

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. А. ГАЛКИНА

УДК 537.6; 538.22

НЕПОЧАТЫХ Юрий Ильич

**РОЛЬ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ
В ДИНАМИКЕ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ**

01. 04. 11 –магнетизм

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Донецк – 2001

Диссертация представляет собой рукопись
Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте
имени А.А. Галкина НАН Украины

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Даньшин Н.К.
ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член-кор. НАН Украины, профессор
Харченко Н.Ф.
ФТИНТ им. Б.И. Веркина НАН Украины, г. Харьков,
заведующий отделом

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Тарасенко С.В.
ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация – Донецкий национальный университет, физический
факультет, кафедра радиофизики, Министерство образования и науки,
г. Донецк.

Защита состоится « 22 » 11 2001 г. в 14 часов на заседании
специализированного ученого совета Д 11.184.01 в ДонФТИ им. А.А. Галкина
НАН Украины: 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72.

Автореферат разослан « 18 » 10 2001г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета Д 11.184.01
доктор физико-математических наук

Криворучко В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение магнитных ориентационных переходов перспективно как для дальнейших исследований в теории магнетизма и фазовых переходов, так и для использования в технике, и в частности, электронике [1]. Взаимодействие высокочастотной энергии с веществом и управление параметрами такого взаимодействия магнитным полем и температурой имеют большой научный и практический интерес. В окрестности фазовых переходов вещество, его элементарные возбуждения и их взаимодействие в наибольшей мере чувствительны к изменению внешних условий, используемых как управляющие воздействия. Это делает возможным изучение все более тонких свойств вещества и явлений, а затем и их практическое применение.

Редкоземельные ортоферриты (РЗОФ) относятся к слабым ферромагнетикам. Наличие в них двух магнитных подсистем с существенно различными свойствами — железной и редкоземельной (РЗ) — в силу их взаимодействия и изменения эффективных констант анизотропии с температурой, полем или упругими напряжениями приводит к целому ряду ориентационных фазовых переходов (ОФП). Фазовые переходы отражаются на спектре магнитных возбуждений обеих подсистем. Частота одного из типов колебаний (мягкая мода магнитного резонанса) в области ОФП уменьшается, попадая в СВЧ диапазон. Исследование поведения мягкой моды при спиновой переориентации позволяет точно определять границы переориентации, строить фазовые диаграммы, судить о взаимодействии в магнитных подсистемах и взаимодействии магнитных возбуждений с другими типами возбуждений (например [2]). Все вышеизложенное – доводы в пользу актуальности темы и перспективности объекта исследований.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования по теме диссертации было выполнено в рамках тематического плана ДонФТИ НАН Украины по темам: “Экспериментальное изучение статистики и динамики магнитных фазовых переходов в многоподрешеточных антиферромагнетиках на основе редкоземельных ортоферритов.” (№01900045392 гос. регистрации); “Резонансные исследования магнитодиэлектриков около ориентационных переходов” (№0197V014941 гос. регистрации).

Цель и задачи исследования заключаются в изучении высокочастотных свойств ряда редкоземельных ортоферритов для выявления

вклада продольных колебаний намагниченности в их динамику и параметров, определяющих такой вклад; для поиска новых экспериментальных данных определяющих роль различных колебательных систем в магнетике и их взаимодействие.

Научная новизна. На защиту выносятся следующие результаты и выводы.

1. Разработана методика регистрации мягких мод магнитного резонанса и определения величины энергетических щелей в миллиметровом диапазоне волн СВЧ с модуляцией магнитного поля и сканированием температуры в окрестности ориентационных фазовых переходов.
2. Восстановлены спектры мягких мод магнитного резонанса в окрестности спонтанных и индуцированных полей ОФП в ErFeO_3 , Fe_3VO_6 , SmFeO_3 , обнаружены и измерены энергетические щели в точках этих переходов, исследована их зависимость от магнитного поля и температуры.
3. Установлено, что высокочастотные свойства ОФП в целом формируются под действием, как прецессии, так и продольных колебаний намагниченности. Предложен параметр, характеризующий перераспределение их вкладов в величины щелей: относительная температура спонтанной переориентации τ_{SR} - индивидуальный для каждого соединения и спиновой подсистемы.
4. Предложен и апробирован способ разделения температурного и полевого вкладов продольных колебаний намагниченности в величины энергетических щелей. Определена зависимость вклада продольных колебаний намагниченности от параметра τ_{SR} .
5. Установлено, что при $\tau_{SR} < 0,15$ динамика ОФП формируется в основном спин-волновыми механизмами, и продольные колебания не вносят ощутимого вклада в наблюдаемые на опыте высокочастотные свойства. При $\tau_{SR} > 0,7$ вклад продольных колебаний намагниченности обнаруживается даже при $H \rightarrow 0$. При этом энергетическая щель в точке перехода является результатом аддитивных вкладов со стороны спин-волновых и термодинамических механизмов.
6. Экспериментально обнаружен скачок частот в спектре мягкой квазиферромагнитной моды в точке спонтанного ОФП в Fe_3VO_6 и объяснен при учете дипольного взаимодействия.
7. Показано, что наблюдаемые в окрестности ОФП высокочастотные свойства РЗОФ могут быть объяснены только на основе теории, в которой учтены как спин-волновые так и термодинамические механизмы формирования динамики ОФП.

Практическое значение результатов. Полученные результаты уточняют и дополняют общую картину резонансных свойств слабых ферромагнетиков. С учетом последнего вытекала актуальная необходимость создания новой, более полной и универсальной теории динамических свойств ориентационных переходов [3], рассчитанной на любые значения температуры и поля. Тогда существующие спин-волновая и термодинамическая модели могли бы быть ее крайними пределами – соответственно в малых полях при температуре $T \rightarrow 0$ и при $T \rightarrow T_N$ или в больших полях. При этом в отношении большинства наблюдаемых в эксперименте мягких магниторезонансных мод придется принять утверждение о том, что они не могут быть идентифицированы ни как чисто прецессионные, ни как чисто релаксационные, и уж никак не исключительно спинового происхождения. На практике всегда имеют место связанные колебания различных подсистем магнетика. (Такая теория, учитывающая результаты данной работы, опубликована в конце 1999 года [4]).

