# МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

МОРОЗОВ Артем Сергеевич

# ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАНГАНИТОВ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Работа выполнена на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель:

# Королёва Людмила Ивановна,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

# Официальные оппоненты:

**Ползикова Наталья Ивановна**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией «Полупроводниковые приборы» Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Кугель Климент Ильич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теоретической и прикладной электродинамики РАН

Маренкин Сергей Фёдорович, доктор химических наук, профессор,

главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

Защита диссертации состоится «05» апреля 2018 года в 17<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 8, корпус кафедры низких температур и сверхпроводимости, конференц-зал.

Email: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <u>https://istina.msu.ru/dissertations/99326471/</u>

Автореферат разослан «05» марта 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук

А.И. Ефимова

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>Актуальность темы исследования.</u> Интерес к магнитным проводникам проявляется на протяжении нескольких последних десятилетий – обнаруженные в них гигантские эффекты магнитосопротивления, фотомагнитосопротивления, объёмной магнитострикции, большой величиной фарадеева вращения и другие прочно вошли в жизнь каждого современного человека в виде накопителей на жёстких магнитных дисках, акселерометров, гироскопов и других устройств. Улучшение характеристик существующих магнитных материалов и поиск новых – предмет работы многих научных коллективов по всему миру.

<u>Цели и задачи диссертационного исследования.</u> Целью диссертационной работы является установление связи магнитно-двухфазного (МДФС) ферроантиферромагнитного состояния в легированных магнитных полупроводниках с особенностями термоэдс и магнитотермоэдс. В частности, в соединениях SmMnO<sub>3</sub> и NdMnO<sub>3</sub> поставлена цель выявить влияние легирования стронцием на термоэдс и магнитотермоэдс, а также связь указанных характеристик с электросопротивлением и магнитосопротивлением.

Другой целью диссертации является изучение влияния магнитно-неоднородного состояния на величину магнитокалорического эффекта (МКЭ) на примере ряда составов манганитов. МКЭ в данной работе измерялся как непосредственно (напрямую), так и рассчитывался косвенным способом (из магнитной части энтропии).

<u>Научная новизна работы.</u> В данной работе были впервые изучены термоэдс и магнитотермоэдс в сериях легированных манганитов  $Sm_{1-x}Sr_xMnO_3$  (где x = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 и 0.45) и  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ , экспериментально обнаружены гигантские максимумы величин в областях температур Кюри и Нееля соответствующих видов магнитных кластеров и дано научное объяснение этому явлению.

Помимо этого, впервые изучен методом прямых измерений магнитокалорический эффект в манганитах  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ ,  $(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ ,  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  (x = 0.1, 0.125, 0.175 и 0.3),  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ ,  $PrBaMn_2O_6$ . В первых двух составах также проведены магнитометрические измерения и произведены расчёты МКЭ исходя из изменения магнитной части энтропии.

Полученные в работе новые результаты пополняют базу фундаментальных знаний о физических свойствах магнитных полупроводников.

**Практическая** значимость результатов. Работа носит исключительно фундаментальный научный характер, однако автор не исключает, что обнаруженные в ней свойства могут быть применены для создания термоэлектрических генераторов в космической технике, в холодильных установках, а также в микроприборах, где использование классического газового сжатия для охлаждения затруднительно или невозможно. Возможно создание датчиков магнитного поля и новых устройств для преобразования тепловой энергии в электрическую.

<u>Достоверность полученных результатов</u>. Результаты данной работы получены на надёжном оборудовании с использованием статистических методов обработки данных. Оцениваемый уровень погрешности по всем измерениям не превышает 5%. Установка для измерения магнитокалорического эффекта была протестирована на образце высокочистого гадолиния, полученный результат совпадает с литературными данными. Большинство измерений было произведено двумя независимыми взаимодополняющими методиками: компьютерной с оцифровкой сигнала от образцов на АЦП и с подключением к аналоговым приборам, также достоверность подтверждается повторяемостью результатов.

#### Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных измерений термоэдс и магнитотермоэдс, удельного электросопротивления и магнитосопротивления в серии легированных монокристаллов манганитов  $Sm_{1-x}Sr_xMnO_3$  (x = 0.15, 0.2, 0.25 и 0.3). В районе температуры Кюри обнаружены максимумы гигантской термоэдс и модуль отрицательной магнитотермоэдс: 18 мВ/К и 94.5% в магнитном поле 13.23 кЭ. Отмечены также аналогичные пики сопротивления и магнитосопротивления. Это подтверждает, что данные явления имеют одинаковую природу – МДФС ферроантиферромагнитное состояние, вызванное сильным s-d обменом.

2. Результаты экспериментальных измерений термоэдс и магнитотермоэдс, электросопротивления И магнитосопротивления В легированных удельного монокристаллов манганитов  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  и  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ . В указанных составах гигантские максимумы термоэдс и магнитотермоэдс выявлены В области температуры Кюри ферромагнитных кластеров и температуры Нееля кластеров с СЕтипом антиферромагнитного (A $\Phi$ M) порядка. В составе Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> термоэдс и абсолютная величина отрицательной магнитотермоэдс достигают 46 мкВ/К и 86% соответственно, а в Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> – 53 мкВ/К и 44% соответственно И сопровождаются гигантскими максимумами сопротивления и магнитосопротивления, ЧТО указывает на их одинаковую природу. Выдвинуто предположение 0 превалирующем вкладе в термоэдс от магнитно-примесных состояний ферронного типа и АФМ СЕ-типа кластеров с зарядово-орбитальным упорядочением. Это означает, что величина термоэдс в них определяется количеством примесных центров, то есть концентрацией примеси.

