

05,06

Ориентационные и релаксационные особенности динамической магнитной восприимчивости $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ при переходе из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное

© А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич, В.И. Костюков

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
Харьков, Украина

E-mail: anatoliy.a.bezlyepkin@univer.kharkov.ua

(Поступила в Редакцию 29 октября 2013 г.
В окончательной редакции 14 мая 2015 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований динамической магнитной восприимчивости гексаферрита свинца в температурной области перехода из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное. При ориентации вектора напряженности переменного магнитного поля в направлении легкого намагничивания вдоль гексагональной оси c в области температуры Кюри обнаружено аномальное пикообразное уменьшение действительной части магнитной восприимчивости. Наблюдаемый эффект зависит от частоты переменного магнитного поля и исчезает при частоте примерно 12 МГц. Обнаруженные особенности интерпретируются как эффекты, обусловленные релаксационным резонансом.

1. Введение

Концепция о спонтанном нарушении симметрии легла в основу теории фазовых переходов второго рода [1,2]. Количественно теория основывалась на приближении самосогласованного поля. При этом флуктуации считались пренебрежимо малыми. В работах [3,4] было показано, что флуктуации параметра порядка, даже если они малы вдали от точки перехода, становятся большими вблизи фазового перехода.

В работе [5] было сделано феноменологическое предположение, что в области фазового перехода критическая динамика носит релаксационный характер, а производная от параметра порядка по времени пропорциональна самосогласованному полю, которое является производной от термодинамического потенциала по параметру порядка. Поэтому, согласно [5], время релаксации τ , характеризующее скорость установления равновесного состояния параметра порядка, должно расти при приближении к точке фазового перехода со стороны более низких температур.

Для ферро- и ферримангнетиков при приближении к точке Кюри от температуры меньше T_C , если частота внешнего переменного магнитного поля ω меньше частоты релаксации $1/\tau$, вследствие роста τ возможно выполнение условия $\omega\tau = 1$, соответствующее релаксационному резонансу [6].

В данной работе приведены результаты исследований, из которых следует, что в гексаферрите $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ (PbM) в области фазового перехода поведение действительной части магнитной восприимчивости χ' обладает характерными признаками релаксационного резонанса.

2. Образцы и методика измерений

Монокристаллы $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ выращены методом раствора в расплаве флюса PbO . Синтез производился в интервале температур 960–1050°C на вращающейся затравке. Фазовый состав кристаллов контролировался рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки исследуемого феррита при комнатной температуре составляют: $a = 0.589 \text{ nm}$, $c = 2.312 \text{ nm}$. Образцы имели форму, близкую к сферической с диаметром $\sim 5 \text{ mm}$. Температурная зависимость действительной части магнитной восприимчивости определялась, исходя из экспериментальных значений резонансной частоты LC-контура, в катушку индуктивности которого помещался исследуемый образец. Точность определения резонансной частоты контура $\sim 2 \text{ kHz}$. Для определения характеристик контура использовался анализатор спектра СК4-59.

Катушка индуктивности изготавливалась из платиновой проволоки, помещалась в электрическую печь, питание которой осуществлялось постоянным током, стабилизируемым на заданном уровне с точностью не хуже 0.01%. Нагреватель печи наматывался бифилярно на медную трубку, которая обеспечивала однородность температуры в рабочем пространстве печи. Температура определялась по термоэдс дифференциальной термопары платина-платинородий, измерительный спай которой имел непосредственный контакт с образцом, а второй термостатировался при 0°C тающим льдом. Точность определения температуры составляла 0.1°C. Исследования были проведены в переменных магнитных полях, не превышающих $1 \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$.

