

На правах рукописи

Юркин Глеб Юрьевич

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КРИСТАЛЛОВ $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Сибирского
отделения РАН Институте физики им. Л.В. Киренского

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Патрин Г.С.
(г. Красноярск)

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Панкрац А.И.
д.ф.-м.н. Иванова Н.Б.

Ведущая организация: Институт физики металлов, УрО РАН
(г. Екатеринбург)

Защита состоится «06» мая 2011 г. в 14:30 часов в конференц-зале
главного корпуса ИФ СО РАН на заседании диссертационного совета совете
Д 003.055.02 по защите диссертаций в Учреждении Российской академии
наук Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, г.
Красноярск, Академгородок, 50, строение 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН

Автореферат разослан «14» марта 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Втюрин А.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность

Многочисленные исследования транспортных и магнитных свойств моносилицидов переходных металлов MSi ($M=Cr, Mn, Fe, Co, Fe_{1-x}Co_x$) со структурой B20 показали, что эти материалы можно рассматривать как перспективные для спинтроники. $CrSi$ и $CoSi$ являются парамагнетиком и диамагнетиком, соответственно. $MnSi$ давно известен как ферромагнетик с коллективизированными электронами. $FeSi$ – кубический узкозонный полупроводник (пространственная группа $P2_13$). Особо острый интерес к нему стали проявлять в последнем десятилетии в большей степени из-за его сходства с редкоземельными узкозонными интерметаллическими соединениями, более известные как «изоляторы Кондо». Изоструктурной копией $FeSi$ является $CoSi$ – диамагнитный полуметалл с независимой от температуры восприимчивостью. Существующие единичные эксперименты показывают, что введение ионов Co в матрицу $FeSi$ приводит к кардинальному изменению магнитных свойств. Сплавы системы $Fe_{1-x}Co_xSi$ отличаются также тем, что они магнитны почти для всех промежуточных концентраций, в то время как $FeSi$ и $CoSi$ немагнитные, последний и вовсе является диамагнитным полуметаллом. В литературе, посвященной $Fe_{1-x}Co_xSi$, имеется ряд работ, связанных с различными интерпретациями и моделями для объяснения необычных магнитных свойств кристалла $Fe_{1-x}Co_xSi$, однако до настоящего времени для описания всего набора физических свойств нет устоявшейся и общепринятой картины, что обуславливает актуальность работы.

Цель работы. Целью данной работы явилось выяснение механизмов, отвечающих за формирование магнитного состояния и исследование магнитных и электрических свойств кристаллов $Fe_{1-x}Co_xSi$. А именно:

1. Синтезировать образцы $Fe_{1-x}Co_xSi$ с содержанием кобальта до 1%.

2. Паспортизировать полученные образцы.

3. Исследовать магнитные ($\chi(T, H)$) и электрические ($\rho(T, H)$) характеристики полученных образцов;

Научная новизна работы.

1. По стандартной сплавной технологии были синтезированы поликристаллические образцы $Fe_{1-x}Co_xSi$ с $x = 0.001, 0.005, 0.01$. В данном соединении ($Fe_{1-x}Co_xSi$) при изменении концентрации кобальта кристаллическая структура остается неизменной.
2. На основании исследований магнитных и электрических свойств поликристаллов с различным содержанием кобальта экспериментально показано, что при введении ионов кобальта в малых количествах качественный характер температурного поведения магнитной восприимчивости не меняется, однако происходит возрастание абсолютной величины магнитной восприимчивости. Из экспериментальных результатов также выявлено, что при введении кобальта в матрицу $FeSi$ удельное электрическое сопротивление уменьшается.
3. Установлено, что увеличение магнитной восприимчивости в кристаллах $Fe_{1-x}Co_xSi$ связано с образованием $Fe-Co$ комплексов, при этом суммарный магнитный момент содержит два вклада: вклад системы суперпарамагнитных железных кластеров, вклад от комплексов, содержащих ионы кобальта.
4. Поведение электрофизических свойств $Fe_{1-x}Co_xSi$ во многом аналогично поведению Кондо системы. В случае легирования кристаллов $FeSi$ появляется дополнительный канал рассеивания на комплексах, содержащих кобальт. Определены температуры T_i^f , при которых взаимодействия между магнитными примесями становятся существенными.

5. Определено, что зависимость электросопротивления от магнитного поля имеет квадратичный характер, что согласуется с механизмом рассеивания Кондо.
6. Модернизирован высокотемпературный вибрационный магнитометр. Изготовлен источник питания для электромагнита ФЛ-1. Максимальное достижимое магнитное поле 14 кЭ.

Практическая ценность.