3. Результаты измерения МКЭ прямым методом в составах  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ ,  $(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ ,  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  (x = 0.1, 0.125, 0.175 и 0.3),  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ , PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, а также результаты исследования намагниченности (кроме  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ ) и данные магнитометрических измерений по первым двум составам из перечисленных. Показано, что расчёт МКЭ по стандартным термодинамическим соотношениям исходя из данных по намагниченности приводит к завышенным в несколько раз значениям эффекта, так как в них не учтён отрицательный вклад от АФМ фазы.

<u>Личное участие автора.</u> Автором данной диссертации сделан выбор объекта исследований, проведена модернизация экспериментальной установки с подключением к компьютеру, произведена основная часть экспериментальных измерений магнитоэлектрических и термомагнитных свойств, теоретических расчётов, произведена обработка и анализ результатов эксперимента, сделаны выводы и написана диссертационная работа.

На основе полученных в ходе работы над диссертацией данных совместно с соавторами были написаны статьи в различных научных журналах, а также сделаны

доклады на ряде международных конференций. Соавторы не возражают против использования совместно полученных научных результатов в данной диссертации.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: IV Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (Екатеринбург, 2010), Joint European Magnetic Symposia (2010, Польша, Краков), JEMS2012 (Италия, Парма), XXII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Астрахань, 2012), 7th Joint European Magnetic Symposia (Греция, Родос, 2013), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2014), 9th International Conference on Surfaces, Coatings and Nano-Structured Materials (NANOSMAT 2014, Ирландия, Дублин), VI Международная конференция «Магнитные материалы. Байкальская Новые технологии» (BICMM-2014, Иркутск), Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2015» (Москва), Международная научная конференция III «Моделирование структур, строение вещества, нанотехнологии» (Тула, 2016), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017), IBCM 2017 (Калининград).

Основные результаты диссертации изложены в 12 научных статьях, опубликованных в журналах Scopus, WoS, RSCI и в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а также в 17 иных публикациях, включая 1 патент.

<u>Структура и объём диссертации.</u> Диссертационная работа изложена на 107 страницах, содержит 48 рисунков и 2 таблицы, и состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка публикаций по теме работы и списка цитированной литературы из 111 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Королёвой Л.И. за чуткое руководство, помощь в постановке задачи, подбору материалов для научного обзора и исследования. Также автор благодарен А. И. Балбашову и А. Р. Каулю за предоставленные на исследование образцы, Генриха и проведение магнитометрических измерений Риту Шимчак за на SOUIDмагнетометре, коллективу кафедры общей физики и физики конденсированного состояния за советы и содействие при выполнении работы, оппонентам за ценные замечания при прочтении работы, оказанную поддержку и терпение.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении приводится обоснование актуальности данной диссертационной работы, приводится постановка целей и задач исследования, отмечена научная новизна, научная и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. В конце введения приводятся перечень научных конференций, где состоялась апробация результатов работы и выходные данные: структура, объём, кол-во работ автора по теме диссертации и цитированной литературы.

<u>Глава 1. Литературный обзор.</u> Первая глава диссертации разделена на несколько пунктов. В 1 пункте приводится краткий исторический экскурс

исследований свойств магнитных полупроводников. Во 2 пункте приводится обзор физической модели магнитных полупроводников и ферронной гипотезы Э. Л. Нагаева [1-2 и др.], на основании которой объясняются все эффекты, связанные с особенными магнитными свойствами магнитных полупроводников. З-6 пункты посвящены описанию физических свойств исследуемых в диссертационной работе серий составов: Sm<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, Nd<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> и RBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. В частности, приводятся экспериментальные данные по обнаружению МДФС и кластерной структуры в указанных составах. В 7 и 8 пунктах содержатся обзоры современного состояния науки по термоэдс и магнитокалорическому эффектам в манганитах. Сделан акцент на то, что в большинстве работ приводятся лишь значение магнитокалорического эффекта, рассчитанное из данных по намагниченности ферромагнитной части образца из следующего широко известного по ряду работ [например, 3-5] выражения:

$$\Delta T = -\int_{0}^{H_{max}} \frac{T}{C_H} \left(\frac{dM}{dT}\right)_{H=const} dH, \qquad (1)$$

где M – намагниченность и  $C_H$  – теплоемкость. Часть этого выражения представляет собой изменение магнитной составляющей энтропии  $\Delta S_M$  при постоянном внешнем магнитном поле:

$$\Delta S_M = -\int_{0}^{H_{max}} \left(\frac{dM}{dT}\right)_{H=const} dH$$
(2)

Однако на практике вычисленное подобным образом значение магнитокалорического эффекта оказывается завышенным, так как не учитывается отрицательный вклад от антиферромагнитной матрицы. Также приводятся формулы для расчёта практически важного коэффициента термоэлектрической добротности, где показано, что добиться повышения добротности можно не только повышая термоэдс, но и понижая теплопроводность за счёт включения легирующих добавок.

Глава 2. Экспериментальная часть. В этой главе первый пункт отводится описанию исследованных в данной работе образцов, методике их получения и проверке кристаллографической чистоты. Следующие два пункта посвящены описанию экспериментальной установки, в том числе компьютерной части с программным обеспечением. В заключительных четырёх пунктах описана методика термоэдс. магнитотермоэдс, электрического измерения сопротивления, магнитосопротивления, магнитокалорического эффекта И намагниченности. Приведены формулы для расчёта искомых величин и оценки погрешности.

<u>Глава 3. Исследование термоэдс в манганитах.</u> В третьей главе приводятся результаты измерения термоэдс, магнитотермоэдс, а также удельного сопротивления и магнитосопротивления и их обсуждение.

