

## Ориентационные особенности динамической магнитной восприимчивости и релаксационный резонанс в $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ при фазовом переходе

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

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,  
61022, Харьков, пл. Свободы, 4, Украина  
anatoliy.a.bezlyepkin@univer.kharkov.ua*

Представлены результаты экспериментальных исследований динамической магнитной восприимчивости гексаферрита свинца в температурной области перехода из магнитоупорядоченного в парамагнитное состояние. При ориентации вектора напряженности переменного магнитного поля вдоль гексагональной оси обнаружен релаксационный резонанс. Показано, что критическое затухание в области температуры Кюри возникает за счет аддитивных вкладов диссипативных процессов, обусловленных релаксационным резонансом при температурах, меньших температуры Кюри, и диссипативных процессов, обусловленных флуктуационным механизмом фазового перехода при температурах как меньших, так и больших температуры Кюри.

**Ключевые слова:** магнитная восприимчивость, релаксационный резонанс, гексаферрит, точка Кюри.

Представлені результати експериментальних досліджень динамічної магнітної сприйнятливості гексаферита свинцю в температурній області переходу з магнітоупорядкованого в парамагнітний стан. При орієнтації вектора напруженості змінного магнітного поля вздовж гексагональної осі виявлено релаксаційний резонанс. Показано, що критичне затухання в області температури Кюрі виникає внаслідок адитивних вкладів дисипативних процесів, зумовлених релаксаційним резонансом при температурах, менших температури Кюрі, та дисипативних процесів, зумовлених флуктуаційним механізмом фазового переходу при температурах як менших, так і більших температури Кюрі.

**Ключові слова:** магнітна сприйнятливість, релаксаційний резонанс, гексаферит, точка Кюрі.

Results of experimental studies of dynamic magnetic susceptibility of lead hexaferrite in the temperature range of phase transition from ferrimagnetic to paramagnetic state are presented. Relaxation resonance was found at orientation of variable magnetic field intensity vector along the hexagonal axis. It is shown that critical attenuation in the region of Curie temperature appears due to additive contributions of dissipative processes caused by relaxation resonance at temperatures below Curie temperature and dissipative processes caused by fluctuation mechanism of the phase transition below and above Curie temperature.

**Keywords:** the magnetic susceptibility, the relaxation resonance, magnetoplumbite, point curi.

### Введение

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

В работе [4] 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 [4], время релаксации  $\tau$ , характеризующее скорость установления равновесного состояния параметра порядка, должно расти при приближении к точке фазового перехода.

Для магнитоупорядоченных сред, если частота внешнего переменного магнитного поля  $\omega$  меньше частоты релаксации  $1/\tau$  при температурах  $T$ , меньших температуры Кюри  $T_c$ , то при приближении к точке Кюри, вследствие роста  $\tau$ , возможно выполнение условия  $\omega\tau=1$ , соответствующее релаксационному резонансу [5] на частоте  $\omega$ . При выполнении этого условия, вследствие конечной скорости протекания

процессов намагничивания, должен наблюдаться рост мнимой части динамической магнитной проницаемости и, соответственно, восприимчивости  $\chi''$  и уменьшение действительной ее части  $\chi'$  [5, 6].

В настоящей работе приведены результаты исследований, из которых следует, что в гексаферрите  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  (PbM) при температурах, меньших температуры фазового перехода  $T_C$ , в области фазового перехода наблюдается релаксационный резонанс. Рост мнимой части магнитной восприимчивости  $\chi''$  в области релаксационного резонанса при  $T < T_C$  происходит на фоне диссипативных процессов флуктуационного типа, протекающих как при  $T < T_C$ , так и при  $T > T_C$ .

