

УДК 537.638.214

PACS: 75.40.Gb

Особенности динамической магнитной восприимчивости $BaFe_{12}O_{19}$ при фазовом переходе

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

anatoliy.a.bezlyepkin@univer.kharkov.ua

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Изучены температурные особенности поведения динамической магнитной восприимчивости в различных кристаллографических направлениях гексаферрита $BaFe_{12}O_{19}$ при фазовом переходе ферримагнетик–парамагнетик. Показано, что отклик спиновой системы в области фазового перехода на внешнее магнитное поле существенно различен для доменов и доменных границ. При ориентации магнитного поля в направлении трудного намагничивания в области точки Кюри наблюдается максимум действительной части магнитной восприимчивости сингулярного вида. При ориентации магнитного поля в направлении легкого намагничивания в области точки Кюри имеет место широкий максимум действительной части магнитной восприимчивости и пикообразное ее уменьшение непосредственно в точке Кюри с шириной пика примерно 6 К.

Ключевые слова: гексаферрит, динамическая восприимчивость, фазовый переход.

Вивчені температурні особливості поведінки динамічної магнітної сприйнятливості в різних кристаллографічних напрямках гексафериту $BaFe_{12}O_{19}$ при фазовому переході ферримагнетик–парамагнетик. Показано, що відгук спигової системи в області фазового переходу на зовнішнє магнітне поле суттєво різний для доменів та доменних меж. В напрямку трудного намагнічування в області точки Кюрі спостерігається максимум дійсної частини магнітної сприйнятливості сингулярного виду. При орієнтації магнітного поля в напрямку легкого намагнічування в області точки Кюрі має місце широкий максимум дійсної частини магнітної сприйнятливості та пікоподібне її зменшення безпосередньо в точці Кюрі з шириною піка приблизно 6 К.

Ключові слова: гексаферит, динамічна сприйнятливість, фазовий перехід.

Temperature features of the behavior of dynamic magnetic susceptibility in various crystallographic directions of $BaFe_{12}O_{19}$ hexaferrite are studied at ferrimagnetic-paramagnetic phase transition. It is shown that the response of spin system to an external magnetic field in the vicinity of phase transition is essentially different for domains and domain boundaries. In the direction of hard magnetization near the Curie point the maximum of a singular type is observed for the real part of magnetic susceptibility. At magnetic field orientation in the direction of easy magnetization near the Curie point the wide maximum of the real part of magnetic susceptibility and its pinnaled reduction takes place at exactly Curie point with peak width of approximately 6 K.

Keywords: hexaferrit, dynamic susceptibility, phase transition.

Введение

Для определения температуры Кюри в магнитоупорядоченных веществах часто используют экспериментальные данные температурной зависимости динамической магнитной восприимчивости. Сингулярное поведение магнитной восприимчивости в магнитных полях меньше поля анизотропии и размагничивающих полей позволяет надежно фиксировать переход из магнитоупорядоченного в парамагнитное состояние [1, 2]. Качественно поведение магнитной восприимчивости вблизи фазового перехода может быть описано в рамках теории самосогласованного поля. Непосредственно в области перехода поведение параметра порядка – намагниченности и ее производной по магнитному полю – магнитной восприимчивости

является следствием флуктуаций самого параметра порядка. По мере роста критических флуктуаций их динамика изменяется и в области перехода носит релаксационный характер [3, 4]. Следует ожидать, что в одноосных высокоанизотропных магнитных кристаллах релаксационные процессы в доменах и в доменных границах будут происходить по-разному вследствие разной ориентации локальной намагниченности относительно направления легкого намагничивания. В высокоанизотропном феррите $BaFe_{12}O_{19}$ (BaM), задавая ориентацию переменного магнитного поля, можно фиксировать магнитную восприимчивость, обусловленную процессами вращения намагниченности в доменах, и восприимчивость, обусловленную процессами смещения доменных границ.

В настоящей работе изучены температурные

особенности поведения динамической магнитной восприимчивости при ориентации переменного магнитного поля в различных кристаллографических направлениях гексаферрита ВаМ при фазовом переходе ферромагнетик-парамагнетик.

Образцы и методика измерений

В качестве образцов использовались монокристаллы гексаферрита ВаМ, выращенные методом раствора в расплаве флюса $BaO \times B_2O_3$. Кристаллизация производилась на вращающуюся затравку в интервале температуры 1420–1300 К. Фазовый состав кристаллов контролировался рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки при комнатной температуре: $a=0,589$ нм, $c=2,319$ нм. Образцы имели геометрические размеры ~6 мм в базисной плоскости и ~5 мм вдоль гексагональной оси с.

