

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА

УДК 537.622.4

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$)

© 2024 г. Ю. А. Перевозчикова^{а,*}, В. Ю. Ирхин^а, А. А. Семянникова^а, В. В. Марченков^{а,**}

^аИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru

**e-mail: march@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.09.2024 г.

После доработки 05.09.2024 г.

Принята к публикации 17.09.2024 г.

Исследованы электросопротивление, намагниченность и эффект Холла в ферромагнитных сплавах Гейслера Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$). Выявлено, что между электронными и магнитными характеристиками изученных сплавов существует ряд корреляций, проявляющихся при изменении атомного номера Z -компоненты. Для сплавов Co_2FeAl и Co_2FeSi , которые являются полуметаллическими ферромагнетиками, величина намагниченности согласуется с правилом Слэтера–Полинга. Для соединений Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe имеет место квадратичная температурная зависимость электросопротивления при температурах ниже 30 К и выше 65 К, а в области промежуточных температур (от 40 К до 65 К) наблюдается степенная зависимость $\sim T^b$ с показателем $3.5 \leq b \leq 4$, что может быть обусловлено двухмагнетонными процессами рассеяния.

Ключевые слова: сплав Гейслера, полуметаллический ферромагнетик, электронный транспорт, намагниченность, эффект Холла, электросопротивление

DOI: 10.31857/S0015323024120111, EDN: ПНЛПС

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективными материалами для спинтроники, например, для магнитооптической записи информации или в качестве спиновых инжекторов, являются полуметаллические ферромагнетики (ПМФ) [1–4]. Предсказано [1–4], что в основном состоянии при $T = 0$ К в них можно реализовать почти 100% спиновую поляризацию носителей заряда из-за их необычной зонной структуры (рис. 1): для одного направления спина (против направления намагниченности, спин вниз) на уровне Ферми наблюдается энергетическая щель, а для другого направления спина — щель отсутствует. ПМФ-состояние может быть реализовано в широком классе соединений Гейслера на основе Co , Mn , Fe и др., например, в системах Fe_2MeZ , Co_2MeZ или Mn_2MeZ , где Me — переходные $3d$ -элементы (Ti , V , Cr и др.), а Z — p -элементы Периодической таблицы Д.И. Менделеева [см., напр., 5–8]. Согласно теоретическим расчетам [8–10], соединения Co_2FeAl , Co_2FeSi и

Co_2FeGe являются ПМФ с полной поляризацией носителей заряда на уровне Ферми.

Из экспериментальных и теоретических работ известно [5–8], что при варьировании состава гейслеровых сплавов путем изменения $3d$ -элементов, происходят сильные изменения в плотности состояний на уровне Ферми E_F , а следовательно, и в их электронных транспортных и магнитных свойствах. Поэтому представляет интерес проследить за изменениями электронных и магнитных характеристик сплавов Гейслера при изменении p -элементов, т.е. Z -компоненты.

В качестве объектов исследования были выбраны сплавы системы Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$). Входящие в эту группу соединения Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe являются ПМФ с высокой спиновой поляризацией [8–10], а температура Кюри этих сплавов много выше комнатной температуры (около 1000 К). Таким образом, высокая спиновая поляризация в этих соединениях может сохраняться и при комнатной температуре.

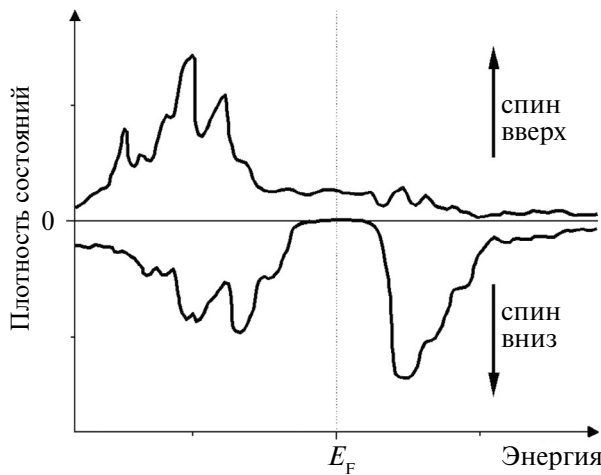


Рис. 1. Схематическое изображение плотности состояний полуметаллического ферромагнетика. Стрелками обозначены направления спинов для электронных состояний, пунктиром отмечен уровень Ферми E_F .

В данной работе исследованы электросопротивление, намагниченность и эффект Холла гейслеровых сплавов Co_2FeZ ($Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Sb}$) с целью установления закономерностей поведения их электронных и магнитных характеристик при изменении атомного номера Z -компоненты, т.е. при варьировании p -элементов.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплавы Гейслера Co_2FeZ ($Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Sb}$) были синтезированы методом дуговой плавки в атмосфере очищенного аргона с последующим отжигом при 773 К в течение 120 ч в атмосфере очищенного аргона и охлаждением до комнатной температуры со скоростью ~ 100 К/час, а также дополнительным отжигом при 873 К (1073 К для Co_2FeGa , Co_2FeSn) в течение 7 дней с последующей закалкой в ледяную воду для гомогенизации и получения необходимой фазы. Атомное содержание элементов в поликристаллическом сплаве контролировали с помощью растрового электронного микроскопа FEI Company Quanta 200, оборудованного устройством рентгеновского микроанализа EDAX. Результаты анализа представлены в табл. 1. Отклонение от стехиометрического состава во всех образцах оказалось незначительным. Структурная аттестация показала, что во всех исследованных сплавах основной является фаза $L2_1$.