### Образцы и методика измерений

Монокристаллы PbM, выращены методом раствора в расплаве флюса PbO. Синтез производился в интервале температур 960–1050 °C на вращающейся заправке. Фазовый состав кристаллов контролировался рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки исследуемого феррита при комнатной температуре составляют:  $a=0,589$  nm,  $c=2,312$  nm. Образцы с линейными размерами ~5 mm имели форму, близкую к сферической. 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  $\approx 2$  kHz. Для определения характеристик контура использовался анализатор спектров 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 постоянство 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.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость резонансной частоты колебательного контура с кристаллом PbM, ориентированным гексагональной осью  $\vec{c}$  вдоль вектора напряженности переменного магнитного поля для интервала температур 375–460 °C. Гексагональная ось с исследуемого кристалла ориентирована вдоль направления легкого намагничивания. Температурная

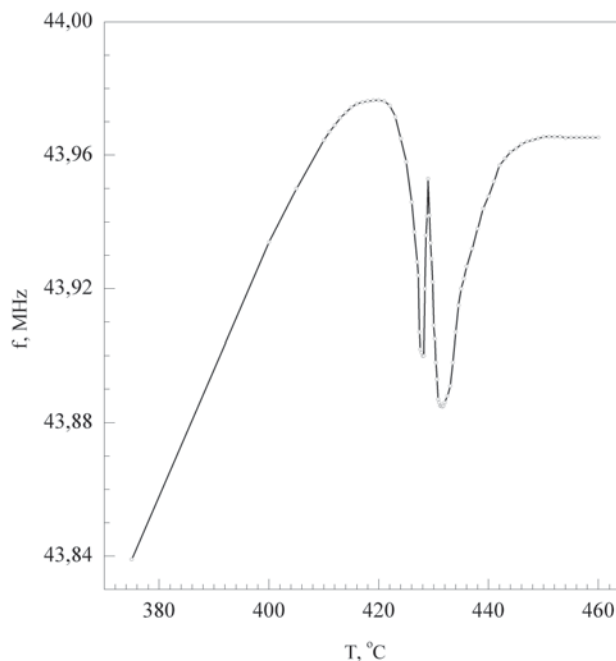


Рис. 1. Температурная зависимость резонансной частоты колебательного контура с монокристаллическим образцом  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Направление легкого намагничивания образца совпадает с осью катушки контура.

зависимость действительной части магнитной восприимчивости исследуемого образца определялась методом сравнения частоты контура с образцом в катушке с частотой контура с пустой катушкой. Для температуры  $T$  величина действительной части магнитной восприимчивости образца рассчитывалась по формуле

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

где  $B$  – 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,  $f_2(T)$  – частота пустого контура при температуре  $T$ .

Поскольку определить точное значение коэффициента заполнения катушки образцом не представляется возможным, на рис. 2 значение  $\chi'$  приведено в относительных единицах. Как видно на рисунке, на фоне широкого максимума, связанного с уменьшением термодинамической устойчивости спиновой подсистемы вблизи температуры Кюри [7], наблюдается пикообразное уменьшение магнитной восприимчивости при температуре несколько меньшей температуры Кюри. Ширина пика по температуре  $\approx 4$  °C при ширине области соответствующей критической динамике  $\approx 30$  °C.

Информацию о диссипативных процессах при взаимодействии радиочастотного поля со спиновой подсистемой может дать изучение температурных

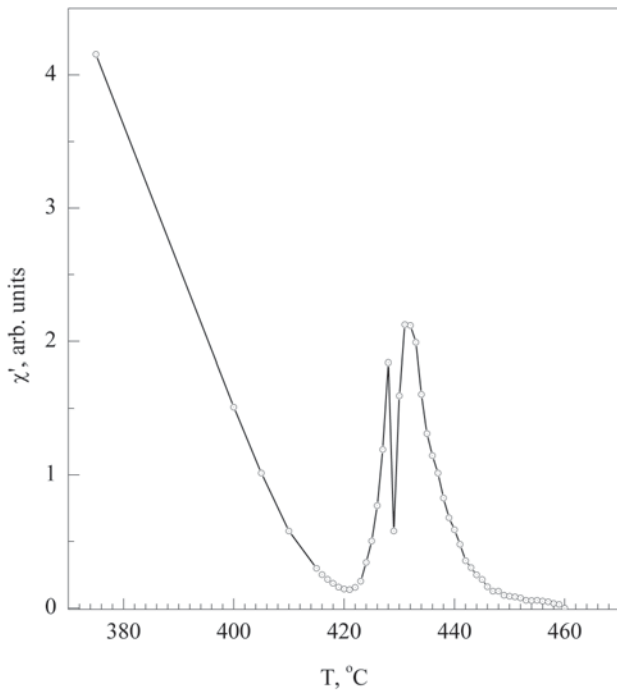


Рис. 2. Температурная зависимость действительной части магнитной восприимчивости образца  $PbFe_{12}O_{19}$  (в относительных единицах).