Действительная часть комплексной магнитной восприимчивости исследуемых образцов определялась по изменению резонансной частоты LC-контура, в катушку индуктивности которого помещался кристалл, ориентированный определенным образом относительно переменного радиочастотного поля. Точность определения резонансной частоты контура составляла 1 кГц. Для определения характеристик контура использовался анализатор спектра СК4-59. Катушка индуктивности из платиновой проволоки с образцом помещалась в электрическую печь, питание которой осуществлялось постоянным током, стабилизируемым на задаваемом уровне не хуже 0,01%. Нагреватель печи наматывался бифилярно на медную трубку, которая обеспечивала однородность температуры в рабочем пространстве печи. Температура определялась по термоэдс дифференциальной платино-платинородиевой термопары, рабочий спай которой имел непосредственный тепловой контакт с образцом.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 (кривая 1) приведена зависимость собственной частоты LC-контура с кристаллом феррита ВаМ, ориентированным направлением трудного намагничивания вдоль оси катушки индуктивности, от температуры в интервале 340–470 С. Намагничивание образца в этом случае происходит вследствие поворота вектора намагниченности в доменах под действием магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности. Изменение действительной части магнитной восприимчивости образца $\Delta\chi'$ с изменением температуры и вызванное им изменение частоты контура Δf , связаны соотношением

$$\Delta\chi' = Bf^{-3}\Delta f, \quad (1)$$

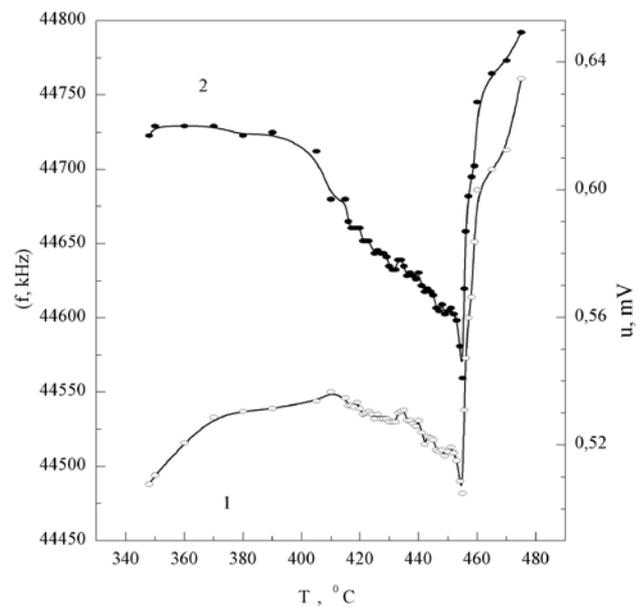


Рис. 1. Температурные зависимости собственной частоты(1)и напряжения(2)на LC-контуре с образцом ВаМ, ориентированным направлением легкого намагничивания перпендикулярно переменному магнитному полю катушки индуктивности контура.

где B – величина, зависящая от параметров контура;

f – собственная резонансная частота LC-контура.

Температура Кюри исследуемых образцов, равная $T_c=(451\pm 1)$ С. При $T>T_c$ величины χ , $\Delta\chi$ и Δf можно приближенно считать равными нулю. Учитывая это, с помощью соотношения (1) была рассчитана зависимость $\chi'(T)$ в интервале 340–470 С. Изменения

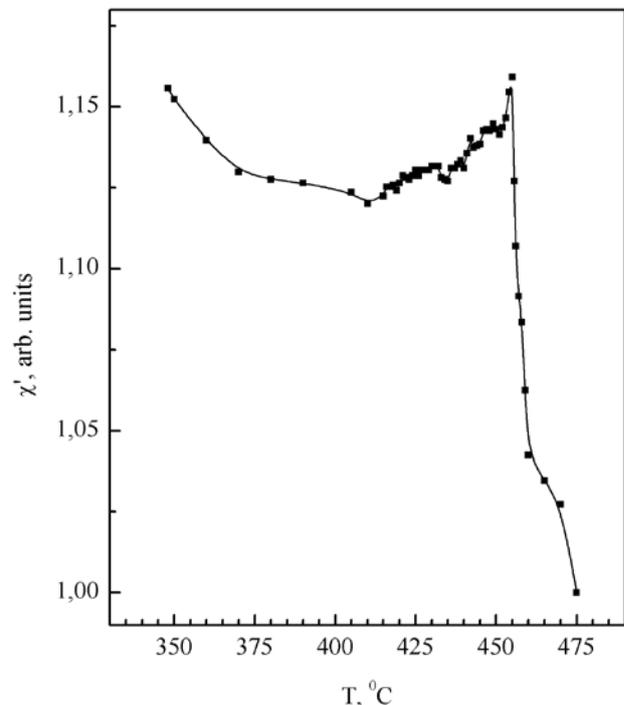


Рис. 2. Температурная зависимость магнитной восприимчивости χ' образца феррита ВаМ в направлении трудного намагничивания.

