

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МОХАМАД ХАЛИБИ

11.8
10.10.94

МАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕЙЗЕНБЕРГОВСКОЙ
СПИН-СТЕКОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Ga_xO_4$

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков 1994

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Харьковском государственном университете.

Научные руководители - Д-р физ.-мат.наук, проф.

ПОПКОВ Юрий Андронович

К-т физ.-мат.наук, доц.

ЕФИМОВА Нелли Николаевна

Официальные оппоненты: Д-р физ.-мат.наук, прсф.

МЕРИСОВ Борис Александрович

(ХГУ, г.Харьков)

Д-р физ.-мат.наук, проф.

ХАРЧЕНКО Николай Федорович

(АКАДЕМИЯ НАН Украины, г.Харьков).

Ведущая организация - Национальный научный центр

Харьковский физико-технический институт

(г.Харьков).

Защита состоится "4" октября 1994 г. в 14⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета Д 053.06.02 в Харьковском
государственном университете (310077, г.Харьков-77, пл.Свободы,4,
ауд.им.К.Д.Синельникова).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан "31" августа 1994 г.

Ученый секретарь

специализированного совета

В.П.Пойда

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756615 (U)

Актуальность проблемы. Физика неупорядоченных магнетиков и спиновых стекол (СС) как самостоятельное научное направление сформировалась к началу 80-х годов, чему предшествовал громадный поток теоретических и экспериментальных научных исследований, лавинообразно увеличившийся после сообщения Канеллы и Мидоша (Canella V., Mydosh J.A., 1972) об обнаружении каспа на температурной зависимости динамической восприимчивости разбавленных сплавов типа Au - Fe и интерпретации этого факта как свидетельства фазового перехода в новое магнитное состояние, названное СС (Edwards S.F., Anderson P.W., 1975).

Согласно представлениям, сложившимся на сегодняшний день и опирающимся на результаты теоретического рассмотрения в рамках модели среднего поля с бесконечным радиусом взаимодействия (модель Шеррингтона-Киркпатрика) и компьютерного моделирования, основное отличие СС от других магнитоупорядоченных состояний состоит в своеобразных особенностях энергетического спектра, а именно, его высокой степени вырождения и неэргодичности. Предпосылками для перехода в СС состояние является наличие в структуре случайных конкурирующих взаимодействий и высокая концентрация фрустрированных связей.

Несмотря на значительные успехи в понимании природы спинстеклового состояния, эта проблема даже в общих чертах еще далека от разрешения. Единственной последовательной теорией СС является теория среднего поля ШК, в полной мере приложимая лишь к системам с действием (классические СС типа Au + Fe). Однако и здесь точные решения получены лишь в окрестностях температуры перехода T_f (температура замерзания СС). Для систем с короткодействующим обменным взаимодействием общее теоретическое рассмотрение вообще отсутствует, так что в рамках обменного механизма вопрос о фазовом переходе при $T = T_f > 0\text{K}$ остается открытым. Если для изинговского случая в компьютерных экспериментах получены свидетельства наличия фазового перехода в СС состояние при конечной температуре (Ogielsky A.T., 1985), то для гейзенберговской модели, которая соответствует большому числу известных магнетиков, тако-

