

Низкотемпературные отклонения от закона Блоха в гексаферрите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: bezlepkin@bk.ru*

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2004 г.

Методом ЯМР изучены температурные изменения локальных полей на ядрах ^{57}Fe в октаэдрических позициях $12k$, $4f_2$ и $2a$ ионов железа в феррите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Рассмотрена возможность применения спин-волновой теории Блоха для описания температурных изменений локальных полей на ядрах железа. В области температур 4,2–77 К обнаружены отклонения от закона степени $3/2$ Блоха, которые не могут быть объяснены в рамках особенностей поведения, связанных с наличием энергетической щели в спектре акустических магнонов.

Методом ЯМР вивчено температурні зміни локальних полів на ядрах ^{57}Fe в октаєдричних позиціях $12k$, $4f_2$ та $2a$ іонів заліза в фериті $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Розглянуто можливість застосування спин-хвильової теорії Блоха для опису температурних змін локальних полів на ядрах заліза. В області температур 4,2–77 К виявлено відхилення від закону степені $3/2$ Блоха, які не можуть бути пояснені в рамках особливостей поведінки, пов'язаних з наявністю енергетичної щілини в спектрі акустичних магнонів.

PACS: 75.50.Gg

Введение

Исследование магнитного резонанса ядер в многоподрешеточных ферримагнетиках позволяет получать данные о температурной зависимости намагниченностей подрешеток. Эти зависимости отражают особенности спиновой динамики и несут информацию о характере энергетического спектра при возбуждении спиновых волн. Гексаферрит $\text{BaFe}_{12}^{3+}\text{O}_{19}$ содержит в качестве магнитоактивных ионов только ионы Fe^{3+} в пяти кристаллографически неэквивалентных позициях, имеющих октаэдрическое ($12k$, $2a$, $4f_2$), тетраэдрическое ($4f_1$) и бипирамидальное ($2b$) кислородное окружение [1]. Бипирамидальное окружение имеет форму тригональной бипирамиды и состоит из двух псевдотетраэдрических узлов. В работе [2] в интервале температур 4,2–295 К были изучены локальные поля на ядрах ^{57}Fe в бипирамидальных и тетраэдрических позициях кристаллической решетки феррита ВаМ. В настоящей работе методом ЯМР исследованы температурные изменения локальных полей на ядрах железа в позициях $12k$, $2a$ и $4f_2$ в феррите ВаМ.

При низких температурах обнаружены отклонения от закона Блоха, которые не могут быть объяснены в рамках особенностей поведения, связанных с наличием энергетической щели в спектре акустических магнонов.

Образцы и методика измерений

Образцы гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ синтезировали методом раствора в расплаве флюса $\text{BaO}\cdot\text{V}_2\text{O}_5$. Кристаллизацию осуществляли на вращающуюся затравку в диапазоне температур 1420–1300 К. Фазовый состав кристаллов контролировали рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки при комнатной температуре: $a = 0,589$ нм, $c = 2,19$ нм. Кристаллы имели 95% обогащение изотопом ^{57}Fe . ЯМР изучали на ядрах железа в придоменных слоях блоховских доменных границ стационарной методикой, описанной в работе [3]. Измерения проводили при низком уровне радиочастотной мощности. Величина возбуждающего напряжения на контуре, содержащем исследуемый образец, не превышала 10^{-2} В. Частоты ЯМР линий от

придоменных слоев, полученные стационарной методикой при 77 К, с погрешностью 0,2% совпали с частотами линий от ядер в доменах, полученных методом спинового эха. Погрешность определения частот пиков ЯМР сигналов не превышала 0,1%.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Температурные зависимости локальных полей H_i (i — индекс подрешетки) на ядрах ^{57}Fe для всех кристаллографически неэквивалентных положений $12k$, $2a$, $4f_2$, $4f_1$ и $2b$ ионов трехвалентного железа, соответствующих подрешеткам a , b , c , d и e , показаны на рис. 1. (Для подрешеток c и e приведены результаты по данным работы [2].) Как видно на рис. 1, с понижением температуры на ядрах подрешетки e ($2b$) в интервале 4,2–77 К происходит аномальное уменьшение локального поля, причины которого рассмотрены в [2]. Для остальных подрешеток такой аномалии нет, а наблюдается монотонный рост поля при понижении температуры от 295 до 4,2 К. Как известно, наибольший вклад в локальное поле H_i подрешетки вносят нескомпенсированные спины электронной оболочки магнитоактивного иона, поэтому в первом приближении локальное поле определенной подрешетки пропорционально намагниченности этой подрешетки [4]. Если не учитывать межзонное диполь-дипольное взаимодействие, то при низких температурах будет иметь место квадратичный закон дисперсии для акустических магновов [5]. В гексаферритах М-типа дипольные магнитные поля, обусловленные межзонным диполь-дипольным взаимодействием, существенно

