

## СТАТЬИ

УДК 669.255:537.633.2:537.638.2:537.312.8

**МАГНИТНЫЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ  $\text{Co}_2\text{VSi}$  И  $\text{Co}_2\text{MnSi}$** **<sup>1</sup>Перевозчикова Ю.А., <sup>1</sup>Семянникова А.А., <sup>1</sup>Доможирова А.Н., <sup>1,2</sup>Коренистов П.С.,****<sup>1</sup>Чистяков В.В., <sup>1</sup>Емельянова С.М., <sup>1,2</sup>Марченков В.В.***<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,**e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru, march@imp.uran.ru;**<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

Сплавы Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  являются типичными представителями полуметаллических ферромагнетиков, которые являются перспективными магнитными материалами для их возможного применения в приборах и устройствах спинтроники, так как в них может быть реализована высокая спиновая поляризация носителей заряда. Для получения новой информации об их электронных и магнитных характеристиках в данной работе были синтезированы поликристаллические сплавы Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  и экспериментально исследованы их магнитные и гальваномагнитные свойства: полевые зависимости намагниченности при  $T = 4,2$  К и 300 К в магнитных полях до 70 кОе и полевые зависимости эффекта Холла при  $T = 4,2$  К и в магнитных полях до 100 кОе. Используя разработанный авторами ранее метод по совместному измерению намагниченности и холловского сопротивления, были получены значения нормального и аномального коэффициентов Холла и установлено, что основным типом носителей тока в обоих сплавах являются электроны. Сделанные при  $T = 4,2$  К оценки концентрации и подвижности носителей заряда показали, что их значения являются типичными для металлов.

**Ключевые слова:** полуметаллический ферромагнетик,  $\text{Co}_2\text{VSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ , эффект Холла, намагниченность**MAGNETIC AND GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF HALF-METALLIC FERROMAGNET  $\text{Co}_2\text{VSi}$  AND  $\text{Co}_2\text{MnSi}$** **<sup>1</sup>Perevozchikova Yu.A., <sup>1</sup>Semyannikova A.A., <sup>1</sup>Domozhirova A.N.,****<sup>1,2</sup>Korenistov P.S., <sup>1</sup>Chistyakov V.V., <sup>1</sup>Emelyanova S.M., <sup>1,2</sup>Marchenkov V.V.***<sup>1</sup>M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,**Ekaterinburg, e-mail: yu.perevozchikova@imp.uran.ru, march@imp.uran.ru;**<sup>2</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg*

$\text{Co}_2\text{VSi}$  and  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Heusler alloys are typical representatives of half-metallic ferromagnets, which are promising magnetic materials for their possible application in devices of spintronics, since a high spin polarization of charge carriers can be realized in them. In order to obtain new information about their electronic and magnetic characteristics, in this work, polycrystalline  $\text{Co}_2\text{VSi}$  and  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Heusler alloys were synthesized and their magnetic and galvanomagnetic properties were experimentally studied: field dependences of magnetization at  $T = 4.2$  K and 300 K and in magnetic fields up to 70 kOe and field dependences of Hall effect at  $T = 4.2$  K and in magnetic fields up to 100 kOe. Using the previously developed method for the joint measurement of magnetization and Hall resistivity, the normal and anomalous Hall coefficients were obtained and it was found that the main type of current carriers in both alloys are electrons. The estimates of the concentration and mobility of charge carriers made at  $T = 4.2$  K showed that their values are typical for metals.

**Keywords:** half-metallic ferromagnet,  $\text{Co}_2\text{VSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ , Hall Effect, magnetization

Для активно развивающихся в настоящий момент областей нанoeлектроники и спинтроники требуются новые материалы, в которых можно задействовать не только заряд, но и спин электрона для создания спинового тока, использования направления спина в качестве единицы информации с последующей разработкой спиновых инжекторов или устройств с магнитными тунельными переходами, ячеек памяти [1, 2] и т.д. К таким материалам относится класс полуметаллических ферромагнетиков (ПМФ), в которых можно реализовать высокую поляризацию носителей заряда по спину. Главная особенность таких материалов – существование широкой энергетической

