B* **75**, 224435 (2007).
21. И.С. Качур, В.С. Курносов, В.Г. Пирятинская, А.В. Еременко, И.А. Гудим, *ФНТ* **43**, 738 (2017) [*Low Temp. Phys.* **43**, 590 (2017)].
22. A.V. Malakhovskii, S.L. Gnatchenko, I.S. Kachur, V.G. Piryatinskaya, A.L. Sukhachev, and V.L. Temerov, *J. Magn. Magn. Mater.* **375**, 153 (2015).
23. A.V. Malakhovskii, S.L. Gnatchenko, I.S. Kachur, V.G. Piryatinskaya, and V.L. Temerov, *Opt. Mater.* **52**, 126 (2016).
24. A.V. Malakhovskii, S.L. Gnatchenko, I.S. Kachur, V.G. Piryatinskaya, and I.A. Gudim, *Phys. Rev. B* **96**, 224430 (2017).
25. L.N. Bezmaternykh, V.L. Temerov, I.A. Gudim, and N.A. Stolbova, *Crystall. Rep.* **50**, Suppl. 1, S97 (2005).
26. C. Ritter, A. Balaev, A. Vorotynov, G. Petrakovskii, D. Velikanov, V. Temerov, and I. Gudim, *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 196227 (2007).
27. А.И. Панкрац, Г.А. Петраковский, Л.Н. Безматерных, В.Л. Темеров, *ФТТ* **50**, 77 (2008) [*Phys. Solid State* **50**, 79 (2008)].

Особливості розщеплення кramerсових дублетів Nd^{3+} в антиферромагнітному кристалі $NdFe_3(BO_3)_4$ у зовнішньому магнітному полі

С.Л. Гнатченко, І.С. Качур, В.С. Курносов,
В.Г. Пірятинська, О.В. Малаховський, І.А. Гудім

Проведено дослідження спектрів оптичного поглинання легкоплосинного антиферромагнетика $NdFe_3(BO_3)_4$ в області переходу $^4I_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ іону Nd^{3+} в діапазоні температур 2–35 К і в зовнішніх магнітних полях напруженістю до 65 кЕ, які направлені як вздовж осі C_3 , так і в базисній площині кристалу. Визначено величини розщеплень збуджених станів Nd^{3+} в обмінному полі підсистеми Fe^{3+} , а також значення g -факторів станів мультиплету $^2H_{11/2}$. Нетривіальні залежності розщеплення деяких станів Nd^{3+} в магнітному полі вказують на присутність анізотропної Fe - Nd обмінної взаємодії для цих збуджених станів.

Ключові слова: рідкісноземельний фероборат, спектри поглинання, f - f переходи.

Peculiarities of splitting of Nd^{3+} Kramers doublets in antiferromagnetic crystal $NdFe_3(BO_3)_4$ in external magnetic field

S.L. Gnatchenko, I.S. Kachur, V.S. Kurnosov,
V.G. Piryatinskaya, A.V. Malakhovskii,
and I.A. Gudim

Optical absorption spectra of easy-plane antiferromagnet $NdFe_3(BO_3)_4$ in the region of the transition $^4I_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ of Nd^{3+} ion were studied in the temperature range 2–35 K and in external magnetic fields up to 65 kOe directed both along the C_3 axis and in the basal plane of the crystal. The splitting values of Nd^{3+} excited states in the exchange field of Fe^{3+} subsystem and g -factors of $^2H_{11/2}$ multiplet states were determined. Non-trivial dependences of splitting of some Nd^{3+} states on magnetic field point to the existence of anisotropic Fe - Nd exchange interaction for these excited states.

Keywords: rare-earth ferrobore, absorption spectra, f - f transitions.