го рода данных нет. В имеющихся на сегодняшний день теоретических расчетах устойчиво получается, что нижняя критическая размерность $d_c > 3$, что означает отсутствие фазового перехода в СС состояние и противоречит имеющимся экспериментальным результатам. Другая сложность построения общей теории реальных СС связана с тем, что в существующих теоретических моделях рассматриваются, как правило, однородные состояния, тогда как реальные объекты — неоднородны. Неоднородность, обусловленная эффектами кластеризации перколяционной природы, особенно ярко выражена и принципиально неустраима в магнетиках с короткодействующим обменным взаимодействием, хотя имеет место и для классических спинстекольных систем. С учетом неоднородности возрастают трудности не только при рассмотрении СС состояния. Возникает вопрос и о существовании в неоднородных системах фазового перехода в состояния с дальним ферро- или антиферромагнитным порядком. Имеющиеся по этому поводу экспериментальные данные разрознены и немногочисленны, а их интерпретация противоречива. Этот вопрос, хотя и имеет большой самостоятельный интерес, тесно связан с проблемой СС, т.к. переход в состояния типа СС возможен не только из парамагнитной, но и из магнитоупорядоченных фаз (\overline{FM} или $A\overline{FM}$) — так называемые возвратные переходы. По существу, однозначные представления, здесь имеются только о парамагнитной фазе. Круг вопросов, относящийся к типу и структуре состояний, формирующихся при понижении температуры, наличие и особенностям фазовых переходов между ними, остается дискуссионным и по-прежнему является предметом теоретических и экспериментальных исследований.

Представления о неупорядоченных состояниях типа СС не могут быть полными без рассмотрения вопросов, связанных со спектром элементарных магнитных возбуждений, возникающих в таких системах. В настоящее время на основании результатов компьютерных расчетов, а также экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов и температурной зависимости теплоемкости можно считать установленным, что в спинстекольных системах могут существовать коллективные возбуждения типа бозонов. Однако из разнообразия экспериментальных данных, полученных для различных СС систем, сле-

дует, что спектр магнитных возбуждений, вероятно, во многом определяется характером и структурой неупорядоченных состояний, так что эта проблема требует систематического изучения.

Затронутыми вопросами (гейзенберговские системы с короткодействием, возвратные переходы, спектр элементарных возбуждений) далеко не исчерпывается круг актуальных проблем современной физики СС. Однако эти вопросы можно отнести к "классическим", которые поднимались еще в ранних исследованиях, но не были решены в период "мозгового штурма" проблемы СС в 70-80 гг. Сегодня ясно, что для их разрешения нужны всесторонние исследования, в том числе систематические целенаправленные эксперименты на модельных объектах.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы являлось следующее:

- экспериментальное исследование типов, структуры и механизмов формирования неупорядоченных магнитных состояний в разбавленных ферримагнитных шпинелях ($\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5-x}\text{Ga}_x\text{O}_4$), относящихся к числу гейзенберговских систем с короткодействующим обменом. При этом основное внимание было сосредоточено на изучении состояний, реализующихся в областях концентраций, соответствующих начальной и конечной стадиям разрушения дальнего ферримагнитного порядка;

- экспериментальное исследование особенностей тепловых свойств разбавленных ферримагнетиков $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5-x}\text{Ga}_x\text{O}_4$, обусловленных типом и структурой состояний в различных сечениях фазовой диаграммы концентрация - температура ($x - T$).

В связи с указанной целью работы в диссертации были поставлены следующие задачи исследования:

- выбор модельных объектов, отличающихся степенью возмущения обменного взаимодействия;

- синтез поликристаллических образцов и их аттестация;

- комплексное исследование магнитных свойств, обусловленных дальним ферримагнитным порядком;

- исследование спинстекольных свойств (магнитной необратимости и вязкости) в стационарных магнитных полях;

- исследование динамической восприимчивости в слабых низко-

частотных полях;

- оценка характера возмущения обменного взаимодействия, вносимого диамагнитным разбавлением;

- исследование температурных зависимостей магнитной части теплоемкости - $C_m(T)$;

- анализ полученных результатов с точки зрения: 1) существующих представлений о влиянии обменного взаимодействия на спиновое упорядочение; 11) установление корреляций между структурой состояний и характером магнитных возбуждений.

Научная новизна работы. В результате проведенных исследований получены следующие новые научные результаты. Впервые на основании результатов комплексного исследования физических свойств разбавленных ферримагнитных шпинелей $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$ идентифицированы тип и структура состояний на начальном по концентрации этапе нарушения дальнего ферримагнитного порядка и установлены особенности их магнитных и тепловых свойств.