меньше эффективных обменных полей [6]. Поэтому для температурных зависимостей намагниченностей M_i подрешеток должен выполняться закон степени $3/2$ Блоха. Поскольку $M_i(T) \sim H_i(T)$, то

$$H_i(0) - H_i(T) = \Delta H_i(T) = B_i T^{3/2}, \quad (1)$$

где $H_i(0)$ — локальное поле для i -подрешетки при $T \rightarrow 0$, а $H_i(T)$ — при температуре T ; B_i — константа, независимая от температуры.

Величины $\Delta H_i(T^{3/2})$, рассчитанные по экспериментальным данным $H_i(T)$ для интервала 4,2–295 К, представлены на рис. 2. Видно, что для подрешетки e в интервале 4,2–200 К и для подрешеток a , b , c и d в интервале 4,2–77 К имеет место отклонение от закона Блоха. Причины отклонения от закона Блоха для подрешетки e рассмотрены в [2]. В этой работе показано, что наблюдаемые особенности обусловлены перераспределением спиновой и электронной плотности в результате низкотемпературной эволюции потенциальных барьеров в области псевдотетраэдрических узлов в бипирамидальных позициях ионов железа. Наблюдаемая особенность не связана со спецификой спиновой динамики, но на графике $\Delta H_i = f(T^{3/2})$ проявляет себя формально как отклонение от закона Блоха.

Рассмотренный механизм не может объяснить отклонения от закона Блоха для подрешеток a , b , c и d в интервале 4,2–77 К по следующим причинам.

Во-первых, искажения кристаллической решетки в области бипирамидальных узлов носят локальный характер. Во-вторых, температурные области нарушения закона Блоха для подрешеток e и a , b , c и d существенно различаются. На рис. 2 видно, что за

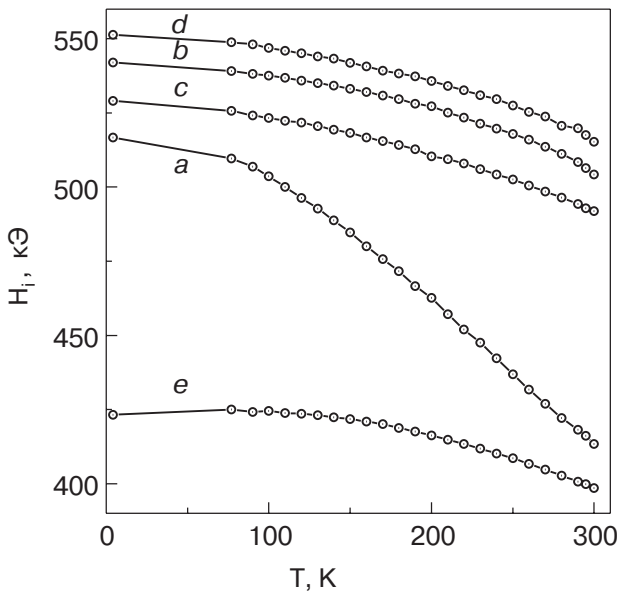


Рис. 1. Температурные зависимости локальных полей на ядрах ^{57}Fe в гексаферрите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