особенностей мнимой части магнитной восприимчивости. Изменение  $\chi''$  должно приводить к изменению добротности колебательного контура и, следовательно, напряжения на нем. На рис. 3 показана

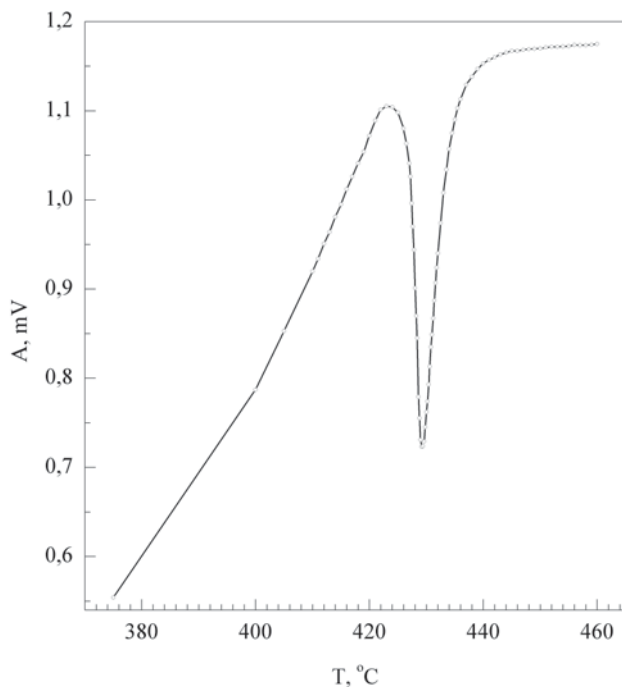


Рис. 3. Температурная зависимость напряжения на колебательном контуре с монокристаллическим образцом  $PbFe_{12}O_{19}$ . Направление легкого намагничивания образца совпадает с осью катушки контура.

зависимость напряжения на LC-контуре в интервале температуры 375-460°C. Как следует из рисунка, в области температуры Кюри имеет место минимум напряжения, что свидетельствует об уменьшении добротности контура и росте  $\chi''$ . Температура, при которой наблюдается минимум напряжения на контуре, совпадает с минимумом пика  $\chi'$ . Резкий рост величины  $\chi''$  и уменьшение  $\chi'$  является специфической особенностью релаксационного резонанса, когда выполняется условие  $\omega\tau = 1$  [5].

То, что минимум амплитуды напряжения на контуре и минимум  $\chi'$  совпадают по температуре, свидетельствует о том, что основной вклад в диссипативные потери радиочастотного магнитного поля обусловлен релаксационным резонансом, ширина которого по температуре  $\approx 4^\circ C$ . Ширина температурной области, в которой наблюдается резкое уменьшение напряжения на контуре, составляет около  $30^\circ C$ , что существенно больше ширины пика  $\chi'$ . Это обстоятельство указывает на то, что критическое затухание в области температуры Кюри возникает за счет аддитивных вкладов диссипативных процессов, обусловленных релаксационным резонансом при температурах меньше точки Кюри и флуктуационных вкладов, происходящих по обе стороны от точки Кюри.

По данным работы [4] увеличение времени релаксации  $\tau$  при приближении к точке Кюри из области температур  $T < T_c$  должно происходить по закону