Намагниченность измеряли на СКВИД-магнитометре MPMS-XL-5 фирмы Quantum Design. Электросопротивление и эффект Холла измеряли стандартным четырехзондовым методом на постоянном токе с коммутацией электрического

Таблица 1. Результаты элементного анализа образцов

Соединение	Состав по данным EDAX
Co_2FeAl	$\text{Co}_{2.04}\text{Fe}_{1.07}\text{Al}_{0.89}$
Co_2FeSi	$\text{Co}_{1.97}\text{Fe}_{0.98}\text{Si}_{1.05}$
Co_2FeGa	$\text{Co}_{1.86}\text{Fe}_{1.13}\text{Ga}_{1.01}$
Co_2FeGe	$\text{Co}_{2.15}\text{Fe}_{1.09}\text{Ge}_{0.76}$
Co_2FeSn	$\text{Co}_{1.90}\text{Fe}_{1.04}\text{Sn}_{1.06}$
Co_2FeSb	$\text{Co}_{1.98}\text{Fe}_{1.04}\text{Sb}_{0.98}$

тока, протекающего через образец. Исследования структуры и магнитных свойств выполнены в Центре коллективного пользования “Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов” ИФМ УРО РАН.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Электросопротивление

Температурные зависимости удельного электросопротивления $\rho(T)$ исследованных сплавов представлены на рис. 2. Видно, что $\rho(T)$ всех сплавов монотонно возрастает с ростом температуры, т.е. имеет металлический вид. Остаточное сопротивление варьируется в диапазоне от ~ 9 мкОм·см для Co_2FeGa и Co_2FeSb до ~ 43 мкОм·см для Co_2FeAl (табл. 2).

Согласно теоретическим представлениям [11] в ПМФ-состоянии одномагнотные процессы рассеяния подавлены и могут проявляться двухмагнотные процессы рассеяния, приводящие к степенной зависимости электросопротивления от температуры $\rho_{\text{д-м.}} \sim T^b$, $7/2 < b < 9/2$. Подобные

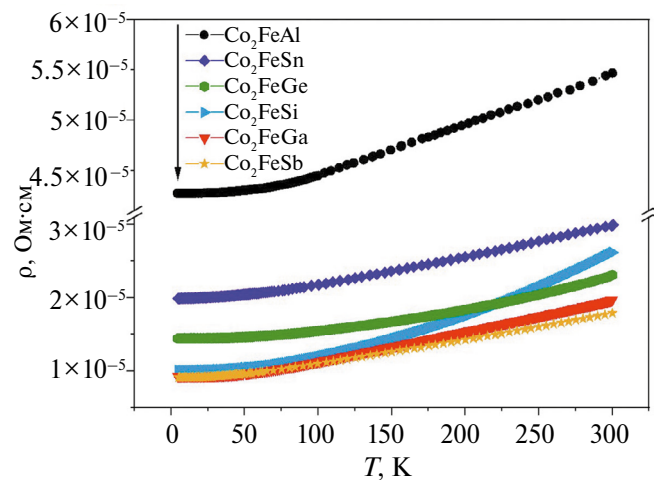


Рис. 2. Температурные зависимости удельного электросопротивления сплавов Co_2FeZ ($Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Sb}$).

Таблица 2. Атомный номер элемента z , остаточное электросопротивление ρ_0 , экспериментальное и литературное (расчетное или экспериментальное) значение магнитного момента, соответствующего намагниченности насыщения $M_{S\text{ экс}}$ и $M_{S\text{ реф}}$, магнитный момент, рассчитанный по правилу Слэтера–Полинга $M_{\text{Sl-Pol}}$, температура Кюри T_C для системы сплавов Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$)

Соединение	Ат. номер z (Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb)	ρ_0 , мкОм·см	$M_{S\text{ экс}}$, $\mu_B/\text{ф.е.}$, $T = 4.2 \text{ К}$	$M_{\text{Sl-Pol}}$, $\mu_B/\text{ф.е.}$	$M_{S\text{ реф}}$, $\mu_B/\text{ф.е.}$	T_C , К
Co_2FeAl	13	42.7	5.4	5	экспер.: 5.27 [15] теор.: 4.99 [16] 4.86–5.22 [17]	экспер.: 1098 [15] 1000 [17] ≥ 1100 [18] теор.: 575–1275 [17]
Co_2FeSi	14	10.02	5.8	6	экспер.: 5.87 [15] 5.97 [19] теор.: 5.09–5.98 [17] 5.75 [19]	экспер.: 1039 [15] 1100 [17] 1030 [18] 1100±20 [19] теор.: 650–1450 [17]
Co_2FeGa	31	9.25	6.4	5	экспер.: 5.17 [15] 3.25–5.4 [20] теор.: 5.02 [16] 4.93–5.4 [17] 5 [21] 5.06 [22]	экспер.: 1093 [15] 1056 [18] 1080 [23] теор.: 550–1225 [17] 1252–1369 [19] 1190–1330 [24]
Co_2FeGe	32	14.43	7.3	6	экспер.: 5.74 (БЗР ленты) [26] теор.: 5.29–5.98 [17] 5.39; 5.7; 5.99 [25] 5.61 [26]	экспер.: 1060 [18] 1000 [23] 981 (БЗР ленты) [26] теор.: 475–1350 [17] 972–1141 [19]
Co_2FeSn	50	19.87	5.1	6	экспер.: 4.3 (82 етм/г при комн. темп., наночастицы) [27]	экспер.: 968 [18]
Co_2FeSb	51	9.13	5.4	7	–	экспер.: ≥ 1100 [18]

вклады в электросопротивление были обнаружены экспериментально в [12, 13]. С другой стороны, в монокристалле Co_2FeSi , находящемся в ПМФ-состоянии, наблюдали температурную зависимость $\rho(T)$, близкую к квадратичной в области низких температур [14]. Поэтому представляет интерес проанализировать вид зависимостей $\rho(T)$ в исследуемых сплавах.