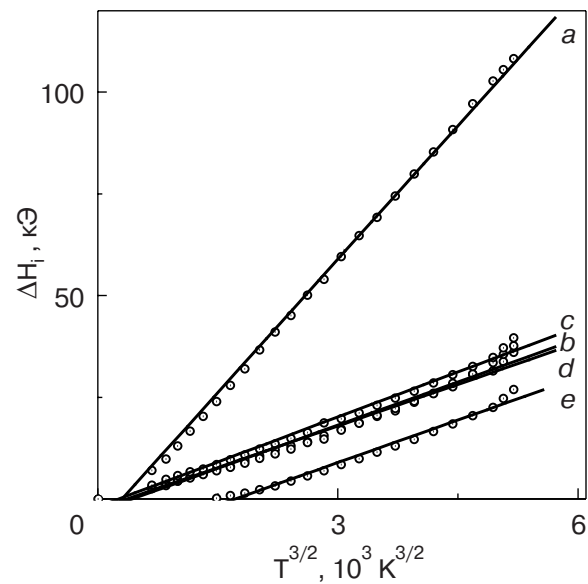


Рис. 2. Температурные изменения локальных полей на ядрах ^{57}Fe в гексаферрите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

висимости $\Delta H_i (T^{3/2})$ для подрешеток a , b , c и d носят «пороговый» характер. Экстраполяция зависимостей к точке $\Delta H_i = 0$ дает температуру $T_s = 55$ К.

В магнитно-одноосных кристаллах закон дисперсии для акустических магнонов в ферримагнетике можно представить в виде [7]

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 + Aa^2k^2, \quad (2)$$

где ε_k — энергия магнона, ε_0 — энергетическая щель, A — обменный параметр, a — параметр кристаллической решетки, k — волновой вектор.

Закон Блоха должен выполняться в интервале температур [8]

$$\frac{\varepsilon_0}{\chi} < T \ll \Theta_C, \quad (3)$$

где χ — постоянная Больцмана; Θ_C — температура Кюри.

При $T < \varepsilon_0/\chi$ должны наблюдаться отклонения от закона Блоха. Величину энергетической щели можно представить в виде

$$\varepsilon_0 = H_a \mu, \quad (4)$$

где H_a — поле анизотропии; $\mu = 5\mu_B$ — магнитный момент иона Fe^{3+} (μ_B — магнетон Бора).

Для гексаферрита ВаМ при температуре 77 К $H_a \approx 16$ кЭ [9]. Воспользовавшись значениями μ и H_a для эффективной температуры щели $T_{\text{eff}} = \varepsilon_0/\chi$, получим значение ≈ 5 К, что на порядок меньше температуры T_s . Поэтому наблюдаемые для подрешеток a , b , c и d отклонения от закона Блоха при низких температурах не связаны с наличием щели в спектре спиновых волн.

Рассмотренные в настоящей работе закономерности указывают на существование некоторого «поро-

гового» механизма, меняющего спиновую динамику в интервале температуры 4,2–55 К.

1. W.D. Nownes, J.H. Fang, and A.J. Perrota, *Z. Kristallogr.* **B125**, 437 (1967).
2. А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич, *ФТТ* **45**, 2048 (2003).
3. С.П. Кунцевич, А.А. Безлепкин, Ю.А. Попков, *ЖЭТФ* **88**, 1820 (1985).
4. Е.А. Туров, М.П. Петров, *Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках*, Наука, Москва (1969).
5. С.П. Кунцевич, А.А. Безлепкин, *ФТТ* **43**, 754 (2000).
6. С.П. Кунцевич, *ФНТ* **24**, 754 (1998).
7. Е.А. Туров, *Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов*, Наука, Москва (1963).
8. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, *Статистическая физика*, ч. 2, Наука, Москва (1978).
9. С.П. Кунцевич, *Вісник ХДУ*, № 440, сер. «Фізика», вип. 3, 125 (1999).

Low-temperature deviations from the Bloch law in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite

A.A. Bezlepkina and S.P. Kuntsevich

Temperature dependences of local fields on ^{57}Fe nuclei in octahedral positions $12k$, $4f_2$ and $2a$ of ferric ions in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ferrite are studied by the NMR method. Consideration is given to the applicability of the Bloch spin wave theory in the description of these dependences. Deviations from the Bloch $3/2$ power law are found in a temperature range 4,2–77 К. The derivations cannot be explained by the specific behavior attributed to the presence of an energy gap in the acoustic magnon spectra.