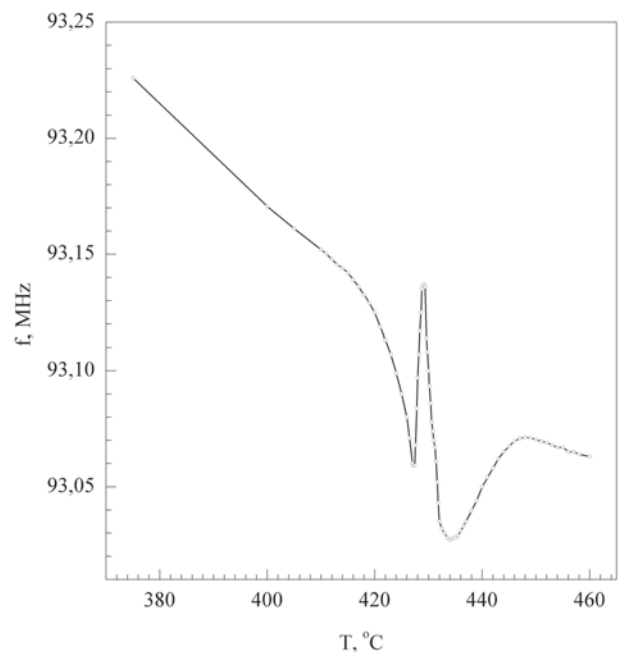


Рис. 4. Температурная зависимость резонансной частоты колебательного контура с монокристаллическим образцом  $PbFe_{12}O_{19}$  в окрестности частоты 93 МГц. Направление легкого намагничивания образца совпадает с осью катушки контура.

$$\tau \sim \frac{1}{T_C - T}, \quad (2)$$

а в парамагнитной области рассматриваемый эффект должен отсутствовать.

Увеличение частоты радиочастотного поля должно приводить к выполнению условия  $\omega\tau = 1$  при меньших значениях  $\tau$  и, соответственно, согласно (2) при более низкой температуре. При этом должен увеличиваться объем фазы магнитоупорядоченных флуктуационных образований. Эти обстоятельства должны приводить к усилению наблюдаемого эффекта – пикообразного увеличения частоты колебательного контура в области точки Кюри. На рис. 4 приведена зависимость резонансной частоты колебательного контура в диапазоне частот 93,2–93 МГц для области температуры 375–460 °С с кристаллом, ориентированным гексагональной осью  $\vec{c}$  вдоль вектора  $\vec{H}$ . Сопоставление рис. 1 и рис. 4 показывает, что пикообразный рост частоты в районе точки Кюри более явно выражен на частоте 93 МГц, а относительная величина пика по сравнению с минимумом в области точки Кюри для частоты 93 МГц существенно больше.

На рис. 5 представлена зависимость резонансной частоты колебательного контура и напряжения на нем с кристаллом, ориентированным гексагональной осью  $\vec{c}$  вдоль переменного поля в постоянном магнитном поле напряженностью 0,4 кОе, приложенном вдоль оси  $\vec{c}$ . Гексагональная ось  $\vec{c}$  совпадает с направлением

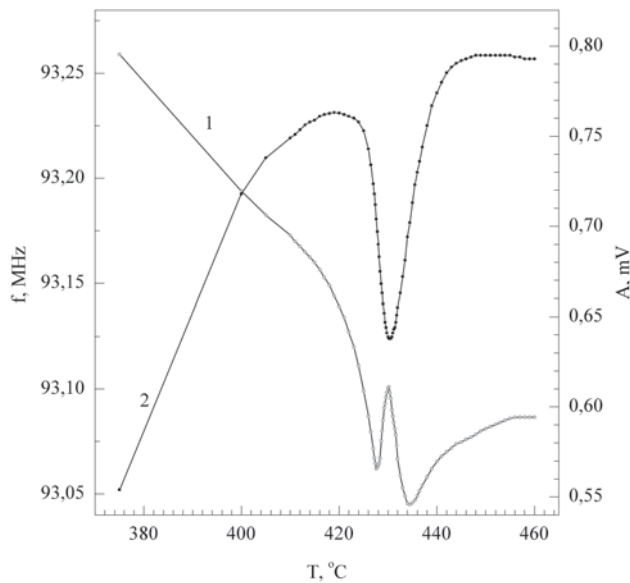


Рис. 5. Температурная зависимость резонансной частоты (1) колебательного контура и напряжения на контуре (2) с монокристаллическим образцом  $PbFe_{12}O_{19}$  в постоянном магнитном поле напряженностью 0,4 кОе. Направление легкого намагничивания образца параллельно оси катушки контура и внешнему постоянному полю.

