

PACS: 72.55. +s, 74.25. Ld

УДК 538.22, 539.2

## Магнитоупругие свойства редкоземельных замещенных ферроборатов $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ( $x=0,25; 0,4$ )

Г. А. Звягина

*Физико-технический Институт Низких Температур им.Б.И.Веркина*

*61103 Харьков, пр. Ленина 47, Украина*

*zvyagina@ilt.kharkov.ua*

Обнаружены и проанализированы аномалии в поведении температурных и магнитопольевых зависимостей акустических характеристик редкоземельных бинарных ферроборатов  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $x=0,25; 0,4$ ) в окрестности магнитных фазовых превращений. Показано, что фазовые Н-Т диаграммы исследованных соединений характеризуются наличием нескольких линий ФП и, соответственно, нескольких магнитных фаз, что, по-видимому, является следствием взаимодействия между несколькими (более чем двумя) магнитными подрешетками в каждом из кристаллов.

**Ключевые слова:** редкоземельные ферробораты, магнитоупругое взаимодействие, магнитные фазовые переходы.

Виявлено й проаналізовано аномалії в температурних та магнітопольових залежностях акустичних характеристик рідкісноземельних бінарних ферроборатів  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $x=0,25; 0,4$ ), поблизу магнітних фазових перетворень. Показано, що фазові Н-Т діаграми досліджуваних сполук характеризуються наявністю декількох ліній ФП та, відповідно, декількох магнітних фаз, що, вірогідно, є наслідком взаємодії між кількома (більш ніж двома) магнітними підґратками в кожному з кристалів.

**Ключові слова:** рідкісноземельні ферроборати, магнітоупруга взаємодія, магнітні фазові переходи.

Anomalies in the temperature and magnetic field dependences of the acoustic characteristics of rare-earth binary ferrobates  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $x=0,25; 0,4$ ) in the vicinity of magnetic phase transitions there, have been found and analyzed. It has been shown that phase H-T diagrams of the investigated compounds were characterized by the presence of several lines of PT and a few magnetic phases accordingly. That is, probably, the result of the interaction between multiple (more than two) magnetic sublattices in each of crystals.

**Keywords:** rare-earth ferrobates, magnetoelastic interaction, magnetic phase transitions.

В минувшее десятилетие интенсивно ведется поиск и изучение материалов, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств [1]. Среди них – ферробораты редкоземельных (РЗ) элементов с общей формулой  $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $\text{R} = \text{Y}; \text{La-Nd}; \text{Sm-Er}$ ), в которых в магнитоупорядоченной фазе возникала электрическая поляризация [2], что позволило отнести их к классу мультиферроиков.

Особенности магнитных и магнитоэлектрических свойств этих нецентросимметричных кристаллов (пр. гр. R32) обусловлены присутствием магнитных ионов d- и f- групп. Магнитный порядок соединений определяется антиферромагнитным упорядочением ионов  $\text{Fe}^{3+}$  (температуры Нееля -  $30 \text{ K} < T_N < 40 \text{ K}$ ). РЗ ионы вносят основной вклад в магнитную анизотропию

и, по-видимому, в магнитоэлектрическую поляризацию кристаллов. Так, например, ферробораты Sm, Er, Nd - имеют анизотропию типа «легкая плоскость» (ЛП), а ферробораты Pr, Tb, Dy – легкоосные (ЛО) АФМ. Ферробораты Gd, Ho спонтанным образом переходят от ЛП к ЛО состоянию. Спонтанная электрическая поляризация возникает в ЛП ферроборатах, а индуцированная магнитным полем – как в ЛП, так и ЛО соединениях [2].

Наши предыдущие исследования показали, что в РЗ ферроборатах сильна связь между магнитной и упругой подсистемами [3-5]. Аномалии в поведении упругих характеристик в окрестности магнитных фазовых переходов (ФП), как правило, весьма яркие. Это дало возможность в ряде кристаллов обнаружить

новые ФП переходы, а также определить их род надежнее, чем с помощью других, даже магнитных методик [5].

