

О ФОРМЕ ЛИНИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА
В ФЕРРИТАХ-ГРАНАТАХ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ

С. А. МНАЦАКАНЯН

Рассчитана форма линии ферромагнитного резонанса (ФМР) вблизи температуры Кюри. Проведено измерение температурной зависимости параметров линии ФМР ряда ферритов-гранатов в интервале температур в окрестности температуры Кюри. Получено хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов.

Форма линии ФМР, определяемая зависимостью мнимой части магнитной восприимчивости χ'' от частоты, имеет вид [1]

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\omega \omega_2 (\omega_{\text{рез}}^2 + \omega^2)}{(\omega_{\text{рез}}^2 - \omega)^2 + 4\omega^2 \omega_2^2}, \quad (1)$$

где χ_0 — статическая восприимчивость, $\omega = \gamma H$, $\omega_2 = \alpha \gamma H_0$, $\omega_{\text{рез}}^2 = \gamma^2 H_0^2 + \alpha^2 \gamma^2 H_0^2$, H — внешнее поле, H_0 — резонансное поле, α — параметр затухания в уравнении Ландау—Лифшица и γ — магнитомеханическое отношение. Для удобства сравнения с экспериментальными данными запишем χ в функции магнитного поля. После небольших преобразований с учетом малости α имеем

$$\frac{\chi''}{\chi_0} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\alpha} - z \right)}{z^2 + 1}, \quad (2)$$

$$\text{где } z = \frac{H_0 - H}{\Delta H}, \quad \alpha = \frac{\Delta H}{H_0}.$$

Из (2) следует, что при малых α , когда величиной z можно пренебречь по сравнению с $1/\alpha$, форма линии должна быть лоренцевой. Так например, при $\alpha < 0,005$ относительное отклонение χ'' от лоренцевого закона не превышает двух процентов во всем интервале магнитных полей, где еще возможно наблюдение резонансного поглощения ($|z| < 4$). При больших значениях α кривая зависимости χ от магнитного поля имеет асимметричный вид с более крутым подъемом при $H < H_0$ и более пологим спадом при $H > H_0$. Однако анализ экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, и результаты работы [2] показывают, что вблизи температуры Кюри кривые резонансного поглощения монокристаллических образцов ферритов-гранатов с разными ΔH симметричны и в центре имеют лоренцевый вид, а на крыльях приобретают гауссовый характер.

В настоящей работе приводятся данные по экспериментальному исследованию температурной зависимости параметров формы линии ФМР ферритов-гранатов и делается попытка рассчитать форму линии

ФМР и зависимость ее параметров от температуры вблизи точки Кюри (θ).

Т е о р и я

В области температур, близких к точке Кюри, где происходит резкое уменьшение магнитного момента образца, т. е. происходит разрушение дальнего магнитного порядка, существенен учет порядка на близких расстояниях и явлений, связанных с наличием ближнего порядка. Учет ближнего порядка еще важен и потому, что основные силы, обуславливающие ферромагнетизм—обменные силы—являются силами, действующими на близких расстояниях. В самой точке Кюри, когда дальний порядок исчезает, ближний порядок имеет конечное значение и выше точки Кюри происходит медленный спад этого порядка.

При рассмотрении ФМР в ферритах-гранатах можно выделить два процесса, определяющих форму и ширину линии поглощения [3]—когерентный процесс, при котором полный магнитный момент железной подрешетки релаксирует без изменения величины самого момента, и флуктуационный, при котором происходят локальные опрокидывания спинов ионов железной подрешетки. Вблизи температуры Кюри доминирующим является второй процесс. Попытаемся провести феноменологический учет влияния разрушения дальнего магнитного порядка и явлений, связанных с наличием ближнего порядка, на линию ФМР вблизи температуры Кюри.

В ферромагнитном образце, благодаря наличию обменного взаимодействия, спины ориентированные в направлении общего магнитного момента и в противоположную сторону распределены не случайным образом, а так, чтобы среднее число антипараллельных соседств не превышало некоторого числа p [4], то есть происходит как бы „слипание“ спинов в отдельные области или рои параллельных спинов. Экспериментальное доказательство наличия таких областей в ферромагнетиках было получено из опытов по дифракции нейтронов [5].