На рис. 3 показаны результаты анализа температурной зависимости электросопротивления от 4.2 К до 75 К. Видно, что при низких температурах для всех соединений наблюдается квадратичная температурная зависимость, которая может быть обусловлена как одномагнитным, так и электрон–электронным рассеянием. При этом для сплавов Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe

при температуре выше 30 К наблюдаются сильные отклонения от закона T^2 , которые могут быть описаны степенными зависимостями с более высокими показателями b . Такие отклонения практически отсутствуют в Co_2FeSn и Co_2FeSb . Чтобы определить показатель степени при более высоких температурах, для сплавов Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe были построены соответствующие зависимости в логарифмических координатах $\log(\rho - \rho_0 - aT^2) = f(\log T)$. Здесь ρ_0 — остаточное электросопротивление, коэффициент a при T^2 определяли из эксперимента в интервале от 4.2 до 30 К. Видно (рис. 4), что $b > 2$ и равен: $b = 3.5$ для Co_2FeAl , $b = 4$ для Co_2FeSi и $b = 3.8$ для Co_2FeGe в интервале температур от 40 до 65 К. Именно в таком температурном ин-

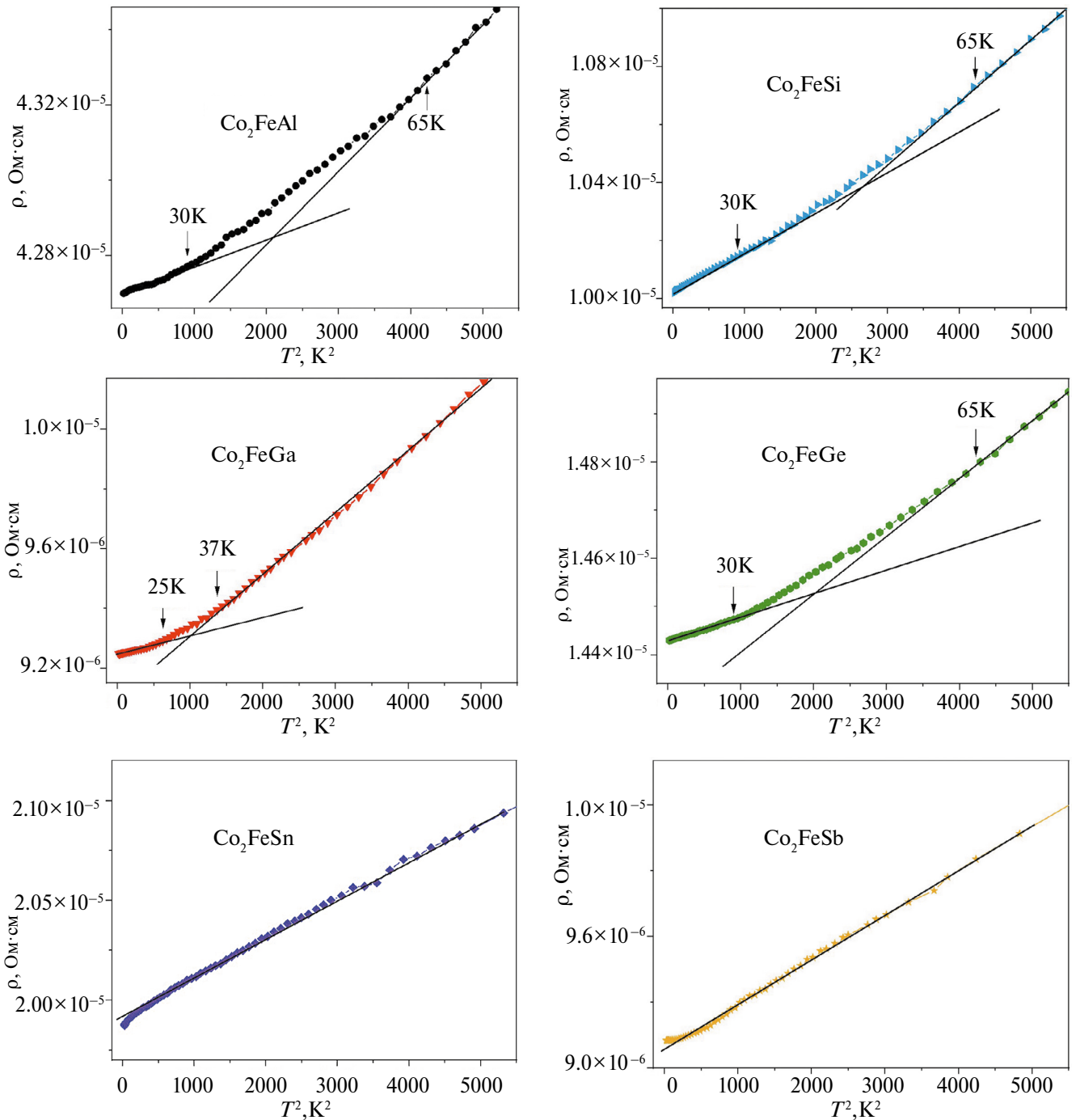


Рис. 3. Зависимости электропроводности сплавов Co_2FeZ ($Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Sb}$) от квадрата температуры в интервале от 4.2 К до 75 К.

тервале наблюдали вклад в сопротивление, пропорциональный T^b , где $b = 4$, в монокристалле Co_2FeSi [13]. Это может быть одним из проявлений двухмагнонных процессов рассеяния, предсказанных в [11]. Недавно аналогичное поведение было найдено в ПМФ-сплаве Co_2MnGe [28].

В сплавах Co_2FeGa , Co_2FeSn и Co_2FeSb степенных зависимостей электропроводности от температуры с показателем $b > 2$ не наблюдали.

В сплаве Co_2FeGa происходит переход от “низкотемпературной” (до ~ 25 К) к “высокотемпературной” (выше ~ 37 К) квадратичной температурной зависимости электропроводности.

