

# Состояние спинового стекла в кристалле ферригерманата бария $Ba_2Fe_2GeO_7$

© Г. Петраковский, Л. Безматерных, И. Гудим, О. Баюков, А. Воротинов,  
А. Бовина, Р. Шимчак\*, М. Баран\*, К. Риттер\*\*

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,  
660036 Красноярск, Россия

\* Институт физики Польской академии наук,

02-668 Варшава, Польша

\*\* Институт Лауэ–Ланжевена,

38042 Гренобль, Франция

E-mail: sasa@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 10 января 2006 г.)

Исследованы температурная зависимость намагниченности и спектры упругого рассеяния нейтронов поликристаллов ферригерманата бария  $Ba_2Fe_2GeO_7$ . Обнаружена зависимость намагниченности от магнитной предыстории образца ниже  $T = 8$  К. Спектры нейтронного рассеяния не обнаружили дальнего магнитного порядка вплоть до температур 2 К. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существовании состояния спинового стекла в поликристалле  $Ba_2Fe_2GeO_7$ .

Работа поддержана проектом 2.1.2 программы ОФН РАН.

PACS: 75.50.LK, 75.25.+z

## 1. Введение

Тетрагональный ферригерманат бария  $Ba_2Fe_2GeO_7$  — один из представителей семейства соединений со структурой мелилита  $Ga_2Al_2SiO_7$ , кристаллизующихся в пр. гр.  $P\bar{4}2_1m$  ( $Z = 2$ ) [1,2]. Поликристалл этого соединения впервые был синтезирован методом твердофазной реакции при  $T = 1200^\circ\text{C}$  в работе [1]. В нашей работе [3], посвященной исследованию магнитных и структурных свойств ферригерманата бария, было установлено, что его кристаллическую решетку в магнитном отношении можно рассматривать как двумерную. Структура образована чередующимися вдоль тетрагональной

оси  $c$  слоями из полэдров, содержащих ионы бария (томсоновские кубы), и кислородных тетраэдров двух сортов, объединенных в пятичленные кольца (рис. 1). Более крупные сравнительно правильные тетраэдры  $T1$  с симметрией  $\bar{4}$ , расположенные в вершинах и центре оснований тетрагональной ячейки, заселены ионами  $Fe^{3+}$ . Менее правильные тетраэдры  $T2$ , образующие диортогруппы  $[M_2O_7]$  с симметрией  $mm2$ , заполнены статистически ионами  $Fe^{3+}$  и  $Ge^{4+}$  примерно в соотношении 1:1. Между всеми магнитными ионами преобладают антиферромагнитные обменные взаимодействия. Было показано [3], что распределение  $Fe^{3+}$  и  $Ge^{4+}$  по позициям  $T2$  играет существенную роль в формировании магнитной структуры слоев ферригерманата. На температурной зависимости магнитной восприимчивости была обнаружена особенность при  $T = 8$  К, характерная для перехода в магнитоупрядоченное состояние. Отмечалась необходимость дополнительных исследований для определения магнитной структуры  $Ba_2Fe_2GeO_7$  при низких температурах.

Здесь предложены результаты дальнейших исследований намагниченности и спектров упругого нейтронного рассеяния ферригерманата бария  $Ba_2Fe_2GeO_7$ .

## 2. Образцы и техника эксперимента

Методика синтеза и кристаллическая структура монокристалла ферригерманата бария  $Ba_2Fe_2GeO_7$  описаны ранее [3].

Спектры нейтронного рассеяния снимались на порошке, полученном перетиранием синтезированных монокристаллов на установке D1A ( $\lambda = 1.911 \text{ \AA}$ ) в институте Лауэ–Ланжевена в диапазоне температур 2–20 К в отсутствие магнитного поля.

