

НЕКРАСОВА Юлия Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И МЕХАНИЗМОВ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
ОБРАЗЦОВ
 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x = 0.3$; $y = 0.15, 0.20, 0.25$)**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Белгородском национальном исследовательском университете.

Научный руководитель: **Захвалинский Василий Сергеевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Официальные оппоненты: **Немов Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики и оптики твёрдого тела, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Рембеза Станислав Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ППТНЭ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ВГТУ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ЮЗГУ»), г. Курск

Защита состоится «11» октября 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при Белгородском государственном национальном исследовательском университете по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Студенческая, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Беленко В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование неупорядоченных систем, частный случай которых представляют собой легированные полупроводники, занимает одно из центральных мест в современной физике конденсированной среды. Яркими представителями новых функциональных материалов являются манганиты-перовскиты – соединения со структурой перовскита и общей формулой $R_{1-x}A_xMnO_3$, где R – трехвалентный редкоземельный элемент (La, Y, Nd), A – двухвалентный щелочноземельный элемент (Sr, Ca, Ba). Особенностью манганитов-перовскитов, демонстрирующих колоссальное магнитосопротивление (КМС), является существование ионов марганца смешанной валентности $Mn^{3+,4+}$, вызванное дырочным легированием, сопровождающимся конкуренцией ферромагнитного двойного обмена между ионами $Mn^{3+}-Mn^{4+}$ и антиферромагнитного суперобменного взаимодействия между ионами $Mn^{3+}-Mn^{3+}$ и локальными янтеллеровскими искажениями, приводящими к образованию малых поляронов.

Манганиты широко исследуются и применяются в технике благодаря уникальному сочетанию электрических, магнитных и каталитических свойств, легко варьируемых с помощью целенаправленного легирования.

Благодаря высокой степени поляризации по спине носителей заряда и наличию ферромагнетизма при комнатной температуре манганиты являются перспективными материалами приборных структур в спинтронных устройствах и устройствах с резистивной энергонезависимой магнитной памятью.

Высокая химическая стабильность, большое электросопротивление, низкая себестоимость манганитов делают возможным применение их в качестве рабочего материала для охлаждающих систем, работающих при комнатных температурах (холодильные установки на магнитокалорическом эффекте), и использование в топливных ячейках.

Эффект постоянной фотоиндуцированной намагниченности может быть использован при создании фотомангнитных устройств памяти или фотопереключаемых приборных электронных структур.

Сложность химического состава и микроструктуры функциональных материалов выдвигает на первый план проблему оптимизации их параметров для прикладных целей, которая отчасти связана с определением механизмов переноса носителей заряда. Поэтому исследование электрофизических свойств полупроводников и полупроводниковых структур с учетом их реальной микроструктуры является важной и актуальной задачей [1].

Цель работы – определение фазового состава, характера магнитного упорядочения, механизмов проводимости образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **основные задачи**.

1. Анализ температурных зависимостей удельного сопротивления образцов $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{O}_3$.

2. Расчет и анализ макро- и микропараметров, характеризующих механизмы электропроводности $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$, $y=0.15$, 0.20 , 0.25).

3. Анализ температурных зависимостей намагниченности образцов $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{O}_3$.

4. Расчёт и анализ параметров, описывающих характер упорядочения спиновой системы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$, $y=0.15$, 0.20 , 0.25).

Научная новизна

Впервые показано, что в соединениях $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ температурная зависимость удельного сопротивления демонстрирует наличие режима прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка (ПППДП) Мотта в высокотемпературном ($T \sim 220 \text{ K} - 170 \text{ K}$) и низкотемпературном (начиная от температур, близких температуре Кюри) интервалах, которые разделены промежуточным интервалом (от 150 K до температур Кюри) проводимости типа ПППДП Шкловского-Эффроса с

обычной водородоподобной волновой функцией локализованных носителей и с отсутствием узкодействующего флуктуирующего потенциала.

Впервые проведён расчёт и анализ макроскопических и микроскопических параметров, позволивший уточнить механизмы прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в зависимости от температуры и концентрации железа образцов $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{O}_3$.

Подтверждено критическое поведение температурной зависимости магнитной восприимчивости образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. Подтверждено наличие фазового расслоения в соединениях $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ и его влияние на магнитные и электронные свойства.

Практическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимальных составов манганитов перовскитов для конструирования магнитной энергонезависимой памяти. Кроме того, результаты исследований облегчают применение перовскитов-манганитов в фотомагнитных устройствах памяти или фотопереключаемых приборных электронных структурах на основе эффекта постоянной фотоиндуцированной намагниченности. Полученные результаты полезны для объяснения свойств и прогнозирования применения перовскитов-манганитов в тех или иных устройствах использующих эффект колоссального магнитосопротивления, в том числе, со спинзависимым транспортом носителей заряда в туннельных приборных структурах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Механизмы и основные параметры прыжковой электропроводности манганитов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$; $y=0.15, 0.20, 0.25$).
2. Установленный характер магнитного упорядочения, зависящий от состава, определенные критические показатели степени, соответствующие

упорядочению спиновой системы, подтверждающие критическое поведение магнитной восприимчивости в керамическом манганите-перовските $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$; $y=0.15, 0.20, 0.25$).

3. Результаты исследования влияния эффекта фазового расслоения на механизмы электропроводности и магнитные свойства манганита-перовскита $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$; $y=0.15, 0.20, 0.25$).

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на XIII Международном междисциплинарном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-13, 16–21 сентября 2010 г., пос. Лоо, Краснодарский край).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе пять – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад

Личный вклад диссертанта состоит в получении керамических объёмных образцов методом традиционной твёрдотельной реакции; анализе температурных зависимостей удельного электросопротивления и намагниченности исследуемых образцов; расчёте параметров, характеризующих магнитные и транспортные свойства материала; соавторстве опубликованных статей.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных результатов, заключения и списка литературы из 177 наименований. Основная часть работы изложена на 125 страницах, содержит 30 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведены литературные данные по теме диссертационного исследования. Рассмотрены технологии получения, кристаллическая и электронная структура, основные свойства перовскитов-манганитов со смешанной валентностью ионов марганца. Приведены основные модели, в рамках которых осуществляется рассмотрение этих свойств. Дается определение эффекта колоссального магнитосопротивления. Рассмотрены механизмы обменного взаимодействия между электронами проводимости и магнитными моментами не полностью заполненных оболочек атомов марганца. Особое внимание уделено рассмотрению эффекта фазового расслоения, обусловленного неомогенностью перовскитов-манганитов, которая приводит к возникновению двух конкурирующих фаз, например: фазы зарядово-упорядоченного изолятора и ферромагнитной металлической фазы. Подчеркивается тот факт, что структура манганитов принадлежит семейству Рудлесдена-Поппера. При этом в соединениях $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ при комнатной температуре в зависимости от уровня легирования реализуются типы структур: кубическая, моноклинная, ромбоэдрическая и орторомбическая. Отдельно рассмотрены свойства соединения $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, которое является базовым для материалов, исследованных в рамках данной работы.

Во второй главе «Получение, методы исследования и характеристики образцов LSMFO ($x=0.3$; $y=0.15, 0.20, 0.25$)» дано подробное описание технологии получения керамических образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ методом стандартной твёрдотельной реакции, а также способов характеристики и исследования образцов. В соответствии с результатами рентгенофазного

анализа, представленными в таблице, легирование железом приводит к ромбоэдрическому искажению структуры.

Таблица 1. Состав, пространственная группа и параметры решетки исследованных образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$.

Состав	Пространственная группа	a (Å)	c (Å)
$x = 0.30, y = 0.00$	куб. $Pm\bar{3}m$	$a = 7.745(5)$	
$x = 0.30, y = 0.15$	Ромб. R-3c	$a = 5.508(4)$	$c = 13.365(6)$
$x = 0.30, y = 0.20$	Ромб. R-3c	$a = 5.513(2)$	$c = 13.360(4)$
$x = 0.30, y = 0.25$	Ромб. R-3c	$a = 5.513(4)$	$c = 13.376(7)$

Согласно результатам электронной микроскопии (см. рисунок 1), размер зерна составил единицы микрон. EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) анализ показал, что распределение элементов по объёму образца и в пределах отдельных зёрен однородно и соответствует заложенной стехиометрии.