С использованием классических методов обнаружения фазового перехода в точке Кюри, в том числе температурной зависимости магнитного вклада в теплоемкость ($H = 0$) и скейлинг-анализа свойств в малых магнитных полях, определены типы и особенности состояний, реализующихся вблизи мультикритической точки $x - T$ диаграммы, где ярко выражена неоднородность кластерного типа. Впервые для разбавленных ферримагнитных шпинелей в широкой области концентраций проведено комплексное изучение тепловых и магнитных свойств, результаты которого позволили установить наличие корреляций между структурой состояний в различных сечениях $x - T$ диаграммы и характером спектра магнитных возбуждений.

Практическая значимость работы. Полученные в настоящей работе результаты - механизмы формирования неупорядоченных ФСС состояний в разбавленных гейзенберговских системах, черты фазового перехода ПМ - ФМ в неоднородных системах, корреляция между структурой состояний и характером ее спектра возбуждений - могут быть использованы для дальнейшего развития представлений о природе и особенностях состояний типа СС.

Разбавленные ферримагнитные окислы со структурой шпинели, выбранные в настоящей работе в качестве модельных объектов, на-

ходит широкое практическое применение как функциональные материалы, применяющиеся в различных типах электронных устройств, поэтому полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования свойств при разработке новых магнитных материалов.

На защиту выносятся следующие положения и научные
результаты:

1. Состояния типа ферримагнитного спинового стекла (ФСС), характеризующиеся сосуществованием ниже температуры замерзания ($T < T_f$) дальнего ферримагнитного порядка для продольных составляющих спинов и спинстекольного для поперечных, в разбавленных ферримагнитных окислах (гейзенберговские системы с короткодействием) формируются уже на начальной по концентрации стадии нарушения коллинеарного ферримагнитного упорядочения. Формирование таких состояний обусловлено возмущением обменного взаимодействия.

2. Для системы разбавленных ферримагнитных шпинелей $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$, которая является типичным примером неоднородных магнитных систем с ярко выраженной кластеризацией перколяционной природы, установлено существование фазового перехода ПМ + ФМ во всей области концентраций немагнитных ионов Ga^{3+} ниже мультикритической точки $x - T$ диаграммы, в том числе в непосредственной близости к ней. При этом вблизи мультикритической точки фазовый переход ПМ - ФМ имеет, те же характерные для фазовых переходов второго рода признаки, что и в однородных системах, однако критический показатель для парамагнитной восприимчивости резко возрастает при увеличении магнитного поля H .

3. Своеобразные особенности поведения, обнаруженные при исследовании температурных зависимостей магнитной части теплоемкости $C_m(T)$ в различных концентрационных сечениях $x - T$ диаграммы системы $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$, свидетельствуют о том, что спектр магнитных возбуждений содержит вклады различной природы и его характер непосредственно определяется конкретными особенностями структуры магнитных состояний.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в работе, были доложены на Всесоюзном совещании по физике низких температур (Казань, 1992) и Международных семинарах "Физика магнитных

явлений" (Донецк, 1993, 1994).

Публикации. По результатам исследований диссертационной работы имеется 5 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии, насчитывающей 132 наименования. Общий объем работы составляет 223 страницы машинописного текста, включая 90 рисунков и 5 таблиц.

Работа выполнена на кафедре общей физики Харьковского государственного университета в рамках важнейшей тематики кафедры "Разработка физических основ создания новых магнитных материалов с заданным комплексом магнитных свойств", шифр темы 1.3.5.6., номер госрегистрации 0186.013.0977, выполняемой по координационному плану НАН Украины.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко рассмотрены основные достижения в изучении проблемы спинового стекла (СС) – нового магнитного состояния, первые сообщения о котором появились лишь в начале 70-х годов, и круг принципиальных вопросов, требующих разрешения для создания общей теории СС; обоснованы актуальность тематики работы, сформулированы ее общая цель и конкретные задачи исследований; показаны новизна, а также научная и практическая значимость основных результатов, полученных в работе при экспериментальном изучении типов, структуры и механизмов формирования неупорядоченных магнитных состояний, реализующихся в системе разбавленных ферримагнитных шпинелей $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$, и особенностей присущих этим состояниям тепловых свойств; изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор основных теоретических и экспериментальных результатов, полученных к настоящему времени, на основании которых сформулирована и обоснована тема исследований диссертации.