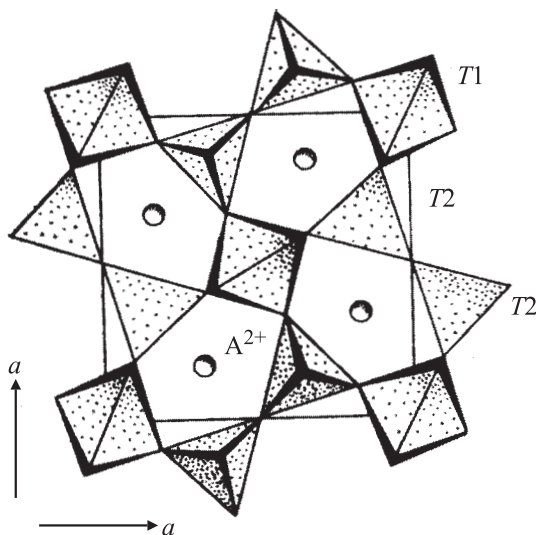
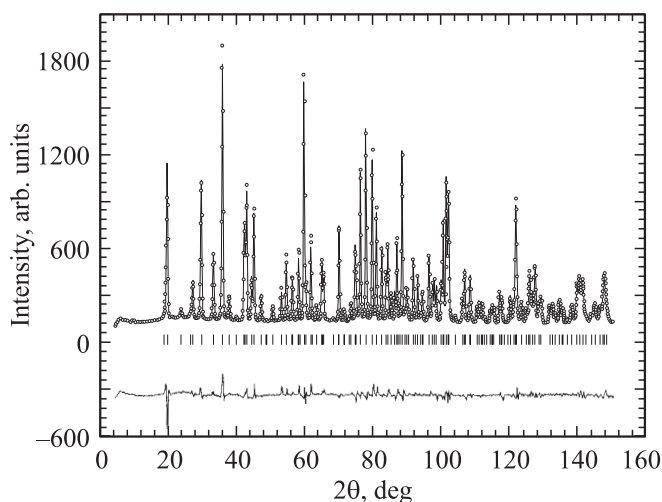


Рис. 1. Кристаллическая структура  $Ba_2Fe_2GeO_7$  в проекции на плоскость (001).  $A^{2+} = B^{2+}$ .

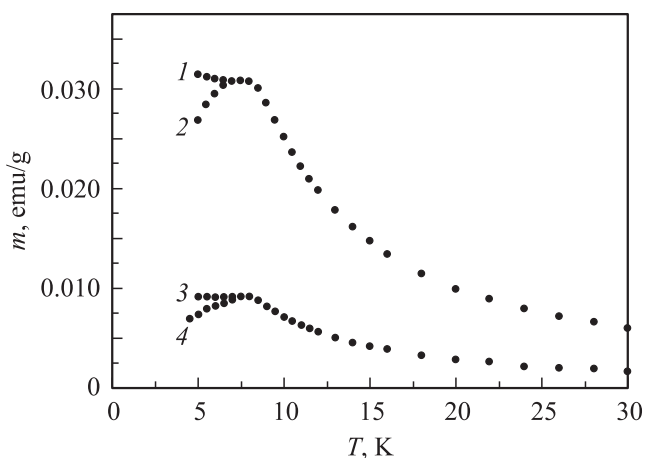
Температурные зависимости намагниченности измерялись на СКВИД-магнетометре в диапазоне температур 4.2–30 К в магнитных полях до 100 Ое, приложенных перпендикулярно оси  $c$  кристалла.

### 3. Экспериментальные результаты

Спектры нейтронного рассеяния, снятые при температурах 2 К (ниже) и 20 К (выше особенности на температурной зависимости восприимчивости [3]) оказались идентичными. На рис. 2 приведены модельный (точки) и экспериментальный (сплошная кривая) спектры нейтронного рассеяния при  $T = 2$  К. Модельный спектр рассчитан только для рассеяния на ионах кристаллической структуры без каких-либо магнитных пиков. Далее



**Рис. 2.** Теоретический (точки) и экспериментальный (сплошная линия) спектры нейтронного рассеяния поликристалла  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{GeO}_7$  при  $T = 2$  К.