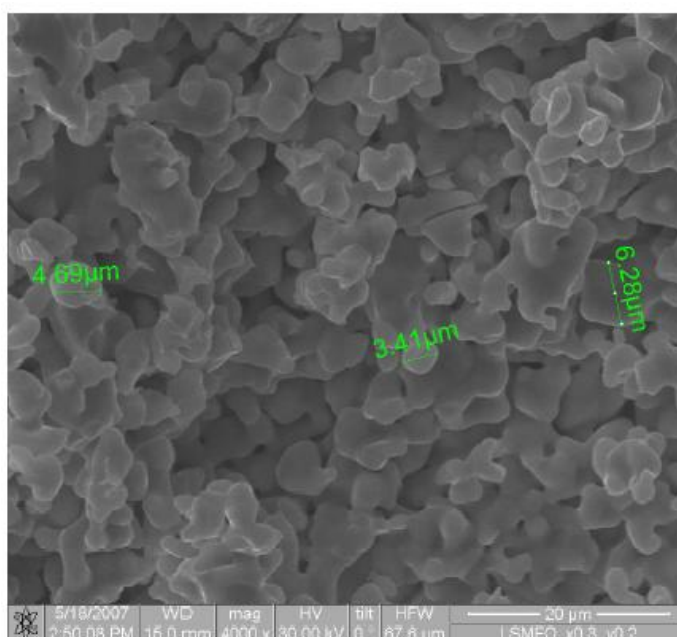


Рис. 1. Изображение поверхности скола керамического образца $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.30, y=0.20$), полученное на электронном микроскопе Quanta 200 3D [2].

Исследования температурной зависимости удельного сопротивления проводились в диапазоне температур $T = 5 - 310$ К с использованием стандартной четырёхзондовой технологии в поперечном магнитном поле ($\mathbf{B} \perp \mathbf{j}$) величиной $B = 0 - 8$ Тл, при повышении и понижении температуры.

Исследования температурных зависимостей намагниченности керамических образцов $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$ и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{O}_3$ были проведены с использованием РФ-СКВИД магнетометра в диапазоне температур от 5 К до 300 К. Образцы охлаждались от комнатной температуры до 5 К в нулевом поле (ZFC) или в постоянном поле $B = 10$ Гс, 0.5 кГс и 1 кГс (FC).

Третья глава посвящена исследованию механизмов электропроводности образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ в зависимости от концентрации железа.

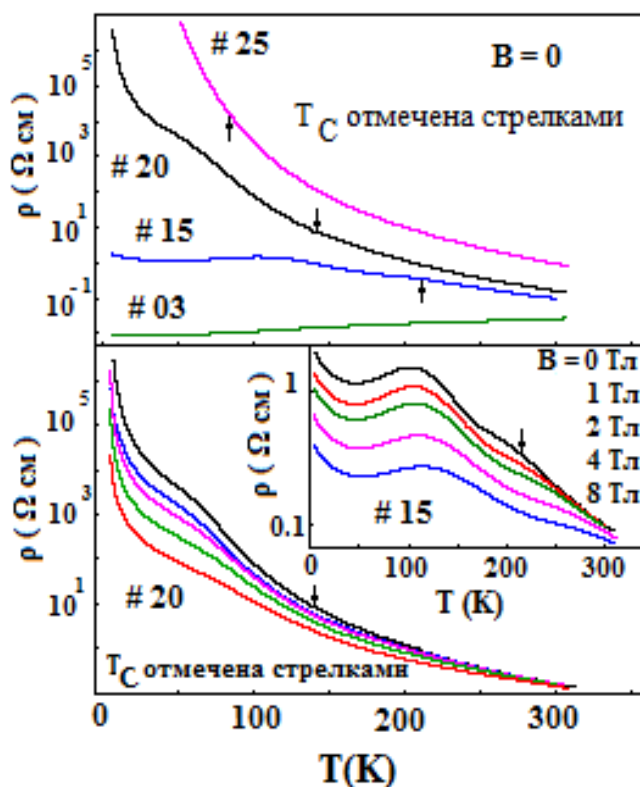


Рис. 2. Верхняя панель: Температурная зависимость сопротивления образцов LSMFO в нулевом магнитном поле. Нижняя панель: Графики зависимости ρ от T в полях $B \geq 0$ для образцов # 15 и # 20.

Температурная зависимость удельного сопротивления на рис.2 демонстрирует активационное поведение, сильную зависимость от содержания железа и КМС эффект в области температуры магнитного фазового перехода, который усиливается с увеличением внешнего магнитного поля.

