

На правах рукописи

**Самарин Александр Николаевич**

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ  
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ  
РАСТВОРОВ ЗАМЕЩЕНИЯ  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  И  
 $Eu_{1-x}Gd_xB_6$**

01.04.07 —

«Физика конденсированного состояния»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Демишев Сергей Васильевич**

Официальные оппоненты: **Дмитриенко Владимир Евгеньевич**,  
доктор физико-математических наук,  
отдел теоретических исследований Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН,  
главный научный сотрудник,

**Еремина Рушана Михайловна**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского,  
ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Защита состоится 29 мая 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/disser/compet.php>.

Автореферат разослан \_\_\_\_ апреля 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Макаров Вячеслав Петрович  
тел. 8 (499) 503-83-94

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

В современной физике конденсированного состояния одно из основных направлений развития связано с теоретическими и экспериментальными исследованиями сильно коррелированных электронных систем (СКС). Во многих случаях возникновение корреляционных эффектов может быть связано с образованием спин-поляронных состояний различного типа. В частности, спин-поляронные эффекты могут иметь важную роль в переходах металл-диэлектрик [1; 2] и приводить к особенностям транспортных характеристик, в частности, обуславливать возникновение эффекта колоссального магнитосопротивления. В современной литературе под спиновым поляроном понимается или автолокализованное состояние одного или нескольких электронов ферронного типа [1; 2], или связанные (квазисвязанные) состояния электронов проводимости, образующиеся в окрестности локализованных магнитных моментов (ЛММ) [3].

В последнее время проблема спин-поляронных состояний являлась предметом полемики в случае спирального магнетика моносилицида марганца,  $\text{MnSi}$  [3—5]. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что для моносилицида марганца характерен целый ряд эффектов, присущих СКС, таких как образование скирмионной (вихревой) магнитной структуры, квантовые критические явления, сложные фазовые диаграммы, отсутствие насыщения намагниченности в поле до 50 Тл. Отметим, что, несмотря на множество опубликованных работ, до сих пор природа аномалий физических свойств  $\text{MnSi}$  остается неясной. В ряде работ наблюдаемые особенности связываются с возможным образованием спиновых поляронов [3; 4], в то время как в других публикациях рассматривается альтернативная интерпретация, не требующая привлечения представлений о спиновых поляронах [5].

Прогресс в исследовании проблемы спин-поляронных эффектов у моносилицида марганца и соединений на его основе может быть связан с структурными растворами замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ . Данные соединения являются квантовой критической системой, в которой концентрация железа играет роль управляющего параметра. При этом варьирование состава позволяет изменять как энергию обменного взаимодействия, так и концентрацию носителей заряда. Таким образом можно ожидать, что изменение концентрации железа

позволяет управлять отношением магнитных моментов в спиновом поляроне и концентрацией спиновых поляронов в образце.

Анализ текущей литературы показывает сходство некоторых физических свойств  $\text{MnSi}$  и классического соединения со спиновыми поляронами гексаборида европия  $\text{EuB}_6$ . В частности, необходимо отметить аналогию между температурными зависимостями удельного сопротивления в окрестности перехода в магнитоупорядоченную фазу у  $\text{EuB}_6$  и  $\text{MnSi}$ .

Поэтому представляет интерес исследование твердых растворов замещения на основе гексаборида европия, в частности систем  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$ , в которых  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Gd}^{3+}$  имеют одинаковое основное состояние  $^8S_{7/2}$  и одинаковый магнитный момент  $\mu = 7\mu_B$ . Исходя из положения атомов  $\text{Eu}$  и  $\text{Gd}$  в периодической таблице элементов, можно ожидать, что увеличение концентрации ионов  $\text{Gd}$  будет приводить к увеличению концентрации электронов и непосредственно влиять на спин-поляронные состояния. Тем не менее, учитывая, что магнитные свойства  $\text{MnSi}$  и  $\text{EuB}_6$  обусловлены  $d$ - и  $f$ -электронами соответственно, следует ожидать определенных различий в спин-поляронных состояниях в указанных материалах.

В последнее время для исследования СКС различной природы открылись новые возможности, связанные с использованием электронного спинового резонанса (ЭСР). Долгое время считалось, что наблюдение ЭСР, обусловленного откликом матрицы ЛММ в сильно коррелированной системе, практически невозможно из-за большой ширины линии и малого объема образца, который взаимодействует с микроволновым излучением (поверхностный слой порядка глубины скин-слоя). К настоящему времени эта «неразрешимая проблема» экспериментально преодолена для различных СКС, в том числе для тяжелофермионных Кондо-систем  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  и  $\text{CeB}_6$ , где были успешно осуществлены наблюдения магнитного резонанса. В случае  $\text{EuB}_6$  ЭСР исследовался в ряде работ, однако в случае  $\text{MnSi}$  известно только две экспериментальные работы [6; 7]. Для обеих систем наблюдается единственная резонансная линия, которая с хорошей точностью может быть описана моделью осциллирующих ЛММ [7]. Следует обратить внимание на работу [7], в которой было показано, что наблюдаемая физическая картина магнитного резонанса у  $\text{MnSi}$  не может быть объяснена в рамках теории зонного магнетизма и, в то же время, допускает последовательную интерпретацию в рамках простой спин-поляронной модели, в

которой спиновый полярон образован ЛММ марганца и квазисвязанными с ними электронами проводимости.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование статических и динамических магнитных свойств твердых растворов замещения  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 \leq x < 0,3$ ) и  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$  ( $0 \leq x < 0,04$ ), направленное на выяснение взаимосвязи между особенностями электронного спинового резонанса и квантовым критическим поведением в магнитоупорядоченных и парамагнитной фазах, а также выявление спин-поляронных эффектов в исследуемых системах.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Разработка спин-поляронной модели для описания статических и динамических магнитных свойств моносилицида марганца;
2. Исследование намагниченности твердых растворов замещения  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 < x < 0,3$ ) в сильном магнитном поле до 50 Тл
3. Измерение и анализ формы линии поглощения электронного спинового резонанса в  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 < x < 0,3$ ) при гелиевых и промежуточных температурах;
4. Выяснение взаимосвязи между параметрами спиновой релаксации и  $T$ - $x$  фазовой диаграммой в  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 < x < 0,3$ );
5. Исследование электронного спинового резонанса в твердом растворе замещения  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$  ( $0 \leq x < 0,04$ ), определение параметров спиновой релаксации, сравнение полученных результатов с  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 < x < 0,3$ ).

### **Структура работы:**

В первой главе приведен литературный обзор исследуемых систем.

Вторая глава посвящена методике измерений, содержит описание измерительных установок и расчет поглощения микроволнового излучения проводящей средой для абсолютной калибровки линии ЭСР.

В третьей главе приведена модель спинового полярона и произведен расчет динамического отклика спинового полярона на внешнее высокочастотное поле.

В четвертой главе приведен анализ экспериментальных данных измерения намагниченности  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  в импульсных магнитных полях до 50 Тл.

Пятая глава посвящена анализу экспериментальных данных измерения ЭСР в твердых растворах замещения  $Mn_{1-x}Fe_xSi$ .