Результаты исследований позволяют расширить представления о природе магнитных взаимодействий и особенностях формирования магнитного состояния в смешанных кристаллах силицида железа с кобальтом. Это дает возможность целенаправленно выбрать соединения с необходимым комплексом свойств, которые могут быть использованы в качестве активных элементов современной электроники в удобной, для практического использования, области температур.

Еще одно из прикладных направлений может быть связано с разработкой устройств спинтроники. Высокая спиновая поляризация носителей заряда в этих материалах позволяет надеяться на успешное их применение в качестве источников поляризованных электронов.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования низкотемпературного поведения магнитной восприимчивости образцов. Низкотемпературное поведение восприимчивости связывается с образованием суперпарамагнитных кластеров железа и образованием Fe-Co комплексов.
2. Особенности высокотемпературного поведения связаны с уменьшением энергетического зазора между валентной зоной и зоной проводимости при легировании ионами кобальта.
3. Изучение магнитотранспортных свойств при легировании примесными ионами кобальта. Получено, что зависимости $\rho(T, H)$

удовлетворительно описываются в рамках модели Кондо. В соответствии с примесным механизмом рассеяния Кондо: на полученной экспериментальной кривой $\rho(T)$ присутствует минимум электросопротивления, зависимость $\rho(H)$ имеет квадратичный характер, имеет место температура «замерзания» спинов.

4. Со-подсистема в FeSi ведет к изменению спин-зависимого канала в рассеяние электронов проводимости. Увеличение концентрации кобальта приводит к подавлению магнитозависимого вклада и переходу к металлическому типу проводимости.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены на:

- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), 20–25 June 2008, Moscow
- International Conference on Magnetism (ICM 2009), Germany, Karlsruhe, July 27–31, 2009
- 21 Международной конференции НМММ-2009, 28 июня – 4 июля 2009 г., Москва
- Совещание по физике низких температур (НТ-35), 29 сентября – 2 октября 2009 г., Черногловка
- IV Евро-азиатский симпозиум по проблемам магнетизма: наноспинтроника EASTMAG–2010. 28 июня–2 июля 2010 г., Екатеринбург

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 5 в центральных научных журналах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из четырех основных разделов, а так же введения и заключения. Содержит 40 рисунков, 73 библиографических ссылок и занимает объем 108 страниц печатного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указана актуальность темы, сформулирована цель, показана новизна и практическая ценность исследований, приведена аннотация полученных результатов и структура диссертации.

В первом разделе проведен обзор теоретических и экспериментальных работ, в которых исследуются физические свойства системы $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. Магнитные и электрические свойства данной системы изучаются как на основе модели Кондо, так и на основе перехода полупроводник-металл. В конце литературного обзора дана постановка задачи.

Во втором разделе приведены методики синтеза кристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$, а так же использованные методы определения структуры образцов и их количественного состава. Далее в разделе описана экспериментальная методика измерения транспортных характеристик $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$, основанная на стандартном 4-х зондовом методе. Так же описаны методы измерения намагниченности в различных температурных диапазонах на СКВИД-магнитометре и высокотемпературном вибрационном магнетометре.

В третьем разделе приведены результаты экспериментального исследования структуры синтезированных образцов и их количественного состава. Представлены спектры рентгеновской дифракции и данные по концентрации элементов, входящих в состав $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$.

В четвертом разделе приведены результаты исследования электрических и магнитных свойств кристаллов в различных магнитных полях при различных температурах.

В ходе проведенных исследований было установлено, что при введении примесных ионов кобальта в малых количествах качественный характер температурного поведения магнитной восприимчивости практически не меняется (рис.1). Однако с увеличением концентрации ионов кобальта абсолютная величина χ растет. При этом наблюдаемый рост восприимчивости различен в низкотемпературной и высокотемпературной областях.

Полевые зависимости намагниченности в области низких температур в слабых магнитных полях имеют вид, приведенный на рис.2. Также имеет место слабый гистерезис, ширина которого увеличивается по мере увеличения концентрации примесей. Тангенс угла наклона кривых намагничивания растет с увеличением концентрации.