Дается понятие прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка и её типы. Показано, что в соединениях $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ температурная зависимость удельного сопротивления демонстрирует наличие режима ПППДП Мотта в высокотемпературном ($T \sim 220 \text{ K} - 170 \text{ K}$) и низкотемпературном (начиная от температур, близких температуре Кюри) интервалах, которые разделены промежуточным интервалом (от 150 K до температуры Кюри) проводимости типа ПППДП Шкловского-Эфроса с обычной водородоподобной волновой функцией локализованных носителей и с отсутствием узкодействующего флуктуирующего потенциала.

Проведён расчёт и анализ макроскопических и микроскопических параметров, позволивший уточнить механизмы прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в зависимости от температуры и концентрации железа с использованием универсального уравнения $\rho(T) = \rho_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^p$ [3, 4], где $\rho_0 = A \cdot T^m$. Рассчитаны параметры p и m , связанные с типом механизма прыжковой проводимости. Получены пары значений $p = 1/4$ и $m = 25/4$, характерные для ПППДП Мотта, $p = 1/2$ и $m = 9/2$, характерные для ПППДП Шкловского - Эфроса.

Установлено, что для образца LSMFO, содержащего 25% железа, в режиме ПППДП Шкловского-Эфроса плотность локализованных состояний $g(E)$ вблизи уровня Ферми содержит «мягкую» щель $\Delta \approx 0.30$ эВ, обусловленную кулоновским электростатическим отталкиванием между электронами, находящимися на одном узле, и жёсткую щель $\delta \approx 0.24$ эВ, обусловленную разупорядочением структуры вследствие легирования.

Установлено, что легирование железом приводит к незначительному увеличению радиуса локализации α с ростом концентрации железа y (таблица 2).

Таблица 2. Значения g (μ) и α в различных температурных интервалах ПППДП исследованных образцов в нулевом магнитном поле.

образец No.	g (μ), 10^{20} эВ $^{-1}$ см $^{-3}$	(НТМ) Å	(ИТМ) Å	(ЛТМ) Å	(SE) Å
# 15	2.8	1.1	–	–	–
# 20	1.8	1.1	1.2	3.5	–
# 25	0.9	1.3	–	1.1	6.5

Значения α в различных температурных интервалах близки друг другу и не превышают максимального радиуса малых решёточных поляронов, равного 5.4, 5.5 и 5.6 Å для образцов # 15, # 20 и # 25.

Четвёртая глава посвящена исследованию магнитных свойств образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. Важной чертой магнитного поведения образцов LSMFO, следующей из графиков на рис. 3 является необратимость или расхождение кривых магнитной восприимчивости $\chi_{ZFC}(T)$ и $\chi_{FC}(T)$ начинающееся вблизи ФМ перехода. В образце, содержащем 25% железа, начало необратимости существенно смещается в сторону высоких температур. Необратимое магнитное поведение свидетельствует о возникновении фрустрированного состояния в LSMFO. Подобное поведение характерно для фаз спинового стекла (СС) или кластерного стекла (КС), возникающих ниже температуры начала замораживания магнитных моментов. Здесь фрустрация связана с конкуренцией взаимодействий между моментами [5]. Достойной внимания особенностью на рисунке 3 является уширение ФМ перехода с ростом магнитного поля, B . Подобное поведение связано с фазовым расслоением и возрастанием доли обогащённой дырками

ферромагнитной (ФМ) фазы, включённой в парамагнитную (ПМ) матрицу. Объём фазы ФМ частиц чувствителен к внешнему магнитному полю. Другие, достойные внимания особенности (см. рис. 3) это относительно слабая температурная зависимость $\chi_{ZFC}(T)$ в пределах широкого интервала ниже T_C в образце # 15, аналогичное поведение зависимости $\chi_{ZFC}(T)$ наблюдаемое в образце # 20, с понижением температуры до ~ 60 К, с последующим быстрым снижением, а также закруглённый максимум зависимости $\chi_{ZFC}(T)$, наблюдаемый в образце # 25 ниже T_C вместо плато, по сравнению с образцами # 15 и # 20.