**В первом пункте главы** рассматривается серия образцов слаболегированного  $Sm_{1-x}Sr_xMnO_3$ , где x = 0.15, 0.2, 0.25 и 0.3. Как было показано в литобзоре, в данной серии составов наблюдается ферро-антиферромагнитная магнитно-двухфазная структура.



Рис. 1. Температурная зависимость термоэдс S(T) в различных магнитных полях для образца  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ .



Рис. 2. Температурная зависимость магнитотермоэдс  $\{\Delta S/S\}(T)$  в разных магнитных полях образца  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ .

На рисунках 1 – 2 приводятся графики температурных зависимостей термоэдс и магнитотермоэдс для состава Sm<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>. Графики зависимостей для остальных составов серии, а также для удельного сопротивления и магнитосопротивления имеют схожий характер (см. полный текст диссертации), полные данные по всем составам сведены в таблице 1 ниже. Из рисунка 1 видно, что в районе  $T_C = 87$  К термоэдс достигает гигантской величины 18 мВ/К и выше этой температуры быстро Аналогичным образом ведут себя другие характеристики. спадает. И Магнитотермоэдс отрицательна и по модулю достигает гигантского значения 94.5% при внешнем магнитном поле 13.23 кЭ. Столь резкое возрастание  $\rho$  и гигантского отрицательного магнитосопротивления характерно для легированных магнитных полупроводников и объясняется существованием примесных ферронов: при термальном разрушении ферронов или их разрушении под действием магнитного поля термоэдс и сопротивление образца резко падают.

В литературном обзоре приводятся данные измерения удельного сопротивления по температурам вплоть до гелиевых [6], из которых видно, что при  $T \approx 80 K$  достигается максимум р порядка 100 Ом\*м, а при более низких температурах происходит постепенный спад значения вплоть до порядка единиц Ом\*м. Таким образом, можно с уверенностью предполагать, что в данном эксперименте достигнут максимум по сопротивлению, а также, ввиду схожести эффектов, по термоэдс.

Хорошо известно, что чем теснее расположены атомы или атомные группы, образующие кристаллы, и чем слабее они связаны, тем более ангармоничны тепловые колебания и тем больше тепловое сопротивление и тем меньше теплопроводность материала [7]. Так как в ферронах кристаллическая решётка сжата по сравнению с антиферромагнитной матрицей [8], то их присутствие в образцах приводит к уменьшению теплопроводности и повышению термоэдс и термоэлектрической добротности. Таким образом, регулируя количество примеси, можно напрямую регулировать количество ферронов, а значит, и величину термоэдс в образце.

Таблица 1. Температура Кюри *Tc* и максимальные величины термоэдс *S*, магнитотермоэдс  $\Delta S/S$ , удельного электросопротивления  $\rho$ , магнитосопротивления  $\Delta \rho/\rho$  в районе температуры Кюри в зависимости от степени легирования *x* в составе  $Sm_{1-x}Sr_xMnO_{3.}$ 

Х	<i>Тс</i> , К	<i>S</i> , мВ/К	$\Delta S/S$	ρ, Ом <sup>.</sup> м	$\Delta \rho / \rho$
0.15	80	16.2	-0.54	1683	-0.7
0.2	90	26.2	-0.37	2083	-0.33
0.25	95	57.9	-0.64	2599	-0.51
0.3	87	18.0	-0.94	677	-0.76

Второй пункт главы посвящён серии образцов того же состава  $Sm_{1-x}Sr_xMnO_3$ , однако на этот раз с уровнем легирования x = 0.45. В отличие от слаболегированных составов, в составах с  $x \ge 0.4$  наблюдаются также АФМ кластеры СЕ-типа с зарядовоорбитальным упорядочением, кристаллическая решетка в которых искажена. Проведены исследования трёх образцов с этим составом: монокристаллов с отжигом в атмосфере воздуха и кислорода, а также поликристалла.



Рис. 3. Температурная зависимость термоэдс S(T) поликристаллического образца  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$ .



Рис. 4. Температурная зависимость магнитотермоэдс поликристаллического образца  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$ .



Рис. 5. Температурная зависимость термоэдс в монокристаллическом образце  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$ , охлаждённом в кислороде.



Рис. 6. Температурная зависимость магнитотермоэдс в монокристаллическом образце Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub>, охлаждённом в кислороде.

На рисунках 3-4 показаны температурные зависимости термоэдс S и магнитотермоэдс  $\Delta S/S$  в различных магнитных полях для поликристаллического образца (графики для монокристаллического образца, охлажденного в воздушной атмосфере при его получении, имеют схожий характер зависимости и приведены в полном тексте диссертации).

Как видно из рисунка 3, наблюдается резкий рост S(*T*) в районе температуры Кюри  $T_C = 126$  K, затем, после прохода максимума, наблюдается плавный спад. В интервале температур  $150 \le T \le 325$  K, содержащим  $T_{NCE} = 240$  K, абсолютное значение термоэдс снижается всего на ~ 30%.

Как видно из рисунка 4, на графике  $\{\Delta S/S\}(T)$  можно заметить острый минимум вблизи  $T_C$ , в максимальном внешнем магнитном поле измерения 14.17 кЭ по модулю значение  $|\Delta S/S|$  приближается к 82% у поликристалла (87% у монокристалла). Столь большое значение модуля магнитотермоэдс в районе температуры Кюри и её отрицательный знак указывает на то, что при термическом разрушении ферронов термоэдс падает почти до нуля. Внешнее магнитное поле, приложенное к образцу в районе  $T_C$ , позволяет сохранить ферромагнитный порядок, что приводит к ощутимому смещению минимума на кривых  $\{\Delta S/S\}(T)$  в область высоких температур. Это можно заметить на вставках к рис. 4.