Во второй главе описаны методы синтеза и контроля однофазности поликристаллических образцов системы $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$ стехиометрических составов, а также экспериментальные методики,

использованные для комплексного исследования магнитных и тепловых свойств Li-Ga шпинелей в широких интервалах магнитных полей и температур. Исследование изотерм $\sigma_T(H)$ и политерм $\sigma_H(T)$ удельной намагниченности в стационарных магнитных полях от 2Э до 15-20кЭ, получаемых с помощью сверхпроводящего соленоида или электромагнита, было проведено: при $T = 4,2 \pm 200\text{K}$ на баллистическом магнитометре (чувствительность $10^{-3} \text{Гссм}^3 \text{с}^{-1}$); при $T = 77-700\text{K}$ - на маятниковом магнитометре (чувствительность $10^{-1} \text{Гссм}^3/\text{г}$). Начальная восприимчивость в постоянных полях, создаваемых объемным соленоидом при $T = (77 \pm 1000)\text{K}$ была измерена индукционным баллистическим методом (чувствительность $\sim 10^{-3} \pm 10^{-4}$); восприимчивость в парамагнитной области при $T > 300\text{K}$ - методом Гау с использованием микроаналитических весов (чувствительность 10^{-7}); динамическая восприимчивость на первой гармонике перемагничивающего поля с частотой от 0 до 4кГц и амплитудой $H_0 \leq 30\text{Э}$ была измерена индукционным методом, выделение действительной χ' и мнимой χ'' частей осуществлялось с помощью МПИ-2 (чувствительность метода 10^{-5}). Во всех случаях температура измерялась откалиброванными терморезисторами медь-константан или - при высоких температурах - хромель-алюмель.

Температурные зависимости теплоемкости были измерены с использованием вакуумного адиабатического калориметра с адсорбционным насосом, температура измерялась угольным термометром, изготовленным и проградуированным во ВНИИФТРИ.

Третья глава посвящена исследованию типов и структуры состояний, реализующихся в системе разбавленных шпинелей $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5-x}\text{Ga}_x\text{O}_4$ в ранее не рассматривавшемся подробно интервале концентраций немагнитных ионов Ga^{3+} $0,8 \leq x \leq 1,2$, что представляло интерес как начальная стадия разрушения дальнего ферри-магнитного порядка, т.к. в соответствии с концентрационной фазовой x - T диаграммой для $x > 1,2$ при низких температурах реализуются неупорядоченные кластерные состояния типа ФСС /1, 2/. Li-Ga шпинели удовлетворяют всем модельным представлениям, положенным в основу теоретических исследований, в которых рассматривается обменный механизм формирования неупорядоченных состояний типа СС /3/. Поэтому вопрос о типе и структуре магнитных состоя-

ний изучался в плане их обусловленности и связи с возмущением обменного взаимодействия, вносимого диамагнитным замещением $\text{Ga}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$. Было учтено, что, наряду с неупорядоченными ФСС состояниями, предсказанными в /3/, Li-Ga шпинелях при $0,8 \leq x \leq 1,2$ могут возникнуть неколлинеарные спиновые упорядочения, соответствующие регулярным или статистическим угловым структурам. В связи с этим в узком смысле задача состояла в проведении комплексного исследования магнитных свойств с целью обнаружения признаков, характерных для каждого из перечисленных магнитных состояний. Независимо от этого в рамках модели молекулярного поля Нееля с использованием результатов исследования температурных зависимостей обратной парамагнитной восприимчивости $\chi_p^{-1}(T)$ была проведена оценка характера возмущения обменного взаимодействия, обусловленного замещением $\text{Ga}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$.