Согласно расчетам [19], Co_2FeGa близок к состоянию полуметаллического ферромагнетика, однако по данным работы [29] электропроводность хорошо описывается законом $T^{2.1}$; впрочем, выделение высших по температуре членов в

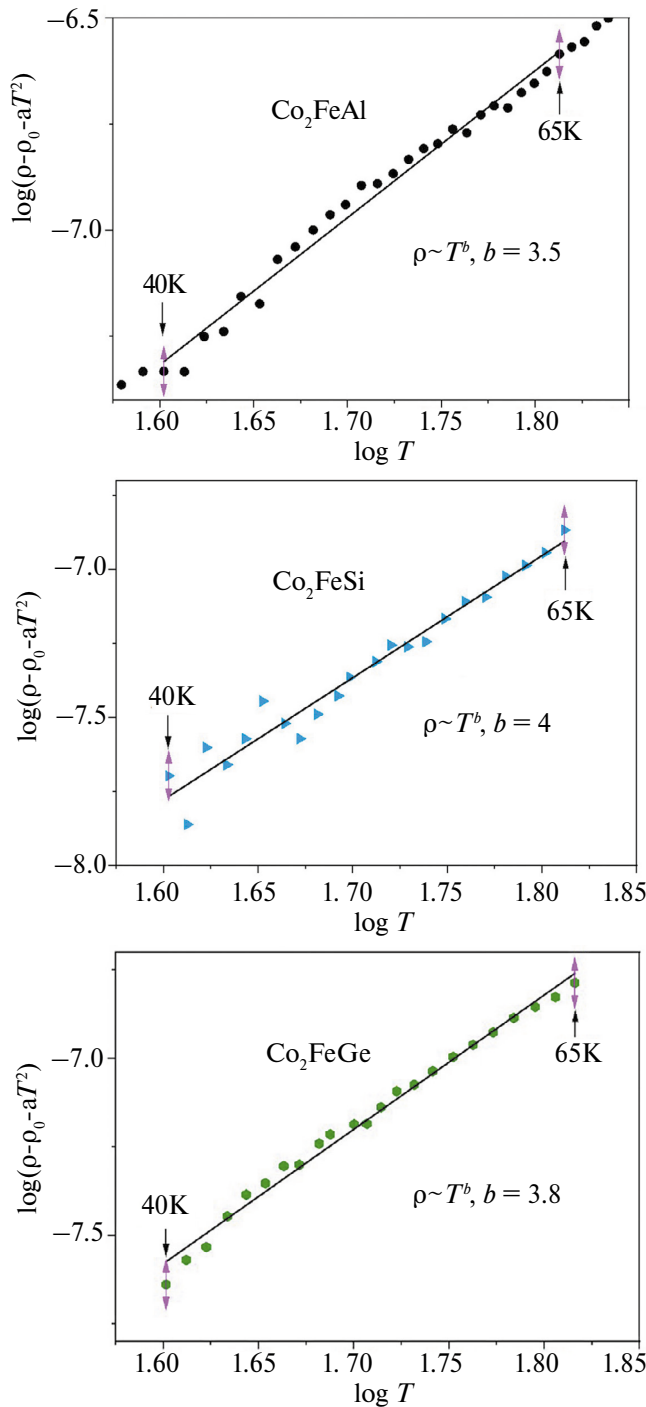


Рис. 4. Зависимости логарифма $\log(\rho - \rho_0 - aT^2)$ от логарифма температуры $\log(T)$ для Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe в интервале температур от 40 К до 65 К.

ней не выполняли. Таким образом, эта ситуация требует дальнейших исследований.

3.2. Намагниченность

Полевые зависимости намагниченности сплавов при $T = 4.2$ К приведены на рис. 5. Исследованные сплавы являются ферромагнит-

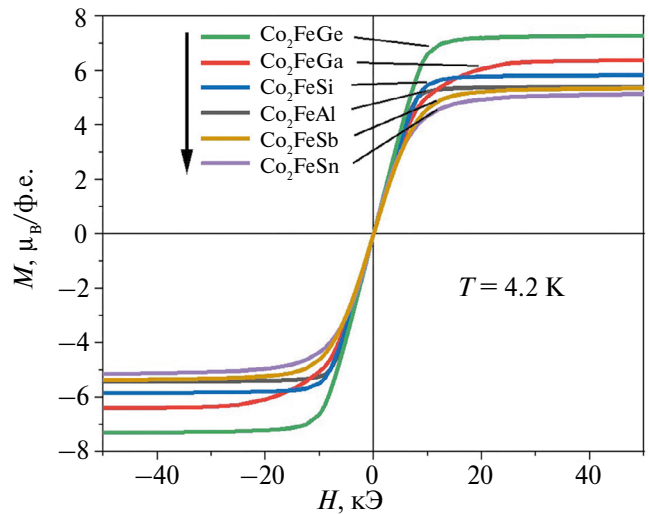


Рис. 5. Полевые зависимости намагниченности исследованных сплавов при $T = 4.2$ К.

ными вплоть до T_C , а в полях свыше 20 кЭ их намагниченность выходит на насыщение. Значения намагниченности насыщения $M_{S_{\text{экс}}}$, которые определяли как значения M в поле 50 кЭ при $T = 4.2$ К, представлены в табл. 2. Для сравнения, в таблице представлены данные работ [15–27] по намагниченности насыщения $M_{S_{\text{ref}}}$. Согласно правилу Слэтера–Полинга, полный спиновый магнитный момент M_t связан с общим числом валентных электронов Z_t простым выражением: $M_t = Z_t - 24$ [30]. Тогда магнитный момент для сплавов Co_2FeAl , Co_2FeGa должен быть равен $5 \mu_B/\text{ф.е.}$, для Co_2FeSi , Co_2FeGe , Co_2FeSn — $6 \mu_B/\text{ф.е.}$, а для Co_2FeSb — $7 \mu_B/\text{ф.е.}$ (табл. 2). Однако значения намагниченности насыщения близки к теоретическим только для Co_2FeAl и Co_2FeSi . Возможно, определенная из эксперимента намагниченность не совпадает с предсказаниями [30] из-за отклонений от стехиометрии и неоднородностей в составах образцов Co_2FeGa и Co_2FeGe . Согласно данным [29], для Co_2FeGa намагниченность равна ≈ 120 эме/г, что соответствует магнитному моменту $\sim 5.2 \mu_B/\text{ф.е.}$

3.3. Эффект Холла

На рис. 6 показаны полевые зависимости сопротивления Холла ρ_H . Из них были определены коэффициенты нормального и аномального эффектов Холла, а затем оценены тип основных носителей заряда (дырки для Co_2FeSi и Co_2FeGe , для остальных — электроны), их концентрация и подвижность, используя однозонную модель и методику, описанную в работе [31]. Результаты оценок приведены в табл. 3. Стоит отметить, что измерения выполнены на поликристаллических образцах, поэтому оценки concentra-