На графиках удельного электросопротивления (представлены в полном тексте диссертации) наблюдается схожая картина: максимум эффекта наблюдается в районе Tc, а именно при T = 133 K для монокристаллического и T = 136 K поликристаллического образцов, при этом приложение внешнего магнитного поля значительно уменьшает максимальную величину удельного электросопротивления и сдвигает максимум в область более высоких температур.

Из сказанного выше следует, что термоэдс в поликристаллическом И охлаждённом на воздухе монокристалле вызвана, в основном, ферромагнитными кластерами ферронного типа. Уменьшение кристаллической решётки внутри ферромагнитных кластеров влечёт за собой изменение термоэдс от данных кластерах сравнению с термоэдс оставшейся части образца, состоящей ПО ИЗ антиферромагнитных А-типа нанокластеров, лишенных носителей заряда, И антиферромагнитных СЕ-типа нанокластеров.

Температурная зависимость S и  $\Delta S/S$ в различных магнитных полях монокристаллического образца, охлажденного в атмосфере кислорода, показана на рисунках 5 и 6. Обширный максимум на графиках S(T) затрагивает парамагнитную температуру Кюри  $\Theta = 270$  К и температуру Нееля АФМ кластеров СЕ-типа  $T_{NCE} =$ 240 К. В районе T<sub>C</sub> наблюдается гораздо более слабый максимум S, величина которого составляет около 60% от величины S при 270 К. На графиках { $\Delta S/S$ }(T) наблюдается резкий минимум при  $T_{NCE}$ , при этом величина  $|\Delta S/S|$  достигает гигантской величины 50% при H = 13.23 кЭ. В этом образце резкое падение S связано разрушением СЕ антиферромагнитного порядка, связанного с c зарядовоорбитальным (СО) упорядочением, при котором кислородные ионы смещаются. Деформированная кристаллическая решетка в таких нанокластерах вызывает изменение термоэдс.

Максимум удельного электросопротивления и колоссального отрицательного магнитосопротивления в этом образце наблюдаются в районе температуры Кюри, а

11

не при  $T = T_{NCE}$ , в области которой имеет место максимум S и минимум  $\Delta S/S$ . Это указывает на то, что в формировании последних основную роль играют изменения решетки кристаллической В CO кластерах, a за максимум удельного электросопротивления И колоссальное отрицательного магнитосопротивления ответственна, в основном, концентрация носителей заряда.

В монокристаллическом образце, охлажденном в кислороде, внешнее магнитное поле в районе T<sub>NCE</sub> вызывает разрушение АФМ структуры внутри кластеров, что приводит к существенному уменьшению термоэдс образца целиком. Такое же действие магнитного поля на термоэдс поликристаллического И монокристаллического образца, охлажденного на воздухе: как показано в [9], внешнее магнитное поле увеличивает кинетическую энергию носителей заряда внутри ферронов и тем самым облегчает их переход в делокализованное состояние, то есть способствует разрушению ферронов. Гигантская величина термоэдс, выше. нанокластеры ферронного описанная означает, ЧТО типа или CO упорядоченные вносят определяющий вклад в суммарную термоэдс. Неоднородности в магнитной структуре магнитных полупроводников могут существенно увеличить величину термоэдс, что важно для практического применения.

Сравнивая величину термоэдс в слаболегированных и сильнолегированных образцах видно, что при высоком легировании порядок величины много меньше. Это связано с присутствием АФМ кластеров СЕ-типа, занимающих значительную часть объёма и существенно уменьшающих количество ферронов. Также по данной причине максимум величины термоэдс расположен в области более высоких температур. Охлаждение в кислороде закрывает разорванные связи Mn-V-Mn (здесь V – кислородная вакансия) и приводит к увеличению числа СО кластеров за счёт уменьшения количества ферронов.

**Третий пункт главы** посвящён исследованию термоэдс, магнитотермоэдс, электросопротивлению и магнитосопротивлению в образце манганита  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ . Данный состав любопытен тем, что при низких температурах он содержит магнитные кластеры всех трёх упомянутых в предыдущих пунктах типов в сопоставимых по объёму долях, а при комнатной температуре является парамагнетиком и меняет свою кристаллографическую структуру на орторомбическую.



Рис. 7. Температурная зависимость термоэдс *S* в разных магнитных полях монокристаллического образца Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub>.



Рис. 8. Температурная зависимость магнитотермоэдс  $\Delta S/S$  в разных магнитных полях монокристаллического образца Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub>.

На рисунках 7 и 8 показаны температурные зависимости термоэдс *S* и магнитотермоэдс  $\Delta S/S$  в некоторых магнитных полях монокристаллического образца. Знак минус у термоэдс свидетельствует о преобладании электронного типа проводимости. При этом на кривых S(T) виден острый минимум в температурном интервале 100 К  $\leq T \leq 133$  К, близком к  $T_{NCE}$ , где по модулю *S* приближается ~ 53 мкВ/К. В области более высоких температур *S* по модулю снижается вплоть до 7 мкВ/К при 200 К. При приближении к  $T_C$  отмечен слабый рост модуля *S* до значения 15 мкВ/К при 254 К. На рис. 8 показана температурная зависимость магнитотермоэдс  $\Delta S/S$ . Наблюдается острый минимум при T = 130 К, близкой к  $T_{NCE}$ , в котором отрицательная магнитотермоэдс достигает величины ~ 45% в магнитном поле 13.23 кЭ. В районе температуры Кюри имеется и второй, более пологий и широкий минимум, величина которого достигает величины ~ 15 % в магнитном поле 13.23 кЭ.

В диссертации приводятся также графики удельного электросопротивления и магнитосопротивления. Магнитосопротивление достигает значения 47% при *T* = 123 К в магнитном поле 13.23 кЭ.