Исследование изотерм намагниченности, проведенное в широком интервале температур в сильных магнитных полях (до $15+20\text{кЭ}$), а также температурных зависимостей начальной восприимчивости позволило определить характер изменения свойств, обусловленных дальним магнитным порядком: при $0,8 \leq x \leq 1,2$ точка Кюри и спонтанный магнитный момент при ОК регулярно понижаются. Изменение обменного взаимодействия при замещении $\text{Ga}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$ приводит также к изменению типа температурных зависимостей спонтанной намагниченности $\sigma_s(T)$ от обычного вейссовского Q (для $x < 1,2$) к P типу ($x = 1,2$) - кривая $\sigma_s(T)$ имеет слабый максимум. В области $0,9 \leq x < 1,2$ обнаружены своеобразные особенности проявления закона $T^{3/2}$ Блоха для намагниченности: в координатах $\sigma_s - T^{3/2}$ экспериментальные зависимости $\sigma_s(T)$ аппроксимируются двумя протяженными линейными участками, заметно отличающимися наклоном. Такое поведение может быть интерпретировано как свидетельство изменения закона дисперсии спиновых волн вследствие флуктуаций обмена. Для $x = 1,2$ в интервале температур ($4,2 - 80$)К закон $T^{3/2}$ не выполняется. Во всех случаях, т.е. при $0,8 \leq x \leq 1,2$, при низких температурах в больших полях не наблюдалось заметной восприимчивости парапроцесса, являющейся характерным признаком обычных неколлинеарных структур, что позволило сделать вывод об их отсутствии. Этот вывод согласуется с результатами оценки ха-

рактера изменения обменного взаимодействия, из которых следует, что неколлинеарные макроскопические спиновые структуры в этой области содержания Ga^{3+} не образуются.

Типичные СС свойства, как известно, могут быть обнаружены только в слабых магнитных полях. Проведение такого рода исследований в статических магнитных полях $H < 100Э$ показало, что: при низких температурах наблюдается магнитная необратимость – отличие политерм $\sigma_H(T)$, измеренных в режимах "ZFC" (предварительное охлаждение до 4,2К в отсутствие H) и "FC" (предварительное охлаждение при $H = const$) – и магнитная вязкость – неравновесная намагниченность σ_{ZFC} зависит от времени. Окончательный вывод об образовании в области концентраций $0,9 \leq x \leq 1,2$ при низких температурах неупорядоченных ФСС состояний был сделан на основании результатов исследования температурных зависимостей действительной $\chi'(T)$ и мнимой $\chi''(T)$ частей динамической восприимчивости. На зависимостях $\chi''(T)$ при $T_f = 9K$ ($x = 0,9$) и $T_f = 12K$ ($x = 1,2$) имеется характерный острый максимум, размывающийся, а затем исчезающий при увеличении h_0 . Особенности магнитных свойств в малых постоянных и переменных полях свидетельствуют о том, что после разрушения при $T = T_f$ дальнего СС порядка для поперечных по отношению к \vec{O}_a составляющих спинов в некотором конечном интервале температур $T > T_f$ в структуре сохраняются изолированные области локальной неколлинеарности (ОЛН).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что концентрационная область $0,8 < x \leq 1,2$ на фазовой x - T диаграмме разбавленных шпинелей $Li_{0,5}Fe_{2,s-x}Ga_xO_4$ соответствует однородным ФСС состояниям, в формировании которых, участвуют только отдельные спины, а не спины и спиновые кластеры, как в неоднородных ФСС состояниях при $x > 1,2$. Образование таких состояний может быть обусловлено только обменным механизмом, в частности предложенным в /3/.