Личный вклад соискателя. Разработана методика регистрации мягких мод магнитного резонанса и определения величины энергетических щелей в диапазоне СВЧ с модуляцией магнитного поля и сканированием температуры в окрестности ориентационных переходов; собрана экспериментальная установка. Проведен сопоставительный анализ имеющихся данных по установлению вклада продольных колебаний намагниченности в динамику ориентационных переходов. Определены конкретные материалы для проведения исследований и их образцы подготовлены к эксперименту. Проведены измерения; результаты измерений обработаны и подготовлены к публикации. Участвовал в поэтапном планировании работы по теме, обсуждении и систематизации результатов.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 6-м научном семинаре “Физика магнитных явлений” (Донецк, 1993); 3-ей международной конференции “Физические явления в твердых телах” (Харьков, 1997), Международной конференции “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах” (Махачкала, 1998); Международной конференции “Магнитные материалы и их применение” (Минск, 1998); Отчетной конференции ДонФТИ НАН Украины им. Галкина А.А. (Донецк, январь 2000); Международной конференции “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах” (Махачкала, 2000); Конференции ДонФТИ НАН Украины им. А.А. Галкина, посвященной 35-летию института (Донецк, декабрь 2000) .

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 12 печатных работах, из них 6 статей в научных журналах, 1 препринт и 5 – тезисы докладов на научных конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 25 рисунков, таблицу и список литературы из 87 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, содержится краткий обзор диссертации, включающий основные результаты работы.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором содержатся вводные сведения о редкоземельных ортоферритах необходимые для описания исследуемой научной проблемы.

Во второй главе проведен анализ экспериментальных и теоретических работ по теме. В нем раскрывается суть каждой из двух основных моделей, объясняющих происхождение энергетических щелей в спектре мягкой резонансной моды (спин-волновой [4,5], в которой вся спиновая динамика относилась на счет прецессии векторов намагниченности и термодинамической [6,7], необходимым образом учитывающей и продольные колебания намагниченности). Выявлены области определения этих моделей как области больших полей для термодинамической теории и относительно низких температур и малых полей – для спин-волновой, а также интервалы полей и температур: $H \rightarrow 0$, $T \rightarrow T_N$ (T_N температура упорядочения спиновой подсистемы), в которых ни одна из теорий не давала удовлетворительного объяснения экспериментальных данных. Обосновано предположение о непротиворечивости спин-волнового и термодинамического подходов к расчету величин энергетических щелей. Для экспериментального подтверждения этого намечены интервалы полей и температур ($H \rightarrow 0$, $T \rightarrow T_N$), в которых должны одновременно обнаружиться вклады в динамику двух названных механизмов. Показаны возможности получения данных о вкладе продольных колебаний намагниченности в динамику спонтанных спин-переориентационных переходов по величине производной $\partial v_0 / \partial H_r$ (при $H_r \rightarrow 0$), по аналогии определения такого вклада [7,8] в переходах, индуцированных большими магнитными полями. Здесь v_0 - величина экспериментально наблюдаемой частотной щели в точках завершения спиновой переориентации, H_r - поле перехода при соответствующей температуре. Определен способ разделения температурного и полевого вкладов продольных колебаний намагниченности в величины энергетических щелей. Температурный вклад предложено выделить путем исследования ряда

однотипных материалов с различными температурами спонтанной переориентации от $T \rightarrow 0$ до $T \rightarrow T_N$ в малых полях. Введен параметр – относительная температура спонтанной переориентации $\tau_{SR} = T_{SR}/T_N$, где T_{SR} – усредненная температура спонтанного перехода $(T_1 + T_2)/2$. Этот параметр индивидуален для каждого конкретного редкоземельного ортоферрита, а его возрастание в ряду РЗОФ, как показано далее (в четвертой главе), ведет к увеличению вклада продольных колебаний намагниченности и перераспределению вкладов в динамику – от спин-волнового к термодинамическому.

В результате: определено, какие эффекты следует искать по теме в эксперименте; намечены материалы для исследования из предположения, что больший вклад продольных колебаний намагниченности следует ожидать при относительно более высоких температурах спонтанных переходов; определена общая методика эксперимента из условия совместности получаемых данных с уже имеющимися.

В третьей главе описаны оборудование и методика проведения экспериментов по высокочастотным магнитрезонансным исследованиям. Измерения проведены на СВЧ спектрометре прямого усиления, в котором регистрировались отраженные сигналы поглощения от образцов, размещаемых в центре закорачивающего волновод поршня. Для создания на образце однородного высокочастотного поля применялись волноводы, допускающие распространение преимущественно волны типа H_{10} . Основной метод исследования – запись сигналов поглощения СВЧ энергии образцом при сканировании температуры в окрестности спин-переориентационных переходов и стабилизации нескольких последовательно фиксированных значений магнитного поля, индуцирующего переход. Измерения проводились в диапазоне частот от 11 до 74 ГГц и магнитных полей – от 0 до 13 кЭ на монокристаллических образцах ErFeO_3 , SmFeO_3 и Fe_3VO_6 . Наибольший размер образцов ErFeO_3 и SmFeO_3 не превышал 0,9 мм, а Fe_3VO_6 – 2,5 мм. Предварительная ориентация направлений кристаллографических осей образцов проводилась с помощью рентгеновского дифрактометра. Точная ориентация поля по осям кристалла осуществлялась поворотом магнита с точностью до $20''$ в плоскости ac образца, уже сориентированного относительно поршня и, следовательно, относительно СВЧ поля. Ориентация поля проводилась путем пробных записей и фиксировалась по максимальному расхождению двух резонансных линий, расположенных по обе стороны от точки перехода.

Для повышения разрешающей способности измерительной установки отработана техника измерений с модуляцией магнитного поля при протяжке температуры, в том числе при спонтанных переходах, когда постоянное внешнее поле $H = 0$. Такая техника позволила более чем на порядок повысить разрешающую способность измерений на Fe_3VO_6 и SmFeO_3 по сравнению с достигнутой ранее.