Гигантское значение отрицательной магнитотермоэдс в области  $T_{NCE}$  и  $T_C$  указывает на практически полное исчезновение термоэдс при термическом разрушении СЕ-типа АФМ кластеров с СО упорядочением и ферронов. Как указывалось в литературном обзоре, внутри ферронов постоянные решетки уменьшены, а в СЕ-типа АФМ кластерах с СО упорядочением даже изменен тип кристаллической симметрии. Измененная кристаллическая решетка и повышенная концентрация носителей заряда (электронов) в этих нанокластерах вызывает изменение термоэдс в них по сравнению с термоэдс оставшейся части образца, состоящей из АФМ А-типа нанокластеров, лишенных носителей заряда.

<u>Глава 4. Магнитокалорический эффект и магнитные свойства манганитов.</u> В данной главе приводятся результаты измерения МКЭ прямым методом в составах  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ ,  $(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ ,  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  (x = 0.1, 0.125, 0.175 u 0.3),  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ ,  $PrBaMn_2O_6$ , а также результаты исследования намагниченности (кроме  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ ) и данные магнитометрических измерений по первым двум составам из перечисленных.

**Первый пункт главы** посвящён составу  $(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ . Его магнитные характеристики изучались на SQIUD-магнетометре в интервале температур 5 – 300 К и магнитных полей 0.1 - 50 кЭ.



Рис. 9. Кривые намагниченности монокристаллического образца  $(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$  в различных внешних магнитных полях: (1) – 1 кЭ, (2) – 5 кЭ, (3) – 10, (4) – 20, (5) – 30 и (6) – 40 кЭ.

Как видно из рисунка 9, у исследуемого образца происходит пологий спад намагниченности с ростом температуры, что нехарактерно для ферромагнетиков. При этом в разных магнитных полях падение намагниченности происходит при разных температурах. Это говорит о неоднородности магнитной структуры.

В полном тексте диссертации также имеются графики кривых намагниченности в магнитных полях 0.5 - 50 кЭ, из которых видно, что кривые намагниченности для различных режимов охлаждения (FC и ZFC) у исследуемого образца с ростом величины внешнего магнитного поля становятся практически неразличимыми. Это свидетельствует о том, что исследуемое вещество не является однородным ферромагнетиком. Кривые намагниченности, снятые при охлаждении образца в слабом (0.5 кЭ) внешнем магнитном поле (FC) и без поля (ZFC), расходятся в области низких температур. Также в тексте диссертации приводится зависимость намагниченности от величины магнитного поля при температуре T = 5 K, где видно, что в поле выше 10 кЭ образец находится в насыщенном ферромагнитном состоянии. В поле 50 кЭ кривые FC и ZFC практически полностью сливаются.

Магнитокалорический эффект, рассчитанный из данных по намагниченности по формулам 1-2, оказался равен  $\Delta T_{th} = 8.2$  К в точке максимума  $T_{max}(th) = 148.6$  К.

Проведённые прямые измерения магнитокалорического эффекта показали, что максимальное значение эффекта  $\Delta T_{ex} = 0.11$  К, что на порядок меньше вычисленного

из намагниченности, при этом экспериментальный максимум  $T_{max}$  (*ex*) = 134.5 К оказался на 14 К ниже теоретического.

Во втором пункте главы рассматривается состав  $Sm_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ . Он также детально исследован на SQIUD-магнетометре в интервале температур 5 – 200 К и магнитных полей 0.1 - 50 кЭ.



Рис. 10. Кривые намагниченности монокристаллического образца Sm<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> в различных внешних магнитных полях: 0.1, 0.2, 1, 10, 30 и 50 кЭ.

Как видно из рисунка 10, у данного образца, как и у предыдущего, происходит пологий спад намагниченности с ростом температуры, что нехарактерно для ферромагнетиков. При этом в разных магнитных полях падение намагниченности происходит при разных температурах. Это говорит о неоднородности магнитной структуры.

По максимуму производной по температуре от кривой намагниченности ZFC в слабом магнитном поле 0.1 кЭ определена температура Кюри образца  $T_C = 87$  K.

В полном тексте диссертации приводятся кривые намагниченности, снятые при охлаждении образца в слабых (0.1 - 0.2 кЭ) внешних магнитных полях (FC) и без поля (ZFC). В области низких температур они расходятся; при этом уже в поле 1 кЭ кривые для различных режимов охлаждения (FC и ZFC) становятся практически неразличимыми, кроме самых низких температур. Это свидетельствует о том, что в слабых магнитных полях (до 1 кЭ) исследуемое вещество не является однородным ферромагнетиком.

Магнитокалорический эффект, рассчитанный из данных намагниченности по формулам 1-2, оказался равен  $\Delta T_{th} = 1.2$  К в точке максимума  $T_{max}(th) = 120$  К.

Прямые измерения магнитокалорического эффекта показали, что максимальное значение эффекта  $\Delta T_{ex} = 0.27$  К в магнитном поле 13.23 кЭ оказалось в несколько раз меньше вычисленного из намагниченности, при этом экспериментальный максимум  $T_{max}(ex) = 127.3$  К оказался на 7 К выше теоретического.

**Третий пункт главы** посвящён составам серии  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ , где x = 0.1, 0.125, 0.175 и 0.3.



Рис. 11. Графики температурной зависимости магнитокалорического эффекта, рассчитанного из намагниченности ( $\Delta T_{th}$ ) и из данных прямых измерений ( $\Delta T_{ex}$ ) в серии образцов La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> (сверху вниз: x = 0.3, 0.175, 0.125 и 0.1) во внешнем магнитном поле 8.2 кЭ.

Намагниченность серии образцов La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> была исследована на SQIUDмагнетометре в интервале температур 80 – 370 К в магнитном поле 8.2 кЭ. Для составов с x = 0.1, 0.125, 0.175 и 0.3 исходя из максимумов на графиках {dM/dT}(T) были определены температуры Кюри в 140, 150, 238 и 315 К соответственно.