Таблица 3. Атомный номер элемента z , тип основных носителей заряда, коэффициент нормального эффекта Холла R_0 , коэффициент аномального эффекта Холла R_S , концентрация n и подвижность μ носителей заряда

Соединение	Ат. номер z (Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb)	Тип основных носителей заряда (электроны или дырки)	R_0 , 10^{-5} см ³ /Кл	R_S , 10^{-5} см ³ /Кл	n , 10^{22} см ⁻³	μ , см ² /(В · с)
Co ₂ FeAl	13	электроны	-9	244	7	2
Co ₂ FeSi	14	дырки	7	21	9	7
Co ₂ FeGa	31	электроны	-10	29	6.5	10.6
Co ₂ FeGe	32	дырки	4	22	17	2.6
Co ₂ FeSn	50	электроны	-9	36	7	4.5
Co ₂ FeSb	51	электроны	-3	18	19	3.6

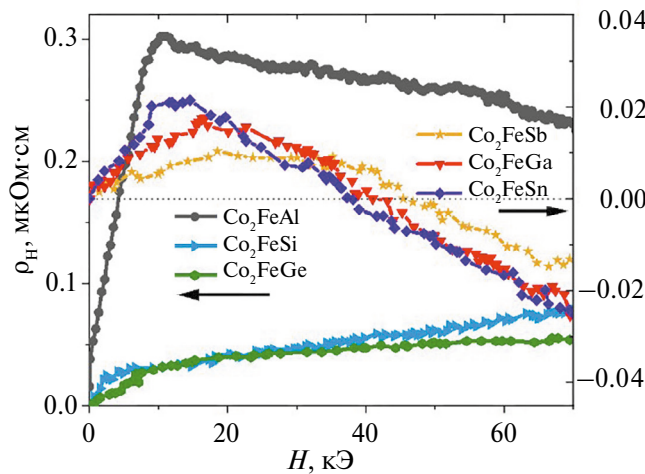


Рис. 6. Полевые зависимости холловского сопротивления исследованных сплавов при $T = 4.2$ К.

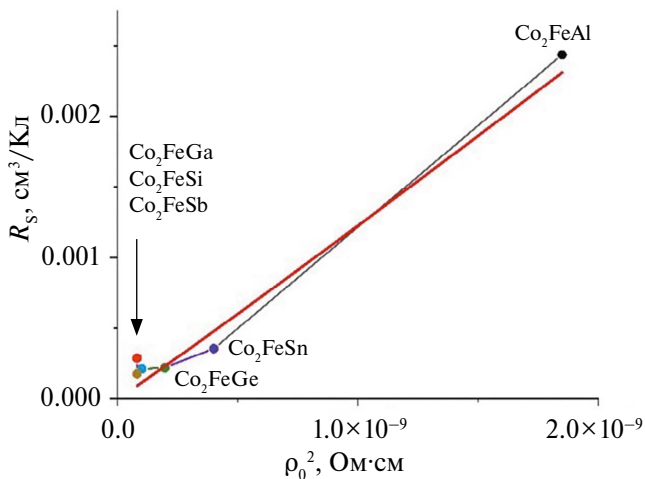


Рис. 7. Зависимость коэффициента аномального эффекта Холла R_S от квадрата остаточного сопротивления ρ_0^2 .

ции и подвижности носителей заряда являются качественными. Тем не менее, даже такие качественные оценки позволяют проследить за изменениями электронных характеристик при из-

менении Z -компоненты в сплавах Гейслера X_2YZ (см., напр., [5, 6, 18]).

Согласно теории аномального эффекта Холла [31], аномальный коэффициент Холла R_S содержит вклады различных механизмов рассеяния — на примесях, фононах и спиновых неоднородностях, которые приводят как к линейным, так и к квадратичным членам в зависимости R_S от электросопротивления ρ . Как видно из рис. 7, эта зависимость для исследованных сплавов Co₂FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$) может быть описана как $R_S \sim \rho^k$, где $k = 2.06 \pm 0.18$.

3.4. Зависимости электронных и магнитных характеристик от атомного номера Z -компоненты

При изменении Z -компоненты в системе сплавов Co₂FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$), меняются их магнитные и электронные свойства. Для визуализации этих изменений на рис. 8 показаны зависимости остаточного электросопротивления, намагниченности насыщения, коэффициентов нормального и аномального эффектов Холла от атомного номера компонента z .

Остаточное электросопротивление максимально для Co₂FeAl. С увеличением атомного номера оно уменьшается для Co₂FeSi и Co₂FeGa, затем вновь увеличивается, выходя на локальный максимум для Co₂FeSn, и уменьшается для Co₂FeSb (рис. 8а).

В простейшей однозонной модели проводимость σ (т.е. обратное электросопротивление $1/\rho$) пропорциональна концентрации носителей заряда n и их подвижности μ . Используя определенные из эксперимента значения концентрации и подвижности носителей тока (табл. 3), были построены зависимости $(\mu \cdot n)^{-1} = f(z)$ для всех сплавов (рис. 8б). Видно, что имеет место хорошее качественное согласие между поведением ρ и $(\mu \cdot n)^{-1}$ при изменении атомного номера Z -компоненты сплавов Co₂FeZ.