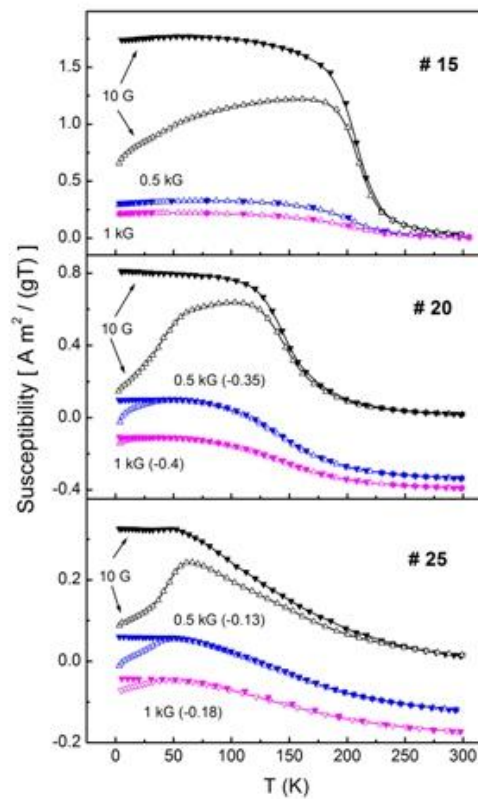


Рис. 3. Графики температурной зависимости магнитной восприимчивости $\chi_{ZFC}(T)$ и $\chi_{FC}(T)$ образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$, полученные при охлаждении в нулевом (ZFC) и постоянном (FC) магнитном поле.

Понижение T_C для образцов LSMFO в промежутке $y = 0.15 - 0.25$ определяется, главным образом, нарушением механизма взаимодействия ДО ионами Fe^{3+} , тогда как беспорядок, вызванный легированием Fe играет незначительную роль в отличие от $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$, где зависимость $T_C(y)$ находится под сильным влиянием беспорядка [5] и легирование Fe приводит к возникновению дополнительного флуктуирующего близкодействующего

потенциала, вносящего микроскопический беспорядок при $y \geq 0.03$ [6]. В исследованных образцах ФМ переход имеет место при температуре Кюри, понижающейся с ростом концентрации железа, y , что связано с ослаблением двуобменного ферромагнитного взаимодействия.

В результате определения характера фрустрации установлено, что образец, содержащий 25% железа, демонстрирует поведение характерное для спинового стекла. Поведение образцов, содержащих 15% и 20% железа, характерно для кластерного стекла.

Исследование образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ подтвердили, что механизмы электропроводности и магнитные свойства перовскитов манганитов со смешанной валентностью определяются склонностью этих соединений к фазовому расслоению.

Анализ критического поведения $\chi(T)$ вблизи ФМ перехода, описываемого уравнением $\chi(T) \sim \left(\frac{T}{T_c} - 1\right)^\gamma$, выявил в интервале концентраций Fe между $y = 0.15-0.20$, наличие двух различных спиновых систем: перколяционной и неперколяционной (Гейзенберга). Вид спиновой системы определяется критическим индексом γ . Расчёт значений γ произведён с использованием метода минимизации стандартного отклонения.

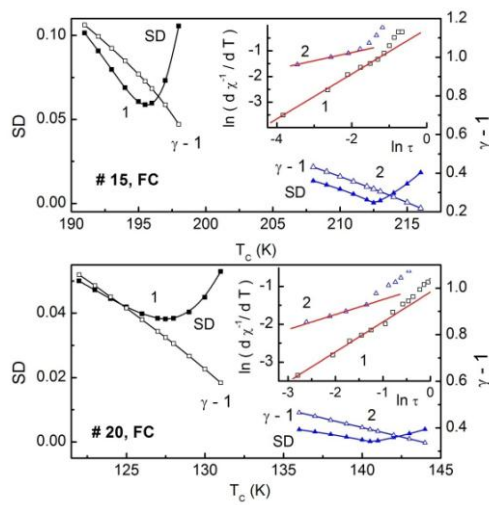


Рис. 4. Температурные зависимости стандартного отклонения SD и критической степени $\gamma-1$ от T_c , полученные внутри температурных интервалов ΔT_1 и ΔT_2 . Вставки: графики зависимости $\ln(d\chi^{-1}/dT)$ от $\ln \tau$ в интервалах ΔT_1 и ΔT_2 образцов LSMFO.