Выбор методики измерений определялся необходимостью получения экспериментальных результатов в виде, пригодном для сопоставления с существующей на тот момент теорией и с выполненными для ее проверки опытами на YFeO_3 и DyFeO_3 [6,7]. Это требовало совпадения: во-первых, – характера и вида фазового перехода, во-вторых, – ориентации магнитного поля, индуцирующего переход. Кроме того, для выяснения границ применимости теории [6,7] необходимо было провести эксперименты на ряде ортоферритов с существенно разными соотношениями собственных частот подсистем железа ν_σ и редкой земли ν_r , т.е. учесть природу мягкой магниторезонансной моды.

В четвертой главе излагаются результаты экспериментальных исследований магнитного резонанса в ErFeO_3 , SmFeO_3 и Fe_3VO_6 , проводится анализ роли отдельных колебательных подсистем и их взаимодействий.

Для выяснения возможности распространения выводов по YbFeO_3 и TmFeO_3 на другие РЗОФ нами были проведены эксперименты на ErFeO_3 . YbFeO_3 и TmFeO_3 характеризуются соотношением частот железной ν_σ и РЗ-мод ν_r соответственно: $\nu_r \ll \nu_\sigma$ и $\nu_\sigma \ll \nu_r$, тогда как для большинства РЗОФ, к которым относится и ErFeO_3 , типичным является соотношение $\nu_r \approx \nu_\sigma$. В ErFeO_3 $T_{N1} = 636$ К и для перехода Γ_2 – Γ_4 параметр $\tau_{SR} = 0,15$ (в ErFeO_3 кроме T_{N1} железа, есть еще и температура упорядочения эрбия T_{N2}). Измеренная при спонтанном переходе Γ_2 – Γ_{24} в точке $T = T_2$ энергетическая щель $\nu_2 = 26,2 + 0,2$ ГГц. Она была также измерена при значениях поля $H \parallel a$ равном 1, 5, и 10 кЭ. Результаты этих измерений приведены на рис.1. В пределах точности измерений (2 ГГц) возрастания щели в поле не обнаружено!

Таким образом в ErFeO_3 , как в YbFeO_3 и TmFeO_3 , т.е. в области температур до 100К продольная восприимчивость и, соответственно, вклад продольных колебаний в величину щели неоспоримо малы. То есть как при спонтанном, так и при индуцированном ОФП щель формируется в основном прецессионными механизмами. Основываясь на экспериментах с YbFeO_3 , TmFeO_3 и ErFeO_3 , делаем вывод о том, что независимость щели от поля (температуры) является, скорее всего, общим свойством всех РЗОФ, в которых переориентация происходит при малых значениях τ_{SR} и в малых

полях. Этот факт не зависит от соотношения характерных резонансных частот ν_r , ν_σ и, следовательно, от степени динамического взаимодействия колебательных подсистем железа и редкой земли.

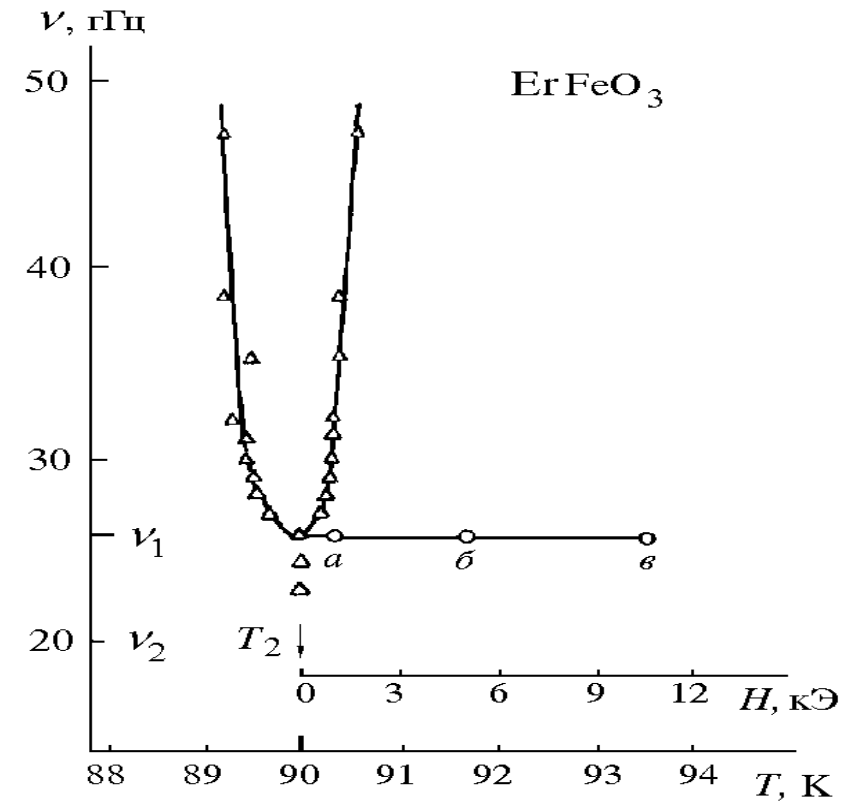


Рис.1. Температурная зависимость частоты мягкой магниторезонансной моды в ErFeO_3 в окрестности спонтанной переориентации $\Gamma_2-\Gamma_{24}$ (Δ) и энергетической щели при индуцировании этого перехода полем $\mathbf{H}||a$ (\circ) величиной (кЭ): $a-1$, $b-5$, $e-10$.

Наиболее подходящим для обнаружения вклада продольных колебаний намагниченности в динамику ОФП в малых полях было найдено изоморфное РЗ ортоферритам соединение Fe_3VO_6 , у него $\tau_{SR} \approx 0,8$. Основные результаты измерений (см. рис.2) получены в режиме изменения температуры

при фиксированных значениях поля. Записывалась производная сигнала поглощения по температуре. По совокупности этих записей восстанавливались температурные зависимости магниторезонансных частот при каждом заданном значении H . Каждой точке на рис.2 соответствует заданное поле перехода, а температура перехода определяется по положению пиков поглощения резонансных линий. Приведены примеры температурных зависимостей частоты мягкой моды в магнитном поле разной величины и ориентации. Минимальная частота каждой такой зависимости есть энергетическая щель ν_{IR} в точке завершения индуцированной полем переориентации при $\mathbf{H}||\mathbf{a}$ или $\mathbf{H}||\mathbf{c}$. По совокупности результатов таких измерений восстановлены температурные и полевые зависимости щели ν_{IR} , которые также приведены на рис.2.