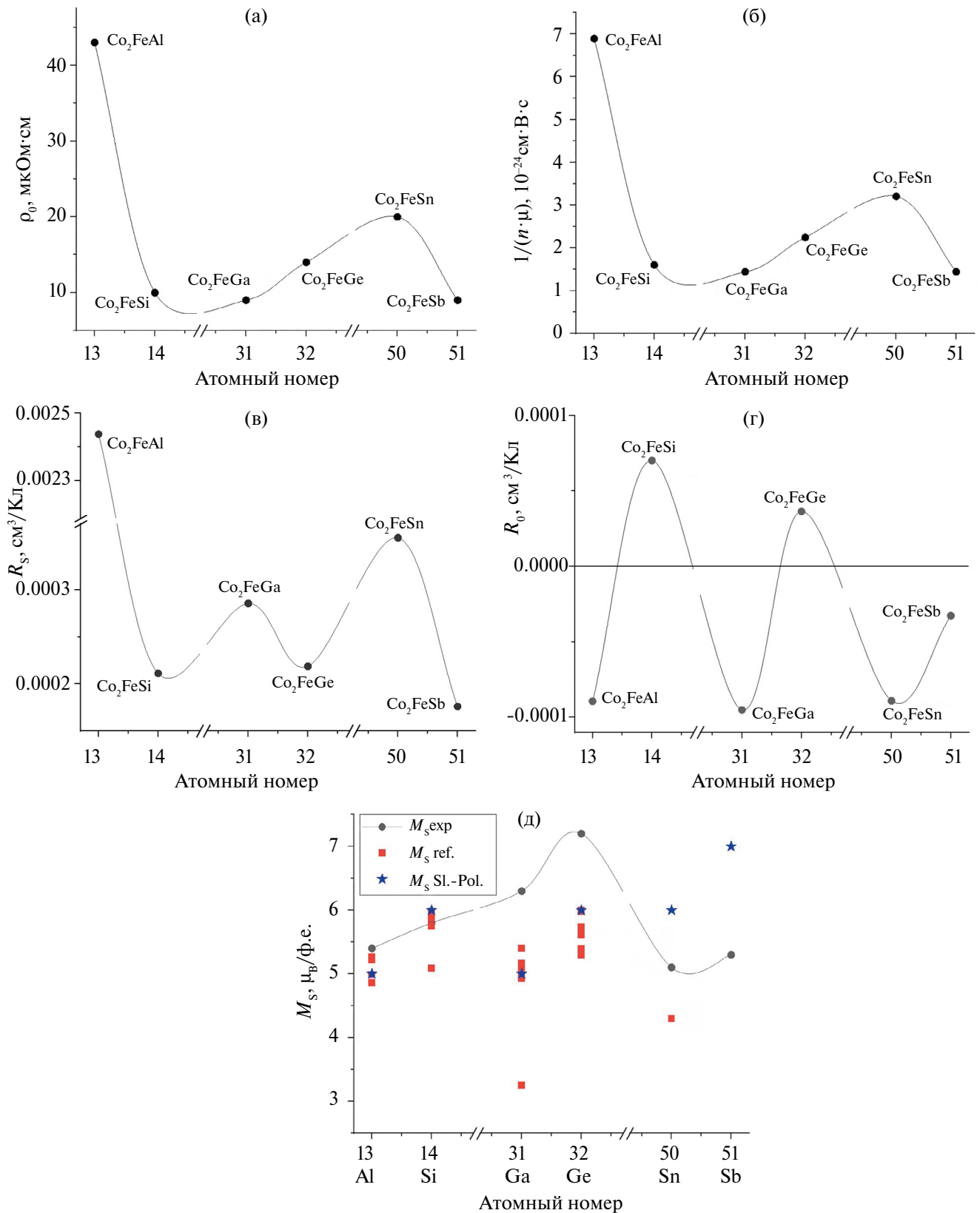


Рис. 8. Зависимости (а) остаточного электросопротивления ρ_0 , (б) обратного произведения концентрации на подвижность $1/(n \cdot \mu)$, коэффициентов (в) аномального R_s и (г) нормального R_0 эффекта Холла, (д) намагниченности насыщения M_s от атомного номера элемента Z .

Как между электросопротивлением и обоими коэффициентами Холла, так и между последними также наблюдаются определенные корреляции. Для Co_2FeAl имеет место максимальное значение электросопротивления и аномально-го коэффициента Холла (рис. 8а и 8в). Локальный максимум электросопротивления совпадает с таковым для аномального Холла в сплаве Co_2FeSn . При дальнейшем увеличении атомного номера — при переходе к Co_2FeSb — наблюдается уменьшение как электросопротивления, так и аномального коэффициента Холла (рис. 8а и 8в). Из сравнения аномального (рис. 8в) и нормального (рис. 8г) коэффициентов Холла видно, что максимальным значениям R_S соответствуют минимальные величины R_0 и наоборот.

Из рис. 8д видно, что значения магнитного момента, полученные в настоящем исследовании, а также экспериментальные данные и теоретические расчеты других авторов сильно различаются, за исключением магнитных моментов для Co_2FeAl и Co_2FeSi . Магнитный момент исследованных нами сплавов монотонно возрастает от $5.4 \mu_B/\text{ф.е.}$ для Co_2FeAl до $7.2 \mu_B/\text{ф.е.}$ для Co_2FeGe , уменьшаясь затем до $5.1 \mu_B/\text{ф.е.}$ и $5.3 \mu_B/\text{ф.е.}$ для Co_2FeSn и Co_2FeSb соответственно.

Тенденции изменения с атомным номером элемента Z магнитного момента в ПМФ как интегральной характеристики определяются правилом Слэтера—Полинга. Аналогично, в простой однозонной модели нормальный коэффициент Холла определяется лишь числом носителей заряда. В то же время другие кинетические характеристики существенно зависят от деталей процессов рассеяния, а следовательно, от спектра электронных состояний вблизи уровня Ферми. Поэтому объяснение соответствующих корреляций является более сложным. В работе [18] продемонстрировано, что удельное электросопротивление с увеличением температуры ведет себя как квадрат спонтанной намагниченности, зависящей от числа носителей заряда (в данных сплавах значения $M_{\text{спонт}}$ близки с значениями $M_{\text{S exp}}$).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований магнитных и электрических характеристик соединений Гейслера Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$) можно сделать следующие выводы.

Обнаружено, что для сплавов Co_2FeAl , Co_2FeSi и Co_2FeGe наблюдается квадратичная температурная зависимость электросопротивления при $T < 30 \text{ K}$, а в области промежуточных температур (от 40 K до 65 K) возникает степенная зависимость $\sim T^b$ с показателем $3.5 \leq b \leq 4$. Это может быть проявлением двухмагнетонных про-

цессов рассеяния, преобладающих в ПМФ-материалах [11].

Установлено, что аномальный коэффициент Холла R_S приближенно пропорционален квадрату электросопротивления ρ^2 , что согласуется с теоретическими представлениями [31].

Показано, что значения намагниченности насыщения близки к теоретическим только для Co_2FeAl и Co_2FeSi . Для других сплавов они сильно отличаются от теоретических, но неплохо согласуются с некоторыми литературными данными. Возможными причинами отличия полученных в эксперименте величин от теоретических предсказаний [30] могут быть отклонение от стехиометрии и наличие неоднородностей в составах образцов Co_2FeGa и Co_2FeGe .

Продемонстрировано, что между электронными и магнитными характеристиками изученных сплавов существует ряд корреляций, проявляющихся при изменении атомного номера Z -компоненты, т.е. при варьировании p -элементов.

Полученные данные могут быть использованы при подборе материалов с оптимальными характеристиками устройств спинтроники, для которых наиболее благоприятно состояние полуметаллического ферромагнетизма. Из полученных соединений можно выделить сплав Co_2FeSi в качестве перспективного для практического применения, поскольку в нем экспериментально наблюдали достаточно высокую спиновую поляризацию носителей заряда [32, 33]) с относительно малым значением остаточного электросопротивления и достаточно высоким магнитным моментом.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (темы “Спин” № 122021000036-3 и “Квант” № 122021000038-7). Авторы благодарят Е.Б. Марченкову за помощь при выполнении данной работы.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марченков В.В., Ирхин В.Ю.* Полуметаллические ферромагнетики, спиновые бесщелевые полупроводники и топологические полуметаллы на основе сплавов Гейслера: теория и эксперимент // ФММ. 2021. Т. 122. № 12. С. 1221–1246.
2. *Marchenkov V.V., Irkhin V.Yu., Semiannikova A.A.* Unusual kinetic properties of usual Heusler alloys // J. Supercond. Novel Magn. 2022. V. 35. P. 2153–2168.
3. *Hirohata A., Lloyd D.C.* Heusler alloys for metal spintronics // MRS Bulletin. 2022. V. 47. P. 593–599.
4. *Elphick K., Frost W., Samiepour M., Kubota T., Takanashi K., Sukegawa H., Mitani S., Hirohata A.* Heusler alloys for spintronic devices: review on recent