Представим магнитный момент единицы объема образца M как сумму магнитных моментов M_i отдельных областей с радиусом r и будем рассматривать движение системы магнитных моментов M_i во внешнем магнитном поле H с учетом взаимодействий между областями. На оценке величины r и ее зависимости от температуры остановимся несколько позднее.

Для M_i имеем следующее уравнение движения

$$\frac{dM_i}{dt} = -\gamma [M_i H_i], \quad (3)$$

где $H_i = H + \delta H_i$, δH_i —локальное магнитное поле, создаваемое в месте расположения магнитного момента M_i соседними областями δH_i ,—обязано своим происхождением магнитному диполь-дипольному взаимодействию. При равенстве магнитных моментов отдельных обла-

стей и их симметричном расположении результирующее поле, создаваемое соседними областями, равно нулю. δH_i отлично от нуля при отклонениях магнитных моментов соседей от своего среднего значения и пропорционально этому отклонению, т. е. δH_i пропорционально флуктуациям магнитного момента и его учет особенно важен в области температур, близких к θ , когда эти флуктуации резко растут. Наличие магнитной кристаллографической анизотропии, эффектами размагничивания и др. пренебрегаем. Можно предположить, что распределение случайной величины δH_i носит гауссовый характер.

Из (3) следует, что при отсутствии взаимодействия между различными M_i резонансная кривая должна представлять собой гауссовую линию с шириной, равной $\sqrt{\langle \Delta M^2 \rangle}$, где $\langle \Delta M^2 \rangle$ — среднеквадратичное значение флуктуаций магнитного момента. Но наличие обменного взаимодействия между отдельными спинами, находящимися на поверхностях областей M_i в месте их соприкосновения, приводит к случайному прерыванию прецессии момента M_i с частотой ω_m . Поскольку только часть спинов, пропорциональная $1/r^3$, принимает эффективное участие в модуляции прецессионного движения магнитных моментов, частота ω_m пропорциональна $\frac{J/\hbar}{r^3}$, где r — радиус областей

в атомных единицах, а $J/\hbar$ — частота обменного взаимодействия между соседними спинами. Такая модуляция приводит к сужению линии ФМР всей системы и изменению формы линии.

Андерсон и Вейсс [6] рассчитали форму линии парамагнитного резонанса при случайной модуляции прецессии парамагнитного спина обменным взаимодействием. Задача определения формы линии ФМР вблизи θ в нашей модели сводится к задаче, решенной в работе [6]. Не повторяя расчетов этой работы, воспользуемся ее выводами, и для формы линии ФМР, для удобства сравнения с экспериментом записанной в функции магнитного поля, имеем

$$J(H) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta H_n}{(H - H_0) + \Delta H_n^2}, \text{ если } |H - H_0| < H_m \quad (4)$$

и

$$J(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta H_n} \cdot e^{-\frac{(H - H_0)^2}{2\Delta H_n^2}}, \text{ если } |H - H_0| > H_m, \quad (5)$$

где $\Delta H_n = \frac{\Delta \omega_\phi^2}{\gamma \omega_m} = \frac{\Delta H_\phi^2}{H_m}$ — ширина лоренцевой части кривой ФМР, $\Delta H_n \equiv \Delta H_\phi \equiv \gamma \Delta \omega$ — флуктуационная ширина или ширина гауссовой части кривой ФМР, $H_m = \frac{\omega_m}{\gamma}$.

Таким образом, видим, что линия ФМР вблизи температуры Кюри в центре (при $|H - H_0| < H_m$) имеет лоренцевый характер с шириной линии ΔH_n , а на крыльях — в полях, отличающихся от резонан-

сного на величину, превышающую H_m — приобретает гауссовую форму с шириной, равной ΔH_r .

Определим температурные зависимости параметров ΔH_d , ΔH_r и H_m вблизи температуры Кюри.

Скроцким и Курбатовым [7] была построена простая статистико-термодинамическая теория влияния тепловых флуктуаций дальнего магнитного порядка на ширину линии ФМР. Из этой теории [8] была получена зависимость флуктуационной ширины линии ΔH_f , которая в нашем случае тождественна ΔH_r , от температуры

$$\Delta H_r = \frac{A}{(\theta - T)^{1/2}}, \quad (6)$$

где A — постоянная, зависящая от параметров образца, θ — температура Кюри и T — температура в $^{\circ}\text{K}$.

Как было указано выше, $\omega_m \sim \frac{J\hbar}{r^3}$ и для H_m имеем

$$H_m = \frac{B}{r^3}, \quad (7)$$

где r — средний радиус областей в атомных единицах.

Для ΔH_d из (4) получаем

$$\Delta H_d = \frac{Kr^3}{\theta - T}. \quad (8)$$

Задача сводится к нахождению зависимости r от температуры. Для оценки r следует рассмотреть поведение ближнего магнитного порядка вблизи температуры Кюри, иными словами, определить распределение спинов, направленных противоположно общему магнитному моменту образца. Задача с учетом ближнего порядка решается точно только для одномерной цепочки спинов. Для трехмерного случая задача сильно усложняется и ряд приближенных методов позволяет получить некоторые результаты для частных случаев. Для определения r мы обратимся к наиболее изящному решению этой проблемы — квазихимическому методу, который подробно рассмотрен в работах [4, 9]. Идея квазихимического метода заключается в том, что процесс изменения ориентации отдельного спина рассматривается как химическая реакция между парой спинов, направленных в одну сторону, и парой спинов, направленных в противоположную сторону. Используя закон действующих масс, для средне-статистического числа антипараллельных соседств спинов p получается следующее выражение

$$p = \frac{Nz}{2} \frac{1 - I^2}{\sqrt{1 + (1 - I^2) \left(4e^{\frac{4J}{kT}} - 1 \right) - 1}}, \quad (9)$$

где N — полное число спинов, z — число ближайших соседств, I — намагниченность образца и J — обменный параметр.

Полагая, что все спины, ориентированные в направлении результирующего момента образца, входят в состав областей, а границы этих областей включают все антипараллельные соседства, получаем

$$r = \frac{\sqrt{1 + (1 - I^2) \left(4e^{\frac{4J}{kT}} - 1 \right)} - 1}{2(1 - I)}. \quad (10)$$

Для ферритов-гранатов в качестве параметра J бралась эффективная обменная энергия, определяющая температуру Кюри. На рис. 1 приведен график зависимости r от приведенной температуры

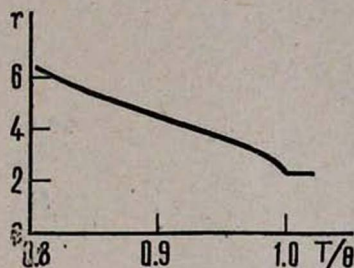


Рис. 1. Зависимость среднего радиуса областей r от приведенной температуры.

Образцы и методика измерений

В настоящей работе было проведено подробное исследование температурной зависимости параметров линии ФМР вблизи температуры Кюри феррита-граната иттрия ($Y_3Fe_5O_{12}$), гадолиния ($Gd_3Fe_5O_{12}$) и ферритов-гранатов иттрия с малыми присадками ионов Tb (0,1 ат%), Er (1,0 и 5,0 ат%) и Sm (0,5; 1,0 и 3,5 ат%).

Измерения проводились на спектрометрах типа РЭ 1301 и ЭПА-2М, на которых снималась зависимость первой производной линии поглощения от приложенного магнитного поля.

Были изготовлены сферические образцы из ферритов-гранатов вышеперечисленных составов диаметром 0,3–0,5 мм. Образцы шлифовались в воздушной камере на шкурках с различными размерами зерен и полировались микронным порошком. Нагревание образцов (до 500°C) осуществлялось при помощи потока горячего воздуха. Точность измерения температуры образца была не хуже $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Для анализа формы линии был использован метод построения линейных анамарфоз по экспериментальным данным, разработанный для анализа одиночных симметричных линий электронного парамагнитного резонанса [10].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Анализ формы линии ФМР при температурах ниже θ показал, что резонансная линия монокристаллических образцов вышеприведен-

ных составов симметрична и в центре имеет лоренцевый вид, а на крыльях приобретает гауссовый характер.

На рис. 2 дана картина линейных анаморфоз линии ФМР монокристаллического образца $Y_3Fe_5O_{12}$ при температуре 276°C . Как видно из этого рисунка, при $|H-H_0| < 7$ э, т. е. в своей центральной части, линия ФМР имеет лоренцевый вид, а при $|H-H_0| > 7$ э характер поглощения ближе к гауссовой форме.

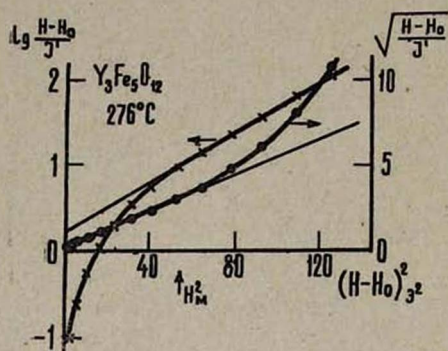


Рис. 2. Линейные анаморфозы линии ФМР иттриевого феррита-граната при температуре 276°C .

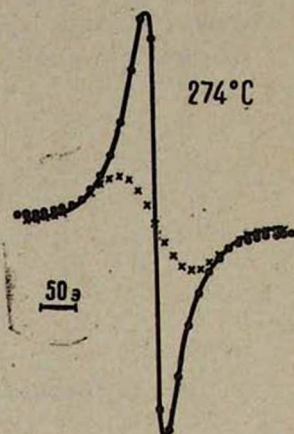


Рис. 3. Производная линии поглощения феррита-граната иттрия с присадкой 0,1 ат % Tb при температуре 274°C . Сплошная линия—эксперимент, $\circ$ — лоренцевая кривая, $\times$ гауссовая кривая.

На рис. 3 изображена экспериментально полученная зависимость первой производной поглощения от поля (сплошная линия) феррита-граната иттрия с присадкой 0,1 ат % тербия. На том же рисунке темными кружочками нанесены точки, соответствующие лоренцевой кривой, а крестиками — гауссовой.

Аналогичная форма линии ФМР наблюдалась и для всех исследованных образцов.

Нами были проведены подробные исследования температурной зависимости параметров ΔH_L , ΔH_T и H_M всех образцов вышеперечисленных составов (по 3–5 образцов каждого состава).

На рисунках 4 и 5 приведены графики зависимости ΔH_L и ΔH_T ферритов-гранатов иттрия и гадолиния от функций $r^3/1 - \frac{T}{\theta}$ и $(1 - \frac{T}{\theta})^{-1}$ соответственно. Линейность этих зависимостей показывает хорошее соответствие экспериментально полученных зависимостей ΔH_L и ΔH_T формулам (8) и (6). На рис. 5 крестиками нанесены значения ΔH_L в функции $(1 - \frac{T}{\theta})^{-1/2}$. Видно, что в непосредственной близости к θ , эта функция достаточно хорошо описывает экспериментально полученную зависимость ΔH_L от температуры. Расхождение начинается с темпе-

ратур, отличающихся от θ примерно на 30°C . Такое совпадение позволило авторам работы [11] отождествить ширину линии ФМР вблизи θ с флуктуационной шириной. (Обычно приводимые значения ширины

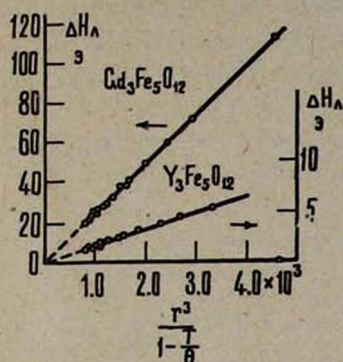


Рис. 4. Характер температурной зависимости ΔH_L .

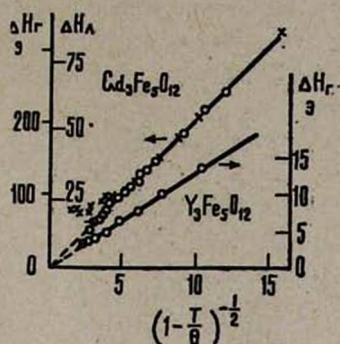


Рис. 5. Характер температурной зависимости ΔH_T ферритов-гранатов иттрия и гадолиния. $\times$ — ΔH_L гадолиниевого граната в зависимости от $\left(1 - \frac{T}{\theta}\right)^{-1/2}$ в относительных единицах.

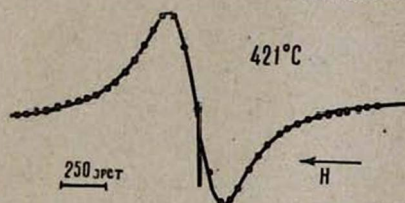


Рис. 6. Производная линии поглощения феррита-граната иттрия с присадкой 0,1 ат % Тб при температуре 421°C . Точки соответствуют лоренцевой кривой.

линии ФМР, измеренные на полувысоте, связаны с ΔH_L простым соотношением — $\Delta H_{1/2} = 2\Delta H_L$). В соответствии с моделью, предложенной для объяснения результатов работы [11], форма линии ФМР должна была бы быть близкой к гауссовой [7]. Однако в наших экспериментах ни при каких температурах линия ФМР не имела гауссового вида. Более того, по мере приближения к θ гауссовый участок на линии ФМР становится менее заметным и при $T = \theta$ и выше резонансная линия имела лоренцевый вид, как это видно из рис. 6, на котором приведена линия резонансного поглощения иттриевого феррита-граната с присадкой 0,1 ат % Тб при температуре выше θ (сравни с рис. 3).

В рамках модели, предложенной в данной работе, такое поведение формы резонансной линии находит объяснение. По мере приближения к θ происходит резкий рост H_m , т. е. переход к гауссовой линии происходит в полях, очень далеких от резонансного. А при θ и выше такой переход должен происходить в полях, отличающихся от

H_0 на величину порядка обменных полей ($\sim 10^5$ эрстед), что практически обнаружить невозможно. Поэтому резонансная линия при θ и выше имеет лоренцевый вид.

По мере приближения к θ имеет место резкое возрастание параметров ΔH_L , ΔH_T и H_M всех исследованных образцов. Рост ΔH_L начинается позже и сама величина ΔH_L значительно меньше флуктуационной ширины.

Рассматривая связь ΔH_L и ΔH_T видим, что уменьшение связано с наличием взаимодействия H_M , которое фактически приводит к частичному подавлению флуктуаций магнитного момента.

В заключение автор выражает благодарность А. О. Меликяну и Э. Г. Шарояну за полезные обсуждения и замечания.

Институт физических исследований
АН АрмССР

Поступила 29.IX.1971

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. Г. Гуревич, Ферриты на сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1960.
2. И. А. Дерюгин, В. В. Запорожец, П. С. Куз, Исследование энергетического спектра электронов в металлах. Сборник Наукова думка. Киев, 1965.
3. P.-G de Gennes, C. Kittel, A. M. Portis, Phys. Rev., 116, 323 (1959).
4. С. В. Вонсовский Магнетизм. М., 1971.
5. Б. Авербах, В сборнике Магнитные свойства металлов и сплавов, ИЛ, М., 1961.
6. P. W. Anderson and P. R. Weiss, Reviews of Mod. Phys., 25, 269 (1953).
7. Г. В. Скроцкий, Л. В. Курбатов, ФММ, 10, 335 (1960).
8. Мэнь Сянь-Чжень, Л. А. Давыдов, ФТТ, 5, 2627 (1963).
9. К. П. Белов, Магнитные превращения, М., 1959.
10. Н. Н. Тихомирова, В. В. Воеводский, Оптика и спектроскопия, 7, 829 (1959).
11. А. Г. Гуревич, П. Е. Губнер, А. Г. Титова, ФТТ, 3, 19 (1961).

ՖԵՐՐԻՄԱԳՆԵՏԻՍԱԿԱՆ ՌԵԶՈՆԱՆՍԻ ԿՈՐԻ ԶԵՎԸ ՖԵՐԻՏ-ԳՐԱՆԱՏՆԵՐՈՒՄ ԿՅՈՒՐԻԻ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՄՈՏԱԿԱՅՔՈՒՄ

Ս. Ա. ՄՆԱԿԱՆՅԱՆ

Հաշվարկվել է ֆերրոմագնիսական (ՖՄՐ) կորի ձևը Կյուրիի շերմաստիճանի մոտակայքում: Զափվել է կորի ձևի պարամետրերի շերմաստիճանային կախվածությունը Կյուրիի շերմաստիճանի շրջակայքում մի շարք ֆերիտ-գրանատների համար: Ստացվել է փորձնական և տեսական արդյունքների լավ համընկնում:

THE LINE SHAPE OF THE FERROMAGNETIC RESONANCE IN THE FERRIT-GARNETS NEAR BY THE CURIE TEMPERATURE

S. A. MNACAKANIAN

The ferromagnetic resonance (FMR) line shape near by the Curie temperature is calculated. The temperature dependence of the FMR line parameters of ferrite-garnets is measured in the temperature interval in the vicinity of the Curie temperature. The good accordance of experimental and theoretical results is obtained.