Выделим наиболее значимые результаты данных измерений:

1. Впервые обнаружено, что температурная и полевая зависимости энергетических щелей на линии фазовых переходов подходят к точке $T = T_{SR}$, $H_{IR} = 0$ с отличными от нуля производными $\partial\nu_{IR}/\partial T$ и $\partial\nu_{IR}/\partial H$.
2. При любых температурах $\partial\nu_{IR}/\partial H > 0$, тогда как $\partial\nu_{IR}/\partial T < 0$ в области $T < T_{SR}$ и $\partial\nu_{IR}/\partial T > 0$ в области $T > T_{SR}$.
3. Экстраполяция величин энергетических щелей к точке спонтанного перехода $\Gamma_2-\Gamma_4$ ($H = 0$, $T = T_{SR}$) со стороны низких температур дает значение щели $\nu_{SR} = 11,8 \pm 1,5$ ГГц, а со стороны высоких – $17,5 \pm 0,5$ ГГц.

Первый (искомый) из выделенных результатов, по нашему мнению, связан с большим значением τ_{SR} , что обуславливает значительную величину отношения продольной и поперечной восприимчивостей (для Fe_3VO_6 , оцененное по методике работы [8] отношение $\chi_{||}/\chi_{\perp} \approx 0,7$ в точке $T = T_{SR}$). Отсюда результат - $\partial\nu_{IR}/\partial H > 0$ при $H \rightarrow 0$, который является внешним признаком того, что в Fe_3VO_6 даже стартовая щель в значительной мере формируется за счет продольных колебаний намагниченности.

Результат №2 проявляет конкуренцию вкладов в величину энергетической щели со стороны поля и температуры. Обнаруживается, что положительный и больший по абсолютной величине вклад в ее результирующую величину дает поле.

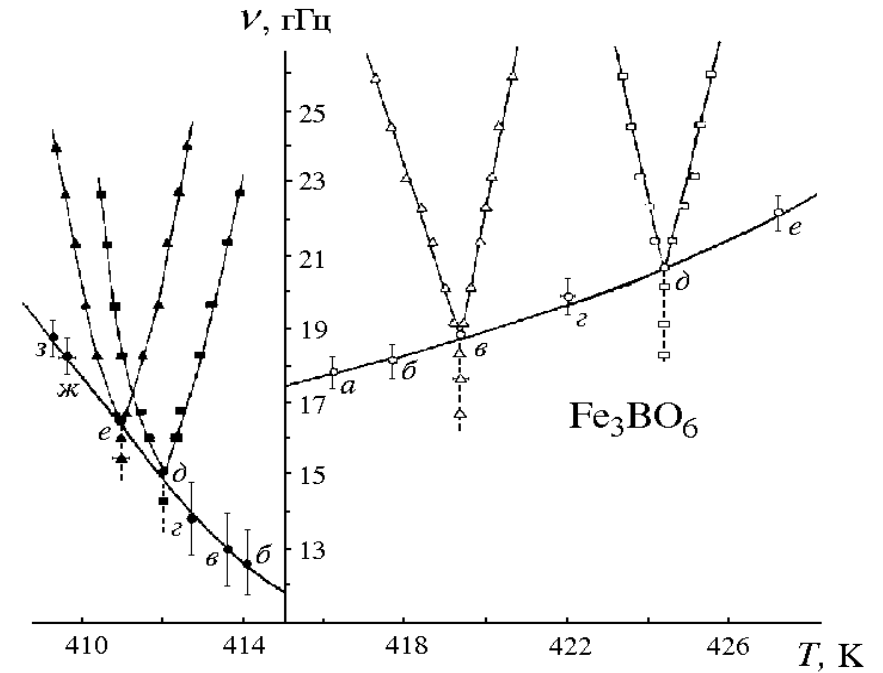


Рис.2. Температурные зависимости частот мягкой моды и энергетических щелей в точках завершения переориентации в Fe_3BO_6 : характерные зависимости частот мягкой моды в поле $\mathbf{H}\parallel\mathbf{c}$ величиной 8 кЭ (\square), 10 кЭ (\blacktriangle) и в поле $\mathbf{H}\parallel\mathbf{a}$ величиной 4 кЭ (\triangle), 8 кЭ (\blacksquare); зависимости щели в точке завершения спиновой переориентации в полях $\mathbf{H}\parallel\mathbf{c}$ (\bullet) и $\mathbf{H}\parallel\mathbf{a}$ (\circ). Каждая точка на температурных зависимостях щелей соответствует следующим значениям поля H , кЭ: $a - 1,25$, $b - 2,5$, $в - 4$, $z - 6$, $\partial - 8$, $e - 10$, $ж - 12$, $з - 12,5$. Вертикальными штриховыми линиями соединены точки, соответствующие пикам поглощения от склонов резонансных линий.

Скачок частот (результат №3) в точке спонтанного перехода для своего объяснения потребовал привлечь представления о механизмах формирования энергетических щелей в точках ориентационных переходов, базирующиеся на максимальном учете динамического взаимодействия спиновой подсистемы с другими колебательными подсистемами магнетика. Расчет спектра колебаний спиновой подсистемы производился по методикам,

развитым в работе [3]. Приведем результаты расчетов для случая $H \geq 0$. Активация σ -моды в фазах Γ_2 и Γ_4 соответственно имеет вид:

$$v_{02}^2 = (g/2\pi)^2 \left[H_E K_1 / M_0 + H_E (H_{me5} + H_{dip2}) + H(H + H_{D2}) \right], \quad (1)$$

$$v_{01}^2 = (g/2\pi)^2 \left[-H_E (K_1 + 2K_2) / M_0 + H_E (H_{me5} + H_{dip1}) + H(H + H_{D1}) \right]. \quad (2)$$

Здесь g – гиромагнитное отношение,

H_E , H_{me5} , $H_{D1,2}$, $H_{dip1,2}$, – соответственно поля однородного обмена, магнитострикции, Дзялошинского и дипольное поле,

$K_{1,2}$ – эффективные константы анизотропии второго и четвертого порядка,

M_0 – намагниченность насыщения подрешеток;

поля $H_{D1,2}$ и $H_{dip1,2}$ выражаются формулами: $H_{D1,2} = (3d_{3,1} - 2d_{1,3})/M_0$,

$H_{dip1,2} = 16\pi (d_{1,3}/H_E)/M_0$, где $d_{1,3}$ – постоянные антисимметричного обмена (постоянные Дзялошинского).