В образцах LSMFO с концентрацией железа $y = 0.25$ влияние перколяционных процессов на магнитную восприимчивость не наблюдается, что сопровождается увеличением необратимости и подавлением ферромагнетизма.

Таблица 3. Значения T_C и γ , найденные внутри оптимального температурного интервала ΔT для обоих режимов охлаждения.

Образец	Режим	$T_C^{(1)}$ (К)	γ_1	ΔT_1 (К)	$T_C^{(2)}$ (К)	γ_2	ΔT_2 (К)
# 15	ZFC (<i>f</i>)	200.5 ±	1.81 ±	210 –	210 ± 2	1.31 ±	230 –
	ZFC	1.5	0.03	230	210.5 ±	0.04	249
	(<i>s</i>)	197 ± 1	1.77 ±	201 –	1.5	1.36 ±	220 –
	FC (<i>f</i>)	199 ± 1	0.07	258	207 ± 1	0.02	249
	FC (<i>s</i>)	195.5 ±	1.86 ±	208 –	212.5 ±	1.42 ±	230 –
	1.5	0.06	268	1.5	0.03	259	
			1.87 ±	200 –		1.32 ±	219 –
			0.04	249		0.03	249
# 20	ZFC (<i>f</i>)	127 ± 1	1.80 ±	140 –	139 ± 1	1.39 ±	147 –
	ZFC	129.5 ±	0.04	191	141.5 ±	0.04	161
	(<i>s</i>)	1.5	1.80 ±	140 –	1.5	1.35 ±	147 –
	FC (<i>f</i>)	124.5 ±	0.04	191	136 ± 2	0.04	171
	FC (<i>s</i>)	1.0	1.81 ±	135 –	140.5 ±	1.45 ±	151 –
	127.5 ±	0.04	185	1.5	0.03	185	
	1.5	1.79 ±	135 –		1.39 ±	157 –	
			0.06	164		0.02	177
# 25	ZFC (<i>f</i>)	93 ± 2	1.01 ±	103 –	–	–	–
	ZFC	94.5 ± 0.5	0.03	118	101 ± 2	1.45 ±	116 –
	(<i>s</i>)	–	1.08 ±	96 – 116	105 ± 2	0.03	143
	FC (<i>f</i>)	92.5 ± 1.5	0.03	–	102.5 ±	1.22 ±	113 –
	FC (<i>s</i>)	–	–	95 – 115	1.5	0.03	144
			1.10 ±			1.35 ±	115 –
		0.02			0.02	142	

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации обобщены результаты исследований магнитных свойств и механизмов электропроводности манганитов-перовскитов

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$, $y=0.15, 0.20, 0.25$) в широком диапазоне температур и магнитных полей.

1. Установлено, что исследованные образцы демонстрируют наличие режима ПППДП Мотта в высокотемпературном и низкотемпературном интервалах, которые разделены промежуточным интервалом проводимости типа ПППДП Шкловского-Эфроса с обычной водородоподобной волновой функцией локализованных носителей заряда и с отсутствием узкодействующего флуктуирующего потенциала.

2. Проведены расчёт и анализ параметров, связанных с механизмами электропроводности. Согласно расчётам, легирование железом приводит к незначительному увеличению радиуса локализации α с ростом концентрации железа y . Значения α в различных температурных интервалах близки друг другу и не превышают максимального радиуса малых решёточных поляронов, равного 5.4, 5.5 и 5.6 Å для образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$, $y=0.15, 0.20, 0.25$).

3. Подтверждено, что спектр локализованных состояний носит сложный характер зависимости по энергии, демонстрируя наличие мягкой и жёсткой щелей, значения которых равны $\Delta \approx 0.30$ эВ и $\delta \approx 0.24$ эВ соответственно.

4. Установлено, что в исследованных образцах LSMFO ФМ переход имеет место при температуре Кюри, понижающейся с ростом концентрации железа y , что связано с ослаблением двуобменного ферромагнитного взаимодействия.

5. Наблюдалась магнитная необратимость, вблизи ФМ перехода, свидетельствующая о фрустрированном состоянии LSMFO. При этом для образца, содержащего 25% железа, фрустрация связана с фазой спинового

стекла, а для образцов с 15% и 20% содержанием железа – кластерного стекла.