В этой работе представлен обзор основных результатов, полученных во ФТИНТ НАН Украины при исследовании магнитоупругих эффектов в ферроборатах бинарных составов  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ , [6-8]. Изучение замещенных соединений типа  $\text{R}^1_{1-x}\text{R}^2_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $\text{R}^{1,2} = \text{Y}; \text{La-Nd}; \text{Sm-Er}$ ) направлено на выяснение роли различных РЗ катионов в формировании магнитной анизотропии и магнитоэлектрической поляризации ферроборатов. С этой целью сотрудниками Института физики СО РАН Л. Н. Безматерных, И. А. Гудим и В. Л. Темеровым было синтезировано семейство монокристаллов  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ , в которых, при небольших концентрациях Dy, ожидалась спонтанная спиновая переориентация от ЛП к ЛО состоянию. И действительно, в кристалле  $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  при  $T_R = 25$  К был обнаружен спонтанный спин-переориентационный ФП от ЛП магнитной структуры, возникающей ниже  $T_N = 32$  К, к ЛО [9]. Однако, наши [6, 7] эксперименты, а также исследования [10] показали, что спонтанная переориентация ЛП→ЛО происходит в нем при  $T_{CR} = 16$  К сложным образом - через промежуточную фазу ( $16\text{K} < T < 25\text{K}$ ). Нами были построены фазовые Н-Т диаграммы для различных направлений внешнего магнитного поля [6, 7]. Они имеют сложную структуру и характеризуются наличием нескольких линий ФП и, соответственно, нескольких магнитных фаз. Было высказано предположение, что соединение  $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  нужно рассматривать как многоподрешеточный АФМ.

Нами исследовался и другой кристалл этого семейства -  $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ . В нем мы не наблюдали спонтанной спиновой переориентации при изменении температуры, однако обнаружили фазовые переходы, индуцированные внешним магнитным полем  $\text{H} \parallel C_3$  [8].

Ниже будут рассмотрены основные результаты, полученные при исследовании низкотемпературных магнитоупругих характеристик монокристаллов  $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ .

#### Экспериментальные образцы и методы исследований

Монокристаллы  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ , выращенные из раствора-расплава на основе тримолибдата висмута [10], представляли собой прозрачные шестигранные призмы зеленого цвета высотой  $5 \div 7$  мм в направлении, близком к оси симметрии  $C_3$ . Для акустических исследований приготавливались образцы с размерами  $\sim 1,5 \times 1 \times 1$  мм, ориентирование которых осуществлялась рентгеновским методом обратной съемки.

Акустические измерения проводились на автоматизированной аппаратуре, [11]. Рабочая частота

- 54,3 МГц. Изучалось температурное поведение относительных изменений скорости и поглощения акустических мод (при фиксированном значении магнитного поля и в отсутствие внешнего поля), а также магнитополевое поведение тех же характеристик при фиксированной температуре. Точность измерений при толщине образцов  $\sim 0,5$  мм была не хуже  $\sim 10^{-4}$  по скорости и  $\sim 0,05$  дБ по поглощению. Диапазон изменения температуры 1,7-300 К и магнитного поля до 5,5 Т.

#### $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$

И.  $\text{H} = 0$ . В температурных зависимостях (здесь будет обсуждаться поведение кристалла в температурном интервале 1,7 - 40К) скорости продольных и поперечных акустических мод обнаружены три особенности - при температурах  $T_N = 32$  К,  $T_{CR2} = 25$  К и  $T_{CR1} = 16$  К. Поглощение звука, как правило, также испытывает аномалии при соответствующих температурах, см. например, [6, 7]. Ранее было установлено [3-5], что наиболее яркие особенности в поведении упругих характеристик ферроборатов демонстрируют поперечные моды. Эффекты в продольных модах - на порядок меньше, и поэтому здесь анализироваться не будут. Особенность при  $T_N$  соответствует переходу кристалла в магнитоупорядоченное состояние (точка Нееля), а аномалии при  $T_{CR2}$  и  $T_{CR1}$  связаны со спин-ориентационными ФП [6, 7]. На рис. 1 представлено типичное температурное поведение скорости звука (на примере  $C_{44}$ -моды). На рисунках использованы следующие обозначения:  $\Delta S/S$  и  $\Delta\alpha$  - относительные изменения скорости и поглощения звуковых волн ( $q$ -волновой вектор,  $u$ -поляризация),

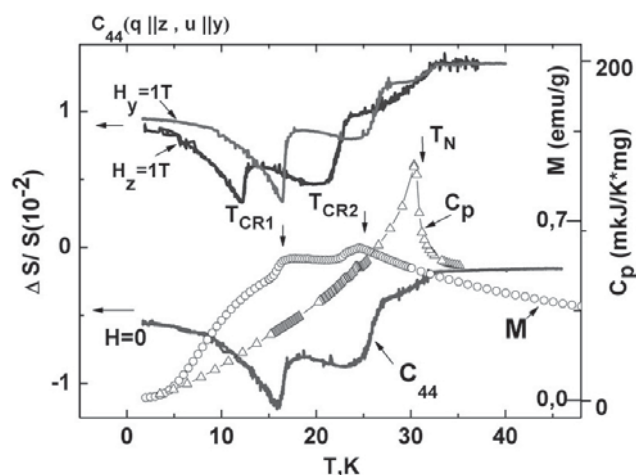


Рис. 1. Температурное поведение скорости  $C_{44}$ -моды кристалла  $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  в нулевом магнитном поле и в поле 1 Т, направленном вдоль осей  $C_3 \parallel z$  и  $C_2 \parallel y$ . Здесь же представлено поведение теплоемкости и намагниченности кристалла в том же температурном интервале [10].