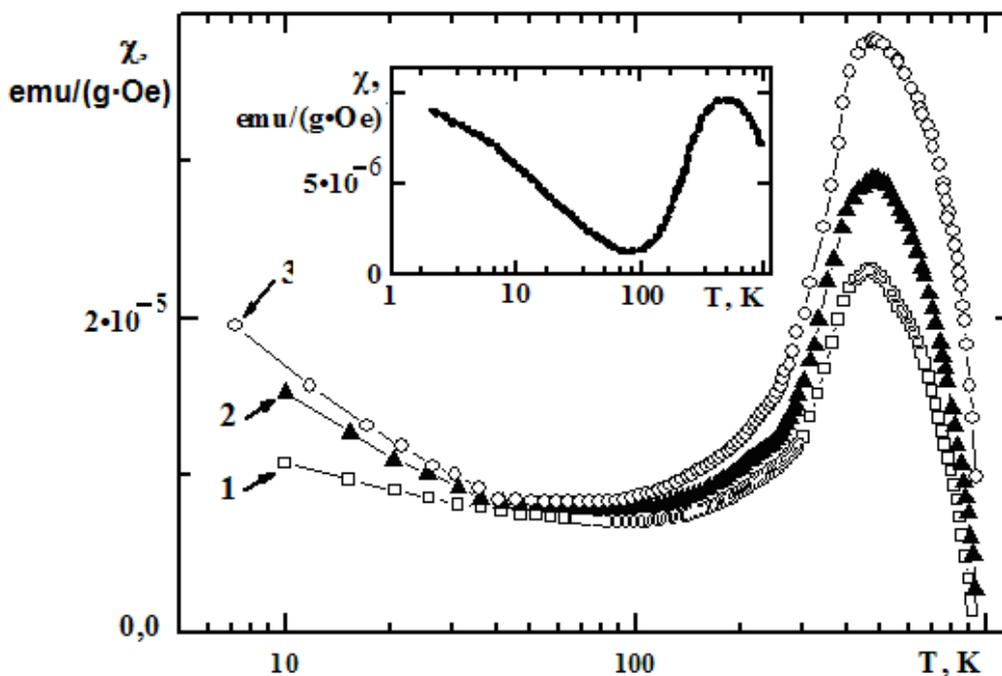


Рис.1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости для кристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. 1 – $x = 0.001$, 2 – $x = 0.005$, 3 – $x = 0.01$.
На вставке - зависимость магнитной восприимчивости для номинально чистого кристалла FeSi.

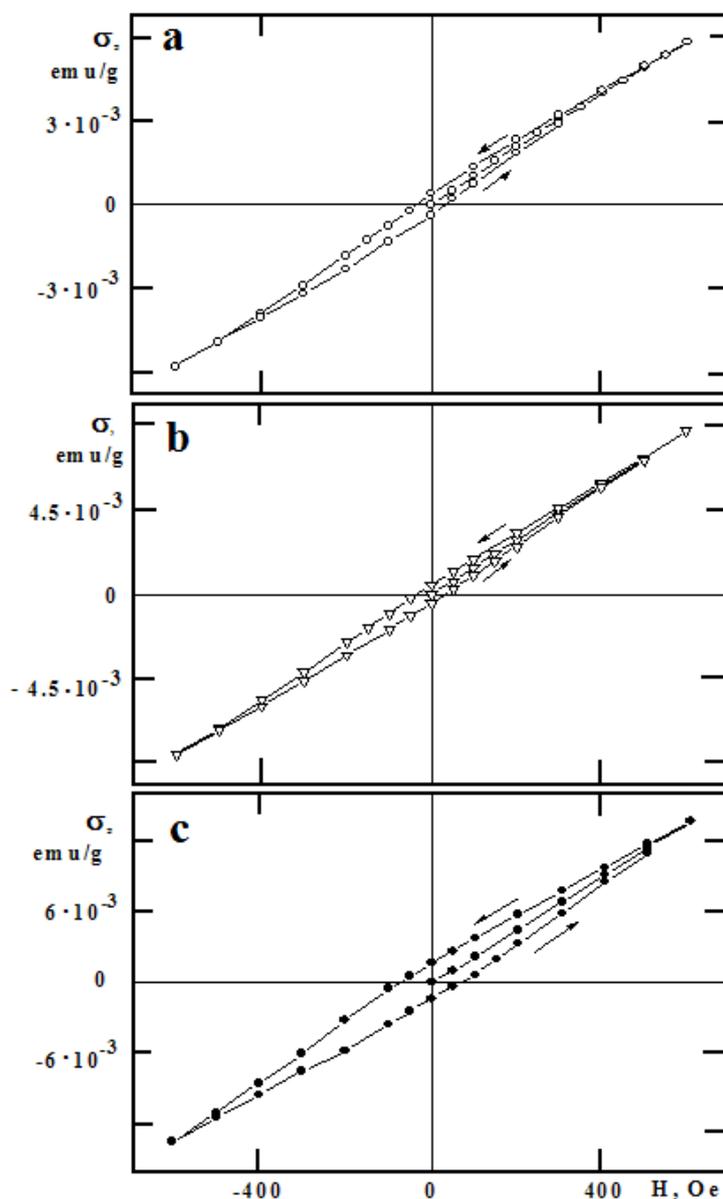


Рис.2. . Полевые зависимости намагниченности кристаллов $Fe_{1-x}Co_xSi$.

a – $x = 0.001$, **b**– $x = 0.005$, **c**– $x = 0.01$. $T = 4.2$ К.