Магнитокалорический эффект в серии соединений  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  (x = 0.1, 0.125, 0.175 и 0.3) был изучен как прямым методом, так и рассчитан из данных по намагниченности по формулам 1-2. При вычислении магнитокалорического эффекта

из намагниченности были взяты данные по теплоёмкости из работы [10]. Для каждого образца графики представлены на рисунке 11.

Из попарного сравнения графиков на рисунке 11 видно, что максимумы на кривых  $\Delta T_{ex}(T)$  и  $\Delta T_{th}(T)$  для каждого состава находятся при различных температурах. Очевидно, что результат вычитания между графиками  $\Delta T_{ex}(T)$  и  $\Delta T_{th}(T)$  дает вклад антиферромагнитной части образца в экспериментально измеренный МКЭ. Этот антиферромагнитный вклад имеет характерную для антиферромагнетиков форму [11] – он отрицателен в районе температуры разрушения антиферромагнитного порядка и выше нее имеет место положительный магнитокалорический эффект, характерный для парамагнетика.





Рис. 12. Температурная зависимость магнитокалорического эффекта для образца Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> в магнитном поле 13.23 кЭ.

Данные магнитокалорического эффекта в результате прямых измерений на образце Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> во внешнем магнитном поле 13.23 кЭ приведены на рисунке 12. Как видно из рисунка, магнитокалорический эффект в данном образце незначительный, его значение не превышает  $\Delta T_{ex} = 0.3$  K, при этом максимальное значение достигается при  $T_{max}(ex) = 256$  K.

Пятый пункт главы посвящён составу PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>.



Рис. 13. Температурная зависимость магнитокалорического эффекта для образца PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> в поле 14.2 кЭ.

Магнитокалорический эффект в образце PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> был изучен как прямым методом, так и рассчитан из данных по намагниченности по формулам 1 – 2. На рис. 13 приведена температурная зависимость МКЭ данного образца во внешнем магнитном поле 14.2 кЭ. На приведённом графике  $\Delta T(T)$  наблюдается широкий максимум в районе 291 К, который включает в себя  $T_C = 295$  К, и острый минимум при T = 234 К, близкий к  $T_N = 231$  К. Однако величина МКЭ  $\Delta T_{ex}$  как в максимуме, так и в минимуме невелика: в максимуме она достигает 0.13 К и в минимуме -0.2 К. Тем не менее расчётная величина  $\Delta T_{th}$ , полученная по упомянутым выше формулам при переходе от антиферромагнитного к ферромагнитному состоянию, равна -5.9 К. Полученное значение по модулю в несколько десятков раз превышает  $|\Delta T_{ex}|$  в минимуме. Очевидно, что заниженные величины МКЭ, полученные прямым методом, как в максимуме, так и в минимуме вызваны тем, что в АФМ фазе присутствуют ФМ взаимодействия, а в фазе со спонтанной намагниченностью – АФМ взаимодействия.

Состав	$T_C$ ,	$T_{NCE}$ ,	$\Delta T_{ex}$ , K	$T_{max}$	$\Delta T_{th}, \mathbf{K}$	$T_{max}$
	K	K		( <i>ex</i> ), K		( <i>th</i> ), K
$(Nd_{0.5}Sm_{0.5})_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$	145		0.11	134.5	8.2	148.6
Sm <sub>0.7</sub> Sr <sub>0.3</sub> MnO <sub>3</sub>	87		0.27	127.3	1.2	120
$La_{0.9}Sr_{0.1}MnO_3$	140		0.15	176	0.34	132

Таблица 2. Значения МКЭ для различных составов манганитов

La <sub>0.875</sub> Sr <sub>0.125</sub> MnO <sub>3</sub>	150		0.37	180	0.43	152
La <sub>0.825</sub> Sr <sub>0.175</sub> MnO <sub>3</sub>	238		0.61	261	0.45	239
La <sub>0.7</sub> Sr <sub>0.3</sub> MnO <sub>3</sub>	315		0.72	348	1.1	318
Nd <sub>0.5</sub> Sr <sub>0.5</sub> MnO <sub>3</sub>	248	148	0.3	256		
PrBaMn <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	295	231	-0.2	236	-5.9	234

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании проведённых экспериментальных исследований термоэдс и магнитотермоэдс монокристаллических образцов легированных манганитов  $Sm_{1-x}Sr_x$   $MnO_3$  (x = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3) обнаружены гигантские величины термоэдс и магнитотермоэдс в районе температуры Кюри ферромагнитных кластеров ферронного типа и дано их объяснение, основанное на предположении о превалирующем вкладе в термоэдс от магнитно-примесных состояний ферронного типа. Это означает, что величина термоэдс в них напрямую определяется количеством примесных центров. Тем самым открывается новый путь для повышения термоэдс в магнитных полупроводниках.

2. В образцах  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  и  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$  экспериментально обнаружены гигантские максимумы термоэдс и магнитотермоэдс в районе температуры Кюри и температуры Нееля кластеров с СЕ-типом антиферромагнитного упорядочения. Дано их объяснение, основанное на предположении о превалирующем вкладе в термоэдс от магнитно-примесных состояний ферронного типа и АФМ СЕ-типа кластеров с зарядово-орбитальным упорядочением. Это означает, что величина термоэдс в них напрямую определяется количеством примесных центров. Тем самым открывается новый путь для повышения термоэдс в магнитных полупроводниках, содержащих кластеры двух типов: ферромагнитных и АФМ СЕ-типа.