щели в электронной зонной структуре для одной из спиновых подсистем [1]. В работе [3] был экспериментально определен коэффициент спиновой поляризации  $P = 0,93$  для пленок  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при комнатной температуре. Данное соединение относится к сплавам Гейслера – тройным соединениям типа  $X_2YZ$ , где  $X$  и  $Y$  – переходные металлы, а  $Z$  – s- или p-элемент главной группы Периодической таблицы Менделеева, сформированным в структуре  $L2_1$  [1]. Положение и ширина щели может варьироваться достаточно сильно в различных ПМФ. Эти параметры можно изменить варьированием 3d-, s- или p-элементов в сплавах Гейслера  $X_2YZ$ , изменяя тем самым и их электронные и маг-

нитные свойства. Особенности полуметаллического ферромагнетизма наблюдали в сплавах Гейслера на основе Co [4–6]. Одними из ярких представителей ПМФ с относительно высокими значениями температур Кюри  $T_C$  из данных по теоретическим расчетам являются  $\text{Co}_2\text{VSi}$  [7] и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  [8]. Поскольку получение новой информации об их электронных и магнитных характеристиках представляет интерес, отсутствуют данные об эффекте Холла в этих сплавах, то целью данной работы стало экспериментальное исследование магнитных и гальваномагнитных свойств полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ .

### Материалы и методы исследования

Поликристаллические сплавы  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  были приготовлены в индукционной печи в атмосфере очищенного аргона. Затем  $\text{Co}_2\text{VSi}$  отжигался при  $1100^\circ\text{C}$  в течение 3 дней с последующей закалкой, а  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  отжигался при  $800^\circ\text{C}$  в течение 9 дней с последующим охлаждением до комнатной температуры. Элементный анализ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа, оснащенного приставкой рентгеновского микроанализа EDAX. Выявлено, что отклонение от среднего стехиометрического состава во всех образцах незначительно (не более 3%), но в сплаве  $\text{Co}_2\text{VSi}$  выделяется вто-

рая фаза  $\text{Co}_4\text{V}_3\text{Si}_3$ . Структурный анализ проводился в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Полевые зависимости сопротивления Холла были выполнены при  $T = 4,2\text{ K}$  в магнитных полях до  $100\text{ kOe}$  по стандартной методике, которая подробно описана в работе [9]. Полевые зависимости намагниченности были измерены при  $T = 4,2\text{ K}$  и  $300\text{ K}$  в магнитных полях до  $70\text{ kOe}$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений кривых намагничивания при  $H \leq 70\text{ kOe}$ ,  $T = 4,2\text{ K}$  и  $T = 300\text{ K}$  в сплавах Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  приведены на рис. 1 и 2. Как видно, полевые зависимости намагниченности  $M(H)$  всех образцов при  $H \geq 10\text{ kOe}$  приближаются к насыщению (кроме зависимости  $M(H)$  при  $T = 300\text{ K}$  для  $\text{Co}_2\text{VSi}$ ). В этой области магнитных полей практически заканчивается процесс технического намагничивания и образцы переходят в однодоменное состояние. В случае зонной природы магнетизма рассматриваемых сплавов намагниченность здесь будет определяться в основном перестройкой электронной зонной структуры в магнитном поле [6]. В табл. 1 представлены значения намагниченности насыщения при температурах  $4,2\text{ K}$  и  $300\text{ K}$ .

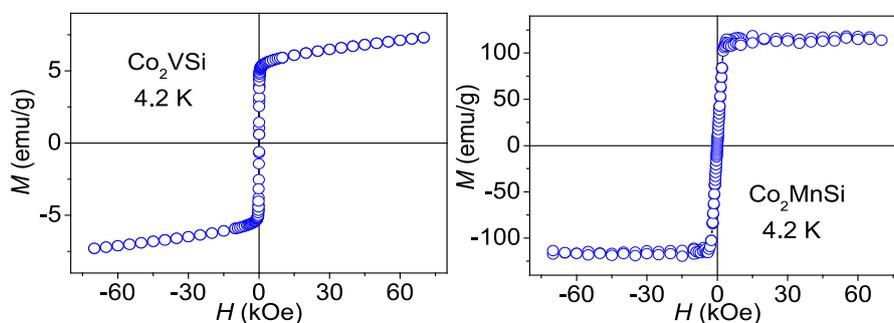


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при  $T = 4,2\text{ K}$

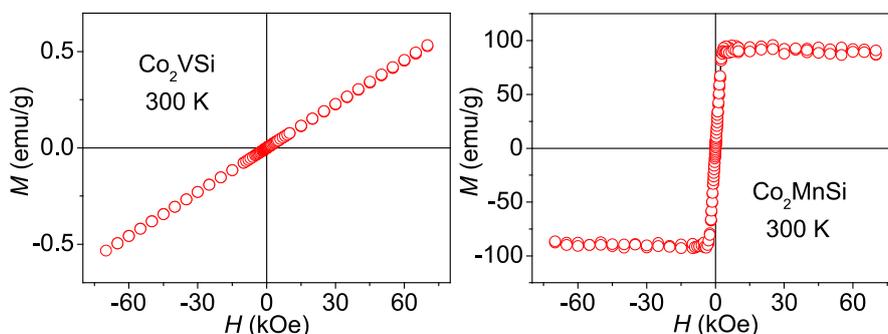


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при  $T = 300\text{ K}$

Намагниченность насыщения сплава  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  близка к значению, полученному для соединения в работе [10]  $M_s = 4,96 \mu_B/\text{f.u.}$ . Отклонения от значения можно объяснить тем, что в данной работе исследуются поликристаллические образцы, а в работе [10] исследовался монокристалл. В случае сплава  $\text{Co}_2\text{VSi}$ , наблюдаются значительные отклонения от теоретического значения намагниченности насыщения [11]  $M_s = 2,97 \mu_B$ . В работе [12] говорится, что в сплаве, близком к стехиометрическому  $\text{Co}_2\text{VSi}$ ,  $\text{Co}_{63.5}\text{V}_{17.0}\text{Si}_{19.5}$  при температурах отжига выше  $800^\circ\text{C}$  происходит переход структуры из  $\text{L2}_1$  в  $\text{A12}$ . Поэтому можно предположить, что низкие значения намагниченности связаны с наличием второй фазы  $\text{Co}_4\text{V}_3\text{Si}_3$ .

Для получения информации о носителях тока в сплавах  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  был исследован эффект Холла. Поэтому при  $T = 4,2 \text{ K}$  и  $H \leq 100 \text{ kOe}$  были измерены полевые зависимости холловского сопро-

тивления  $\rho_H(H)$  (рис. 3). Видно, что общий вид зависимостей  $\rho_H(H)$  аналогичен зависимостям кривых намагничивания  $M(H)$ , представленным на рис. 1: наблюдаются два интервала магнитных полей до и после  $10 \text{ kOe}$ .

Поскольку при низких температурах сплавы находятся в ферромагнитном состоянии, то в них должен наблюдаться как нормальный, так и аномальный эффект Холла. Для разделения составляющих коэффициента Холла была использована следующая формула [9]:

$$\rho_H/H = R_0 + 4\pi R_S M/H, \quad (1)$$

где  $\rho_H$  – сопротивление Холла,  $M$  – намагниченность,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $R_0$  и  $R_S$  – коэффициенты нормального и аномального эффекта Холла, соответственно. На рис. 4 представлены зависимости  $\rho_H/H = f(M/H)$ , из которых определены коэффициенты  $R_0$  и  $R_S$ .

Таблица 1

Намагниченности насыщения  $M_s$  сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$

Сплав	$M_s (T = 4.2 \text{ K}),$ emu/g	$M_s (T = 4.2 \text{ K}),$ $\mu_B/\text{f.u.}$	$M_s (T = 300 \text{ K}),$ emu/g	$M_s (T = 300 \text{ K}),$ $\mu_B/\text{f.u.}$
$\text{Co}_2\text{VSi}$	6	0,21	–	–
$\text{Co}_2\text{MnSi}$	114	4,11	89	3,2

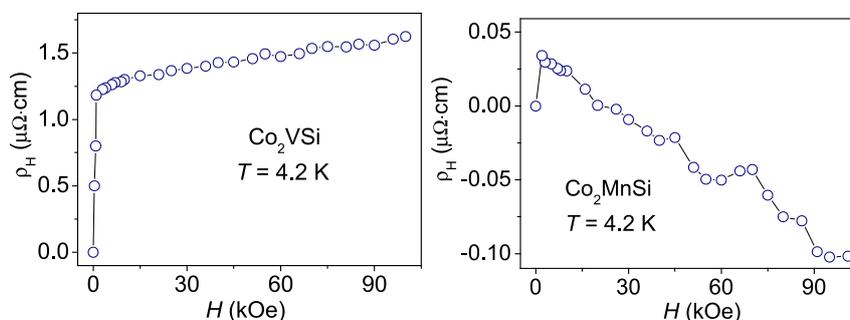


Рис. 3. Полевые зависимости сопротивления Холла сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при  $T = 4,2 \text{ K}$

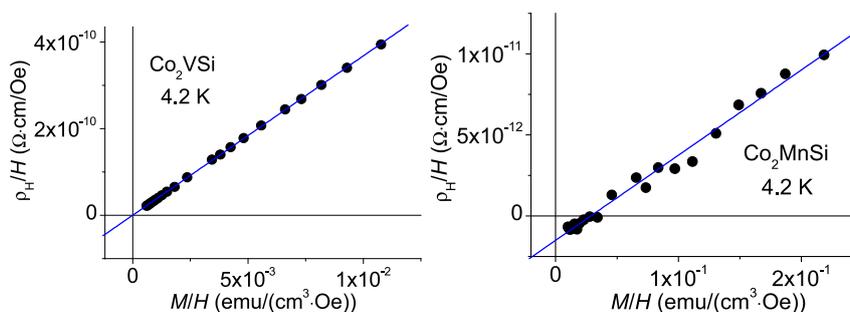


Рис. 4. Зависимости  $\rho_H/H = f(M/H)$  для сплавов  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при  $T = 4,2 \text{ K}$

Таблица 2

Электросопротивление  $\rho$ , коэффициенты нормального  $R_0$  и аномального  $R_s$  эффекта Холла, тип носителей заряда, их концентрация  $n$  и подвижность  $\mu$  сплавов  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  (при  $T = 4,2 \text{ K}$ )

Сплав	$\rho$ , $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ ( $T = 4,2 \text{ K}$ )	$R_0$ , $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{C}$	$R_s$ , $10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$	Основной тип носителей заряда	Концентрация носителей заряда, $n$ , $\text{cm}^{-3}$	Подвижность носителей заряда $\mu$ , $\text{cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
$\text{Co}_2\text{VSi}$	0,294	-1,21	29	электроны	$5 \times 10^{22}$	0,4
$\text{Co}_2\text{MnSi}$	0,016	-1,50	0,04	электроны	$4 \times 10^{22}$	9,7

Коэффициент нормального эффекта Холла  $R_0$  в однозонной модели можно определить как (2) и/или (3):

$$R_0 = 1/nec, \quad (2)$$

где  $n$  – число носителей тока,  $c$  – скорость света,  $e$  – заряд электрона.

$$R_0 = \mu \cdot \rho, \quad (3)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда,  $\rho$  – электросопротивление. Тогда, определив из эксперимента значения  $R_0$  и  $\rho$ , можно оценить значения концентрации носителей заряда  $n$ , а также их подвижность  $\mu$ . Результаты представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, основными носителями заряда в исследованных сплавах являются электроны со значениями концентраций, характерных для типичных металлов. Коэффициенты нормального  $R_0$  и аномального  $R_s$  эффектов Холла имеют противоположные знаки, а значения  $R_0$  и  $R_s$  сплава  $\text{Co}_2\text{VSi}$  различаются на три порядка. Необходимо отметить, что все измерения в данной работе были выполнены на поликристаллических образцах. Поэтому полученные оценки подвижностей носителей заряда являются качественными, позволяющими, однако, судить о порядке величины  $\mu$ .

### Заключение

Таким образом, были исследованы полевые зависимости намагниченности и сопротивления Холла полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{VSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ . Получены новые экспериментальные данные об их электронных характеристиках, т.е. определен основной тип носителей тока, сделаны оценки величины их концентраций и подвижностей, которые оказались типичными для металлов и при  $T = 4,2 \text{ K}$  равны:  $n = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  и  $\mu = 0,4 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  для сплава  $\text{Co}_2\text{VSi}$ ,  $n = 4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  и  $\mu = 9,7 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  для сплава  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания РФ (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-10-2-37), РФФИ

(проект № 18-32-00686) и Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

### Список литературы

1. Graf T., Felser C., Parkin S.S.P. Simple rules for the understanding of Heusler compounds // Progress in Solid State Chemistry. 2011. V. 39. P. 1. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2011.02.001.
2. Fetzer R., Stadtmuller B., Ohdaira Y., Naganuma H., Oogane M., Ando Y., Taira T., Uemura T., Yamamoto M., Aeschlimann M., Cinchetti M. Probing the electronic and spintronic properties of buried interfaces by extremely low energy photoemission spectroscopy. Scientific reports. 2015. V.5. P. 8537. DOI: 10.1038/srep08537.
3. Jourdan M., Minar J., Braun J., Kronenberg A., Chadov S., Balke B., Gloskovskii A., Kolbe M., Elmers H.J., Schonhense G., Ebert H., Felser C., Klauui M. Direct observation of half-metallicity in the Heusler compound  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ . Nature communications. 2014. V.5. P. 3974. DOI: 10.1038/ncomms4974.
4. Yin M., Chen S., Nash P. Enthalpies of formation of selected  $\text{Co}_2\text{YZ}$  Heusler compounds. Journal of Alloys and Compounds. 2013. V. 577. P. 49–56. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.04.136.
5. 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  $\text{Co}_2\text{FeSi}$ . Physical Review Letters. 2013. V. 110. Iss. 6. P. 066601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.066601.
6. Коуров Н.И., Марченков В.В., Перевозчикова Ю.А., Королев А.В., Weber H.W. Высокополевая намагниченность зонных ферромагнетиков  $\text{Co}_2\text{YAl}$  ( $Y = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}$ ) // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. С. 2346–2349.
7. Rai D.P., Sandeep, Shankar A., Sakhya A.P., Sinha T.P., Khenata R., Ghimire M.P., Thapa R.K. Electronic and magnetic properties of  $\text{X}_2\text{YZ}$  and  $\text{XYZ}$  Heusler compounds: a comparative study of density functional theory with different exchange-correlation potentials. Materials Research Express. 2016. V.3. P. 075022.
8. Abderrahim B., Ameri M., Bensaid D., Azaz Y., Doumi B., Al-Douri Y., Benzoudji F. Half-metallic magnetism of quaternary Heusler compounds  $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$  ( $x = 0,0.5$ , and  $1.0$ ): first-principles calculations. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2016. V. 29. P. 277–283. DOI: 10.1007/s10948-015-3277-1.
9. Коуров Н.И., Марченков В.В., Белозерова К.А., Weber H.W. Гальваномагнитные свойства сплавов Гейслера  $\text{Fe}_2\text{YZ}$  ( $Y = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}$ ;  $Z = \text{Al}, \text{Si}$ ) // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. V. 148. P. 966. DOI: 10.7868/S0044451015110127.
10. Brown P.J., Neumann K.U., Webster P.J., Ziebeck K.R.A. The magnetization distributions in some Heusler alloys proposed as half-metallic ferromagnets. Journal of Physics: Condensed Matter. 2000. V. 12. P. 1827–1835. DOI: 10.1088/0953-8984/12/8/325.
11. Bentouaf A., Hassan F.E.H. Structural, electronic, magnetic and thermodynamic properties of full-Heusler compound  $\text{Co}_2\text{VSi}$ : Ab initio study. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. V. 381. P. 65–69.
12. Jiang H., Xu X., Omori T., Nagasako M., Ruan J., Yang S., Wang C., Liu X., Kainuma R. Martensitic transformation and shape memory effect at high temperatures in off-stoichiometric  $\text{Co}_2\text{VSi}$  Heusler alloys. Materials Science and Engineering A. 2016. V. 676. P. 191–196. DOI: 10.1016/j.msea.2016.08.083.