Точка спонтанного ОФП первого рода (ОФП-1) $\Gamma_2 - \Gamma_4$ определяется условием $K_1 + K_2 = 0$ (ОФП первого рода возможен лишь при $K_2 < 0$). В нулевом магнитном поле скачок определяется дипольным вкладом и имеет величину:

$$v_{02}^2 - v_{01}^2 = (g/2\pi)^2 H_E (H_{dip2} - H_{dip1}). \quad (3)$$

Оценим численную величину скачка в точке спонтанного фазового перехода, используя соответствующие значения постоянных для Fe_3VO_6 : $H_E \approx 5 \cdot 10^6$ Э, $H_{dip} \approx 1$ Э, $g = 2 \cdot 10^7$ Гц/Э. Тогда выражение (3) дает значение скачка частот в точке спонтанного ОФП $\Delta v \approx 3$ ГГц. Оно согласуется с экспериментальной величиной $\Delta v \approx 5,7$ ГГц.

Проведенный расчет энергетической щели и скачка частоты учитывал только прецессионное движение намагниченности. При учете ее продольных колебаний в выражения (1) и (2) аддитивно войдет еще и щель релаксационного происхождения, которая может давать существенный вклад в суммарную энергетическую щель. При анизотропном характере этой щели, она может давать вклад также и в величину скачка частот при спонтанном ОФП-1. Наравне с дипольным релаксационный вклад в энергетическую щель от взаимодействия прецессионных и релаксационных колебаний может обуславливать расхождение значений щелей в точках ОФП для случая $H = 0$.

Проанализируем все эксперименты в последовательности, соответствующей возрастанию параметра τ_{SR} . Основные результаты и сведения об РЗОФ и Fe_3VO_6 представлены в виде таблицы. По ним видно, что в ортоферритах, характеризующихся относительно низкими температурами

Таблица

Характеристики спиновой динамики ОФП в РЗОФ и Fe_3VO_6 .

Вещество	YbFeO ₃	TmFeO ₃	ErFeO ₃ (1)	NdFeO ₃	SmFeO ₃	Fe ₃ VO ₆	ErFeO ₃ (2)
Параметры							
Вид перехода	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{24} - \Gamma_2$	$\Gamma_{124} - \Gamma_{24}$
$T_{SR} = (T_1 + T_2) / 2$, К	7,4	88	95	123	463	415	3,9
Энерг. щель при спонт. переходе, ГГц	37,5	20	26,2	56	35	17,5	26,1
$\tau_{SR} = T_{SR} / T_N$	0,01	0,14	0,15	0,17	0,7	0,8	1
$\partial v_{O2} / \partial T$ при $T \rightarrow T_2$, ГГц / К	0	0	0	0*	0,3*	0,5	60
$\partial v_{O2} / \partial H$ при $H \rightarrow 0$, ГГц / кЭ	0	0	0	0*		0,7	4

Примечания:

- а) Значком * отмечены ожидаемые (согласно графику на рис.3) значения;
 б) Для ErFeO₃ (2) следует сделать замены : T_{SR} , T_N , T_2 на T_{N2} ; v_{O2} на v_{ON2} .

спонтанной переориентации $\Gamma_{24} - \Gamma_2$ ($\tau_{SR} < 0,15$), производная $\partial v_{O2} / \partial T = 0$ в поле $H < 10$ Кэ. Это означает, что в данных ортоферритах энергетические щели в точках указанного спонтанного перехода формируются в основном прецессионными механизмами. При $\tau_{SR} < 0,15$ вклад продольных колебаний намагниченности в величину щели в пределах достигнутой точности измерений не проявляется в экспериментах.

Энергетическая щель в Fe_3BO_6 растет с увеличением поля. При $H \rightarrow 0$ производная $\partial v_{02} / \partial H \neq 0$ составляет около 0,7 ГГц / кЭ. Щель растет также при повышении температуры, $\partial v_{02} / \partial T \approx 0,5$ ГГц/К при $T \rightarrow T_{SR}$. Это означает что щель спонтанного перехода, формируется не только за счет прецессионных механизмов, но и за счет продольных колебаний намагниченности вследствие достаточно высокого значения параметра τ_{SR} у Fe_3BO_6 .

Характерным свойством перехода, связанного с антиферромагнитным упорядочением эрбия при $T = T_{N2} \approx 4$ К является чрезвычайно высокая продольная восприимчивость. Измерения дают в этой точке ($\tau_{SR} \approx 1$) значение $\chi_{||} / \chi_{\perp} \approx 3$ и наибольшие в таблице значения $\partial v_{02} / \partial H$ и $\partial v_{02} / \partial T$.

На рис.3 представлена итоговая двухмерная диаграмма, которая характеризует эволюцию $\partial v_0 / \partial H$ при $H = 0$ с изменением параметра τ_{SR} .