3. На основе измерения зависимости термоэдс от величины магнитного поля показано, что величина термоэдс в перечисленных в п. 1 и 2 составах регулируется магнитным полем в широких пределах.

4. Из сравнения полученных экспериментально температурных зависимостей термоэдс и электросопротивления, а также магнитотермоэдс и магнитосопротивления перечисленных в п. 1-2 составов обнаружено их похожее поведение: наличие максимумов в районе температуры Кюри ферромагнитных кластеров и температуры Нееля АФМ кластеров СЕ-типа. Это говорит в пользу предположения, что оба явления вызваны существованием магнитно-примесных состояний.

5. Показано, что в ряде легированных манганитов, находящихся в МДФС ферроантиферромагнитном состоянии, величина магнитокалорического эффекта, измеренная напрямую, значительно отличается в меньшую сторону от вычисленной из изменения магнитной части энтропии. Таким образом, достоверное определение величины магнитокалорического эффекта в легированных манганитах возможно лишь при непосредственном измерении.

## НАУЧНЫЕ СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛАХ SCOPUS, WOS, RSCI, А ТАКЖЕ В ИЗДАНИЯХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ В ДИССЕРТАЦИОННОМ СОВЕТЕ МГУ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ

A1. Zashchirinskii D., Morozov A., Koroleva L.I., Balbashov A. Magnetocaloric Effect in Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> Manganite // Solid State Phenomena. — 2011. — V. 168-169. — P. 373-375.

А2. Защиринский Д.М., Королева Л.И., Морозов А.С., Долженкова Ю.В. Магнитокалорический эффект в Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub>// Физики Твердого Тела. – 2011. — Т. 53, В. 2. — С. 295-297.

АЗ. Защиринский Д.М., Королева Л.И., Морозов А.С., Шимчак Р. Спонтанная генерация электрического напряжения в монокристалле Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> // Физика Твердого Тела. — 2011. — Т. 53, В. 10. — С. 1935-1938.

А4. Королёва Л.И., Защиринский Д.М., Морозов А.С., Шимчак Р. Магнитокалорический эффект в манганитах // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142, В. 4(10). — С. 738-747.

A5. Koroleva L.I., Morozov A.S., Zhakina E.S. Influence of the magnetic and structural neterogeneities on the thermopower, magnetothermopower, and spontaneous generation of an electric voltage in the manganite  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  // Physics of the Solid State. — 2014. — V. 56, N. 6. — P. 1110-1113.

A6. Koroleva L., Morozov A., Zhakina E. The influence of magnetic inhomogeneous state on thermopower and magnetothermopower in  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  manganites // European physics Journal Web of Conferences. — 2014. — V. 75, N. 07001. — P. 1–4.

A7. Koroleva L. I., Morozov A. S., Zhakina E. S. The influence of magnetic inhomogeneous state on thermopower and magnetothermopower in  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  manganites // Solid State Phenomena. — 2014. — V. 215. — P. 320–324.

A8. Koroleva L. I., Morozov A. S., Jakhina E. S., Balbashov A. M.. Connecion of thermopower and giant magnetothermopower with magnetic and structural heterogeneity in  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  manganite // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2015. — V. 396, N. 1. — P. 146–152.

A9. Koroleva L. I., Morozov A. S., Jakhina E S. Giant magnetothermopower in  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  manganite // Solid State Phenomena. — 2015. — V. 233, N. 234. — P. 141–144.

А10. Влияние магнитно-структурных неоднородностей на термоэдс, магнитотермоэдс и магнитосопротивление Nd<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> манганита / Л. И. Королева, А. С. Морозов, Э. С. Жакина и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2016. — Т. 71, № 1. — С. 96–100.

А11. Новый способ повышения термоэдс в легированных манганитах / Л. И. Королева, А. С. Морозов, Э. С. Жакина и др. // Письма в "Журнал технической физики". — 2016. — Т. 42, № 12. — С. 88–95.

А12. Королёва Л.И., Баташев И.К., Морозов А.С., Балбашов А.М., Szymczak H., Slawska-Waniew А. Связь гигантских термоэдс, магнитотермоэдс,

магнитосопротивления и намагниченности с магнитнопримесными состояниями в  $Nd_{(1-x)}Sr_xMnO_3$  и  $Sm_{(1-x)}Sr_xMnO_3$  манганитах // Журнал технической физики. — 2018. — Т. 88, вып. 2. — с. 228-233.

# ИНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

B1. Morozov A.S., Zashchirinskii D.M., Koroleva L.I., Balbashov A.M. Magnetocaloric effect in Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> manganite // Books of abstracts IV Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism". — Ekaterinburg, Russia. — 2010. — P. 124.

B2. Zashchirinskii D.M., Koroleva L.I., Morozov A.S., Khapaeva T.M., Marenkin S.F., Fedorchenko I.V., Szymczak R. and Krzumanska B. Influence of magnetic heterogeneous state on magnetocaloric effect of Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub>// Books of abstracts Joint European Magnetic Symposia. — Krakyw, Poland. — 2010. — P. 140.

B3. Koroleva L., Zashchirinskii D., Morozov A., Szymczak R. Peculiarities of Magnetocaloric effect in manganites connected with magnetic heterogeneous state // JEMS2012, 9-14 September, Parma – Italy. Book of Abstracts. — 2012. — P. 392.

В4. Королева Л.И., Защиринский Д.М., Морозов А.С., Шимчак Р. Особенности магнитокалорического эффекта в манганитах, связанные с магнитно-неоднородным состоянием // Сборник трудов XXII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». — Астрахань. — 2012. — С. 664-667.

B5. Koroleva L., Morozov A., Zhakina E. The influence of magnetic inhomogeneous state on magnetothermopower of  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  manganites // JEMS 2013: Oral Abstracts. — P. 197.