В четвертой главе рассмотрены магнитные свойства неупорядоченных состояний, реализующихся в окрестностях мультикритической точки x - T диаграммы системы $Li_{0,5}Fe_{2,s-x}Ga_xO_4$ ($x_0 = 1,5$), где ярко выражены эффекты перколяционной неоднородности магнитной структуры. Последнюю можно представить в виде совокупности двух

взаимодействующих подсистем матрицы фрустрированных спинов и погруженных в нее перколяционных кластеров с размерами \sim сотен \AA , в пределах которых сохраняется ферромагнитное упорядочение. Основное внимание сосредоточено на таких вопросах, как существование и особенности фазового перехода ПМ - ФМ в неоднородных системах.

Большая часть представленных в работе экспериментальных результатов относится к концентрации Ga^{3+} , наиболее близкой к мультикритической точке фазовой диаграммы, - $x = 1,45$. Для решения вопроса о наличии фазового перехода ПМ - ФМ были проведены исследования политерм $\sigma_n(T)$ и изотерм $\sigma_T(H)$ намагниченности в слабых и сильных полях, результаты которых были использованы для определения точки Кюри традиционными классическими методами. Обработка экспериментальных зависимостей $\sigma_T(H)$, измеренных в полях $H \leq 20\text{кЭ}$, по методу Белова-Аррота, в основу которого положена теория фазовых переходов второго рода Ландау, показала существование $T_c = 110\text{К}$. Такое же значение T_c было получено в результате скейлинг-анализа восприимчивости в парамагнитной области, которая при $H \rightarrow 0$ описывается соотношением: $\chi = A(T - T_c)^{-\gamma}$. В качестве особенностей поведения следует отметить то, что скейлинговое соотношение для χ выполняется в довольно широкой области температур, но не в непосредственной близости к T_c , а начиная с температур, на $(20 \div 30)\text{К}$ превышающих $T_c = 110\text{К}$. Критический показатель γ резко увеличивается с ростом поля от 2 до 20Э , его значение в наименьшем поле ($\gamma \sim 2$) совпадает с обычно наблюдающимся для неоднородных систем. Эти результаты в совокупности позволили сделать вывод о том, что в Li-Ga шпинелях вблизи мультикритической точки x - T диаграммы фазовый переход ПМ - ФМ существует и имеет характерные черты фазового перехода второго рода. Это подтверждается также тем, что на температурной зависимости магнитного вклада в теплоемкость $C_m(T)$ в этом интервале температур обнаружена особенность в виде λ точки. В работе также приведены результаты, свидетельствующие о большом влиянии на T_c конкретных особенностей кластерной структуры. Для проведения такого рода исследований был использован более подходящий в методическом плане стехиометрический состав - $x = 1,4$. Изменение кластерной

структуры осуществлялось посредством использования различных режимов термообработки одного и того же поликристаллического образца. Для закаленного и медленно охлажденного образцов при практически неизменном значении намагниченности насыщения при $T = 4,2\text{K}$ было получено отличие в T_c порядка 100K . Это показывает, что концентрационные границы состояний, реализующихся в окрестностях мультикритической точки x - T диаграммы, могут заметно сдвигаться.

В пятой главе представлены результаты исследования особенностей температурных зависимостей магнитной части теплоемкости $C_m(T)$, предпринятые с целью изучения характера спектра магнитных возбуждений в различных концентрационных сечениях x - T фазовой диаграммы. Магнитный вклад для всех исследованных образцов с $0 \leq x < 2,5$ был определен как разность теплоемкости, измеряемой экспериментально, и теплоемкости $\text{Li}_{0,5}\text{Ga}_{2,5}\text{O}_4$, которая считалась равной решеточному вкладу. Отклонения от закона спиновых волн $T^{3/2}$ обнаружены уже в области концентраций Ga^{3+} $0,9 \leq x < 1,2$, где при низких температурах образуются однородные ФСС состояния. Однако особенности поведения $C_m(T)$ в виде хорошо выраженных широких максимумов наблюдаются только при температурах $T > T_f$. Это означает, что на начальной по концентрации стадии образования неупорядоченных ФСС состояний при $T < T_f$ основной вклад в C_m дают спиновые волны с квадратичным законом дисперсии и ими при $T = T_f$ разрушается дальний СС порядок для поперечных составляющих спинов. Максимумы на зависимостях $C_m(T)$ при $T > T_f$ можно объяснить существованием локальных неоднородностей коллинеарного ферромагнитного упорядочения - ОЛН, благодаря чему в дополнение к спиновым волнам в спектре возбуждений появляются квазилокальные моды колебаний.