распространяющихся вдоль осей  $x, y, z$  стандартной для тригонального кристалла декартовой системе координат ( $y \parallel C_2$  и  $z \parallel C_3$ ). Для сравнения на этом же рис. 1 показано поведение теплоемкости и намагниченности кристалла в том же температурном интервале, взятое из [10]. Теплоемкость демонстрирует лишь одну аномалию - при  $T_N$ . В поведении же намагниченности точка Нееля не проявляется, однако хорошо видны особенности при  $T_{CR2}$  и  $T_{CR1}$ . Акустические характеристики испытывают аномалии при всех трех критических температурах. Таким образом, видно, что ФП в магнитной подсистеме кристалла затрагивают и фононную подсистему, что характерно для мультиферроиков.

II.  $H \parallel C_3 \parallel z$ . Внешнее магнитное поле  $H \parallel C_3$  смещает аномалии при  $T_{CR2}$  и  $T_{CR1}$  в сторону более низких температур, при этом положение особенности при  $T_N$  остается практически неизменным (рис. 1).

В магнитопольевых зависимостях скорости и поглощения акустических мод в полях, соответственно,  $H_z^{CR1}$  и  $H_z^{CR2}$ , обнаружены две гистерезисные особенности, (рис. 2а, вставка). Повышение температуры уменьшает значения  $H_z^{CR1}$  и  $H_z^{CR2}$ . Аномалии в  $H_z^{CR1}$  и  $H_z^{CR2}$  наблюдаются для

каждого значения температуры из интервала от  $1,7K \div 16K(T_{CR1})$ , а в интервале  $16K(T_{CR1}) \leq T \leq 25K(T_{CR2})$  - только одна - в  $H_z^{CR2}$ . Определенные из наших экспериментов значения критических температур и полей коррелируют с соответствующими критическими значениями в поведении магнитных характеристик [10], рис. 2а, вставка. Это позволило нам интерпретировать наблюдаемые особенности как проявление спин-реориентационных ФП [6]. Мы построили [6] фрагмент фазовой  $H$ - $T$  диаграммы  $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$  для  $H \parallel C_3$  (Рис. 2а). Диаграмма оказалась более сложной по сравнению с представленной в [9]. Мы полагаем, что в соединении (при  $H \parallel C_3$ ) ниже  $T_N$  реализуется несколько (не менее трех) магнитоупорядоченных фаз. III. Поле в базисной плоскости кристалла  $H \perp C_3$  ( $H \parallel C_2(y)$  и  $H \perp C_2(x)$ ). Внешнее магнитное поле ( $\geq 2 T$ ), приложенное в базисной плоскости кристалла, несколько сдвигает особенности при  $T_{CR1}$  и  $T_{CR2}$  в сторону низких температур, как для  $H \parallel C_2$ , так и для  $H \perp C_2$ . Положение особенности при  $T_N$  практически не меняется. Пример типичного температурного поведения скорости звука во внешнем магнитном поле  $H \parallel C_2$  представлен на Рис. 1.