При комнатных температурах зависимости $M(H)$ для концентраций $x = 0.001$ и 0.005 являются линейными, а для $x = 0.01$ в полях $H < 5$ кОе наблюдается нелинейность, асимптотически переходящая в прямую линию (рис.3). Однако в данном случае гистерезис практически отсутствует.

Для образцов номинально чистых кристаллов FeSi разных серий наблюдается разброс экспериментальных данных магнитных измерений в

пределах ≤ 5 %, как для поликристаллических образцов, так и для монокристаллов [1].

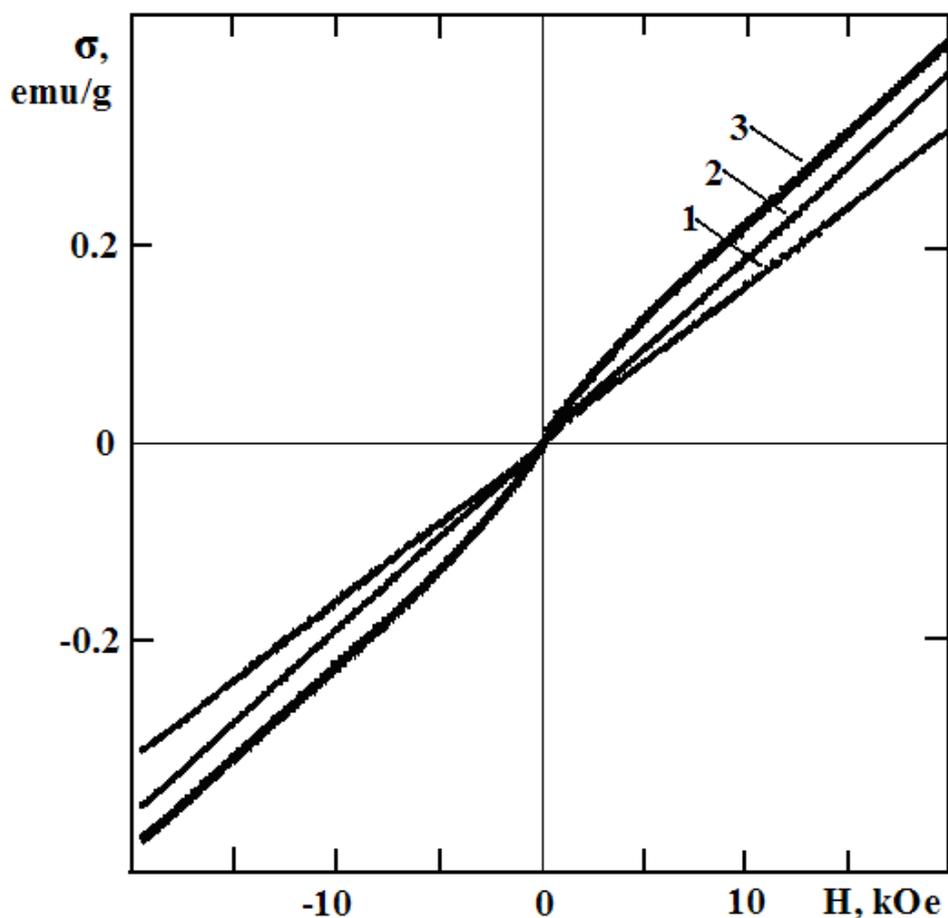


Рис.3. Полевые зависимости намагниченности кристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. 1 – $x = 0.001$, 2 – $x = 0.005$, 3 – $x = 0.01$. $T = 300$

Именно это обстоятельство послужило одним из аргументов в пользу примесного механизма для низкотемпературного поведения намагниченности кристаллов FeSi, возникающего из-за нестехиометрии [1, 2]. Такой же подход применялся при рассмотрении физических свойств кристаллов моносилицида железа, легированных редкоземельными ионами диспрозия [3]. В случае легирования кристалла FeSi ионами кобальта вплоть до полного замещения железа на кобальт не происходит изменения кристаллической структуры. Также известно [4], что при исследованных концентрациях примеси металлический железо-кобальтовый сплав имеет

объемно-центрированную кубическую структуру, и до концентраций $x \leq 0.3$ намагниченность сплава, также как и парциальные намагниченности подсистем железа и кобальта, растут. Так что увеличение магнитной восприимчивости в кристаллах $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$, по-видимому, связано с образованием Fe-Co комплексов.