- development and future perspectives // STAM. 2021. V. 22. № 1. P. 235–271.
5. *Marchenkov V.V., Irkhin V.Yu.* Magnetic states and electronic properties of manganese-based intermetallic compounds Mn_2YAl and Mn_3Z ($Y = V, Cr, Fe, Co, Ni$; $Z = Al, Ge, Sn, Si, Pt$) // *Materials*. 2023. V. 16. № 19. P. 6351.
 6. *Semiannikova A.A., Perevozchikova Yu.A., Irkhin V.Yu., Marchenkova E.B., Korenistov P.S., Marchenkov V.V.* Electronic, magnetic and galvanomagnetic properties of Co-based Heusler alloys: possible states of a half-metallic ferromagnet and spin gapless semiconductor // *AIP Adv.* 2021. V. 11. P. 015139.
 7. *Sunmonu R.S., Akinlami J.O., Dare E.O., Adebayo G.A.* Effects of Y atom substitution on the structural, magnetic, electronic, elastic, mechanical, thermodynamic and thermoelectric properties of Co_2YAl ($Y = Cr, Mn$) full Heusler alloys from first principles investigations // *Comp. Condensed Matter*. 2019. V. 21. P. e00412.
 8. *Fadila B., Ameri M., Bensaid D., Noureddine M., Ameri I., Mesbah S., Al-Douri Y.* Structural, magnetic, electronic and mechanical properties of full-Heusler alloys Co_2YAl ($Y = Fe, Ti$): First principles calculations with different exchange-correlation potentials // *JMMM*. 2018. V. 448. P. 208–220.
 9. *Amari S., Dahmane F., Bin Omran S., Doumi B., Yahiaoui I.E., Tadjer A., Khenata R.* Theoretical investigation of the structural, magnetic and band structure characteristics of $Co_2FeGe_{1-x}Si_x$ ($x = 0, 0.5, 1$) full-Heusler alloys // *J. Korean Phys. Society*. 2016. V. 69. № 9. P. 1462–1468.
 10. *Siakeng L., Mikhailov G.M., Rai D.P.* Electronic, elastic and X-ray spectroscopic properties of direct and inverse full Heusler compounds Co_2FeAl and Fe_2CoAl , promising materials for spintronic applications: a DFT+U approach // *J. Mater. Chem. C*. 2018. V. 6. P. 10341–10349.
 11. *Irkhin V., Katsnelson M.* Temperature dependences of resistivity and magnetoresistivity for half-metallic ferromagnets // *Eur. Phys. J. B*. 2002. V. 30. P. 481–486.
 12. *Srinivas K., Raja M.M., Kamat S.V.* Effect of partial substitution of silicon by other sp-valent elements on structure, magnetic properties and electrical resistivity of Co_2FeSi Heusler alloys // *J. Alloys Compd.* 2015. V. 619. P. 177.
 13. *Marchenkov V.V., Kourov N.I., Irkhin V.Yu.* Half-metallic ferromagnets and spin gapless semiconductors // *Phys. Met. Metallogr.* 2018. V. 119. P. 1321.
 14. *Bombor D., Blum C.G.F., Volkonskiy O., Rodan S., Wurmehl S., Hess C., Buchner B.* Half-metallic ferromagnetism with unexpectedly small spin splitting in the Heusler compound Co_2FeSi // *PRL*. 2013. V. 110. P. 066601.
 15. *Umetsu R.Y., Okubo A., Fujita A., Kanomata T., Ishida K., Kainuma R.* Spin wave-stiffness constants of half-metallic ferromagnets Co_2YZ ($Y = Cr, Mn$, and Fe , $Z = Ga, Al$, and Si) Heusler alloys // *IEEE Trans. Magn.* 2011. V. 47. № 10. P. 2451–2454.
 16. *Ram S., Kanchana V.* Fermi surface studies of Co-based Heusler alloys: Ab-initio study // *AIP Conf. Proceed.* 2013. V. 1512. P. 1102–1103.
 17. *Chico J., Keshavarz S., Kvashnin Y., Pereiro M., Di Marco I., Etz C., Eriksson O., Bergman A., Bergqvist L.* First-principles studies of the Gilbert damping and exchange interactions for half-metallic Heuslers alloys // *Phys. Rev. B*. 2016. V. 93. P. 214439.
 18. *Куров Н.И., Марченков В.В., Перевозчикова Ю.А., Вебер Н.В.* Роль особенностей электронной структуры в электросопротивлении зонных ферромагнетиков Co_2FeZ ($Z = Al, Si, Ga, Ge, In, Sn, Sb$) // *ФТТ*. 2017. Т. 59. № 5. С. 878–882.
 19. *Balke B., Wurmehl S., Fecher G.H., Felser C., Kübler J.* Rational design of new materials for spintronics: Co_2FeZ ($Z=Al, Ga, Si, Ge$) // *STAM*. 2008. V. 9. P. 014102.
 20. *Kukusta D.A., Antonov V.N., Yaresko A.N.* X-ray magnetic circular dichroism in Co_2FeGa : First-principles calculations // *Low Temp. Phys.* 2011. V. 37. P. 684.
 21. *Ahmadian F., Boochani A.* Half-metallic properties of the $Co_2Ti_{1-x}Fe_xGa$ Heusler alloys and $Co_2Ti_{0.5}Fe_{0.5}Ga$ (001) surface // *Physica B*. 2011. V. 406. P. 2865–2870.
 22. *Gao Q.* Pressure-induced tunable magnetism and half-metallic stability in Co_2FeGa Heusler alloy // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 477–478. P. 1303–1306.
 23. *Varaprasad B.S.D.Ch.S., Srinivasan A., Takahashi Y.K., Hayashi M., Rajanikanth A., Hono K.* Spin polarization and Gilbert damping of $Co_2Fe(Ga, Ge_{1-x})$ Heusler alloys // *Acta Mater.* 2012. V. 60. P. 6257–6265.
 24. *Liu X.B., Altounian Z.* Volume dependence of the exchange interaction and Curie temperature in Co_2MGa ($M = Ti$ and Fe): A first-principles study // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. P. 07B108.
 25. *Rai D.P., Shankar A., Sandeep, Ghimire M.P., Thapa R.K.* A comparative study of a Heusler alloy Co_2FeGe using LSDA and LSDA+U // *Physica B*. 2012. V. 407. P. 3689–3693.
 26. *Kumar K.R., Bharathi K.K., Chelvane J.A., Venkatesh S., Markandeyulu G., Harishkumar N.* First-principles calculation and experimental investigations on full-Heusler alloy Co_2FeGe // *IEEE Trans. Magn.* 2009. V. 45. № 10. P. 3997–3999.
 27. *Li T., Duan J., Yang C., Kou X.* Synthesis, microstructure and magnetic properties of Heusler Co_2FeSn nanoparticles // *Micro and Nano Lett.* 2013. V. 8. № 3. P. 143–146.
 28. *Yadava E., Kumar S.* Intrinsically dominated anomalous Hall effect in pulsed laser deposited epitaxial Co_2MnGe ferromagnetic full Heusler alloy thin films // *RSC Adv.* 2023. V. 13. P. 30101.
 29. *Zhang M., Bruck E., de Boer F.R., Li Z., Wu G.* The magnetic and transport properties of the Co_2FeGa Heusler alloy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. V. 37. P. 2049–2053.
 30. *Galanakis I.* Slater–Pauling behavior in half-metallic Heusler compounds // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. P. 2010.
 31. *Ирхин В.Ю., Ирхин Ю.П.* Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d - и f -металлах и их соединениях. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 472 с.

32. *Karthik S.V., Rajanikanth A., Nakatani T.M., Gercsi Z., Takahashi Y.K., Furubayashi T., Inomata K., Hono K.* Effect of Cr substitution for Fe on the spin polarization of $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Si}$ Heusler alloys // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102. P. 043903.
33. *Makinistian L., Faiz M.M., Panguluri R.P., Balke B., Wurmehl S., Felser C., Albanesi E.A., Petukhov A.G., Nadgorny B.* On the half-metallicity of Co_2FeSi Heusler alloy: Point-contact Andreev reflection spectroscopy and *ab initio* study // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 87. P. 220402(R).

REGULARITIES AND FEATURES IN THE BEHAVIOR OF ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$) HALF-METALLIC FERROMAGNETIC HEUSLER ALLOYS

Yu. A. Perevozchikova^{1, *}, V. Yu. Irkhin¹, A. A. Semiannikova¹, and V. V. Marchenkov^{1, **}

¹*Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia*

**e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru*

***e-mail: march@imp.uran.ru*

The electrical resistivity, magnetization, and Hall effect in Co_2FeZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn, Sb}$) ferromagnetic Heusler alloys have been investigated. It has been demonstrated that there are a number of correlations between the electronic and magnetic characteristics of the alloys under study, which are manifested by changes in the atomic number of the Z component. For Co_2FeAl and Co_2FeSi alloys, which are HMFs, the magnetization value agrees with the Slater–Pauling rule. The electrical resistivity of Co_2FeAl , Co_2FeSi , and Co_2FeGe compounds exhibits quadratic temperature dependence at temperatures below 30 K and above 65 K. In the range of intermediate temperatures (40 to 65 K), a power-law dependence of $\sim T^b$ with an exponent of $3.5 \leq b \leq 4$ has been revealed, which may be attributed to two-magnon scattering processes.

Keywords: Heusler alloy, half-metallic ferromagnet, electronic transport, magnetization, Hall effect, electrical resistivity