В шестой главе производится комплексный анализ статических и динамических магнитных свойств (намагниченность, магнитная восприимчивость, сопротивление, эффект Холла и ЭСР) в твердых растворах замещения  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ .

Научная новизна:

1. Разработана и экспериментально подтверждена спин-поляронная модель для  $MnSi$  и  $Mn_{1-x}Fe_xSi$ , качественно и количественно объясняющая аномалии статических и динамических магнитных свойств моносилицида марганца и твердых растворов замещения на его основе.
2. Впервые исследована намагниченность  $M(B)$  твердых растворов замещения  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  в магнитном поле  $B$  до 50 Тл. Обнаружено, что в сильном магнитном поле насыщение намагниченности отсутствует и полевая зависимость намагниченности в парамагнитной фазе следует степенному закону  $M(B) \sim B^\alpha$  с показателем степени  $\alpha = 0,33-0,5$ .
3. На примере  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  продемонстрирована возможность применения ЭСР-спектроскопии для визуализации квантовых критических точек, в том числе «скрытых».
4. Впервые исследован электронный спиновый резонанс в твердых растворах замещения  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$  в области малых концентраций гадолиния ( $x < 0,04$ ).

Практическая ценность результатов диссертации заключается в разработке методики исследования электронного спинового резонанса в металлах с сильными электронными корреляциями, а также в возможности использования спин-поляронной модели в системах со сложной магнитной структурой. Кроме того, экспериментальные данные и численные оценки, представленные в диссертации, могут найти применение при дальнейших исследованиях сильно коррелированных металлов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Создан новый ЭСР-спектрометр на основе векторного анализатора цепей и разработана оригинальная управляющая установкой программа, что позволило повысить отношение сигнал/шум в 50 раз.

2. Разработана модель спинового полярона в  $\text{MnSi}$  и  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ , позволяющая качественно и количественно объяснить аномалию намагниченности в слабом поле (расхождение магнитного момента насыщения и эффективного магнитного момента) и описать динамические магнитные свойства системы.
3. Выполнено исследование намагниченности  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  в сильном магнитном поле. Установлено, что насыщение намагниченности не достигается вплоть до 50 Тл, причем намагниченность  $M$  в области полей  $B > 2\text{--}5$  Тл возрастает по степенному закону  $M \sim B^\alpha$  с показателем степени  $\alpha \sim 0,4$ . Показано, что такое поведение можно связать с возникновением в сильном магнитном поле квантовой критической фазы Гриффитса в системе спиновых поляронов.
4. Исследован электронный спиновый резонанс в твердом растворе замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ . Была обнаружена одна резонансная линия, форма которой соответствует модели локализованных магнитных моментов (ЛММ). При концентрациях железа 11% и 24% температурная зависимость ширины линии соответствует предсказаниям теории Абрахамса-Вольфле для квантового критического режима. При остальных концентрациях обнаружена квадратичная зависимость ширины линии от температуры, нарушающая закон Корринги. Продемонстрирована возможность применения ЭСР-спектроскопии для обнаружения «скрытых» квантовых критических точек.
5. Исследован электронный спиновый резонанс в твердом растворе замещения  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$ . Была обнаружена одна резонансная линия, форма которой соответствует модели ЛММ. Найдено, что повышение концентрации гадолиния индуцирует переход ферромагнетик-антиферромагнетик. Установлено, что при температуре  $T^* \approx 20\text{--}60$  К, зависящей от концентрации гадолиния, происходит разрушение системы спиновых поляронов, которое приводит к изменению режима спиновой релаксации и проявлению эффекта узкого горла в области  $T > T^*$ .

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается тщательной проработкой вопросов, связанных с предварительными отбором, подготовкой и характеризацией монокристаллических образцов — объектов



исследования, подробным описанием экспериментальных методик и выполненных калибровочных экспериментов, а также сопоставлением оригинальных результатов с данными, приведенными в различных литературных источниках. Положения и выводы, сформулированные в диссертации получили квалифицированную апробацию на международных и российских научных конференциях. Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена публикациями результатов в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 2-е международное совещание «Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures» (Великий Новгород, 2013),
2. Международный симпозиум «Spin waves» (Санкт-Петербург, 2013),
3. 56-я, 57-я и 58-я научные конференции МФТИ (Долгопрудный, 2013–2015),
4. Московский международный симпозиум по магнетизму (MISM) (Москва, 2014),
5. XII, XIII и XIV конференции «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления» (Троицк, 2014–2016),
6. 37-е международное совещание по физике низких температур (Казань, 2015)
7. Международная конференция «Modern Development of Magnetic Resonance» (Казань, 2013)
8. Международная конференция «Strongly Correlated Electron Systems (SCES)» (Гренобль, 2014),
9. 13-я, 14-я и 15-я школа-конференция молодых ученых «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений» (Сочи, 2014–2016),
10. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 (Москва, 2015),
11. 49-я школа ФГБУ «ПИАФ» по физике конденсированного состояния (Санкт-Петербург, 2015),
12. 18-я международная школа молодых ученых «Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применение» (Казань, 2015).

Автором лично представлено 8 устных и 5 стендовых докладов на 3 международных и 10 российских научных конференциях.



Личный вклад. Подготовка объектов исследования, измерение электронного спинового резонанса в  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  ( $0 < x < 0,3$ ) и  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$  ( $x < 0,04$ ), измерение транспортных свойств  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ , анализ экспериментальных данных, а также подготовка материалов статей к публикации и модернизация ЭСР-спектрометра выполнены лично диссертантом.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных работах, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 166 страниц с 64 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 134 наименования.

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель и ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе приводится обзор научной литературы по системам  $MnSi$ ,  $EuB_6$  и твердым растворам замещения  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  и  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ . Приведены общие сведения о структуре и физических свойствах моносилицидов 3-*d* переходных металлов и гексаборидов редких земель, к которым относятся исследуемые соединения. Обсуждаются транспортные и магнитные свойства исследуемых соединений, приведены  $B$ - $T$  и  $T$ - $x$  фазовые диаграммы и данные ЭСР-экспериментов. Обозначены актуальные проблемы исследования указанных систем.

Вторая глава посвящена методике исследований. Приведены описание методики получения монокристаллических образцов  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  и  $Eu_{1-x}Gd_xB_6$  и описание экспериментальных установок: ЭСР-спектрометра, установки для измерения гальваномагнитных характеристик и установки для измерения намагниченности в сильных магнитных полях (до 50 Тл).

В рамках данной работы была произведена модернизация ЭСР спектрометра отдела низких температур и криогенной техники ИОФ РАН путем включения в состав установки векторного анализатора цепей Agilent PNA E8361C (рис. 1). Анализатор включен в режиме измерения частотной зависимости коэффициента пропускания резонатора. Применение векторного анализатора це-



Рис. 1 — Модернизированный ЭСР-спектрометр

пей позволило реализовать алгоритм автоматической подстройки резонансной частоты для компенсации ее дрейфа в процессе измерений, что, в свою очередь, позволило до 50 раз улучшить отношение сигнал/шум. Также применение анализатора цепей позволяет проводить измерения магнитного резонанса одновременно на нескольких частотах. Для управления модернизированной версией спектрометра разработано оригинальное управляющее программное обеспечение.