Что касается высокотемпературной области, то здесь увеличение магнитной восприимчивости, во-первых, связано с существованием добавки $M_{\text{Fe-Co}}$, а, во-вторых, возможно, с особенностями строения электронной структуры кристалла $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. Если сравнивать поведение магнитной восприимчивости в высокотемпературной области для номинально чистого и примесного образцов, то видно, что положение высокотемпературного максимума не меняется, а с ростом концентрации кобальта растет только высота пика (рис.1). Такое поведение можно связать с уменьшением энергетического зазора, разделяющего состояния железа e_{2g}^4 и $e_{2g}^3 t_{2g}^1$ при легировании, что ведет к большему заселению возбужденного уровня при тех же самых условиях. Также теоретически показано [5], если в металлическое железо добавлять кобальт, то изменение магнитных свойств сплава связано со смещением подзоны со спином «вверх» относительно подзоны со спином «вниз», аналогично тому. Такой механизм может объяснить модификацию магнитных свойств при образовании Fe-Co комплексов.

Поведение намагниченности в зависимости от магнитного поля при низких температурах объясняется в рамках модели суперпарамагнитных кластеров. Слабые гистерезисные явления связаны с наличием небольшой анизотропии и разориентацией кластеров, а также со слабым обменным взаимодействием между кластерами при их сегрегации [1]. Усиление гистерезиса при увеличении концентрации кобальта объясняется дополнительным вкладом в анизотропию от кобальтсодержащих комплексов (рис.2.) При комнатных температурах, где анизотропия практически исчезла, мы наблюдаем безгистерезисные кривые намагничивания (рис.3).

Поведение электрофизических свойств во многом аналогично поведению Кондо системы. В рамках такого подхода были проанализированы экспериментальные результаты. Как известно [6], наличие минимума в температурной зависимости электросопротивления связано с конкуренцией электрон-фононного рассеяния ($\rho_{s-ph} = b \cdot T^5$, здесь $b = \text{const}$) и спин-зависимого рассеяния (ρ_s) электронов проводимости на магнитных примесях, описываемого выражением:

$$\rho_s = \rho_0 \cdot [1 - 2 \cdot J \cdot c_m \cdot \nu(\epsilon_F) \cdot \ln(\epsilon_F / T)], \quad (1)$$

где c_m – концентрация магнитных частиц, J – константа обменного взаимодействия электрона проводимости с магнитным моментом частицы, $\rho_0 \sim (J \cdot m)^2$, m – магнитный момент частицы, на которой происходит рассеяние. Нетрудно получить, что температура, при которой будет минимум сопротивления $\rho = \rho_{s-ph} + \rho_s$, $T_{\min} \sim c_m^{1/5} \cdot m^{2/5}$.

Рассмотрим сначала номинально чистый кристалл FeSi. При ширине запрещенной зоны $\Delta \approx 60 \text{ meV}$ в низкотемпературной области при $T < 30 \text{ K}$ количество собственных носителей заряда чрезвычайно мало, т.к. фактор Гиббса имеет порядок $\leq 10^{-8}$. Поэтому заметная проводимость может быть обусловлена наличием «хвостов» в запрещенной зоне из-за несовершенства кристалла. Поскольку концентрация примесных кластеров (c_m) приблизительно одна и та же для различных образцов, то на положении минимума в температурной зависимости ρ это не сказывается. С другой стороны, магнитный момент железного кластера $m \sim 250 \mu_B$ [1], а для трехвалентного иона железа $m_{Fe} = 3 \mu_B$. Таким образом, если рассеяние происходит на железном кластере, то коэффициент усиления составляет $(m/m_{Fe})^{2/5} \sim 6$. Это объясняет довольно высокое значение температуры минимума электросопротивления номинально чистых кристаллов FeSi, относительно соединений, где рассеяние происходит на одиночных примесных ионах [7].

В случае легированных кристаллов появляется дополнительный канал рассеяния на комплексах, содержащих кобальт. Но, тем не менее, мы видим, что сопротивление падет. Это обстоятельство можно связать с увеличением плотности состояний в запрещенной зоне из-за движения подзон с разным направлением спинов электронов. По-видимому, влияние изменения плотности состояний в запрещенной зоне является преобладающим. Однако наличие дополнительной магнитной подсистемы все же проявляется в электропроводности образца. Для Кондо системы из (20) следует, что с уменьшением температуры сопротивление будет расти при $J < 0$, что и наблюдается в эксперименте.

