

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Амирова Абдулкарима Абдулнатиповича
на тему: «Калорические эффекты в мультиферроиках»
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Диссертационная работа А.А. Амирова посвящена исследованию физических механизмов, определяющих природу калорических и мультикалорических эффектов в области температур фазовых переходов в материалах с различным типом упорядочения при одиночном или комбинированном приложении магнитного поля, электрического напряжения и механического воздействия. **Актуальность** тематики связана с перспективами практического использования материалов в магнитных холодильниках, в медицинских системах для гипертермии и для адресной доставки лекарственных средств. Предполагается, что применение мультикалорических подходов может повысить эффективность твердотельных систем охлаждения и нагрева, работающих на одиночных калорических эффектах. Исследования имеют также фундаментальную научную значимость для физики магнитных явлений и физики фазовых переходов, поскольку они позволяют выявить взаимосвязь между электронной, решеточной, электрической и магнитной подсистемами магнитного материала.

Диссертационная работа объемом 300 страниц состоит из введения, восьми глав, заключения, списков авторских публикаций по теме диссертации из 49 наименований и цитируемой литературы из 396 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель диссертации и задачи, положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу текущего состояния исследований мультикалорических эффектов в различных материалах. Автором даны

определения основных терминов, приведены термодинамические соотношения, описывающие мультикалорические эффекты. Выводы, сделанные на основе анализа литературы, учтены при планировании экспериментов, изложенных в последующих главах диссертации.

Во **второй главе** описаны технологии получения материалов (природных и искусственно созданных мультикалориков) и экспериментальных методов для исследования мультикалорических эффектов. Подробно описаны оригинальные экспериментальные методики и измерительные вставки, разработанные автором для изучения мультикалорических эффектов. Примечательно, что большинство методик предполагает прямое измерение изменения температуры при внешнем воздействии, что редко встречается у исследователей.

В **главе 3** приведены результаты исследования структуры, магнитных и диэлектрических свойств, а также расчетные оценки магнитокалорического и электрокалорического эффектов в мультиферроиках на основе феррита висмута BiFeO_3 . Усовершенствована расчетная модель для оценки магнитокалорических параметров. Для образцов замещенного феррита висмута установлена корреляция между максимумами изменения магнитной энтропии и ионными радиусами замещающих элементов.

В **главе 4** на примере сплава FeRh исследованы мультикалорические эффекты в магнитных материалах с фазовым переходом I рода под комбинированным воздействием магнитного и упругого полей. Изучено влияние магнитного поля и гидростатического давления на параметры фазового перехода, построены фазовые диаграммы «магнитное поле-температура» и «давление-температура». Экспериментальные фазовые диаграммы сравниваются с расчетными, полученными методом DFT с учетом обменной корреляции.

В **пятой главе** исследованы композитные мультикалорики смесового типа, в которых микрочастицы магнитокалорического материала распределены в керамической либо полимерной сегнетоэлектрической

матрице. Показано, что фазовый сдвиг между приложенными магнитным и электрическим полями может обеспечить и усиление теплового эффекта.

Глава 6 посвящена исследованию слоистых композитов на основе магнитокалорического материала FeRh и пьезоэлектрика $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ (PZT). Установлена возможность управления намагниченностью и магнитокалорическим эффектом через электрическое поле, приложенное к пьезокерамике.

В **главе 7** исследованы калорические и мультикалорические эффекты в магнитоэлектрических композитах цилиндрического типа. В частности, в MnAs установлено влияние на магнитокалорический эффект квазиизотропного механического сжатия, индуцируемого в результате пьезоэффекта.

В **главе 8** изучены практические возможности применения мультикалорических материалов и эффектов. Описан лабораторный прототип для демонстрации мультикалорических эффектов. Реализован ряд потенциальных применений мультикалорических материалов, среди которых наиболее важными являются высвобождение лекарственного средства доксорубина при разовом включении магнитного поля и управление спин-волновым транспортом в микроволноводных структурах.

Полученные автором результаты актуальны для разработок эффективных систем твердотельного охлаждения и поиска возможностей их биомедицинского и технического применения. Технологические основы получения композитов могут быть использованы в области прикладного материаловедения для различных приложений (биомедицина, сенсорика, катализ и др.). Это подтверждает несомненную **практическую значимость** диссертации.