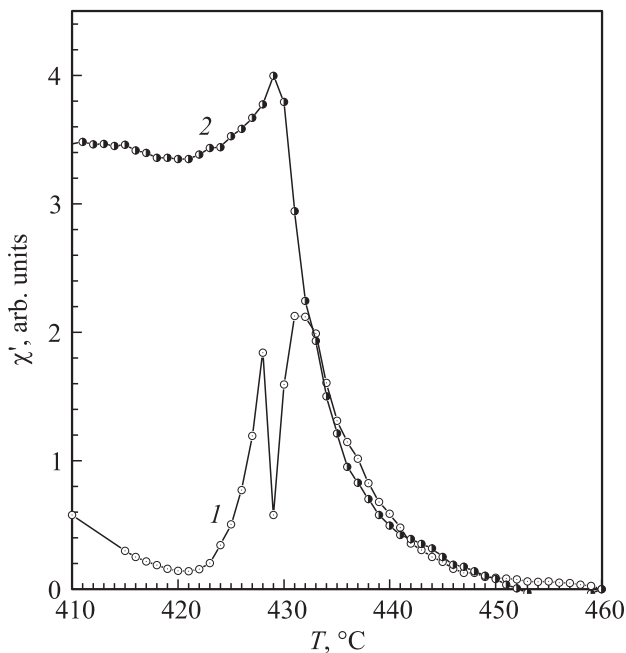


Рис. 1. Температурная зависимость действительной части динамической магнитной восприимчивости кристалла $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ вдоль гексагональной оси c (1) и перпендикулярно оси c (2) на частоте ~ 43.9 MHz.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В работе была изучена зависимость резонансной частоты колебательного контура с кристаллом PbM, ориентированным гексагональной осью c вдоль и перпендикулярно вектору напряженности переменного магнитного поля $h(t)$, для интервала температур 410–460°C. Гексагональная ось c исследуемого кристалла ориентирована вдоль поля анизотропии и соответственно в направлении легкого намагничивания.

Исходя из экспериментальных данных, была определена температурная зависимость величины χ' . Для определения χ' использовалась формула

$$\mu'(T) = 1 + \chi'(T) = B[f_1^{-2}(T) - f_2^{-2}(T)], \quad (1)$$

где μ' — действительная часть магнитной проницаемости исследуемого образца; B — величина, зависящая от параметров контура и также включающая постоянные численные коэффициенты, в том числе и коэффициент заполнения катушки образцом; $f_1(T)$ — частота контура с образцом при температуре T ; $f_2(T)$ — частота пустого контура при температуре T .

Поскольку определить точное значение коэффициента заполнения катушки образцом не представляется возможным, на рис. 1 значение χ' приведено в относительных единицах. Как видно на рисунке, сингулярное поведение при температуре 429°C наблюдается при

$h(t) \perp c$ и не наблюдается при $h(t) \parallel c$. Такое различие объясняется спецификой флуктуационных образований, возникающих в высокоанизотропных магнитно-одноосных кристаллах. При приближении к температуре Кюри существенное влияние начинает оказывать энергия анизотропии [7]. В флуктуационной области вблизи температуры Кюри неограниченно возрастают компоненты намагниченности вдоль направления поля анизотропии [7], а перпендикулярные им компоненты остаются конечными. При $h(t) \perp c$ должны сохраняться особенности фазового перехода второго рода [8], в частности сингулярное поведение χ' . Поэтому есть основания температурой Кюри считать $T = (429 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, при которой наблюдается сингулярное поведение χ' .

Из рис. 1 следует, что при $h(t) \parallel c$ на фоне широкого максимума χ' , связанного с термодинамической неустойчивостью спиновой системы [9] в области температуры Кюри, наблюдается пикообразное уменьшение магнитной восприимчивости χ' . Оно занимает интервал температур $\sim 4^\circ\text{C}$. Температура минимума величины χ' в области пика совпадает с температурой Кюри в пределах точности проведенных измерений.

Информацию о диссипативных процессах при взаимодействии переменного магнитного поля со спиновой подсистемой может дать изучение температурных особенностей мнимой части магнитной восприимчивости χ'' . Изменение χ'' должно приводить к изменению добротности колебательного контура и, следовательно, напряжения на нем. На рис. 2 показана зависимость напряжения на LC-контуре в интервале температуры

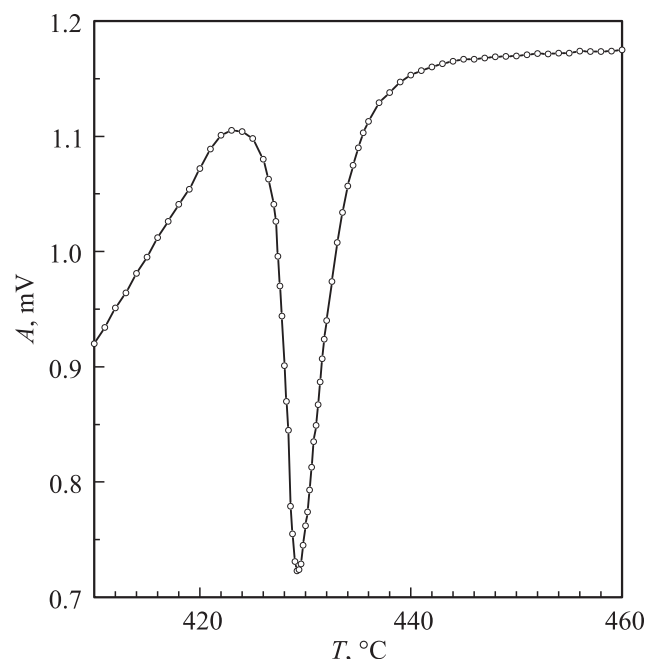


Рис. 2. Температурная зависимость напряжения на колебательном контуре с кристаллом $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$, ориентированным гексагональной осью c вдоль вектора напряженности переменного магнитного поля $h(t)$ на частоте ~ 43.9 MHz.