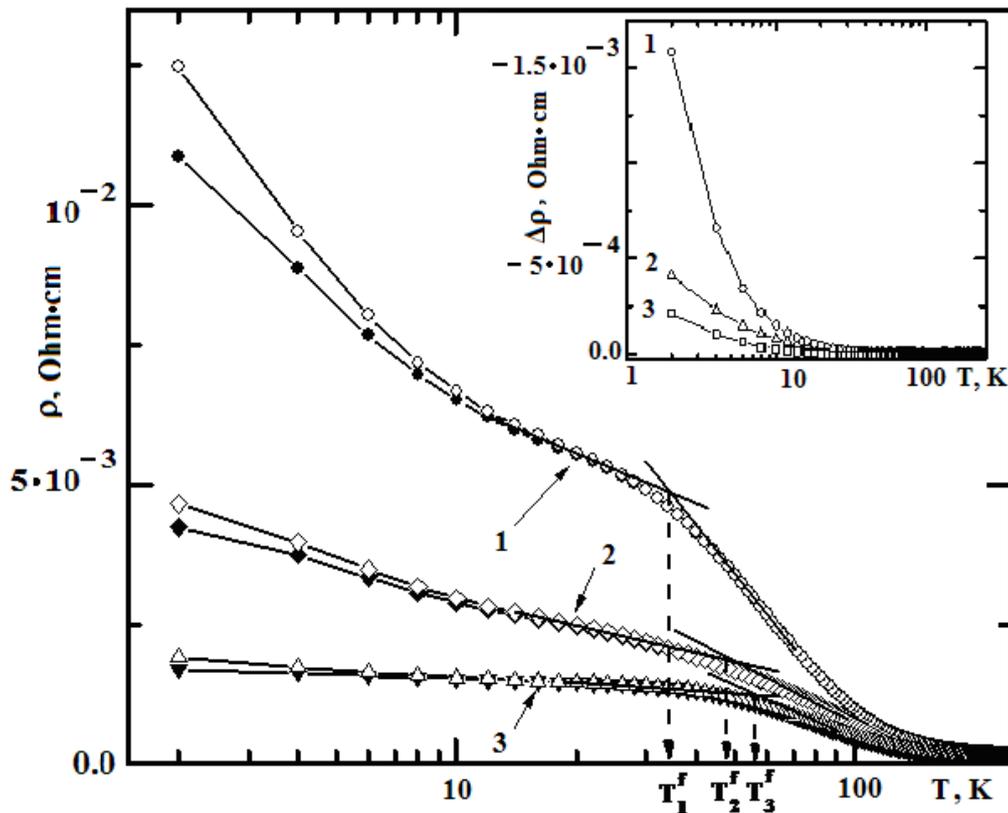


Рис.4. Температурные зависимости удельного электросопротивления образцов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. 1 – $x = 0.001$, 2 – $x = 0.005$, 3 – $x = 0.01$. Пустые значки – $H = 0.6$ Ое, заполненные – $H = 5000$ Ое. На вставке – магнитозависимый вклад $\Delta\rho(T) = \rho(H=5000) - \rho(H=0)$.

При уменьшении температуры рост прекращается там, где взаимодействие между магнитными примесями становится существенным. В

нашем случае (см. рис.4) таким проявлением можно считать образование ступеньки на температурной зависимости $\rho(T)$ при температуре T_i^f ($i=1, 2, 3$).

Именно при этой температуре направления магнитных моментов «замораживаются». А, как известно [6], вследствие фиксации ориентации примесных спинов пропадает возможность рассеяния электронов с поворотом спина. По оценкам [1] в номинально чистом кристалле FeSi среднее расстояние между магнитными частицами порядка 50 nm, и при малой концентрации электронов проводимости их можно считать невзаимодействующими. В этой ситуации влияние магнитного поля приводит к фиксации направления магнитного момента частицы и противодействует влиянию температуры, что также уменьшает вероятность спин-зависимого рассеяния.

В кристаллах $Fe_{1-x}Co_xSi$ возникают дополнительные Co-содержащие магнитные рассеивающие комплексы. И хотя магнитного порядка в кристалле еще не возникает, тем не менее, наряду с увеличением концентрации электронов проводимости, уменьшается расстояние между различными магнитными образованиями, и возникают дополнительные корреляции, т.е. магнитные взаимодействия становятся сильнее. Это приводит к тому, что температура «замерзания» спинов повышается при увеличении содержания ионов кобальта, что и наблюдается экспериментально на рис.4, ($T_1^f = 34 K$, $T_2^f = 48 K$, $T_3^f = 57 K$). В легированных кристаллах также происходит уменьшение сопротивления при включении магнитного поля, и увеличение содержания кобальта подавляет магнитозависимый вклад в ρ (см. вставку на Рис.4). Наиболее хорошо это видно на Рис.5, где приведены полевые зависимости электросопротивления.