B6. Koroleva L., Morozov A., Zhakina E. The Influence of Magnetic Inhomogeneous State on Thermopower and Magnetothermopower in  $Sm_{0.55}Sr_{0.45}MnO_3$  Manganites // EASTMAG 2013: Abstracts. — P. 49.

B7. Koroleva L.I., Morozov A.S. Peculiarities of magnetocaloric effect in manganites connected with magnetic heterogeneous state // American Journal of Modern Physics. — 2013. — V. 2(2). — P. 61-67.

B8. Koroleva L.I., Morozov A.S., Jakina E.S. Giant magnetothermopower in Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> manganite // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2014). — 2014. — Moscow, Russia. — P. 524.

В9. Морозов А.С., Королёва Л.И., Жакина Е.С. Особенности термоэдс и магнитотермоэдс, связанные с магнитной и структурной неоднородностью в манганите Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> // Тезисы докладов VI Байкальской Международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (ВІСММ-2014). Иркутск: Иркутский государственный университет (ИГУ). — 2014. — Иркутск. — С. 87.

B10. Koroleva L.I., Morozov A.S., Jakhina E.S., Batashev I.K., Balbashov A.M. Thermopower and Giant Magnetothermopower in  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$  Manganite // Abstracts Book of 9th International Conference on Surfaces, Coatings and Nano-Structured Materials (NANOSMAT), 8-11 September 2014. — Dublin, Ireland. — P. 152.

В11. Морозов А. С. Гигантская магнитотермоэдс и термоэдс в манганите Sm<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>MnO<sub>3</sub> и их связь с магнетоструктурными неоднородностями. // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015» — М.: МАКС Пресс. — 2015.

B12. Koroleva L. I., Morozov A. S., Batashev I. K., Balbashov A. M. New features to increase the thermopower in magnetic semiconductors // International journal of magnetism and nuclear science. — 2016. — V. 1, N. 2. — P. 11–15.

В13. Королёва Л.И., Морозов А.С., Жакина Е.С., Баташёв И.К., Балбашов А.М. Влияние магнитно-неоднородного состояния на магнитокалорический эффект в манганитах // Моделирование структур, строение вещества, нанотехнологии. Сборник материалов III Международной научной конференции. — Тула, Россия. — 2016. — С. 89.

В14. Способ создания образцов с заранее заданной термоЭДС, предназначенных для преобразования тепловой энергии в электрическую: патент №2614739 Российская Федерация: МПК H01F 1/01 (2006.01) / Королёва Л.И., Морозов А.С., Жакина Э.С., Балбашов А.М.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ). — № 2015144116; заявл. 14.10.2015; опубл. 29.03.2017, Бюл. № 10.

B15. Batashev I., Koroleva L., Morozov A., Balbashov A., Szymchak H., Slawska-Waniewska A. Connection of thermopower, magnetothermopower with resistivity and magnetoresistivity in  $Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$  manganites // Book of abstracts IBCM 2017. — Kaliningrad, 2017. — P. 93.

B16. Batashev I., Koroleva L., Morozov A., Balbashov A., Szymchak H., Slawska-Waniewska A. Connection of thermopower, magnetothermopower with resestivity and magnetoresestivity in manganites with Nd and Sm // Book of Abstracts MISM-2017. Moscow, Russia, 1 - 5 July, 2017. — Moscow, Russia. — 2017. — P. 1092.

B17. Koroleva L., Batashev I., Morozov A., Balbashov A., Szymczak H., Slawska-Waniewska A., Lewinska S. Connection of thermopower, magnetothermopower with resistivity and magnetoresistivity in  $Nd_{(1-x)}Sr_xMnO_3$  and  $Sm_{(1-x)}Sr_xMnO_3$  manganites // American Journal of Physics and Applications. — 2017. — V. 5, No. 6. — P. 84-90.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нагаев Э.Л. Ферромагнитные микрообласти в полупроводниковом антиферромагнетике // ЖЭТФ. — 1968. — Т. 54, № 1. — С. 228.

2. Нагаев Э.Л. Физика магнитных полупроводников. — М.: Наука. — 1979. — С. 432.

3. Phan M.-H., Yu S.-C. Review of the magnetocaloric effect in manganite materials // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2007. — V. 308. — P. 325–340.

4. Szymczak H., Szymczak R. Magnetocaloric effect. Physics and applications // Materials Science-Poland. — 2008. — V. 26, N. 4. — P. 807-814.

5. Chernyshov A. S., Tsokol A. O., Tishin A. M., Gschneidner K. A., Pecharsky Jr. and V. K. Magnetic and magnetocaloric properties and the magnetic phase diagram of single-crystal dysprosium // Physical Review B. — 2005. — V. 71. — N. 184410.

6. Dunaevski S. M., Malyshev A. L., Trunov V. A., Popov V. V. Colossal magnetoresistance of the Sm<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> system // Phys. Solid State. — 1997. — V. 39, N. 10. — P. 1636-1637.

7. Иоффе А.Ф. Физика полупроводников. — М.: АН СССР, 1957. — 491 с.

8. Kasuya T., Yanase A., Takeda T. Stability condition for the paramagnetic polaron in paramagnetic semiconductor // Solid state communications. — 1970. — V. 8, N. 19. — P. 1543-1546.

9. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением // УФН. — 1996. — Т. 166, №8. — С. 833–858.

10. Liu G. L., Zhou J. S., Goodenough J. B. Interplay between charge, orbital, and magnetic ordering in  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  // Phys. Rev. B. — 2001. — V. 64. — 144414.

11. Знаменский Б. В., Факидов И. Г. Намагниченность и магнитокалорический аффект поликристаллического сплава Cu + 22.8 ат.% Mn // ФММ. — 1962. — Т. 13. — С. 312.