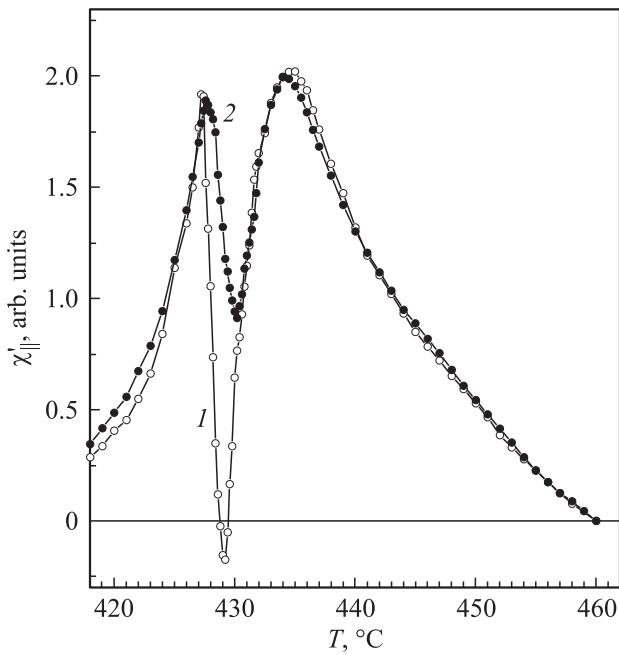


Рис. 3. Температурная зависимость действительной части магнитной восприимчивости кристалла $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ в нулевом постоянном магнитном поле (1) и в поле 0.4 kOe (2) на частоте $\sim 93 \text{ MHz}$. Направление легкого намагничивания образца параллельно оси катушки индуктивности контура и постоянному магнитному полю.

$410\text{--}460^\circ\text{C}$. Как следует из рисунка, при температуре Кюри имеет место минимум напряжения на контуре, что свидетельствует о минимуме добротности контура и максимальном значении χ'' . Резкое уменьшение χ' и максимальное значение величины χ'' при этом является специфической особенностью релаксационного резонанса, когда выполняется условие $\omega\tau = 1$ [6].

На рис. 3 для интервала температур $410\text{--}460^\circ\text{C}$ представлены зависимости действительной части магнитной восприимчивости χ' на частоте $\sim 93 \text{ MHz}$ для образца, находящегося в нулевом внешнем постоянном магнитном поле (1) и в поле напряженностью 0.4 kOe (2), ориентированном параллельно оси c и переменному магнитному полю. Ось c совпадает с направлением легкого намагничивания. Поэтому образец сферической формы перейдет в однодоменное состояние при намагниченности $I \approx 100 \text{ G}$. Такое значение намагниченности будет иметь кристалл при температурах на 50° ниже температуры Кюри [10]. Из рис. 3 следует, что и в магнитном поле рассмотренные особенности поведения χ' в области температуры Кюри сохраняются. Это обстоятельство исключает возможность интерпретировать наблюдаемые особенности как следствие магнитного резонанса.

На рис. 4 приведены в относительных единицах зависимости действительной части магнитной восприимчивости от температуры в интервале $420\text{--}460^\circ\text{C}$ для частот вблизи 12.6 , 43.9 и 93.1 MHz . Как видно

на рисунке, величина пика χ' при температуре Кюри уменьшается при снижении частоты и при частоте 12.6 MHz аномалия проявляется как небольшой изгиб на зависимости $\chi'(T)$.

Из рис. 4 следует, что положение пика χ' для всех частот совпадает с температурой Кюри. Это, по-видимому, связано с тем, что выполнение условия $\omega\tau = 1$ происходит в очень узком температурном интервале при температуре Кюри и не может быть обнаружено при разных температурах в рамках проведенных экспериментов, поскольку магнитоупорядоченные флуктуационные образования имеют разброс по температуре.

Полученные экспериментальные результаты и анализ литературных данных указывают на следующий возможный физический механизм, ответственный за обнаруженные особенности динамической магнитной восприимчивости.