Также приведен расчет магнитопоглощения в образце и описание методики абсолютной калибровки линии ЭСР, которая позволяет получить полные зависимости высокочастотной магнитной проницаемости  $\mu_R$  в абсолютных единицах.

В третьей главе рассмотрена предложенная нами спин-поляронная модель MnSi. Модель призвана количественно объяснить расхождение между эффективным магнитным моментом  $\mu^*$ , определяющим магнитный отклик образца в слабом поле, и магнитным моментом насыщения  $M_{sat}$ . Модель зонного магнетизма Мории, традиционно ассоциируемая с MnSi, не может даже качественно описать подобное поведение, поскольку предполагает, что величина  $M_{sat}$  пропорциональна квадрату спиновых флуктуаций, которые подавляются

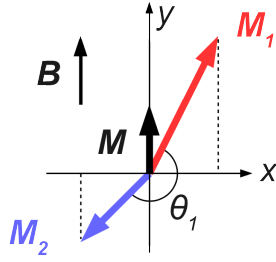


Рис. 2 — Конфигурация магнитных моментов в модели спинового полярона

магнитным полем. Это должно приводить к немонотонной полевой зависимости намагниченности, чего не наблюдается на эксперименте.

В предложенной нами модели спиновый полярон состоит из двух магнитных моментов, соответствующих локализованному магнитному моменту марганца и спином квазилокализованных в окрестности Mn электронов. При этом спиновый полярон имеет простую «жесткую» спиновую конфигурацию: магнитные моменты в общем случае различны и направлены в разные стороны (ферримагнитно), а суммарный магнитный момент направлен по внешнему магнитному полю (рис. 2).

В такой модели эффективный магнитный момент  $\mu^*$  и магнитный момент насыщения  $M_{sat}$  спинового полярона можно найти по формулам

$$\mu^* = \mu_1/f, \quad M_{sat} = n_1 f \mu_1, \quad (1)$$

$$f = \cos \theta_1 - \sqrt{(M_{20}/M_{10})^2 - \sin^2 \theta_1}, \quad (2)$$

где  $\mu_1 = \mu_B$  — магнитный момент электрона,  $M_{10}$  и  $M_{20}$  — магнитные моменты насыщения электрона и ЛММ соответственно,  $n_1$  — концентрация электронов в системе и  $\theta_1$  — угол между магнитными моментами  $\mathbf{M}_1$  и  $\mathbf{M}_2$  (рис. 2). Расчет показал, что угол  $\theta_1$  зависит только от отношения магнитных моментов, что и обеспечивает «жесткость» конфигурации, а ферримагнитное положение моментов приводит к редукции магнитного момента насыщения. Согласно расчету, при угле  $\theta_1 \approx 25^\circ$  величина эффективного магнитного момента спинового полярона равна  $\mu^* = 5,3\mu_B$ , а магнитного момента насыщения  $M_{sat} \approx 0,27\mu_B$ , что с хорошей точностью соответствует экспериментальным значениям для MnSi.

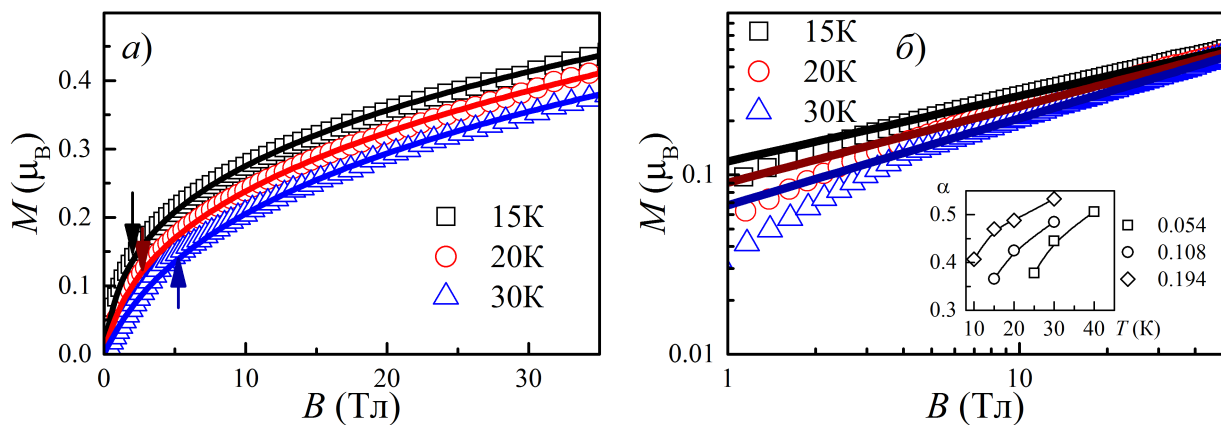


Рис. 3 — Полевые зависимости намагниченности образца  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  с  $x = 0.108$ . Точки — экспериментальные данные. На панели (а) сплошными линиями показана аппроксимация функцией (3), на панели (б) — аппроксимация степенной функцией  $M = B^\alpha$  в сильных полях. Стрелками отмечено поле  $B_c$  (см. текст). На вставке показаны температурные зависимости показателя степени  $\alpha$  для различных концентраций.

Расчет динамического отклика спинового полярона на внешнее переменное магнитное поле был выполнен для двух геометрий: с перпендикулярной (геометрия Фарадея) и параллельной (геометрия Фойгта) ориентацией переменного магнитного поля относительно постоянного. Расчет показал, что в системе будет наблюдаться магнитный резонанс только в геометрии Фарадея с перенормированным осциллирующим магнитным моментом, равным сумме ЛММ и спинов квазилокализованных электронов и  $g$ -фактором  $g \approx 2$ .

В четвертой главе приведены результаты исследования намагниченности  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  в сильных магнитных полях до 50 Тл.

Измерения намагниченности образцов производились индукционным методом в импульсном магнитном поле напряженностью до 50 Тл согласно методике, описанной в главе 2. Исследовались три образца с концентрациями железа  $x = 0,05, 0,11$  и  $0,19$ , что позволило избежать искажения экспериментальных данных  $M(B)$ , обусловленного магнитокалорическим эффектом.

Было обнаружено, что намагниченность всех исследованных образцов в парамагнитной фазе не выходит на насыщение вплоть до максимальной напряженности магнитного поля 50 Тл (рис. 3).

Анализ экспериментальных данных показывает, что в сильных полях намагниченность с хорошей точностью может быть аппроксимирована степенной

зависимостью  $M(B) \sim B^\alpha$  с показателем степени  $\alpha$  от 0,33 до 0,5 (рис. 3,б). Для модельного описания зависимостей в парамагнитной (ПМ) фазе была использована интерполяционная формула

$$M(B) = \frac{C}{T - \theta} \cdot \frac{B}{(B/B_c + 1)^\xi}, \quad (3)$$

где  $C$  — константа Кюри,  $\theta$  — парамагнитная температура Кюри,  $B_c$  и  $\xi$  — параметры, определяющие поведение кривой в сильных полях. Данная формула позволяет описать как линейное поведение намагниченности в слабых полях ( $B \ll B_c$ ), так и степенную зависимость с показателем степени  $\alpha = 1 - \xi$  в сильном магнитном поле ( $B \gg B_c$ ).

Полевые зависимости намагниченности в области линейного отклика в слабом магнитном поле были проанализированы в рамках спин-поляронной модели, рассмотренной в главе 3. Найдено, что величина ЛММ марганца может быть оценена величиной  $\mu_{Mn} \sim 1,1-1,3\mu_B$  в разумном согласии с LDA расчетами, согласно которым величина  $\mu_{Mn}$  составляет примерно  $1,2\mu_B$ .

Степенная асимптотика  $M(B) \sim B^\alpha$ , наблюдаемая в сильных магнитных полях вместо насыщения, является крайне необычной. Существующие теории предсказывают, что степенная зависимость намагниченности должна наблюдаться для систем, у которых основное состояние представляет собой фазу Гриффитса (ФГ) [8]. Образование ФГ возможно в различных магнитных системах с беспорядком, как ферромагнитных так и антиферромагнитных. В фазе Гриффитса магнитная система распадается на спиновые кластеры из-за пространственной дисперсии обменной энергии. При этом спиновые кластеры с большей степенью корреляции и определяют магнитные свойства фазы Гриффитса [8]. Вариации температуры или магнитного поля приводят к отклонению температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  от закона Кюри-Вейсса при низких температурах, и  $\chi(T \rightarrow 0)$  становится пропорциональна степени обратной температуры [8]). Одновременно в ФГ в сильном магнитном поле следует ожидать возникновение зависимости  $M(B) \sim B^\alpha$  [8]. При этом для наблюдения степенной асимптотики  $M \sim B^\alpha$  должно выполняться условие  $k_B T \ll \mu^* B$ , где ( $\mu^*$  — эффективный магнитный момент). Согласно теоретическим расчетам показатель степени  $\alpha$  лежит в пределах  $0,2 \leq \alpha \leq 0,6$  или  $1/3 \leq \alpha \leq 1/2$  [8], что согласуется с нашим экспериментом (вставка на рис. 3,б).



В случае  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  отклонений от закона Кюри-Вейсса в слабом магнитном поле обнаружено не было, поэтому необходимо предположить, что фаза Гриффитса отсутствует в слабых полях и возникает только под воздействием сильного поля. В таком случае поле перехода  $B_c$  можно связать с амплитудой спиновых флуктуаций. В слабых полях ( $B < B_c(T)$ ) спиновые флуктуации велики и система остается в ПМ фазе. Сильное поле ( $B > B_c(T)$ ) подавляет спиновые флуктуации и возникает фаза Гриффитса. Более того, естественно ожидать роста величины поля перехода с ростом температуры, поскольку известно, что с повышением температуры амплитуда спиновых флуктуаций растет как в зонной [9], так и в спин-поляронной модели. Проведенные качественные оценки полностью соответствуют эксперименту, в котором поле  $B_c(T, x)$  увеличивается с ростом как  $T$ , так и  $x$ .

Отметим, что предполагаемое возникновение фазы Гриффитса в сильных магнитных полях в системе спиновых поляронов указывает на ограничение области применимости модели спинового полярона (глава 3), основанной на «жесткой» спиновой конфигурации и не учитывающей возможности изменения взаимной ориентации векторов намагниченности  $\mathbf{M}_1$  и  $\mathbf{M}_2$  и (или) взаимодействия между спин-поляронными состояниями.

В пятой главе приведены результаты исследования электронного спинового резонанса (ЭСР) в  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  для диапазона концентраций железа  $x < 0,3$  на частоте 60 ГГц в полях до 7 Тл и в температурном диапазоне от 1,8 К до 50 К.

Во всех случаях наблюдалась одна узкая резонансная линия, хорошо различимая в области низких температур (рис. 4,а). Повышение температуры и увеличение концентрации железа приводит к уменьшению интенсивности поглощения и при температурах выше  $\sim 50$  К резонанс становится практически ненаблюдаемым. При обработке и анализе экспериментальных данных применялась методика абсолютной калибровки кривых поглощения ЭСР, описанная в главе 2. Найдено, что форма линии ЭСР соответствует модели осциллирующих ЛММ, причем величина осциллирующей намагниченности в пределах погрешности совпадает с величиной статической намагниченности образцов в резонансном поле  $M_0 \approx M(B_{res})$ . Для всех образцов твердых растворов замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  ( $x \leq 0,3$ )  $g$ -фактор варьируется в пределах  $g \approx 1,93-1,97$  и не зависит от температуры.

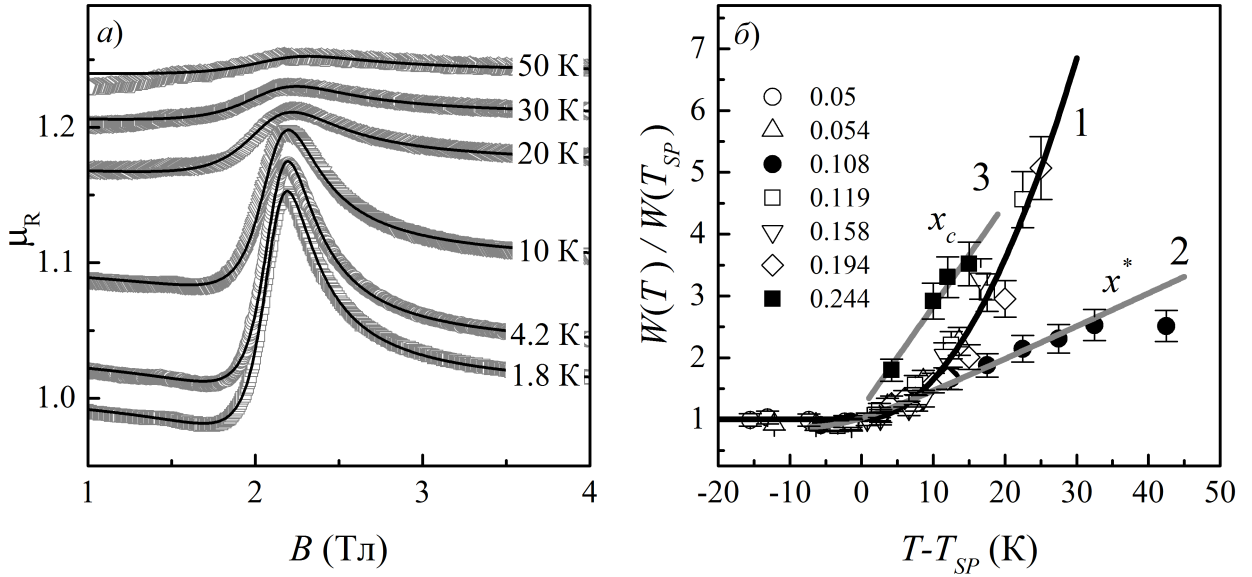


Рис. 4 — Полевые зависимости высокочастотной магнитной проницаемости  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  с  $x = 0,108$  при различных температурах (а). Температурные зависимости нормированной ширины линии ЭСР  $W(T)/W(T_{SP})$  (б). Заполненными точками обозначены данные для концентраций  $x = x^*$  и  $x = x_c$ , соответствующих квантовым критическим точкам. Линия 1 — аппроксимация температурных зависимостей квадратичным законом (4). Линии 2 и 3 — аппроксимация  $W(T)$  формулой (5). Концентрации  $x$  железа указаны на рисунке.

Наиболее интересные результаты были получены при исследовании спиновой релаксации в системе  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ . Было обнаружено, что температурные зависимости ширины линии ЭСР  $W(T)$  не подчиняются закону релаксации Корринги [10] (предполагающий линейный рост ширины линии  $W(T) = W_0 + b \cdot T$ ), а вместо этого для большинства концентраций наблюдается квадратичный рост в парамагнитной фазе (рис. 4,б), который можно описать следующим скейлинговым соотношением для ширины линии ЭСР:

$$\begin{cases} \frac{W(T)}{W(T_{SP})} = \text{const}, & T < T_{SP}, \\ \frac{W(T)}{W(T_{SP})} = a_0 \cdot (T - T_{SP})^2, & T > T_{SP}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T_{SP}(x)$  — зависящие от концентрации железа температуры фазового перехода в спин-поляризованное состояние в резонансном поле  $B \approx 2,2$  Тл  $a_0$  — постоянная величина, равная  $a_0 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-2}$ .



Две кривые  $W(T)$ , которые не подчиняются скейлинговому соотношению, соответствуют квантовым критическим точкам при концентрациях  $x^* \approx 0,11$  и  $x_c \approx 0,24$  (рис. 4,б). Поведение  $W(T)$  вблизи квантовых критических точек теоретически исследовано в работе [11] и описывается выражением

$$W(T) = W_0 + A \cdot T \cdot \arctg(T/T_x), \quad (5)$$

где величина  $T_x$  обозначает температуру перехода между фермижидкостным ( $T \ll T_x$ ) и нефермижидкостным ( $T \gg T_x$ ) режимами [11]. Формула (5) позволяет с хорошей точностью аппроксимировать зависимости  $W(T)$  для концентраций  $x = x^*$  и  $x = x_c$  (рис. 4,б, линии 2 и 3), причем параметр модели  $T_x$  оказывается близким к  $T_{SP}$ .

Таким образом, анализ температурных зависимостей ширины линии ЭСР системы  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  показывает существование аномальной спиновой релаксации, которая наблюдается вблизи квантовых критических точек и проявляется как в случае обычных ( $x_c$ ), так и в случае скрытых ( $x^*$ ) квантовых критических точек. Таким образом, детектирование особенностей спиновой релаксации методом ЭСР позволяет «визуализировать» квантовые критические точки, в том числе скрытые.

В главе 6 приведены результаты комплексного исследования транспортных и магнитных свойств твердых растворов замещения  $Eu_{1-x}Gd_xV_6$ . Все измерения производились на монокристаллических образцах с концентрацией гадолиния  $x = 0,007, 0,030$  и  $0,039$ . Измерения производились согласно методикам, описанным в главе 2.

Измерения намагниченности производились на установке MPMS-5 (Quantum Design) в магнитных полях до 5.5 Тл и при температурах от 2 К до 50 К. Анализ кривых магнитной восприимчивости, измеренной в магнитном поле 100 Э, показал, что для всех образцов в парамагнитной фазе с хорошей точностью выполняется закон Кюри-Вейсса с положительной парамагнитной температурой Кюри  $\theta$ .

Измерения транспортных свойств (магнитосопротивление и эффект Холла) производились в магнитных полях до 8 Тл и при температурах от 2 К до 300 К. Для всех исследованных составов магнитосопротивление отрицательно во всем температурном диапазоне  $2,1 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$ . Отрицательное магнитосопротивление (ОМС) может свидетельствовать о значительном магнит-

ном вкладе в рассеяние. Одна из наиболее простых моделей, описывающих эффект ОМС является модель Иосиды для рассеяния на локализованных магнитных моментах [12], из которой следует формула  $\Delta\rho/\rho = -b_0(M/M_{sat})^2$ , где  $M_{sat}$  обозначает намагниченность насыщения, а  $b_0$  является параметром модели. Анализ магнитосопротивления в рамках модели Иосиды показал наличие универсальной зависимости  $\Delta\rho/\rho(M^2)$  для образца  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  с  $x = 0,007$  в ПМ фазе, которая линейна только при малых значениях  $M$ . Для  $x = 0,030$  универсальная зависимость становится линейной для всех  $M$ , а при  $x = 0,039$  скейлинг перестает наблюдаться, что может указывать на смену типа магнитного взаимодействия у  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$ .

Было показано, что в магнитоупорядоченных фазах  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  выполняется скейлинговое соотношение вида

$$\Delta\rho/\rho(T = \tilde{T}, B) = \tilde{f}([M(T = \tilde{T}, B)/M_{sat}]^2), \quad (6)$$

где  $\tilde{T} = 0,55 \cdot (T_C, T_N)$ , в котором образцы разбиваются на две группы:  $x < 0,03$  и  $x \geq 0,03$ , что подтверждает предположение о смене типа магнитного взаимодействия. В качестве возможного объяснения такого поведения предполагается, что РККИ-взаимодействие между ЛММ ионов  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Gd}^{3+}$  в исследованном диапазоне концентраций носит ФМ характер, что дает  $\theta(x) > 0$ , в то время как процесс магнитного рассеяния и образования магнитоупорядоченных фаз оказывается более сложным.

Измерения ЭСР в системе  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  производились на частоте 60 ГГц в магнитных полях до 7 Тл и при температурах от 1,8 К до 300 К.

Для всех исследованных образцов наблюдается одна резонансная линия с максимумом в поле  $B_{res} \sim 2\text{--}2,2$  Тл. Увеличение концентрации гадолиния приводит сначала к сужению резонансной линии ЭСР ( $x = 0,007$ ), а затем к увеличению ее ширины ( $x \geq 0,030$ ). При повышении температуры до  $T = T_0 \sim 50\text{--}80$  К происходит уменьшение интенсивности и рост ширины линии ЭСР, а при температурах выше  $T_0$  параметры резонансной линии практически не меняются.

Обработка экспериментальных данных ЭСР для  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  производилась согласно методике абсолютной калибровки линии поглощения, описанной в главе 2. При анализе формы линии ЭСР производилась нелинейная аппроксимация с использованием трех независимых параметров: осциллиру-

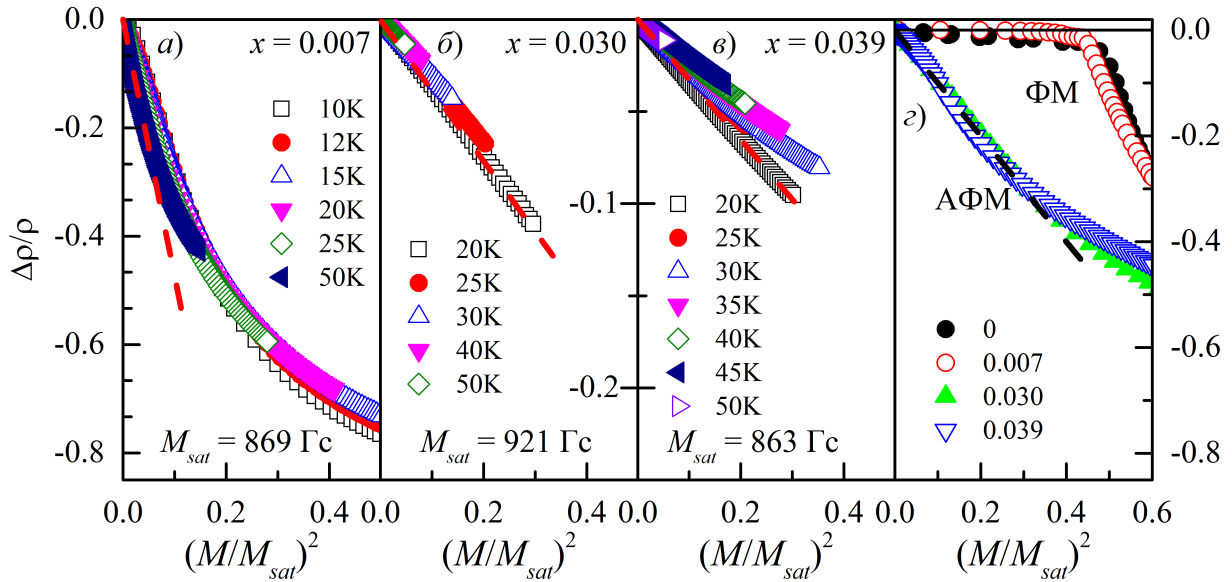


Рис. 5 — Зависимости магнитосопротивления  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  как функции квадрата нормированной намагниченности  $\Delta\rho/\rho = f([M/M_{sat}]^2)$  в парамагнитной (а-в) [12] и магнитоупорядоченной (г) фазах. На панели (г) зависимости взяты при температурах  $T = 0.55(T_C, T_N)$ .

ющей намагниченности  $M_0$ ,  $g$ -фактора и ширины линии ЭСР  $W$ . Полученные величины  $M_0$  во всем температурном диапазоне для всех исследованных образцов совпали с величиной статической намагниченности образцов в резонансном поле  $M(B_{res})$ . Это свидетельствует о том, что в системе  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  при  $0 \leq x \leq 0,039$  основной вклад в резонансное поглощение вносят только осциллирующие ЛММ Eu и Gd.

Для всех составов ширина линии имеет глобальный минимум при температуре  $T_{min}$ , которая с хорошей точностью соответствует парамагнитной температуре Кюри и максимуму  $\rho(T)$ .

В ПМ фазе ( $T > T_{min}$ ) наблюдается монотонный рост ширины линии ЭСР (рис. 6,б). Для каждой концентрации на кривой  $W(T)$  в ПМ фазе присутствует особенность при температуре  $T_0 \approx 50\text{--}80$  К, разделяющая кривую на два участка  $T_{min} < T < T_0$  и  $T > T_0$ , в каждом из которых наблюдается линейная зависимость  $W(T)$  от температуры.

Линейная зависимость  $W(T) = W_0 + b \cdot T$  в диапазоне  $T_{min} < T < T_0$  (рис. 6) может быть объяснена корринговским механизмом спиновой релаксации (передача энергии от ЛММ к электронам проводимости) [13], а изменение коэффициента  $b$  при  $T > T_0$  (рис. 6) связано с проявлением второго канала релаксации — релаксации Оверхаузера (передача энергии от электронов про-

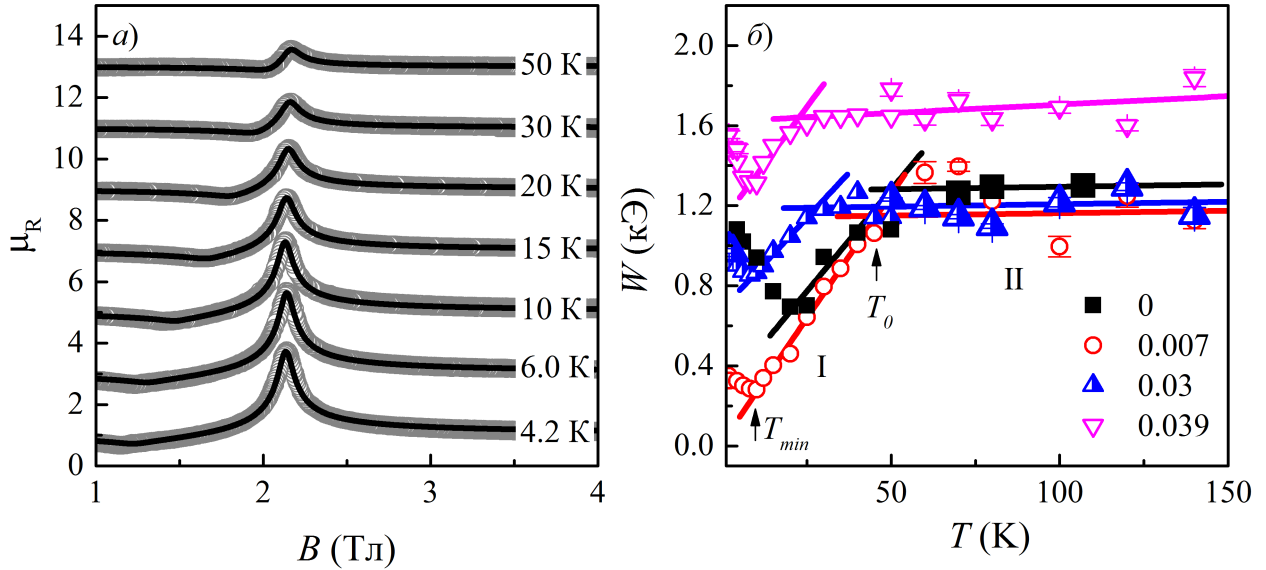


Рис. 6 — Полевые зависимости высокочастотной магнитной проницаемости  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  с  $x = 0.030$  при различных температурах (а). Температурные зависимости ширины линии ЭСР в  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  (б). Линиями показаны линейные аппроксимации ширины линии  $W(T) = W_0 + b \cdot T$ . Стрелками отмечены температуры  $T_{min}$  и  $T_0$ .

водимости к ЛММ) [13], что приводит к сужению резонансной линии. Проявление релаксации Оверхаузера в литературе называют эффектом узкого горла («*bottleneck*») [13]. Также нами было показано, что для всех исследованных составов  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  относительный вклад в форму и параметры резонансной линии от спиновых поляронов несущественен и находится в пределах погрешности наших измерений.

Используя холловские данные и результаты ЭСР-эксперимента, была оценена величина эффективного обмена  $J_{sf}$ , которая меняется от  $|J_{sf}| \approx 110$  мэВ для  $\text{EuB}_6$  до  $|J_{sf}| \approx 43$  мэВ для  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  с  $x = 0.039$ . Полученные величины с хорошо сочетаются с литературными данными [14; 15]. При этом обнаруженное подавление обмена в области  $T > T_0$  можно связать с разрушением спиновых поляронов при  $T > T_0$ .

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Указывается, что в работе было выполнено комплексное исследование статических (намагниченности  $M$  и магнитной восприимчивости  $\chi$ ) и динамических (электронного спинового резонанса, ЭСР) магнитных свойств твердых растворов замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  ( $0 < x < 0,24$ ) в магнитных полях до 50 Тл и  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  ( $0 \leq x < 0,04$ ) в магнитных полях до 8 Тл в диапазоне темпе-

ратур от 1,8 К до 300 К. Также были проведены исследования транспортных свойств системы  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  в указанном диапазоне магнитных полей и температур. Для проведения измерений ЭСР с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA E8361C был модернизирован ЭСР-спектрометр и разработано оригинальное программное обеспечение, что позволило до 50 раз повысить точность измерений электронного спинового резонанса в сильно коррелированных металлах. Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Для описания статических и динамических свойств моносилицида марганца разработана спин-поляронная модель, объясняющая аномалию полевой зависимости намагниченности, заключающаяся в расхождении между редуцированным магнитным моментом насыщения  $M_0 \approx 0,3\mu_B/\text{Mn}$  и эффективным магнитным моментом  $\mu^* \approx 5\mu$ , описывающим выход полевой зависимости намагниченности на насыщение. В рамках предложенного подхода спиновый полярон представляет собой квазисвязанное состояние зонных электронов и локализованных магнитных моментов ионов Mn. Показано, что учет специфических взаимодействий для простой «жесткой» спиновой конфигурации ферримагнитного типа, характеризующей спиновый полярон, позволяет количественно интерпретировать экспериментальные данные, причем наблюдаемые значения  $\mu^*$  не связаны с большими локализованными магнитными моментами в объеме образца. Найдено, что данная модель предсказывает появление единственной линии поглощения в эксперименте по электронному спиновому резонансу, отвечающей перенормированному магнитному моменту спинового полярона и эффективному  $g$ -фактору  $g \approx 2$ . Полученные результаты показывают, что парамагнитную фазу у MnSi следует рассматривать как фазу, физические свойства которой определяются магнитными неоднородностями на нанометровом пространственном масштабе.
2. Исследована намагниченность твердых растворов замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  в сильном магнитном поле. Установлено, что насыщение намагниченности  $M(B)$  не достигается вплоть до магнитного поля  $B = 50$  Тл, причем намагниченность  $M$  в области полей  $B > 2-5$  Тл возрастает по степенному закону  $M(B) \sim B^\alpha$  с показателем степени

$\alpha \approx 0,3-0,5$ , а в слабом поле выполняется закон Кюри-Вейсса и полевая зависимость намагниченности линейна  $M(B) \sim B$ . Показано, что такое поведение можно связать с возникновением в сильном магнитном поле квантовой критической фазы Гриффитса в системе спиновых поляронов, которые выступают в качестве элементарных неоднородностей, необходимых для формирования спиновых кластеров. Данный результат показывает ограниченность модельного подхода, основанного на представлении о «жесткой» конфигурации спинов, характеризующих спиновый полярон, и не учитывающего взаимодействие между спин-поляронными состояниями.

3. Для твердых растворов замещения  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  ( $x < 0,3$ ) в диапазоне магнитного поля  $B < 8$  Тл в области температур 1,8–60 К, выполнено исследование высокочастотного (60 ГГц) электронного спинового резонанса. Установлено, что экспериментальные спектры ЭСР характеризуются единственной резонансной линией с  $g$ -фактором  $g \approx 1,93-1,97$ , в согласии с предложенной моделью спинового полярона. Показано, что форма линии ЭСР соответствует магнитным колебаниям локализованных магнитных моментов, а осциллирующая намагниченность совпадает с полной статической намагниченностью образца в поле магнитного резонанса. Применение разработанной методики анализа формы линии ЭСР позволило установить, что для ширины линии ЭСР  $W(T)$  в парамагнитной фазе справедлив универсальный скейлинг вида  $W(T)/W(T_{SP}) = 1 + a_0 \cdot (T - T_{SP})^2$  (где  $T_{SP}$  — температура перехода в спин-поляризованную фазу и  $a_0 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-2}$ ), который выполняется для всех составов, за исключением образцов с концентрацией железа  $x^* \approx 0,11$  и  $x_c \approx 0,24$ , отвечающих квантовым критическим точкам в системе  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ . Квантовые критические точки  $x^*$  и  $x_c$ , в которых происходит подавление дальнего и промежуточного магнитного порядка, характеризуются аномальной температурной зависимостью ширины линии ЭСР, в согласии с предсказаниями теории Абрахамса-Вольфле для квантовых критических систем. Таким образом, особенности спиновой релаксации могут использоваться для «визуализации» квантовых критических точек (в том числе скрытых) на магнитной фазовой диаграмме.



4. Комплексное исследование намагниченности, магнитной восприимчивости, магнитосопротивления и эффекта Холла у твердых растворов замещения  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  ( $x < 0,04$ ) в диапазоне температур 1,8–300 К в магнитном поле до 8 Тл позволило установить эффект нарушения приближения среднего поля при электронном легировании, обусловленным замещением европия гадолинием. В то время как парамагнитная температура в законе Кюри-Вейсса, описывающим магнитную восприимчивость в парамагнитной фазе, остается положительной и соответствует ферромагнитному взаимодействию, локальное взаимодействие между магнитными моментами Eu и Gd меняет знак с ферромагнитного ( $x < 0,03$ ) на антиферромагнитный ( $x \geq 0,03$ ). Следствием этого эффекта является выполнение скейлингового соотношения, зависящее от типа локального магнитного взаимодействия, и связывающего магнитосопротивление и квадрат намагниченности  $\Delta\rho/\rho(T^*) = f[M(T^*)^2]$ , взятых при характерной температуре  $T^* \approx 0,55T_c$  (где  $T_c$  — температура перехода в соответствующую магнитоупорядоченную фазу).
5. Установлено, что спектры высокочастотного (60 ГГц) электронного спинового резонанса в системе  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  образованы единственной резонансной линией с  $g$ -фактором  $g \approx 2 \pm 0,2$ , форма которой хорошо описывается в модели локализованных магнитных моментов, причем осциллирующая намагниченность совпадает с полной статической намагниченностью в поле резонанса. Температурные зависимости ширины линии  $W(T)$  показывают, что в парамагнитной фазе  $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_6$  присутствует два участка линейных зависимостей, которые разделяются характерной температурой  $T(x) \approx 20\text{--}60$  К. Показано, что такое поведение  $W(T)$  может быть обусловлено возникновением эффекта узкого горла, при котором низкотемпературному участку  $T < T(x)$  соответствует механизм релаксации Корринги, а высокотемпературному диапазону  $T > T(x)$  — механизм релаксации Оверхаузера. Анализ параметров корринговского закона позволил установить, что рост концентрации гадолиния в твердом растворе приводит к уменьшению абсолютной величины обменного взаимодействия  $J$  от  $J = 110$  мэВ ( $x = 0$ ) до  $J = 44$  мэВ ( $x = 0,039$ ).