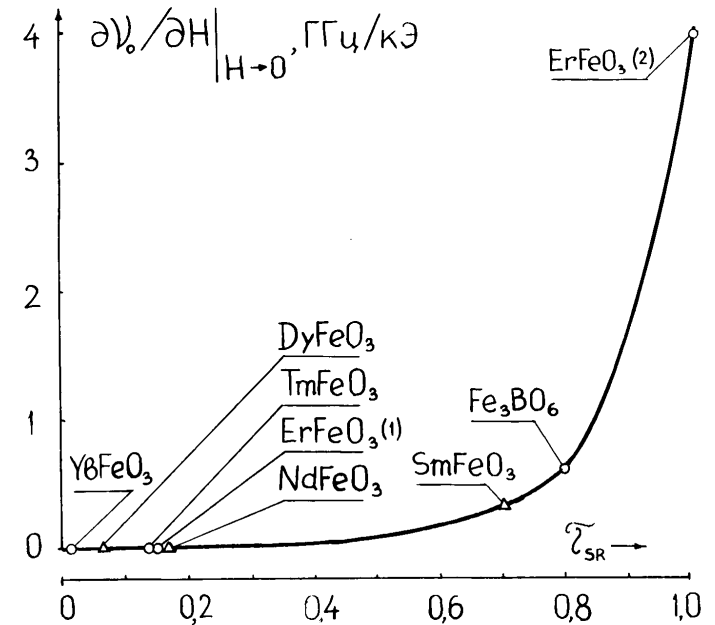


Рис.3. Значения $\partial v_0 / \partial H$ в точках спонтанных переходов в различных соединениях при соответствующих $\tau_{SR} = (T_1 + T_2) / 2 T_N$: (o) - измеренные значения, (Δ) - ожидаемые. Индексы (1), (2) при ErFeO_3 означают, что в первом случае имеется виду переход $\Gamma_{24} - \Gamma_2$ в подсистеме железа, а во втором - $\Gamma_{124} - \Gamma_{24}$ в подсистеме эрбия.

Плавная линия, соединяющая полученные в эксперименте точки, дает представление о величинах $\partial\nu_0 / \partial H$ при $H = 0$, которые следует ожидать в некоторых других РЗОФ. Видно, что вклад продольных колебаний в спиновую динамику спонтанной переориентации есть смысл искать при $\tau_{SR} > 0,5$. Однако соответствующие эффекты должны быть обнаружены во всех приведенных здесь "низкотемпературных" ортоферритах при индуцировании переходов достаточно сильным полем, что уже реализовано в DyFeO_3 [8]

Среди РЗОФ подходящим по параметру τ_{SR} перехода $\Gamma_2 - \Gamma_4$ для обнаружения эффектов продольных колебаний намагниченности можно считать лишь SmFeO_3 ($T_1 = 478 \text{ K}$, $T_2 = 450 \text{ K}$, $T_N = 674 \text{ K}$, $\tau_{SR} \approx 0,7$). По мере совершенствования техники эксперимента появилась возможность проведения на нем достаточно точных магниторезонансных измерений. Их результаты стали убедительным подтверждением выводов сделанных нами ранее. На рис.4, в качестве примера, представлены температурные зависимости частот мягкой моды в окрестности ориентационного перехода $\Gamma_4 \leftrightarrow \Gamma_{24}$ при двух заданных значениях внешнего поля - 4 и 6 кЭ.

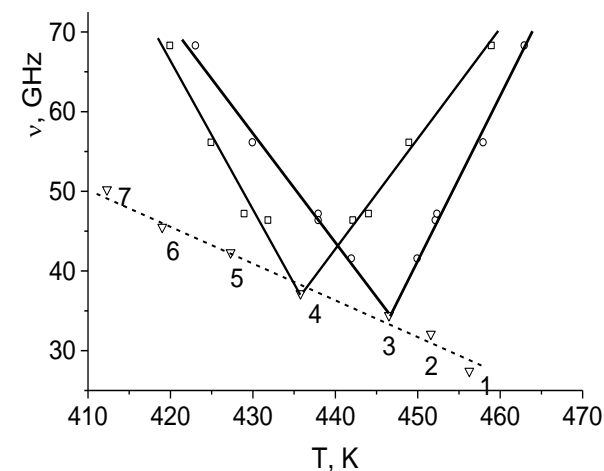


Рис.4. Температурные зависимости частот мягкой моды в точках завершения спиновой переориентации $\Gamma_{24} - \Gamma_4$ в SmFeO_3 в поле \mathbf{H}/c величиной 4кЭ (●) и 6кЭ (◻) и энергетической щели (▽) в тех же условиях во внешнем поле \mathbf{H} , кЭ: 1 - 0,1; 2 - 2,0; 3 - 4,0; 4 - 6,0; 5 - 8; 6 - 10; 7 - 12.

Такие же зависимости получены и на ряде других значений внешнего поля H , кЭ: 0,1; 2; 8;10; 12. По их минимумам построили температурную зависимость щели, показанную на этом же рисунке штриховой линией. Ее наклон $\partial v_0 / \partial T = -0,47$ ГГц / К. При понижении температуры в интервале 410÷460 К щель v_0 возрастает почти в 2 раза - на ~ 25 ГГц, что на порядок превышает абсолютную погрешность ее определения. При $H \rightarrow 0$ производная $\partial v_0 / \partial H \approx 1,52$ ГГц/кЭ. При $T \rightarrow T_1$ ($H \rightarrow 0$) энергетическая щель, соответствует спонтанному переходу $\Gamma_{24} \Leftrightarrow \Gamma_4$ и равна $(27,7 \pm 2,5)$ ГГц.

Следует обратить внимание, по крайней мере, на три особенности полученных здесь результатов. Во-первых, как и предполагалось, энергетическая щель в спектре спиновых волн в SmFeO_3 существенно зависит от температуры и магнитного поля даже в пределе $H \rightarrow 0$, т.е. в окрестности спонтанного перехода $\Gamma_{24} - \Gamma_4$. Это единственный из РЗОФ, в котором обнаружен подобный эффект. Другая особенность полученных здесь результатов состоит в том, что энергетическая щель растет при понижении температуры. Обнаруженное возрастание щели в условиях разнонаправленного воздействия внешних параметров на этот эффект является результатом конкурирующих вкладов в ее результирующую величину со стороны H и T при $H||c$. В данном случае положительный и больший по абсолютной величине вклад в v_0 дает поле. Оно и обуславливает в целом возрастание результирующей щели, наблюдаемой на опыте также как и в аналогичном случае в Fe_3VO_6 . Отметим, что несоизмеримость температурного и полевого вкладов в такую динамическую характеристику, как щель, фактически задается статическими параметрами магнетика, воплощенными в его H - T фазовой диаграмме. И, наконец, третья особенность состоит в том, что возрастание щели v_0 в поле начинается с довольно большого ее “стартового” значения при $H=0$. Это означает, что энергетическая щель наряду с отмеченными термодинамическими формируется также и спин-волновыми механизмами. Полученные результаты могут быть адекватно описаны с помощью теоретической модели, которая одновременно учитывает взаимодействие различных колебательных подсистем магнетика и вклады в динамику за счет, как прецессии, так и продольных колебаний намагниченности [4].