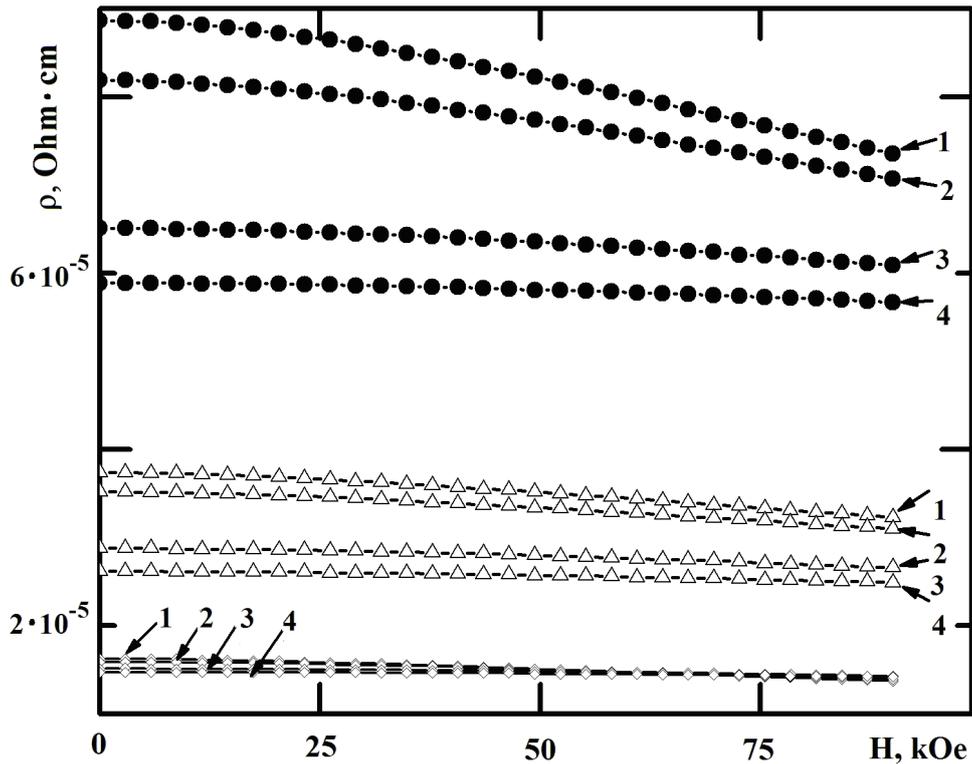


Рис.5. Полевые зависимости удельного электросопротивления образцов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. ● – 0.001, Δ – $x = 0.005$, \diamond – $x = 0.01$.
 1 - $T = 4$ К, 2 - $T = 5$ К, 3 - $T = 10$ К, 4 - $T = 15$ К.

В соответствии с механизмом рассеяния Кондо зависимость электросопротивления от магнитного поля имеет квадратичный характер [71], причем имеет место уменьшение ρ . В нашем случае экспериментальные зависимости прекрасно ложатся на зависимости типа

$$\rho(H) = \rho_0 - A \cdot H - B \cdot H^2 \quad (2)$$

(H измеряется в эрстедах), например, для кристалла с $x = 0.001$ при $T = 4$ К имеем по величине $A = 3,3 \cdot 10^{-11}$ и $B = 3,01 \cdot 10^{-16}$. Для всех исследованных концентраций примеси с повышением температуры от 4 К до 15 К отношение линейного члена к квадратичному уменьшается примерно в 5 раз. Зависимости типа (2) наблюдаются в неоднородно намагниченных ферромагнетиках и антиферромагнетиках [7], причем возможны различные

знаки констант А и В. В данном случае наличие линейного члена можно связать с появлением локальных областей спонтанной намагниченности из-за введения примесей кобальта.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы данной работы.

1. Синтезированы кристаллы $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ с $x = 0.001, 0.005, 0.01$. В данном соединении при изменении концентрации примеси кобальта x кристаллическая структура остается неизменной. Кобальт растворен в матрице FeSi.
2. Создан высокотемпературный вибрационный магнитометр, оснащенный системой стабилизации параметров механических колебаний образца. За счёт применения отрицательной обратной связи, нестабильность амплитуды колебаний не превышает 10^{-4} . Эта система является оригинальной разработкой.
3. На основании исследований магнитных свойств полученных кристаллов с различным содержанием кобальта экспериментально показано, что качественный характер поведения магнитной восприимчивости не меняется. Однако абсолютная величина χ растет с увеличением концентрации ионов кобальта.
4. Показано, что низкотемпературное поведение магнитной восприимчивости объясняется существованием суперпарамагнитных кластеров железа и образованием Fe-Co комплексов. Высокотемпературное поведение связано с уменьшением энергетического зазора, разделяющего состояния железа e_{2g}^4 и $e_{2g}^3 t_{2g}^1$ при легировании.
5. Установлено, что магнитотранспортные свойства удовлетворительно описываются в рамках модели Кондо. В соответствии с примесным механизмом рассеяния Кондо: на полученной экспериментальной кривой $\rho(T)$ присутствует минимум электросопротивления,

зависимость $\rho(H)$ имеет квадратичный характер, имеет место температура «замерзания» спинов.