## Публикации автора по теме диссертации

1. [Anomalous spin relaxation and quantum criticality in  \$Mn\_{1-x}Fe\_xSi\$  solid solutions](#) / S. V. Demishev, A. N. Samarin, V. V. Glushkov, M. I. Gilmanov, I. I. Lobanova, N. A. Samarin, A. V. Semeno, N. E. Sluchanko, N. M. Chubova, V. A. Dyadkin, S. V. Grigoriev // *Pis'ma v ZhETF*. — 2014. — Vol. 100. — Pp. 30–33.
2. [High Frequency Electron Spin Resonance in  \$Mn\_{1-x}Fe\_xSi\$](#)  / A. N. Samarin, A. V. Semeno, M. I. Gilmanov, V. V. Glushkov, I. I. Lobanova, N. A. Samarin, N. E. Sluchanko, I. I. Sannikov, N. M. Chubova, V. A. Dyadkin, S. V. Grigoriev, S. V. Demishev // *Physics Procedia*. — 2015. — Vol. 71. — Pp. 337–342.
3. *Демисhev С. В., Ищенко Т. В., Самарин А. Н. Аномальные магнитные свойства парамагнитной фазы и спиновые поляроны в моносилициде марганца* // *Физика Низких Температур*. — 2015. — Т. 41, № 12. — С. 1243—1253.
4. *Квантовые фазовые переходы в спиральных магнетиках без центра инверсии* / С. В. Демишев, В. В. Глушков, С. В. Григорьев, М. И. Гильманов, И. И. Лобанова, А. Н. Самарин, А. В. Семенов, Н. Е. Случанко // *Успехи физических наук*. — 2016. — Т. 186, № 6. — С. 628—632.
5. [Magnetization of the  \$Mn\_{1-x}Fe\_xSi\$  in high magnetic field up to 50 T: possible evidence of a field-induced Griffiths phase](#) / S. V. Demishev, A. N. Samarin, J. Huang, V. V. Glushkov, I. I. Lobanova, N. E. Sluchanko, N. M. Chubova, V. A. Dyadkin, S. V. Grigoriev, M. Y. Kagan, J. Vanacken, V. V. Moshchalkov // *JETP Letters*. — 2016. — Vol. 104, no. 2. — Pp. 116–123.
6. [Tuning of exchange by band filling in low-carrier-density magnet  \$Eu\(Gd\)B\_6\$](#)  / V. V. Glushkov, A. N. Samarin, M. I. Gilmanov, A. V. Semeno, A. V. Bogach, A. V. Dukhnenko, A. V. Kuznetsov, A. V. Levchenko, N. Y. Shitsevalova, V. V. Voronov, N. E. Sluchanko, S. V. Demishev // *physica status solidi (b)*. — 2016. — Oct. — DOI: [10.1002/pssb.201600571](https://doi.org/10.1002/pssb.201600571).

## Список литературы

1. *Mott N. F., Davis E. A.* Electronic processes in non-crystalline materials. — Oxford : Clarendon Press, 1971.
2. *Нагаев Э. Л.* Основные состояния и аномальный магнитный момент электронов проводимости в антиферромагнитном полупроводнике // Письма в ЖЭТФ.. — 1967. — Т. 6, № 1. — С. 484.
3. [Magnetic phase diagram of MnSi in the high-field region](#) / S. V. Demishev, V. V. Glushkov, I. I. Lobanova, M. A. Anisimov, V. Y. Ivanov, T. V. Ishchenko, M. S. Karasev, N. A. Samarin, N. E. Sluchanko, V. M. Zimin, A. V. Semeno // Phys. Rev. B. — 2012. — Jan. — Vol. 85, issue 4. — P. 045131.
4. [Electron localization into spin-polaron state in MnSi](#) / V. G. Storchak, J. H. Brewer, R. L. Lichti, T. A. Lograsso, D. L. Schlagel // Phys. Rev. B. — 2011. — Apr. — Vol. 83, issue 14. — P. 140404.
5. [Understanding the  \$\mu\$ SR spectra of MnSi without magnetic polarons](#) / A. Amato, P. Dalmas de Réotier, D. Andreica, A. Yaouanc, A. Suter, G. Lapertot, I. M. Pop, E. Morenzoni, P. Bonfà, F. Bernardini, R. De Renzi // Phys. Rev. B. — 2014. — May. — Vol. 89, issue 18. — P. 184425.
6. *Date M., Okuda K., Kadowaki K.* [Electron Spin Resonance in the Itinerant-Electron Helical Magnet MnSi](#) // Journal of the Physical Society of Japan. — 1977. — Vol. 42, no. 5. — Pp. 1555–1561.
7. Является ли MnSi зонным магнетиком? Результаты ЭПР-эксперимента / С. В. Демишев, А. В. Семенов, А. В. Богач, В. В. Глушков, Н. Е. Случанко, Н. А. Самарин, А. Л. Чернобровкин // Письма в ЖЭТФ.. — 2011. — Т. 93. — С. 231.
8. *Fisher D. S.* [Critical behavior of random transverse-field Ising spin chains](#) // Phys. Rev. B. — 1995. — Mar. — Vol. 51, issue 10. — Pp. 6411–6461.
9. *Moriya T.* Spin fluctuations in itinerant electron magnetism. — Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo : Springer-Verlag, 1985.
10. *Barnes S. E.* [Theory of electron spin resonance of magnetic ions in metals](#) // Advances in Physics. — 1981. — Vol. 30, no. 6. — Pp. 801–938.

11. *Wölfle P., Abrahams E. Phenomenology of ESR in heavy-fermion systems: Fermi-liquid and non-Fermi-liquid regimes // Phys. Rev. B. — 2009. — Dec. — Vol. 80, issue 23. — P. 235112.*
12. *Yosida K. Anomalous Electrical Resistivity and Magnetoresistance Due to an  $s - d$  Interaction in Cu-Mn Alloys // Phys. Rev. — 1957. — July. — Vol. 107, issue 2. — Pp. 396–403.*
13. *Taylor R. H. Electron spin resonance of magnetic ions in metals an experimental review // Advances in Physics. — 1975. — Vol. 24, no. 6. — Pp. 681–791.*
14. *Spin-split conduction band in  $\text{EuB}_6$  and tuning of half-metallicity with external stimuli / J. Kim, W. Ku, C.-C. Lee, D. S. Ellis, B. K. Cho, A. H. Said, Y. Shvyd'ko, Y.-J. Kim // Phys. Rev. B. — 2013. — Apr. — Vol. 87, issue 15. — P. 155104.*
15. *Sperlich G., Janneck K. H., Buschow K. H. J. Exchange Narrowing in the ESR Spectra of Metallic  $\text{Gd}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$  ( $x = 1$  to  $0.01$ ) // physica status solidi (b). — 1973. — Vol. 57, no. 2. — Pp. 701–706.*