**Рис. 3.** Температурные зависимости намагниченности монокристалла  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{GeO}_7$ . Кривые 1, 2 — измерения в магнитном поле 100 Ое; 3, 4 — измерения в магнитном поле 30 Ое; 1, 3 — охлаждение в магнитном поле 100 и 30 Ое соответственно; 2, 4 — охлаждение без поля.

приведена разность двух спектров, свидетельствующая об отсутствии дополнительных (магнитных) пиков на экспериментальной нейтронограмме.

Данный факт может, на наш взгляд, объясняться двумя причинами. Первая — достаточно малая величина магнитного момента иона  $\text{Fe}^{3+}$ , не позволяющая зарегистрировать магнитные пики, если они есть. Такая ситуация в принципе возможна. Вторая причина — реальное отсутствие дальнего магнитного порядка в исследуемом соединении при низких температурах. Однако, обнаруженная особенность на температурной зависимости магнитной восприимчивости при  $T = 8$  К [3] свидетельствует о том, что образец не остается парамагнитным до температуры  $T = 2$  К.

С целью выяснения этого вопроса были проведены измерения намагниченности монокристалла  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{GeO}_7$ , охлажденного в различных магнитных полях и без поля. Полученные результаты показаны на рис. 3.

Обнаружена резкая зависимость намагниченности образца от условий охлаждения при температурах ниже 7.5 К в поле 30 Ое и 7 К в поле 100 Ое.

### 4. Обсуждение результатов

Отсутствие магнитных пиков на спектрах нейтронного рассеяния и зависимость намагниченности образца от его магнитной предыстории характерны для состояния спинового стекла [4,5]. Однако, как правило такое состояние реализуется в аморфных магнетиках и металлических сплавах. Необходимыми условиями для существования спинового стекла является наличие фрустрированных обменных взаимодействий и их случайное распределение в кристаллической решетке. Ранее нами было установлено [3], что температура Кюри–Вейсса  $\theta$  для  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{GeO}_7$  отрицательна, следовательно, в соединении преобладают антиферромагнитные обменные взаимодействия. В предположении, что  $\theta$  определяется обменным взаимодействием  $J$  ближайших  $z = 4$  соседей, из соотношения  $\theta = -zJS(S+1)/3k_B$  величина обменного взаимодействия ближайших ионов  $\text{Fe}^{3+}$  составляет  $J = -0.6$  К. Необходимо отметить, что полученное значение является средним обменным взаимодействием в системе. При этом, если обменные взаимодействия антиферромагнитны, они полностью фрустрированы. Кроме того, установлено [3], что вследствие хаотического распределения  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ge}^{4+}$  по позициям  $T2$  эти взаимодействия случайным образом распределены по решетке кристалла. Подобная ситуация наблюдалась ранее в кристалле  $\text{CuGa}_2\text{O}_4$  [4].

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных установлено, что в кристалле  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{GeO}_7$  при температурах ниже 8 К реализуется состояние спинового стекла.

## Список литературы

- [1] И. Любутин, Б. Милль, В. Терзиев, А. Буташин. Кристаллография **33**, 136 (1988).
- [2] Ю. Сигаловская, П. Сандомирский, В. Урусов. Минерал. журн. **6**, 3 (1984).
- [3] Г. Петраковский, Л. Безматерных, И. Гудим, Д. Шептяков, О. Баюков, А. Воротынов, Д. Великанов, А. Бовина. ФТТ **47**, 2027 (2005).
- [4] C.Y. Huang. J. Magn. Magn. Mater. **51**, 1 (1985).
- [5] G.A. Petrakovskii, K.S. Aleksandrov, L.N. Bezmaternikh, S.S. Aplesnin, B. Roessli, F. Semadeni, A. Amato, C. Baines, J. Bartolome, M. Evangelisti. Phys. Rev. B **63**, 184425 (2001).