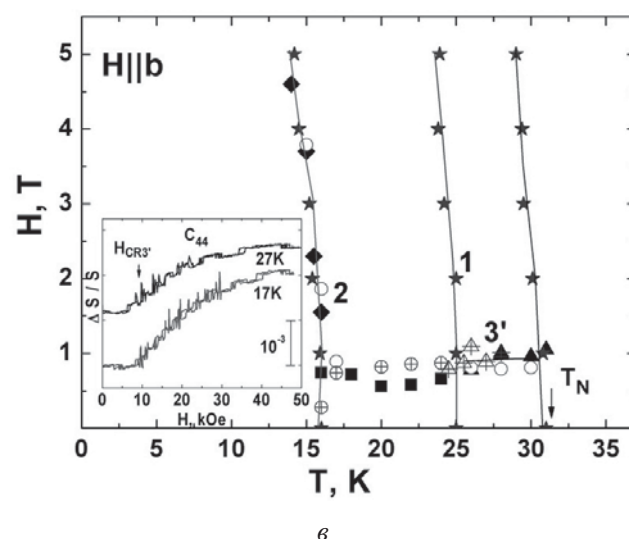
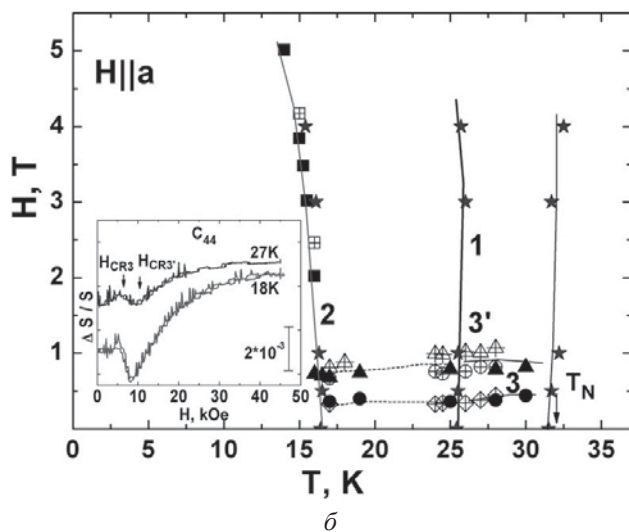
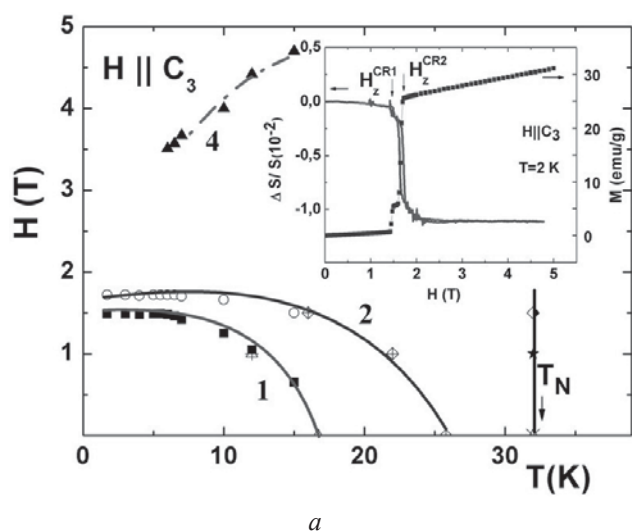


Рис. 2. Фазовые  $H$ - $T$  диаграммы  $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$ . Символы соответствуют положению особенностей в температурных и магнитопольевых зависимостях скорости и поглощения различных акустических мод.  
 а)  $H \parallel C_3 \parallel z$ . На вставке – магнитопольевое поведение скорости  $C_{44}$ -моды и намагниченности при 2 К.  
 б)  $H \parallel C_2 \parallel y$ . На вставке - магнитопольевые зависимости скорости  $C_{44}$ -моды при  $T=18 K$  и  $T=27 K$ .  
 в)  $H \perp C_2 \parallel x$ . На вставке - магнитопольевые зависимости скорости  $C_{44}$ -моды при  $T=17 K$  и  $T=27 K$ .

Анализ магнитопольевых зависимостей скорости и поглощения акустических мод позволил сделать два вывода: 1. В температурном интервале 1,7К ÷ 16 К практически отсутствует анизотропия поведения акустических мод для  $H \parallel C_2$  и  $H \perp C_2$ ; 2. В диапазоне  $16 \text{ К} \leq T \leq 32 \text{ К}$  поведение акустических характеристик анизотропно - различается для случаев  $H \parallel C_2$  и  $H \perp C_2$  [7], (вставки на Рис.2б и 2в). Подобное анизотропия связана, по нашему мнению, с существованием в базисной плоскости кристалла еще одной оси легкого намагничивания, направление которой близко к направлению оси  $C_2$ . Мы наблюдали аналогичное поведение и в  $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$  в температурном интервале, где реализуется ЛП АФМ коллинеарная структура [5]. Фазовые H-T диаграммы кристалла для двух направления поля в базисной плоскости кристалла  $H \parallel C_2(y)$  и  $H \perp C_2(x)$  представлены на Рис. 2б, в. Они подробно проанализированы в [7]. На наш взгляд, линия 3 на диаграмме  $H \parallel C_2$  соответствует линии спин-флоп перехода (критическое поле перехода  $H_{\text{ср}3}$ ).



К настоящему времени свойства этого соединения пока изучены мало. Результаты экспериментального и теоретического исследования поведения намагниченности (восприимчивости) были представлены на конференциях ICYS LTP (Харьков) MISM (Москва) в 2011 г [12, 13]. Высказывалось предположение, что в кристалле при низких температурах и  $H = 0$  магнитные моменты Nd, Dy и Fe подсистем ориентированы вдоль оси  $C_3$ . Т.е., при 40% концентрации Dy, вклад этой подсистемы в магнитную анизотропию становится определяющим и стабилизирует ЛО магнитную конфигурацию. Температура магнитного упорядочения определена не была. Обнаруженный скачок намагниченности в поле  $H \parallel C_3$ , ( $H_{\text{ср}} \approx 1,9 \text{ Тл}$ ) при 2 К был интерпретирован как

спин-флоп ФП в подсистеме Fe.