В заключении приведены основные результаты работы и выводы.

ВЫВОДЫ

Выводы сделаем на основе сопоставительного анализа представленных здесь опытных данных со всей совокупностью предшествующих исследований низкоэнергетической динамики ориентационных переходов в редкоземельных ортоферритах.

1. Динамика ориентационных переходов в реальных экспериментальных условиях формируется под действием и прецессии, и продольных колебаний намагниченности. Соотношение спин-волнового и термодинамического вкладов в величины энергетических щелей зависит от свойств (главным образом – статических) конкретного соединения.

2. Параметром, характеризующим соотношение указанных вкладов вблизи точек спонтанных переходов (т.е. – в малом поле), может служить отношение температуры спонтанного перехода T_{SR} к температуре упорядочения T_N соответствующей спиновой подсистемы для каждого конкретного магнетика.

3. Установлено, что при величине этого отношения $\tau_{SR} < 0,15$ продольные колебания не вносят ощутимого вклада в наблюдаемую на опыте динамику. В то же время, при $\tau_{SR} > 0,7$ вклад продольных колебаний намагниченности обнаруживается даже в нулевом поле. При этом энергетическая щель в точке перехода может быть результатом аддитивных и соизмеримых вкладов со стороны спин-волновых и термодинамических механизмов.

4. При наличии в магнетике двух спиновых подсистем природа мягкой моды в точке перехода никак не проявляется в эффектах перераспределения спин-волнового и термодинамического вкладов в величину энергетической щели.

5. Стартовая щель при достаточной величине τ_{SR} (т.е. – когда эффекты проявления продольных колебаний уже не маскируются иными механизмами формирования щели) всегда растет с увеличением поля, но соответствующая температура перехода при этом может, как повышаться, так и понижаться.

6. Обнаруженная корреляция различных динамических характеристик указывает на необходимость учета взаимодействия всех колебательных подсистем магнетика также и при термодинамическом описании спиновой динамики ориентационных переходов. Особенно в области температур, где строго не работают ни спин-волновое, ни термодинамическое приближение.

7. Полученные результаты показывают актуальную необходимость создания новой, более полной и универсальной теории динамических свойств ориентационных переходов, рассчитанной на любые значения температуры и поля. Тогда существующие спин-волновая и термодинамическая модели

могли бы быть ее крайними пределами – соответственно при $T \rightarrow 0$ в малых полях и при $T \rightarrow T_N$ или больших полях.

Публикации по теме диссертационной работы.

1. Даньшин Н.К., Крамарчук Г.Г., Непочатых Ю.И. Энергетическая щель при индуцированной переориентации в ErFeO_3 . // ЖЭТФ.- 1994.- Т.105, вып.3. - С. 660-664.
2. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Шкарь В.Ф. Роль прецессии и продольных колебаний намагниченности в динамике спиновой переориентации в Fe_3VO_6 . // ЖЭТФ.- 1996. - Т. 109, вып.2. - С.639-648.
3. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Обнаружение анизотропии энергетической щели в Fe_3VO_6 . ФТТ.- 1996. - Т.38, №8. - С. 2513-2515.
4. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Вклад продольных колебаний намагниченности в спиновую динамику спонтанной переориентации. // ФНТ.- 1998.- Т.24, №4.- С. 353-359.
5. Обнаружение дипольного вклада в мягкую магниторезонансную моду в Fe_3VO_6 / Бучельников В.Д., Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И., Шавров В.Г. // Письма в ЖЭТФ.- 1999.- Т.70, вып.5.- С. 356-359.
6. Обнаружение вклада продольной восприимчивости в частоту мягкой магниторезонансной моды в SmFeO_3 / Бучельников В.Д., Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И., Шавров В.Г. // ЖЭТФ. – 2001. – Т.119, вып.4. – С.738-737.
7. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Цымбал Л.Т. Роль продольных колебаний намагниченности в динамике ориентационных переходов. - Донецк. - 1996. – 54 с. (Препринт / НАН Украины. ДонФТИ – 96 – 1).
8. Даньшин Н.К., Крамарчук Г.Г., Непочатых Ю.И. Энергетические щели в точках ФП-2 в магнитном поле // Тезисы докладов 6-го научного семинара ФМЯ.- Донецк: ДФТИ АНУ.- 1993.- С. 42.
9. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И., Цымбал Л.Т. Параметр соотношения вкладов прецессии и продольных колебаний намагниченности в динамику спиновой переориентации. // Тр. 3-й Международной конференции “Физические явления в твердых телах”. - Харьков: ХГУ. - 1997. - С.107.
10. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Роль продольных колебаний намагниченности в динамике спонтанной спиновой переориентации. // Тезисы докладов Международной конференции “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах”. - Махачкала: ИФ РАН и ДГУ. - 1998. - С. 53-54.
11. Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И. Вклад продольных колебаний

намагниченности в спектр мягкой магниторезонансной моды при спонтанной переориентации // Тезисы докладов Международной конференции “Магнитные материалы и их применение”. - Минск: ИФТГиП НАН Беларуси. - 1998. - С. 101-103.

12. Природа мягкой моды спиновых волн в окрестности ориентационных фазовых переходов / Бучельников В.Д., Даньшин Н.К., Непочатых Ю.И., Шавров В.Г. // Тезисы докладов Международной конференции “Фазовые переходы и нелинейные явления в конденсированных средах”. - Махачкала: ИФ РАН. - 2000. - С. 90-91.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках / Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. – М.: Наука, 1977.- 318 с.
2. Туров Е. А., Шавров В. Г. Нарушенная симметрия и магнитоакустические эффекты в ферро- и антиферромагнетиках // УФН.- 1983.-т. 140, вып.3.-С. 429-462.
3. Магнитоакустика редкоземельных ортоферритов / Бучельников В.Д., Даньшин Н.К., Цымбал Л.Т., Шавров В.Г. // УФН. - 1996. - Т.166, №6. - С. 585-612.
4. Бучельников В.Д., Даньшин Н.К., Цымбал Л.Т., Шавров В.Г. Соотношение вкладов прецессионных и продольных колебаний в динамике магнетиков // УФН.- 1999. т.169, №10.-С. 1049-1084.
5. Бучельников В.Д., Бычков И.В., Шавров В.Г. Связанные колебания железной, редкоземельной и упругой подсистем в ортоферритах с крамерсовскими ионами // ЖЭТФ.- 1992. - Т.101, вып.6. - С.1869-1880.
6. Бучельников В.Д., Бычков И.В., Шавров В.Г. Влияние некрамерсовских редкоземельных ионов на спектр магнитоупругих волн в антиферромагнетиках // ФТТ. - 1991. - Т.33, вып.11.- С.3439-3440.
7. Мягкая мода и энергетические щели в спектре спиновых волн при ориентационном фазовом переходе второго рода. АФМР в $YFeO_3$ / Балбашов А.М., Березин А. Г., Гуфан Ю. М. и др. // ЖЭТФ.- 1987.- Т. 93, вып. 1. - С. 302-314.
8. Природа энергетической щели в спектре спиновых волн при спиновой переориентации в магнитном поле / Балбашов А. М., Гуфан Ю. М., Марчуков П.Ю., Рудашевский Е.Г. // ЖЭТФ.- 1988. - Т. **94**, вып. 4. - С. 305-313.