легкого намагничивания. Поэтому образец сферической формы перейдет в однодоменное состояние при намагниченности 98 Г. Такое значение намагниченности кристалл будет иметь при температуре на 50 °С ниже точки Кюри [6]. Сопоставление рис. 1, 3 и 5 показывает, что в магнитном поле 0,4 кОе все особенности поведения  $\chi'$  и в районе точки Кюри сохраняются. Механизм роста  $\tau$  при  $T \rightarrow T_C$  не связан с наличием или отсутствием доменной структуры.

На рис. 6 представлена зависимость резонансной частоты колебательного контура с образцом, ориентированным гексагональной осью с перпендикулярно переменному магнитному полю в интервале температуры 375–460 °С. Как следует из рисунка эта зависимость не имеет резонансных особенностей, а при температуре Кюри наблюдается сингулярное поведение, характерное для фазового перехода из магнитоупорядоченного состояния в

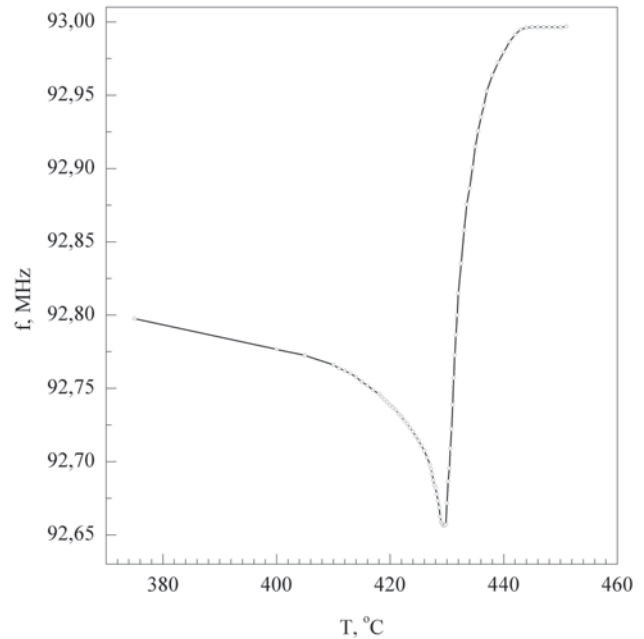


Рис. 6. Температурная зависимость резонансной частоты колебательного контура с монокристаллическим образцом  $PbFe_{12}O_{19}$  в окрестности частоты 93 МГц. Направление легкого намагничивания образца перпендикулярно оси катушки контура.

парамагнитное.

Из приведенных результатов следует, что релаксационный резонанс удается наблюдать только при ориентации радиочастотного поля вдоль гексагональной оси  $\vec{c}$ , которая совпадает с направлением легкого намагничивания.

### Заключение

Из проведенного рассмотрения следует, что наблюдаемые особенности поведения динамической магнитной восприимчивости в области температуры Кюри следует интерпретировать как следствие релаксационного резонанса по следующим причинам:

– аномальное уменьшение  $\chi''$  в области фазового перехода наблюдается в узком температурном интервале  $\cong 4^\circ\text{C}$ , который значительно меньше температурной области критической динамики спиновой подсистемы  $\cong 30^\circ\text{C}$ ;

– в температурной области аномального уменьшения  $\chi'$  величина  $\chi''$  имеет максимальное значение;

– в магнитном поле 0,4 кОе, приложенном в направлении легкого намагничивания, сохраняются наблюдаемые в отсутствие магнитного поля особенности поведения  $\chi'$  и  $\chi''$  при фазовом переходе.

1. Л.Д. Ландау. ЖЭТФ, 7, 627 (1937).
2. А.П. Леванюк. ЖЭТФ, 36, 810 (1959).
3. В.А. Гинзбург. ФТТ, 2, 2031 (1960).
4. Л.Д. Ландау, Н.М. Халатников. ДАН СССР, 96, 469 (1954).
5. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров, редкол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. М.: Сов. энциклопедия (1984). С. 633.
6. Pauthenet R., Rimet G. G. r. Acad. Sci., 294, 19, 1875 (1959).
7. Белов К.П. Магнитные превращения. Государственное издательство физико-математической литературы, М. (1959) 260 с.