Акустические исследования этого соединения позволили нам определить температуру магнитного упорядочения ( $T_N=31,4 \text{ К}$ ) и обнаружить аномалии в поведении магнитоупругих характеристик, которые, по нашему мнению, отвечали реализации в кристалле нескольких ФП, индуцированных магнитным полем  $H \parallel C_3 \parallel z$ . Измерения намагниченности кристалла в зависимости от магнитного поля, проведенные во ФТИНТ с помощью SQUID магнетометра MPMS-XL в 2013 г., подтвердили это предположение [8].

Температурное поведение скорости и поглощения поперечных акустических мод обнаружило ряд аномалий в интервале 1,7 К ÷ 120 К, Рис.3. Ниже они перечислены в порядке убывания температуры: Во-первых, смягчение скорости некоторых мод, начиная с температуры  $T^* \approx 100 \text{ К}$ , и излом при  $T^{**} \approx 60 \text{ К}$ . Эти аномалии отсутствуют в поведении намагниченности, и могут быть связаны, например, со структурными искажениями, обусловленными относительно большим содержанием Dy. Напомним, что в  $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$  при температуре  $\approx 280 \text{ К}$  реализуется структурный ФП ( $R32 \rightarrow P3_121$ ) [14]. Во-вторых, скачок скорости (максимум в поглощении) при  $T=31,4 \text{ К}$ . Аналогичное поведение акустических характеристик мы наблюдали в  $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$  [5] и в  $\text{Nd}_{0.75}\text{Dy}_{0.25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  в окрестности точки Нееля [6, 7]. Таким образом, уже по характерному виду этой аномалии можно предположить, что температура 31,4 К отвечает точке магнитного упорядочения в  $\text{Nd}_{0.6}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ .

Отметим, что зависимость намагниченности ( $H \parallel C_3$ ) имеет максимум при 31,4 К, Рис.3а. В то же время, все исследованные к настоящему времени кристаллы ряда  $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  не проявляют подобной аномалии при  $T_N$ , а имеют особенности (максимумы), отвечающие спонтанным спин-реориентационным ФП [9, 10, 15]. Родительские же соединения  $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$

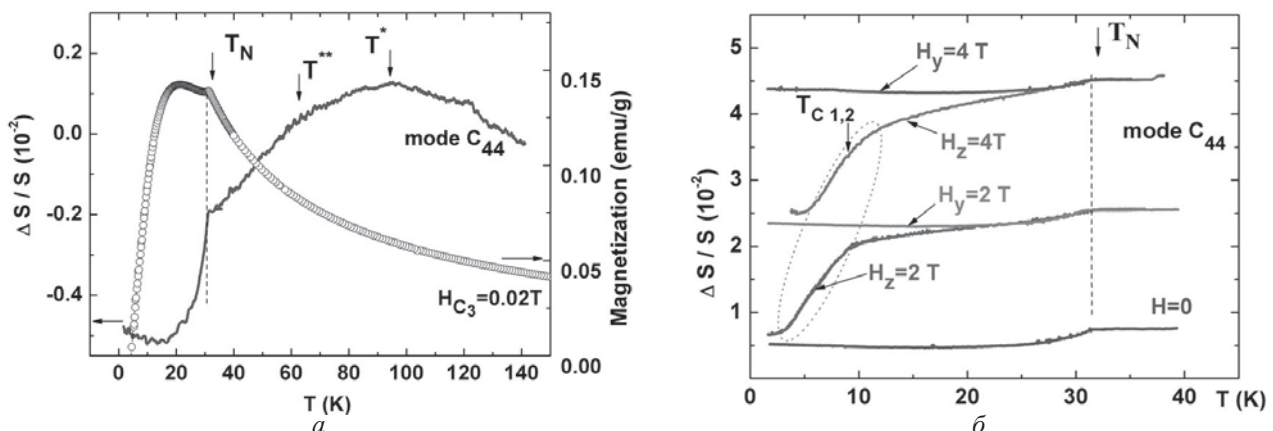


Рис. 3. Температурное поведение скорости  $C_{44}$ -моды в кристалле  $\text{Nd}_{0.6}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ . а) в нулевом магнитном поле и намагниченности, измеренной в поле  $H \parallel C_3 = 0.02 \text{ Т}$ , б) в магнитном поле  $H \parallel C_3$  и  $H \parallel C_2$  ( $H=0; 2 \text{ Т}; 4 \text{ Т}$ ).

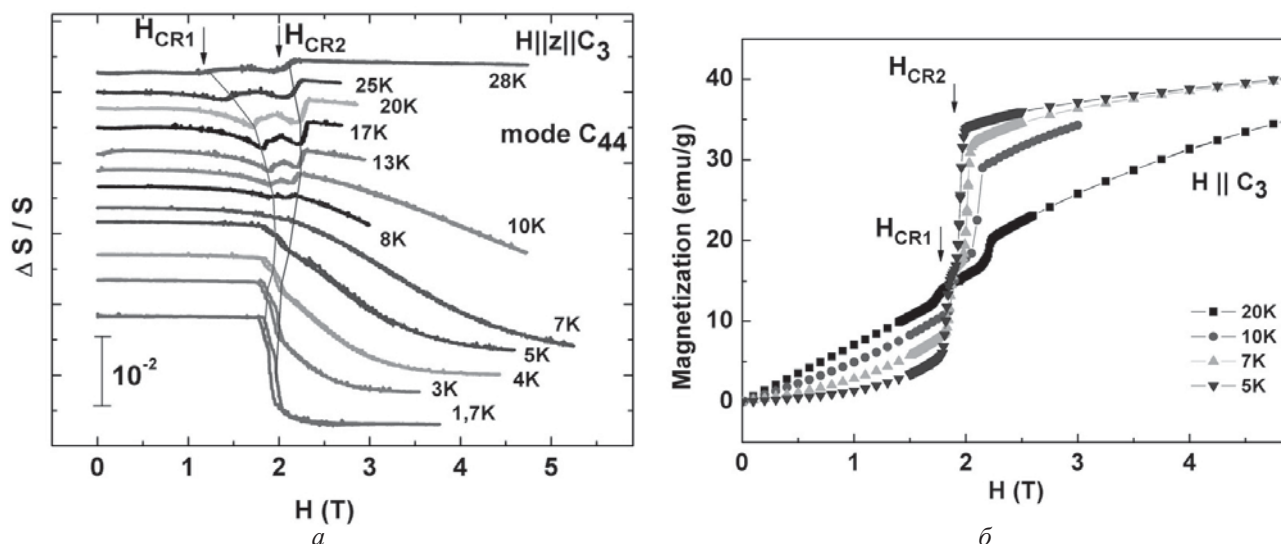


Рис. 4. Магнитоупругие зависимости в кристалле  $Nd_{0,6}Dy_{0,4}Fe_3(BO_3)_4$ .

а) скорости  $C_{44}$ -моды, измеренные при фиксированной температуре из интервала  $1,7\text{ K} \leq T \leq T_N$  в магнитном поле  $H \parallel C_3$ ;

б) намагниченности, измеренные при температурах 5 К; 7 К; 10 К; 20 К в магнитном поле  $H \parallel C_3$ ; Положение особенностей в  $H_{CR1,2}$  указано для 5 К.

[16] и  $DyFe_3(BO_3)_4$  [14], напротив, имеют максимумы при  $T_N$  в температурном поведении намагниченности (восприимчивости). Поэтому температуру 31,4 К мы определили как точку магнитного упорядочения в  $Nd_{0,6}Dy_{0,4}Fe_3(BO_3)_4$ , учитывая два обстоятельства: а) максимум в намагниченности наблюдается при том же значении температуры, что и характерный для  $T_N$  скачок скоростей звука; б) в упругих характеристиках ниже 31,4 К нет дополнительных аномалий, указывающих на спонтанную спиновую переориентацию как, например, в случае  $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$ .

Магнитоупругие зависимости скорости и поглощения поперечных мод исследованы при фиксированных температурах в диапазоне 1,7÷35 К для трех направлений внешнего магнитного поля:  $H \parallel C_3$ ,  $H \parallel C_2$ ,  $H \perp C_2$  (поле в базисной плоскости).

I.  $H \parallel C_3(z)$ . В магнитоупругих зависимостях скоростей всех акустических мод обнаружены две близкорасположенные особенности (скачки в  $H_{CR1}$  и  $H_{CR2}$ ), сопровождающиеся небольшим (0,08 Т) гистерезисом. Скачкам в скорости отвечают аномалии в поглощении [8]. Увеличение температуры несколько изменяет масштаб и форму аномалий, причем значение поля  $H_{CR2}$  почти не меняется, а значение  $H_{CR1}$  смещается в сторону меньших полей, Рис. 4а. Аномалии в  $H_{CR1}$  и  $H_{CR2}$  наблюдаются в температурном интервале от 1,7 К до 30 К, т.е. практически до  $T_N$ .

Особенности в  $H_{CR1}$  и  $H_{CR2}$ , по нашему мнению, обусловлены ФП в магнитной подсистеме кристалла. Это предположение подтвердили исследования магнитоупругого ( $H \parallel C_3$ ) поведения намагниченности, которые обнаружили ступенчатые аномалии в  $H_{CR1}$

и  $H_{CR2}$ . Рис. 4б. Величины критических полей, отвечающих аномалиям в магнитоакустических и магнитных зависимостях, хорошо коррелируют друг с другом. Заметим, что предыдущие измерения поведения намагниченности в поле  $H \parallel C_3$  [12, 13] обнаружили только один скачок, который интерпретировался как спин-флоп магнитных подрешеток железа.

Таким образом, обнаруженные особенности в магнитоупругих зависимостях акустических и магнитных характеристик обусловлены несколькими магнитными ФП, что может свидетельствовать о большом числе взаимодействующих магнитных подрешеток.

II. Поле в базисной плоскости  $H \perp C_3$  ( $H \parallel C_2$ ,  $H \perp C_2$ ). Магнитное поле до 5 Т, приложенное в базисной плоскости кристалла, не меняет вида температурных зависимостей скорости и поглощения звука. На кривых, как и в случае  $H=0$ , видна лишь аномалия, отвечающая точке Нееля, Рис.3б.

Магнитоупругое поведение акустических характеристик при фиксированной температуре  $T \leq T_N$  исследовано для случаев  $H \parallel C_2$  и  $H \perp C_2$ . Пример такой зависимости (для  $C_{66}$ -моды) при 5 К для  $H \parallel C_2$  и  $H \perp C_2$  приведен на вставке Рис.5. Для сравнения здесь же представлена зависимость скорости этой моды для  $H \parallel C_3$ , демонстрирующая скачки в  $H_{CR1}$  и  $H_{CR2}$ . Как видно, есть небольшая анизотропия поведения скорости для двух взаимно перпендикулярных направлений поля в базисной плоскости. В случае  $H \parallel C_2$  скорость монотонно нарастает с увеличением поля, а для  $H \perp C_2$  – практически не зависит от поля. В обоих случаях мы не обнаружили каких-либо аномалий,

свидетельствующих о ФП в магнитной подсистеме кристалла. Именно поэтому мы не исследовали поведение намагниченности соединения в магнитном поле  $H \perp C_3$ . Такие измерения для случая  $H \parallel C_2$  (поле менялось до 9 Т) при температурах 2 - 40 К были сделаны в Институте физики СО РАН и обсуждались в [12, 13]. Для каждого значения температуры зарегистрирован монотонный рост (без аномалий) намагниченности во всем диапазоне полей, что может свидетельствовать об отсутствии в кристалле индуцированных полем  $H \perp C_3$  спин-переориентационных ФП.

Таким образом, наблюдается корреляция в поведении акустических и магнитных характеристик кристалла во внешнем магнитном поле  $H \parallel C_3$ ,  $H \perp C_3$ .

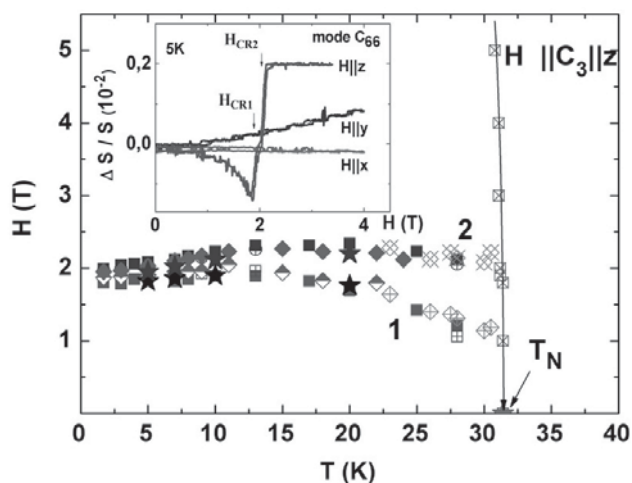


Рис. 5. Фазовая H-T диаграмма кристалла  $Nd_{0.6}Dy_{0.4}Fe_3(BO_3)_4$ ,  $H \parallel C_3 \parallel z$ . Четырехугольники соответствуют положению особенностей в температурных и магнитополевых зависимостях скоростей и поглощения различных акустических мод, звездочки – особенности в намагниченности. На вставке - магнитополевые зависимости скорости  $C_{66}$ -моды, измеренные при 5 К в магнитном поле  $H \parallel C_3$ ,  $H \parallel C_2$ ,  $H \perp C_2$ .