6. Наличие Co-подсистемы в FeSi приводит к возникновению спин-зависимого канала в рассеяние электронов проводимости. Увеличение концентрации кобальта приводит к подавлению магнитозависимого вклада и переходу к металлическому типу проводимости.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Д.А.Великанов, Г.Ю.Юркин Повышение точности прямых измерений на вибрационном магнитометре // Вестник КГУ (Физ.-мат. науки). - 2006 . -в39. –С.48—53.
2. Д. А. Великанов, Г. Ю. Юркин, Г. С. Патрин Стабилизация параметров механических колебания образца в вибрационном магнитометре // Научное приборостроение. -2008, -Т.18, -в3, -С.86–94
3. Г.С. Патрин, В.В.Белецкий, Д.А. Великанов, Н.В. Волков, Г.Ю. Юркин Влияние примесных ионов кобальта на магнитные и электрические свойства кристаллов моносилицида железа // ЖЭТФ. -2011, - Т139, -в2, -С.351-358
4. G.Yu. Yurkin , G.S. Patrin, V.V. Beletsky, D.A. Velikanov Transport properties of FeSi with cobalt impurities // Solid State Phenomenon, Vols. 168-169, -2011, pp 493-496
5. G.S. Patrin, V.V. Beletsky, D.A. Velikanov, G.Yu. Yurkin. *Magnetic properties of FeSi with Co impurities.* // J. Phys.: Conf. Ser.-2010.-200.-P.062021 (1-4)
6. Г.С. Патрин, В.В. Белецкий, Д.А. Великанов,Н.В. Волков, Г.Ю. Юркин. *Влияние примесных ионов Co на магнитные свойства кристаллов FeSi.* Сборник трудов. 10^{ый} Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах». (ОМА-10). Ростов-на Дону, п. Лоо, Россия, 2007.-Т.2.-С.103-104.

7. Patrin G.S., Beletsky V.V., Velikanov D.A., Yurkin G.Yu. *Magnetic properties of FeSi crystals with Co impurities.* // Book of abstracts. Moscow International Symposium on Magnetism, 2008, p.762-763.
8. Yurkin G.Yu., Patrin G., Velikanov D. *Magnetic properties of $Fe_{1-x}Co_xSi$.* // Book of abstracts. Moscow International Symposium on Magnetism, 2008, p.763-764
9. Патрин Г.С., Белецкий В.В., Великанов Д.А., Юркин Г.Ю. *Магнитные свойства кристаллов FeSi, легированных ионами кобальта.* // Сборник трудов XXI Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». Россия, Москва, 2009, С.1673.
10. G.S. Patrin, V. Beletsky, D. Velikanov, G. Yurkin. *Influence of low concentration Co impurity on magnetic and electric properties in FeSi crystals.* // Program & Abstracts. International Conference on Magnetism (ICM-2009), Karlsruhe, Germany, 2009, P.361 (Th-D-6.6-46)

Цитированная литература

1. Патрин Г.С., Белецкий В.В., Великанов Д.А. и др. Нестехиометрия и низкотемпературные магнитные свойства кристаллов FeSi // ФТТ. 2006. Т. 48, №. 4. С. 658–662.
2. M. Mihalik, M. Timko, P. Samuely et al. Magnetic properties and gap formation in FeSi// JMMM, 157-158, 637 (1996).
3. Г.С. Патрин, В.В. Белецкий, Н.В. Волков, Д.А. Великанов, О.В. Закиева. Физические свойства кристалла $Fe_{1-x}Dy_xSi$ // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, С.7-10.
4. *Magnetic Properties of Metals (d-Elements, Alloys and Compounds)*. Editor: H.P.J. Wijn. Berlin: Springer-Verlag. 1991. 181 P.
5. А.А. Абрикосов. *Основы теории металлов*. М.; Наука, 1987, 520 С.
6. K. Schwarz, P. Mohn, P. Blaha, & J.Kubler., J. Phys. F: Met. Phys., 14, 2659 (1984).
7. В.Ю. Ирхин, Ю.П. Ирхин. *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях*. Екатеринбург, УрО РАН, 2004, 472 С

Подписано к печати 04.03.2011

Формат 60×84/16 Тираж 60 экз., у. –п.л.:1,1. Заказ № 26

Отпечатано в типографии ИФ СО РАН

660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН