

УДК 669.225:537.312.6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Co_2FeSi

¹Перевозчикова Ю.А., ¹Емельянова С.М., ¹Дякина В.П., ²Попова О.Е., ^{1,2}Марченков В.В.

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург;

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru

Исследовано электро- и магнитосопротивление полуметаллического ферромагнитного сплава Гейслера Co_2FeSi в температурном интервале от 4.2 до 100 К в отсутствие магнитного поля и во внешнем магнитном поле 14 Тл. Установлено, что величина магнитосопротивления положительная при низких температурах и становится отрицательной при температурах выше 80 К. Показано, что температурно-зависимая часть сопротивления содержит два квадратичных по температуре вклада. Первый из них «низкотемпературный», который увеличивается с магнитным полем и может быть связан с электрон-электронным взаимодействием, а второй – «высокотемпературный», который уменьшается с полем и может быть объяснен магнитным упорядочением, т.е. связан с электрон-магнонным рассеянием. Однако для окончательного выяснения этих предположений требуется проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: полуметаллический ферромагнетик, сопротивление, сплавы Гейслера

ELECTRICAL PROPERTIES OF HALF-METALLIC FERROMAGNETIC Co_2FeSi HEUSLER ALLOY

¹Perevozchikova Yu.A., ¹Emelyanova S.M., ¹Dyakina V.P., ²Popova O.E., ^{1,2}Marchenkov V.V.

¹M.N. Miheev Institute of Metal Physics of UB RAS, Ekaterinburg;

²Ural Federal University, Ekaterinburg, e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru

The electro- and magnetoresistivity of the half-metallic ferromagnetic Co_2FeSi Heusler alloy has been measured in the temperature range from 4.2 to 100 K without magnetic field and in a field of 14 T. The magnitude of the magnetoresistivity has been found to be positive at low temperatures and become negative at temperatures above 80 K. It has been shown that the temperature-dependent part of the resistivity contains two quadratic contributions. One of them is the «low temperature» term, which increases with a magnetic field and can be caused by the electron-electron interaction, and the second is the «high temperature» one, which decreases with a field and can be explained by the electron-magnon scattering. However, for a final clarification of these assumptions we plan to carry out further experiments.

Keywords: half-metallic ferromagnet, resistivity, Heusler alloys

Повышенный интерес к изучению интерметаллических соединений на основе сплавов Гейслера [3] во многом обусловлен возможностью их применения в спинтронике как полуметаллических ферромагнетиков [3, 5] с высокой степенью поляризации носителей заряда [3, 4]. Основной особенностью полуметаллических ферромагнетиков является наличие щели в их электронном спектре на уровне Ферми для носителей заряда со спином вниз. Эта особенность обычно выявляется в результате зонных расчетов и в экспериментах при измерении оптических свойств. По-видимому, эта энергетическая щель должна проявляться и в других электронных свойствах, в частности, в электронном транспорте. Известно, что некоторые из сплавов Гейслера относятся к классу ПМФ, а наиболее перспективными из них являются сплавы с большими температурами Кюри T_c и высокой спиновой поляризацией при комнатной температуре. К таким материалам, в частности, относится сплав Гейслера Co_2FeSi , с T_c около 1100 К [2]. Поэтому любая новая информация о физических свойствах этого сплава, в частности, новые

данные об электрических свойствах, представляет несомненный интерес. Цель данной работы – получение новой информации об электронных свойствах сплава Co_2FeSi , а также о проявлении энергетической щели на уровне Ферми в электронном транспорте, посредством экспериментального исследования температурных зависимостей электро- и магнитосопротивления от 4.2 до 100 К и в магнитном поле 14 Тл.

Материалы и методы исследования

Сплав Co_2FeSi был выплавлен методом дуговой плавки в атмосфере аргона, затем он был подвергнут отжигу при температуре 1100 К в течение 24 часов с последующим охлаждением в печи. Из полученного слитка электроискровым методом вырезались образцы для измерения электро- и магнитосопротивления. Элементный анализ проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа с автоэмиссионным катодом FEI Inspect F и приставкой GENESIS APEX 2 (Inspect F, FEI Company), оснащенного EDAX спектрометром. Рентгеноструктурные исследования образца проведены на рентгеновском порошковом автодифрактометре STADI-P (STOE, Германия) в $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучении (длина волны $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$) при температуре 293 К в диапазоне углов 5-120°. Исследова-

ния показали, что отклонение от стехиометрического состава является незначительным и в сплаве сформирована структура $L2_1$.

Измерения сопротивления были выполнены на постоянном токе стандартным четырехзондовым методом с коммутацией тока через образец с размерами $0.8 \times 0.8 \times 12 \text{ мм}^2$, в интервале температур от 4.2 до 100 К без магнитного поля и в поле 14 Тл.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости сопротивления сплава Co_2FeSi без магнитного поля и в поле 14 Тл, соответственно. Видно, что обоих случаях сопротивление возрастает с температурой по закону близкому к квадратичному. Чтобы проверить это предположение, были построены зависимости сопротивления от квадрата температуры T^2 в отсутствие магнитного поля и в поле $B = 14 \text{ Тл}$ (Рис. 2). Хорошо видно, что имеется два температурных интервала, где сопротивление квадратично зависит от T .

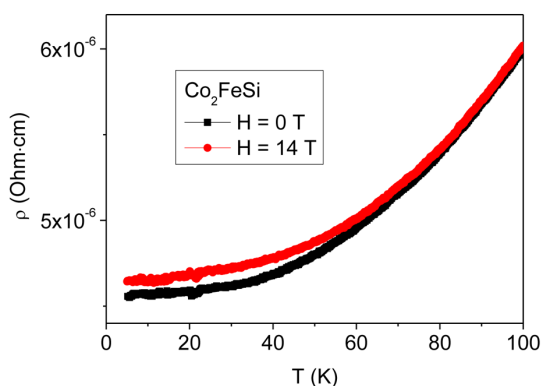


Рис. 1. Зависимость электросопротивления от температуры без магнитного поля (черная линия) и в поле 14 Тл (красная линия)

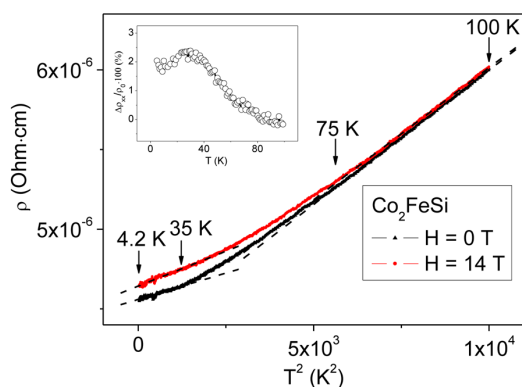


Рис. 2. Зависимость сопротивления Co_2FeSi от T^2 без магнитного поля (Δ , черная линия) и в поле 14 Тл ($\circ$, красная линия). На вставке показана температурная зависимость магнитосопротивления в поле 14 Тл

Общее сопротивление металлов обычно состоит из нескольких вкладов от различных механизмов рассеяния носителей заряда. Поэтому был проанализирован вид температурных зависимостей сопротивления $\rho(T)$. Как видно из рис. 2, $\rho(T)$ исследованного сплава состоит из независимого от температуры вклада $\rho_{\text{ост.}}$ – остаточного сопротивления, и квадратичных по температуре «низкотемпературного» и «высокотемпературного» вкладов. Т.е. температурная зависимость $\rho(T)$ может быть представлена в виде:

$$\rho(T) = \rho_{\text{ост.}} + A \cdot T^2 + B \cdot T^2, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты.

Квадратичную температурную зависимость сопротивления обычно связывают с электрон-электронным и/или с электрон-магнетонным рассеянием [1]. Включение внешнего магнитного поля будет по-разному проявляться во вкладах в сопротивление от этих двух процессов рассеяния: вклад от электрон-электронного рассеяния должен возрастать вследствие ларморовского закручивания в магнитном поле, а вклад от электрон-магнетонного должен уменьшаться вследствие магнитного упорядочения с полем. Из эксперимента были определены значения коэффициентов A и B . При $B = 0$ $A_1 = 6.6 \cdot 10^{-11} \text{ Ohm} \cdot \text{cm/K}^2$ и $B_1 = 1.7 \cdot 10^{-10} \text{ Ohm} \cdot \text{cm/K}^2$, а в поле $B = 14 \text{ Тл}$ $A_2 = 8.8 \cdot 10^{-11} \text{ Ohm} \cdot \text{cm/K}^2$ и $B_2 = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ Ohm} \cdot \text{cm/K}^2$. Т.е. «низкотемпературный» квадратичный вклад (коэффициент A) возрастает с магнитным полем, а «высокотемпературный» квадратичный вклад (коэффициент B) уменьшается. Эти данные хорошо согласуются с температурной зависимостью магнитосопротивления. На вставке рис. 2 показана температурная зависимость магнитосопротивления ρ_{xx} в поле 14 Тл. Здесь $\rho_{xx} = \Delta \rho_{xx} / \rho_0 = (\rho_{xx} - \rho_0) / \rho_0$, где ρ_{xx} – сопротивление в поле 14 Тл, а ρ_0 – сопротивление без поля. Видно (рис. 2), что магнитосопротивление ρ_{xx} положительное, в области низких температур при $T = 4.2 \text{ К}$ оно равняется 2%. Затем с ростом температуры оно достигает максимума около 2.5% при $T = 27 \text{ К}$, после чего уменьшается, становится равным нулю при $T = 80 \text{ К}$, а при $T = 100 \text{ К}$ равно около -0.2% .

В работе [2], где также исследовали температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ сплава Co_2FeSi , сообщалось о том, что поведение $\rho(T)$ хорошо описывается формулой, содержащей экспоненциальный член $\exp(\Delta/T)$. Из экспериментальных данных авторами [2] была определена величина щели $\Delta = 103 \text{ К}$, что на порядок величины меньше реального значения. Сле-

дует также отметить, что добавка в электро-сопротивление, возможно связанная с экспонентой, составляла в [2] всего лишь 1-3 %. Анализ наших экспериментальных данных показал, что экспоненциальный член в $\rho(T)$ отсутствует, а в «промежуточной» области температур от 35 К до 65 К можно выделить дополнительный вклад, пропорциональный T^n , где $n > 4$. Согласно работе [5], в ПМФ может наблюдаться зависимость $\rho(T) \sim T^n$, где $n = 9/2$, как результат двухфононных процессов рассеяния, характерных для ПМФ. Однако для окончательных выводов требуются дальнейшие исследования.

Заключение

В результате изучения электро- и магнитосопротивления полуметаллического ферромагнитного сплава Гейслера Co_2FeSi показано, что температурно-зависящая часть сопротивления содержит два квадратичных по температуре вклада. Если «низкотемпературный» вклад увеличивается с магнитным полем и может быть связан с электрон-электронным взаимодействием, то «высокотемпературный», напротив, уменьшается с полем и может быть объяснен магнитным упорядочением, т.е. связан с электрон-магнонным рассеянием. Однако

для окончательного выяснения этих предположений требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена по плановому государственному заданию (тема «Спин» № 01201463330) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-12), молодежного проекта РФФИ (грант № 16-32-00072) и финансовой поддержке постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

Список литературы

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
2. Bombor D. Half-metallic ferromagnetism with unexpectedly small spin splitting in the Heusler compound Co_2FeSi // D. Bombor, C.G.F. Blum, O. Volkonskiy, S. Rodan, S. Wurmehl, C. Hess, B. Buchner // Phys. Rev. Lett. – 2013. – Vol. 110. – P. 066601.
3. Graf T. Simple rules for the understanding of Heusler compounds / T. Graf, C. Felser, S.S.P. Parkin // Prog. Solid State Chem. – 2011. – Vol. 39. – P. 1.
4. Inomata K. Highly spin-polarized materials and devices for spintronics / K. Inomata, N. Ikeda, N. Tezuka, R. Goto, S. Sugimoto, M. Wojcik, E. Jedryka // Sci. Tech. Adv. Mater. – 2008. – Vol. 9. – P. 014101.
5. Katsnelson M.I. Half-metallic ferromagnets: From band structure to many-body effects / M.I. Katsnelson, V.Yu. Irkhin, L. Chioncel, A.I. Lichtenstein, R.A. de Groot // Rev. Mod. Phys. – 2008. – Vol. 80. – P. 315.