Достоверность и научная новизна результатов обусловлены широким использованием экспериментальных и расчетных методик, которые взаимодополняют друг друга, Автором предложены оригинальные методы измерений, позволившие получить новые результаты в области

мультикалорического эффекта в природных и искусственных мультикалориках с различным типом связности. Диссертант проявил себя умелым экспериментатором, способным собирать собственные измерительные установки и синтезировать собственные образцы. Следует отметить организаторские способности диссертанта, его умение проводить исследования образцов в крупных российских и зарубежных научных центрах, что обеспечивает комплексность исследований и высокое качество полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением общеизвестных теоретических подходов и методов обработки данных, а также сравнением наблюдаемых закономерностей с данными из литературных источников.

В то же время, как и всякий большой научный труд, диссертация Амирова А.А. не лишена недостатков.

1. На странице 46 в выводе 1 к главе 1 автор утверждает, что «мультикалорические материалы можно отнести к мультиферроикам — группе соединений, в которых сосуществуют различные типы ферроупорядочения». Это не совсем корректное утверждение. Так материалы, отмеченные в выводе 3 к главе 1, как обладающие значительным мультикалорическим эффектом, такие как FeRh , $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ не являются мультиферроиками, так как они не проявляют свойства сегнетоэлектрика или сегнетоэластика.

2. В разделе 4.2 проведено сравнение свойств двух образцов сплава $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$: закаленного (FR72h) и медленно охлажденного (FR48h). Значения изменения магнитной энтропии ΔS_M в этих образцах в поле 1 Тл при атмосферном давлении различаются более чем в 2 раза, что автор связывает с различием режима термообработки. Однако в случае образца FR72h изменение магнитной энтропии определено из зависимостей $M(H)$, а для образца FR48h из $M(T)$. Хотелось бы увидеть различие при одинаковом подходе к измерениям. Строго говоря, соотношение Максвелла применимо с

большими ограничениями для определения ΔS_M в случае фазовых переходов первого рода, что в диссертации не обсуждается.

3. На рис. 4.10 приведены петли магнитного гистерезиса $Fe_{48}Rh_{52}$, измеренные при различных температурах. При определении коэффициента прямоугольности M_r/M_s измерения должны быть выполнены в замкнутой цепи. Судя по рис. 4.10(а) измерения проведены в открытой цепи. Как учитывался переход от внешнего поля к внутреннему? Судя по подписи к рис. 4.10 эти зависимости должны быть опубликованы в работе [105*], однако такой рисунок в [105*] отсутствует.

4. В разделе 5.3 при анализе магнитной восприимчивости композита с типом связности 0-3 на основе сплава $Gd_5Si_{2.4}Ge_{1.6}$ и поливинилиденфторида использован модифицированный закон Кюри-Вейсса, с помощью которого автору удалось определить значения парамагнитных температур Кюри и эффективных моментов для трех магнитных фаз. Формула, с помощью которой проведен анализ, в диссертации не приведена. Как следует из таблицы 10, для одной кривой использовали по крайней мере 8 подгоночных параметров. Насколько однозначно удалось их определить?

5. В диссертации встречаются погрешности оформления. Наиболее существенные погрешности, замеченные при чтении текста: рис. 1.11 не упоминается в тексте; на стр. 65 ссылки [26,27] неверные; на стр. 69 вместо ссылки на рис. 2.13а указан рис. 2.1а; стр. 69 пропущена формула для определения величины A ; в таблице 4 указан параметр S_c вместо S_N ; стр. 91-92 ссылка на формулы 3.8 и 3.9 ошибочна; на стр. 120 перепутаны данные для поля 0 Тл и 1 Тл; на рис. 5.7(б) температура нижней кривой должна быть 330 К, а не 300 К; на стр. 248 в выводе 2 не указан сплав FeRh, к которому относится вывод. Встречаются также стилистические и орфографические ошибки.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.

Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Амиров Абдулкарим Абдулнатипович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
академик РАН,
директор ФГБУН Институт физики
металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Мушников Николай Варфоломеевич

12.09.2025

Контактные данные:
Тел.: +7 (343) 374-02-30, e-mail: mushnikov@imp.uran.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация: 01.04.11 физика магнитных явлений

Адрес места работы:
6201087, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Тел.: +7 (343) 374-02-30
e-mail: physics@imp.uran.ru

Подпись д.ф.-м.н. Н.В. Мушникова удостоверяю:

ученый секр

И.Ю. Арапова
12.09.2025