резонансной частоты контура без образца в этом же интервале температуры были незначительны, что позволило при расчетах χ' считать величину B не зависящей от температуры.

На рис. 2 приведена рассчитанная зависимость χ' от температуры в относительных единицах. Как следует из рисунка, при температуре Кюри $T_c=451$ С имеет место сингулярное поведение действительной части магнитной восприимчивости, характерное для фазового перехода ферромагнетик–парамагнетик.

Информацию о диссипативных процессах при взаимодействии переменного магнитного поля со спиновой подсистемой может дать изучение температурной зависимости мнимой части магнитной восприимчивости χ'' . Изменение χ'' должно приводить к изменению добротности контура и, соответственно, изменению напряжения на нем. На рис. 1, кривая 2, представлена зависимость напряжения u на LC-контуре в интервале температур 340–470 С. Как видно на рисунке, в области фазового перехода имеет место резкое уменьшение напряжения на контуре, что свидетельствует об уменьшении добротности контура и резком росте мнимой составляющей магнитной восприимчивости χ'' . Как следует из рис. 1, при геометрии опыта, когда переменное магнитное поле перпендикулярно направлению легкого намагничивания в области перехода ферромагнетик–парамагнетик χ' и χ'' достигают максимальных значений. На рис. 3, кривая 1, приведена зависимость резонансной частоты контура f при ориентации

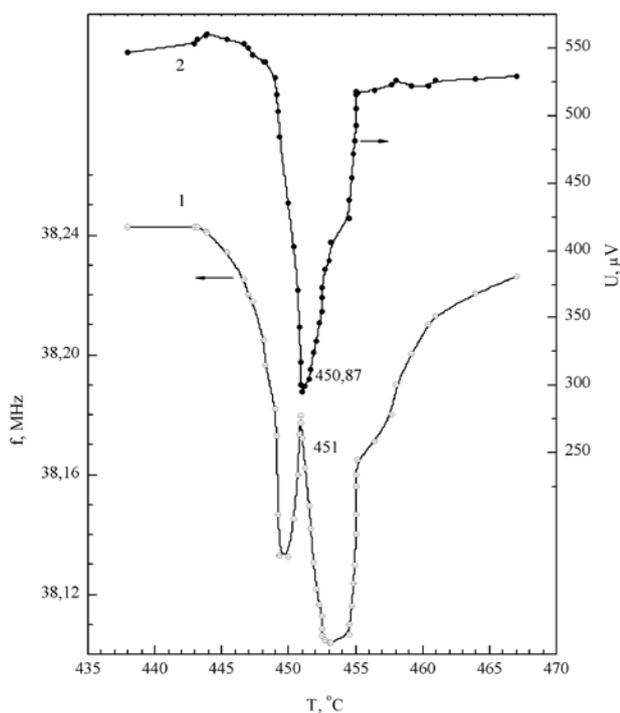


Рис. 3. Температурные зависимости собственной частоты (1) и напряжения (2) на LC-контуре с образцом ВаМ, ориентированным направлением легкого намагничивания параллельно переменному магнитному полю катушки индуктивности контура.

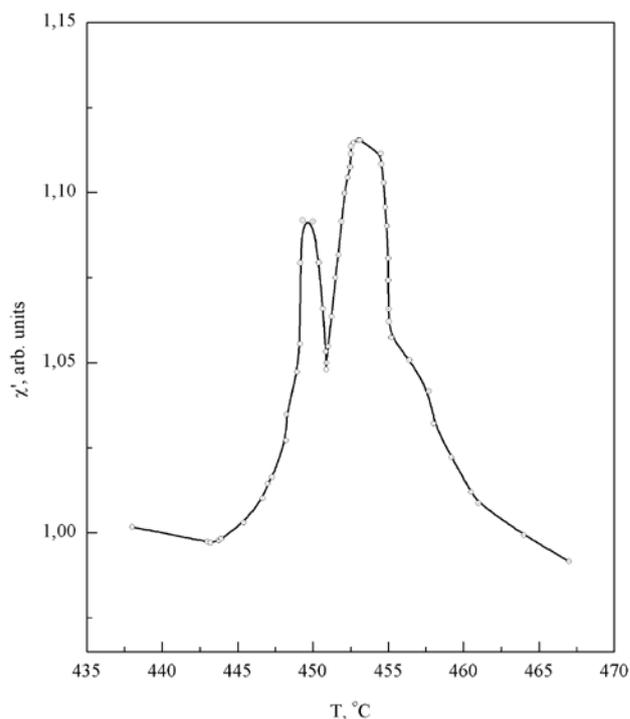
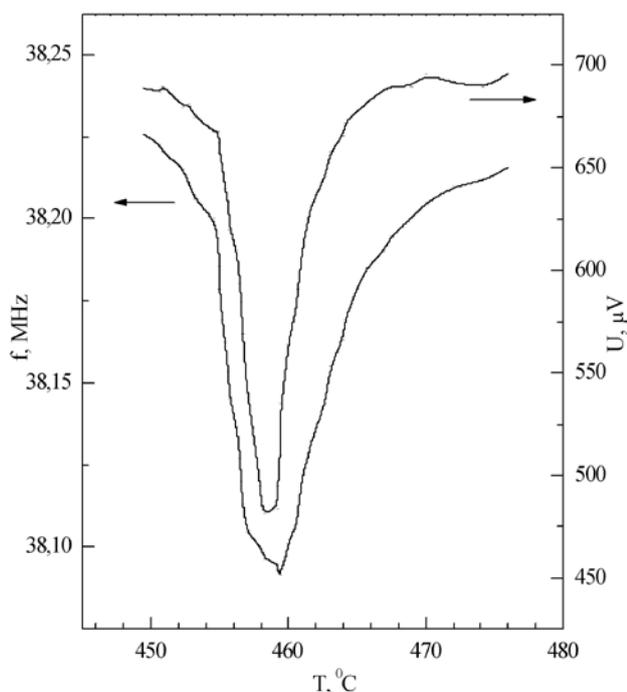