В исследуемых ферритах в интервале температур, близком к температуре Кюри, присутствуют магнитоупорядоченные и парамагнитные флуктуационные образования [2,9]. Обе эти фазы дают вклад в величину χ' исследуемого феррита и влияют на параметры LC-контура. Релаксационные процессы в образце будут задаваться механизмом наиболее быстрой релаксации. При температурах, меньших температуры Кюри, время релаксации магнитоупорядоченной фазы τ_1 гораздо меньше, чем фазы парамагнитной τ_2 [9]. При приближении к температуре Кюри, вследствие критического замедления скорости релаксации [2,5], τ_1 будет расти, но рост будет ограничен

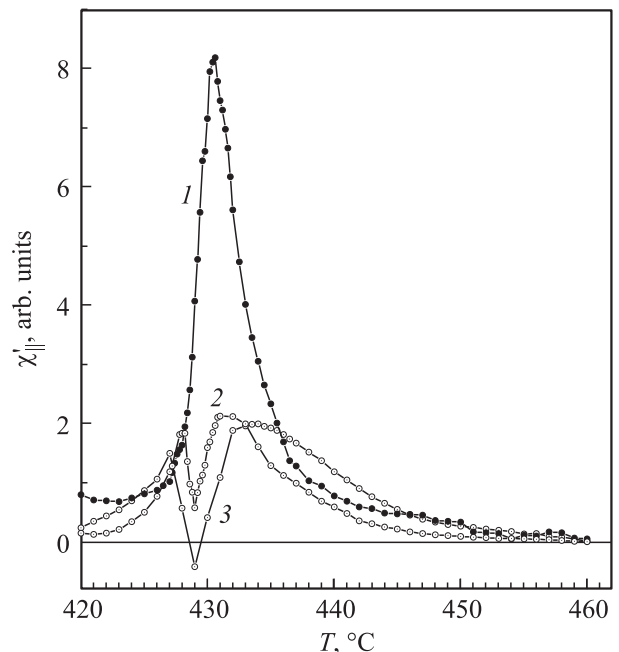


Рис. 4. Температурная зависимость действительной части магнитной восприимчивости кристалла $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$, ориентированного гексагональной осью c вдоль вектора напряженности переменного магнитного поля $h(t)$, на частотах ~ 12.6 (1), 43.9 (2) и 93.1 MHz (3) в интервале температур $420\text{--}460^\circ\text{C}$.

временем релаксации τ_2 . При этом наблюдение релаксационного резонанса станет невозможным. Поэтому есть основания предположить, что частота 12.6 МГц близка по величине к численному значению частоты релаксации $\omega_r = 1/\tau_2$ парамагнитной фазы. Это допущение хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными и выводами, следующими из работы [11]. В работе [11] показано, что для парамагнитной фазы в области температуры Кюри при выполнении условия $\omega \gg \omega_r$ действительная часть магнитной восприимчивости становится величиной отрицательной. Как видно на рис. 4, при температуре Кюри на частоте 93.1 МГц, которая значительно больше частоты релаксации парамагнитной фазы $\omega_r \approx 12.6$ МГц, действительная часть магнитной восприимчивости χ' имеет отрицательный знак. Это будет происходить при выполнении условия $\omega\tau = 1$ для магнитоупорядоченной фазы, когда вклад ее в χ' мал.

4. Заключение

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что наблюдаемые особенности поведения динамической магнитной восприимчивости в области температуры Кюри можно интерпретировать как следствие релаксационного резонанса по следующим причинам:

- в температурной области аномального уменьшения χ' величина χ'' имеет максимальное значение;
- в постоянном магнитном поле, разрушающем доменную структуру, аномалии сохраняются;
- наблюдаемый эффект зависит от частоты приложенного магнитного поля.

Список литературы

- [1] Л.Д. Ландау. ЖЭТФ **7**, 627 (1937).
- [2] А.З. Паташинский, В.Л. Покровский. Флуктуационная теория фазовых переходов. Наука, М.: (1982) 382 с.
- [3] А.П. Леванюк. ЖЭТФ **36**, 810 (1959)
- [4] В.А. Гинзбург. ФТТ **2**, 2031 (1960)
- [5] Л.Д. Ландау, Н.М. Халатников. ДАН СССР **96**, 469 (1954).
- [6] Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. Сов. энциклопедия, М.: (1984). С. 633.
- [7] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, Наука, М.: (1982).
- [8] Н.К. Камиллов, Х.К. Алиев. УФН **140**, *4*, 639 (1983).
- [9] К.П. Белов. Магнитные превращения. ГИФМЛ, М. (1959). 260 с.
- [10] R. Pauthenet, G.G. Rimet. Acad. Sci. **294**, *19*, 1875 (1959).
- [11] С.В. Малеев, ЖЭТФ **73**, 1572 (1977).