Для неоднородных ФСС состояний ($x = 1,35; 1,45$) характерно типичное СС поведение: $C_m(T) \sim T$ при $T \leq T_f$. Исследование зависимости $C_m(T)$ для образца с $x = 1,45$ в широком интервале температур ($4,2\text{K} - T_c$) показало, что на зависимости $C_m(T)$ при $T > T_f$ существует очень интенсивный широкий максимум, а при $T \sim T_c$ особенность в виде λ -точки. Сопоставление температурного хода $C_m(T)$ с зависимостью от температуры спонтанной намагниченности σ_s , оп-

ределенной кинк-методом в малых полях H , показывает, что расположение максимума зависимости $C_m(T)$ по температуре совпадает с той областью, где наблюдается резкое уменьшение $\sigma(T + OK)$. Поскольку в неоднородной системе (матрица + кластеры) наибольший вклад в σ_m дают перколяционные кластеры, в работе сделан вывод о том, что в области линейного хода $C_m(T)$, т.е. при $T < T_f$, основной вклад в спектр магнитных возбуждений дают фрустрированные спины матрицы, тогда как максимум $C_m(T)$ обусловлен термическими флуктуациями магнитных моментов кластеров.

В СС области фазовой диаграммы также наблюдается линейная зависимость $C_m(T)$, но, если для $x = 1,9$ $C_m(T) \sim T$ практически вплоть до $T = T_f$, то вблизи мультикритической точки - образец с $x = 1,6$ - только при температурах $T \leq 0,2T_f$. В области отклонения от линейности для обоих образцов получены однотипные зависимости - $C_m(T) \sim T^{0,52}$. Эти результаты также показывают присутствие в спектре возбуждений двух вкладов, связанных соответственно со спинами фрустрированной матрицы и кластерами. Таким образом, в совокупности результаты исследования особенностей температурных зависимостей $C_m(T)$ в различных концентрационных сечениях фазовой x - T диаграммы показывают, что характер спектра магнитных возбуждений в неупорядоченных магнетиках в существенной мере зависит как от типа, так и от структуры этих состояний.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

1. В широком диапазоне температур и магнитных полей проведено систематическое исследование магнитных свойств разбавленных ферримагнитных шпинелей $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$, являющихся хорошими модельными объектами для изучения обменного механизма формирования неупорядоченных состояний типа СС в гейзенберговских системах с короткодействием.

2. В рамках модели молекулярного поля проведена оценка характера возмущения обменного взаимодействия, обусловленного диамагнитным замещением $Ga^{3+} + Fe^{3+}$.

3. Установлено, что начальная по концентрации ($x = 0,9+1,1$) стадия нарушения коллинеарного ферримагнитного упорядочения соответствует образованию при низких температурах ($T \leq T_f$) состояний типа ферримагнитного СС (ФСС), где дальний ферримагнитный

порядок для продольных составляющих спинов сосуществует с СС порядком для поперечных.

4. ФСС состояния, реализующиеся при $x = 0,9 \div 1,1$, обусловлены обменным механизмом и могут быть отнесены к числу однородных - в их формировании участвуют только отдельные спины, а не спины и спиновые кластеры, как при $x > 1,2$. Характерным для этих состояний является слабая устойчивость по отношению к воздействию внешнего поля и большие времена релаксации неравновесной намагниченности.