Рис. 4. Температурная зависимость магнитной восприимчивости χ' образца феррита ВаМ в направлении легкого намагничивания.

образца осью с (направление легкого намагничивания) в направлении магнитного поля катушки. Исходя из того, что в парамагнитной области при $T > T_c$, например 470 °С, χ , $\Delta\chi$ и Δf можно приближенно считать равными нулю, с помощью соотношения (1) была рассчитана зависимость $\chi'(T)$. Температурная зависимость χ' в относительных единицах в интервале 435–470 °С представлена на рис. 4. Как видно на рисунке, в области температуры Кюри в интервале 445–460 °С имеет место максимум восприимчивости, а непосредственно в точке Кюри $T_c=451$ °С наблюдается её пикообразное уменьшение, занимающее интервал примерно 6 °С.

На рис. 3, кривая 2, представлена зависимость резонансного напряжения U на LC-контуре при ориентации переменного поля вдоль гексагональной оси с. В интервале температур 445–455 °С наблюдается уменьшение напряжения, что свидетельствует о росте мнимой части магнитной восприимчивости, причем в области точки Кюри этот рост имеет форму пика. Рассмотренные особенности поведения χ' и χ'' в области температуры Кюри при направлении переменного поля параллельно оси с исчезали при наложении постоянного магнитного поля в том же направлении. На рис. 5 представлены зависимости резонансной частоты контура и напряжения на нем в магнитном поле 300 Э в интервале температур 450–470 °С. Как следует из рисунков, при $H=300$ Э в области температуры Кюри пикообразное уменьшение χ' не наблюдаются.

При ориентации намагничивающего поля в направлении легкого намагничивания изменение намагниченности образца происходит путем смещения



1. И.К. Камилов, Х.К. Алиев. УФН, 140, в. 4, 640 (1983).
2. К.М. Голант, В.Е. Махоткин, В.Г. Веселаго. ФТТ. 17, в. 8, 2279 (1975).
3. Л.Д.Ландау, Н.М. Халатников. ДАН СССР, 96, в. 11, 469 (1954).
4. В.Л. Покровский. УФН, 179, в. 11, 1237 (2009).

Рис. 5. Температурные зависимости резонансной частоты контура f и напряжения u на нем с образцом феррита ВаМ в постоянном магнитном поле 300 Э, приложенном в направлении легкого намагничивания.

доменных границ и рассмотренные особенности, по-видимому, обусловлены специфическим взаимодействием высокочастотного переменного поля со спиновой системой доменных границ в области фазового перехода ферромагнетик–парамагнетик.

Из приведенных результатов следует, что отклик спиновой системы в области фазового перехода на приложенное внешнее поле в доменах и в доменных стенках существенно различается. Как известно [3, 4], при приближении к критической точке наиболее существенным фактором становится симметрия системы и как она редуцируется в результате перехода. Исходная симметрия параметра порядка – намагниченности – в доменах и блоховских доменных границах исследуемого феррита ВаМ существенно различна и это может быть основным фактором, определяющим отличие в поведении χ' в направлении легкого или трудного намагничивания в критической точке при фазовом переходе ферромагнетик–парамагнетик.

Из приведенных на рис. 4 и 5 результатов следует, что для восприимчивости, связанной со спиновой системой доменных границ, в критической точке имеет место резкое уменьшение χ' и резкий рост χ'' . Это обстоятельство указывает на то, что в рассматриваемом случае механизм поглощения переменного поля может быть аналогичен механизму поглощения при критической опалесценции в жидкостях.