Низкотемпературный участок фазовой H-T диаграммы  $Nd_{0.6}Dy_{0.4}Fe_3(BO_3)_4$ , для  $H \parallel C_3$ , построенный на основании акустических и магнитных исследований, представлен на Рис.5. Диаграмма, как и в случае  $Nd_{0.75}Dy_{0.25}Fe_3(BO_3)_4$ , характеризуются наличием нескольких линий ФП и, соответственно, нескольких магнитных фаз. Сходный вид фазовых диаграмм обоих соединений обусловлен, естественно, близостью их химических составов. Это сходство проявляется в особенностях поведения их магнитных и акустических характеристик в ненулевом магнитном поле. В то же время, при  $H=0$  в  $Nd_{0.6}Dy_{0.4}Fe_3(BO_3)_4$  отсутствуют спонтанные спин-реориентационные ФП. Ниже  $T_N$  система, по-видимому, находится практически в ЛО магнитном состоянии. Высокая концентрация ионов Dy подавляет ЛП анизотропию, вызываемую Nd,

и не дает реализоваться ни ЛП ни промежуточной фазам. Внешнее же магнитное поле  $H \parallel C_3$ , возможно, стимулирует появление этих фаз.

## Выводы

В работе проанализировано поведение упругих характеристик и намагниченности редкоземельных замещенных ферроборатов  $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$  ( $x=0,25; 0,4$ ) при низких температурах и во внешнем магнитном поле в окрестности магнитных фазовых превращений. Показано, что фазовые H-T диаграммы исследованных соединений характеризуются наличием нескольких линий ФП и, соответственно, нескольких магнитных фаз, что, по-видимому, является следствием взаимодействия между несколькими (более чем двумя) магнитными подрешетками в каждом из кристаллов.

1. W. Erenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott, Multiferroic and magnetoelectric materials, *Nature Mater.*, **442**, 759 (2006).
2. A.M. Kadomtseva, Yu.F. Popov, G.P. Vorob'ev, A.P. Pyatakov, S.S. Krotov, P.I. Kamilov, V.Yu. Ivanov, A.A. Mukhin, A.K. Zvezdin, I.A. Gudim, L.N. Bezmaternykh, and V.L. Temerov, *Fiz. Nizk. Temp.* **36**, 640 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 511 (2010)].
3. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, I.V. Bilych, and A.A. Zvyagin, *Fiz. Nizk. Temp.* **34**, 1142 (2008), [*Low Temp. Phys.* **34**, 901 (2008)].
4. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, A.A. Zvyagin, I.V. Bilych, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, *Fiz. Nizk. Temp.* **36**, 376 (2010), [*Low Temp. Phys.* **36**, 296 (2010)].
5. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, A.A. Zvyagin, I.A. Gudim, and V.L. Temerov, *Fiz. Nizk. Temp.* **37**, 1269 (2011) [*Low Temp. Phys.* **37**, 1010 (2011)].
6. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, A.A. Zvyagin, I.V. Bilych, L.N. Bezmaternykh, and I.A. Gudim, *Fiz. Nizk. Temp.* **36**, 352 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 279 (2010)].
7. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, A.A. Zvyagin, I.A. Gudim, and I.V. Bilych, *Fiz. Nizk. Temp.* **38**, 571 (2012), [*Low Temp. Phys.* **38**, 446 (2012)].
8. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, A.A. Zvyagin, I.A. Gudim, and I.V. Bilych, Abstracts of ICYS LTP-2013, Kharkiv, Ukraine, p.58.
9. Yu.F. Popov, A.M. Kadomtseva, G.P. Vorob'ev, A.A. Mukhin, V.Yu. Ivanov, A.M. Kuz'menko, A.S. Prokhorov, L.N. Bezmaternykh, and V.L. Temerov, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **89**, 405 (2009).
10. I. A. Gudim, E. V. Eremin, V. L. Temerov, *J. of Cryst. Growth*, **312**, 2427 (2010).
11. E. A. Masalitin, V. D. Fil', K. R. Zhekov, A. N. Zholobenko, and T. V. Ignatova, *Fiz. Nizk. Temp.* **29**, 93 (2003) [*Low Temp. Phys.* **29**, 72 (2003)].
12. A.A. Demidov, I.A. Gudim, and E.V. Eremin, Abstracts of MISIM -2011, Moscow, Russia, p.477.
13. A.A. Demidov, I.A. Gudim, and E.V. Eremin, Abstracts of ICYS LTP-2011, Kharkiv, Ukraine, p.83.
14. E.A. Popova, N. Tristan, A.N. Vasiliev, V.L. Temerov, L.N. Bezmaternykh, N.Leps, B. Buchner, and R. Klingeler, *Eur. Phys. J.* **B 62**, 123 (2008).
15. A.A. Demidov, I.A. Gudim, and E.V. Eremin, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **141**, 294 (2012).
16. N. Tristan, R. Klingeler, C. Hess, B. Buchner, E. Popova, I.A. Gudim, L.N. Bezmaternykh, *JMMM*, **316**, e621-e623, (2007).