6. Показано, что наблюдаемое критическое поведение $\chi(T)$ вблизи ФМ перехода в интервале концентраций Fe между $y = 0.15 - 0.20$ обусловлено наличием двух различных спиновых систем: перколяционной и неперколяционной (Гейзенберга). Определены величины соответствующих критических показателей степени γ . При концентрации Fe $y = 0.25$ влияние перколяционных процессов на магнитную восприимчивость не наблюдается, что сопровождается увеличением необратимости и подавлением ферромагнетизма.

7. Подтверждена роль влияния эффекта фазового расслоения на магнитные свойства и механизмы электропроводности в соединении $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$; $y=0.15, 0.20, 0.25$).

Список цитируемой литературы

1. Галеева А.В. Исследование проводимости полупроводниковых структур методом импедансной спектроскопии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2011. 23 с.
2. Кувшинов С.М. Получение и свойства $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($x=0.3$, $y=0.03, 0.15, 0.20, 0.25$) / С.М. Кувшинов, R. Laiho, В.С. Захвалинский, В.Н. Стамов, П.А. Петренко // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. 2008. № 2.
3. Мотт Н. Электроны в неупорядоченных структурах. М.: Мир, 1969.
4. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
5. Laiho R. Low-field magnetic properties as indication of disorder, frustration and cluster formation effects in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ / Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Salminen J., Zakhvalinskii V.S. // J. Magn. Mater. 2002. 250. P. 267 – 274.

6. Laiho R. Variable-range hopping conductivity in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$: evidence of a complex gap in density of states near the Fermi level/ Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Petrenko P.A., Salminen J., Shakhov M.A., Safontchik M.O., Stamov V.S., Shubnikov M.V., Zakhvalinskii V.S.// J. Phys.: Condens. Matter. 2002. 14. P. 8043 – 8055.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Variable-range hopping conductivity of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ V. S. Zakhvalinskii, R. Laiho, A. V. Lashkul, K. G. Lisunov, E. Lahderanta, Yu. S. Nekrasova, P. A. Petrenko and V. N. Stamov. J. Phys.: Condens. Matter 23 (2011) 015802 (8pp).

2. Phase separation, ferromagnetism and magnetic irreversibility in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. V.S. Zakhvalinskii, R. Laiho, A.V. Lashkul, K.G. Lisunov, E. Lahderanta, Yu.S. Nekrasova, P.A. Petrenko. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323 (2011) 2186–2191.

3. Прыжковая проводимость $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. В. С. Захвалинский, R. Laiho, A. V. Lashkul, К. Г. Лисунов, E. Lähderanta, Ю. С. Некрасова и П. А. Петренко. Научные ведомости БелГУ . Серия: Математика. Физика. 2011. №11(106). Вып. 23. С. 24 – 43.

4. V. S. Zakhvalinskii , R. Laiho, A. V. Lashkul, K. G. Lisunov, E. Lähderanta, Yu. S. Nekrasova and P. A. Petrenko, Low-field magnetic properties of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ //Journal of Physics: Conference Series.Vol.303 (2011). P. 012067 (6).

5. V. S. Zakhvalinskii , R. Laiho, A. V. Lashkul, K. G. Lisunov, E. Lähderanta, Yu. S. Nekrasova and P. A. Petrenko, Hopping conductivity of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ //Journal of Physics: Conference Series. Vol.303 (2011). P.012066 (6).

Материалы конференций

6. Hopping Conductivity and Phase Evolution of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. V.S. Zakhvalinskii, R. Laiho, A.V. Laskhul, K. G. Lisunov, E. Lähderanta, Yu.S. Nekrasova, P. A. Petrenko, V.N. Stamov. Order, Disorder and Properties of Oxides. 13-th International meeting. 16-21 of September 2010, Rostov-on-Don-Loo, Russia. Vol. 1. P. 151-154.

7. Ferromagnetism and Irreversible Low-Field Magnetic Properties of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$. V.S. Zakhvalinskii, R. Laiho, A.V. Laskhul, K. G. Lisunov, E. Lähderanta, Yu.S. Nekrasova, P. A. Petrenko, V.N. Stamov. Order, Disorder and Properties of Oxides. 13-th International meeting. 16-21 of September 2010, Rostov-on-Don-Loo, Russia. Vol. 1. P. 155-158.