Непечатых Ю.И. Роль продольных колебаний намагниченности в динамике ориентационных переходов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, Донецк, 2001.

Проведено экспериментальное исследование резонансных свойств кристаллов ErFeO_3 , SmFeO_3 и Fe_3VO_6 вблизи происходящих в них ориентационных фазовых переходов. Обнаружен вклад продольных колебаний намагниченности в величину энергетической щели мягкой магниторезонансной моды в малых магнитных полях и его независимость от соотношения частот железной и редкоземельной мод. Анализируя данные ряда однотипных материалов – редкоземельных ортоферритов и Fe_3VO_6 , показано, что вклады в динамику от прецессии и продольных колебаний намагниченности являются аддитивными и конкурирующими. Парциальные величины этих вкладов зависят от отношения температуры переориентации T_{SR} к температуре магнитного упорядочения T_N . При $T_{SR}/T_N \ll 1$ в малых полях основной вклад в динамику вносит прецессия. При $T_{SR} \rightarrow T_N$ возрастает роль продольных колебаний намагниченности. Определена зависимость вклада продольных колебаний намагниченности от T_{SR}/T_N .

Экспериментально обнаружен скачок частот мягкой квазиферромагнитной моды в Fe_3VO_6 в точке спонтанного ориентационного перехода. Теоретически этот скачок объяснен вкладом дипольного взаимодействия в выражение для мягкой квазиферромагнитной моды.

Ключевые слова: ориентационные фазовые переходы, резонансные свойства, мягкая мода, энергетическая щель, продольные колебания намагниченности.

Непечатих Ю.І. Роль подовжніх коливань намагніченості в динаміці орієнтаційних переходів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.11 – магнетизм. – Донецький фізико-технічний інститут ім. А.А. Галкіна НАН України, Донецьк, 2001.

Проведено експериментальне дослідження резонансних властивостей кристалів ErFe_3 , SmFe_3 і Fe_3VO_6 поблизу орієнтаційних фазових переходів, що відбуваються в них. Виявлено внесок подовжніх коливань намагніченості у величину енергетичної щілини м'якої магніторезонансної моди в малих магнітних полях і його незалежність від співвідношення частот залізних і рідкісноземельний мод. Аналізуючи дані ряду однотипних матеріалів –

рідкісноземельних ортоферитів і Fe_3BO_6 , показано, що внески в динаміку від прецесії і подовжніх коливань намагніченості є адитивними і конкуруючими. Парціальні величини цих внесків залежать від відношення температури переорієнтації T_{SR} до температури магнітного упорядкування T_N . При $T_{SR}/T_N \ll 1$ у малих полях основний внесок у динаміку вносить прецесія. При $T_{SR} \rightarrow T_N$ зростає роль подовжніх коливань намагніченості. Визначено залежність внеску подовжніх коливань намагніченості від T_{SR}/T_N .

Експериментально виявлено стрибок частот м'якої квазіферромагнітної моди в Fe_3BO_6 у точці спонтанного орієнтаційного переходу. Теоретично цей стрибок пояснено внеском дипольної взаємодії у вираз для м'якої квазіферромагнітної моди.

Ключові слова: орієнтаційні фазові переходи, резонансні властивості, м'яка мода, енергетична щілина, подовжні коливання намагніченості.

Nepochatykh Yu.I. The role of the longitudinal oscillations of magnetization in dynamics of the orientational transitions.

The thesis for candidate's degrees by speciality 01.04.11 - a magnetism. – A.A. Galkin Donetsk Physics and Technology Institute, National Academy of Sciences of the Ukraine, Donetsk, 2001.

An experimental investigation of the resonance properties of crystals ErFeO_3 , SmFeO_3 and Fe_3BO_6 at points of different orientational phase transitions has been performed. The contribution of longitudinal oscillation of magnetization in the energy gap value of the soft magnetic-resonant mode in small magnetic fields and its independence from the correlation of frequencies of iron and rare-earth modes are discovered. Analyzing data of the same type material series - rare-earth orthoferrites and Fe_3BO_6 , shown that contributions to the dynamic from precession and longitudinal oscillation of magnetization are additive and competing ones. The partial values of those contributions depend on the reorientation temperature T_{SR} to the Neel temperature T_N ratio. At $T_{SR}/T_N \ll 1$ in small fields the magnetization precession is the main contributor to the dynamics. At $T_{SR} \rightarrow T_N$ the role of longitudinal oscillations of magnetization increases. Dependence of contribution of longitudinal oscillation of magnetization from T_{SR}/T_N has been determined.

Jump of soft quazifromagnetic mode frequencies in Fe_3BO_6 in the point spontaneous orientational transition has been experimental discovered. Theoretically this jump is explained by the contribution of dipole interaction into the expression for the soft quazifromagnetic mode.

Key words: orientational phase transition, resonance properties, soft mode, energy gap, longitudinal oscillation of magnetization.

Подписано к печати 12.07.2001 г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная
Усл. печ. л. 1,28. Усл. кр.-отг. 1,34. Уч.-изд. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Зак. 4.

Напечатано на ризографе ДонФТИ НАН Украины.
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72