5. На начальном этапе образования ФСС состояний претерпевают некоторые изменения и свойства, связанные с дальнейшим ферромагнитным порядком, в частности, обнаружены своеобразные особенности проявления закона $T^{3/2}$ Блоха для температурной зависимости намагниченности насыщения, которые могут быть интерпретированы как свидетельство изменения закона дисперсии спиновых волн в результате флуктуации обменного взаимодействия.

6. Установлено, что вблизи концентрационной границы существования ферромагнитного порядка (мультикритическая точка $x - T$ диаграммы), где в магнитной подсистеме сильно выражена неоднородность перколяционной природы, фазовый переход ПМ - ФМ существует и имеет, в основном, те же черты, что и для однородных систем. Неоднородность проявляется в типичном для подобных систем завышенном значении критического показателя восприимчивости γ , причем установлено, что величина γ резко увеличивается с ростом поля H .

7. Своеобразные особенности поведения, обнаруженные при исследовании температурных зависимостей магнитной части теплоемкости $C_m(T)$ в различных концентрационных сечениях $x - T$ диаграммы системы $Li_{0,5-x}Fe_{2,5-x}Ga_xO_4$, свидетельствуют о том, что спектр магнитных возбуждений содержит вклады различной природы и его характер непосредственно определяется конкретными особенностями структуры магнитных состояний.

Цитированная литература и основные публикации:

1. Ефимова Н.Н., Попков Ю.А., Ткаченко Н.В. Состояние кластерного спинового стекла в разбавленных ферромагнетиках // ЖЭТФ. - 1986. - Т.90, вып.4. - С.413-420.

2. Ефимова Н.Н., Попков Ю.А., Ткаченко Н.В. Концентрационный переход ФСС-СС в неупорядоченных системах на основе разбавленных ферримагнитных окислов // ФНТ. - 1990. - Т.16, N12. - С.1565-1575.

3. Villain J. Insulating Spin Glasses. // Z.Phys.B. - 1979. - V.33. - P.31-42.

4. Ефимова Н.Н., Попков Ю.А., Халиби М. Динамическая восприимчивость в спинстекольной системе $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5-x}\text{GaO}_x$ // В сб. научных работ аспирантов ХГУ. Харьков: Основа, 1992. - С.127-132.

5. Ефимова Н.Н., Куфтерина С.Р., Попков Ю.А., Халиби М. Эволюция спектра низкоэнергетических возбуждений при образовании неупорядоченных состояний СС // Тез. доклада 29 Совещания по физике низких температур, Казань. - 1992. - часть 3. - С.Т44.

6. Ефимова Н.Н., Куфтерина С.Р., Овчаренко В.И., Перваков В.А., Тютрюмова Н.Ю., Халиби М. Магнитная структура и спектр возбуждений неупорядоченного ферримагнетика вблизи мультикритической точки концентрационной фазовой диаграммы // Тез. доклада 6 международного семинара "Физика магнитных явлений". - С.20. - (Донецк, 1993).

7. Ефимова Н.Н., Попков Ю.А., Халиби М. Влияние перколяционных эффектов на структуру и свойства неупорядоченных магнитных состояний в разбавленных ферримагнитных окислах // Тез. доклада 7 международного семинара "Физика магнитных явлений". - С.96. - (Донецк, 1994).

8. Ефимова Н.Н., Попков Ю.А., Куфтерина С.Р., Халиби М., Перваков В.А., Овчаренко В.И., Тютрюмова Н.Ю. Магнитные и тепловые свойства на начальной стадии формирования состояний типа спинового стекла в системе $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5-x}\text{GaO}_x$ ($x=0,9;1,0$). // ФНТ. - 1994. - Т.20, N6. - С.546-555.

Ответственный за выпуск
к. ф. -м. н. Н. Н. Ефимова

Подписано к печати 04.07.94 г.
Формат 60x84 1/16. Уч. -изд. л. 1, 0.
Тираж 100. Зак. 18. Бесплатно.

Ротапринт Института монокристаллов
Харьков, пр. Ленина, 60.
30-70-97.

458486

AB 30.665

AB 30.665