

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.25'74'71:537.622;537.311.3

### МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ГЕЙСЛЕРА $\text{Co}_2\text{MnZ}$ ( $Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn}$ )

© 2022 г. А. А. Семянникова<sup>а, \*</sup>, Ю. А. Перевозчикова<sup>а</sup>, П. С. Коренистов<sup>а</sup>,  
Е. Б. Марченкова<sup>а</sup>, А. В. Королев<sup>а</sup>, В. В. Марченков<sup>а, б, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

<sup>б</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

\*e-mail: semiannikova@imp.uran.ru

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

Поступила в редакцию 16.12.2021 г.

После доработки 26.12.2021 г.

Принята к публикации 03.01.2022 г.

Измерены температурные зависимости электросопротивления сплавов Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn}$ ) от 78 до 300 К, а также их намагниченность при 5 К и 300 К в полях до 30 кЭ. Обнаружено, что в сплавах  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  правило Муиджи [Mooij J.H. Phys. Stat.Sol. (a). 1973. V. 17. P. 521] не выполняется. Обнаружена корреляция между электронными и магнитными характеристиками и атомным номером элемента  $Z$  в сплавах  $\text{Co}_2\text{MnZ}$ .

**Ключевые слова:** сплавы Гейслера, полуметаллические ферромагнетики, спиновые бесщелевые полупроводники, электрические свойства, магнитные свойства

**DOI:** 10.31857/S0015323022070166

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений в физике конденсированного состояния и материаловедения является поиск и получение новых функциональных материалов с необычными физическими свойствами. К таким материалам относятся и соединения Гейслера, спектр функциональных характеристик которых необычайно широк [1–3]. Известны сплавы Гейслера с эффектом памяти формы и магнитокалорическим эффектом [4–6], необычными полупроводниковыми [7], сверхпроводящими [8] и топологическими [9, 10] свойствами (см. также обзоры [1–3] и ссылки в них). Однако особое место среди Гейслеровых сплавов занимают соединения, в которых реализуются состояния полуметаллического ферромагнетика (ПМФ) [11–14] или спинового бесщелевого полупроводника (СБП) [13–16]. В таких материалах может наблюдаться высокая, близкая к 100%, степень спиновой поляризации носителей тока, что может быть использовано в спинтронике.

Во многом это обусловлено тем, что в ПМФ и СБП вблизи уровня Ферми для электронных состояний со спином “вниз” имеется широкая щель ( $\Delta E \sim 1$  эВ), тогда как для состояний с противоположной проекцией спина щель отсутствует в полуметаллических ферромагнетиках, а в СБП щель нулевая. Поэтому ПМФ и СБП перспективны

для устройств спинтроники, поскольку они могут быть использованы в качестве эффективных инжекторов спин-поляризованных носителей, например, в системах “ПМФ-соединение/полупроводник” [17, 18].

Стоит отметить, что щель для носителей тока со спином “вниз” при повышении температуры будет сохраняться только в приближении среднего поля: она будет “размываться” за счет некогерентных состояний [12] и исчезать при температурах, близких к температуре Кюри  $T_C$ . Таким образом, большие значения коэффициента спиновой поляризации  $P$  в таких соединениях можно реализовать при температурах  $T \ll T_C$ . Как правило, интерес представляют спинтронные устройства, работающие вблизи комнатных температур, поэтому не обходимы ПМФ и СБП – соединения Гейслера с высокими значениями температуры Кюри [19].

Известно [20–22], что электронная структура и, следовательно, электронные транспортные свойства меняются довольно сильно при изменении компонентов в соединениях Гейслера  $X_2YZ$ . Состояния, близкие к ПМФ, наблюдали в системе  $\text{Co}_2\text{FeZ}$  ( $Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, In, Sn, Sb}$ ) [20, 22]. По-видимому, подобная картина может наблюдаться и в других соединениях Гейслера на основе Co, в частности, в системе  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  с изменением  $Z$ -компоненты, что должно проявляться в элек-

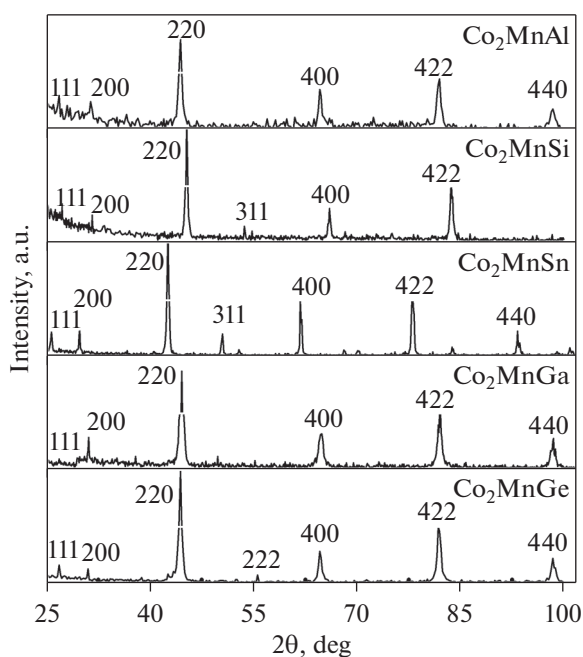
**Таблица 1.** Тип структуры и параметры решетки сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$ 

Сплав	Тип структуры	Параметры решетки
$\text{Co}_2\text{MnAl}$	$L2_1$	5.765
$\text{Co}_2\text{MnSi}$	$L2_1$	5.660
$\text{Co}_2\text{MnGa}$	$L2_1$	5.760
$\text{Co}_2\text{MnGe}$	$L2_1$	5.760
$\text{Co}_2\text{MnSn}$	$L2_1$	6.000

трических и магнитных свойствах этих соединений. Отметим, что о возникновении ПМФ-состояния и почти 100%-ной спиновой поляризации в тонких пленках  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  при комнатной температуре сообщали в работе [23]. Новая информация об электронных и магнитных свойствах ПМФ- и СБП-соединений Гейслера, а также о величине спиновой поляризации представляет несомненный фундаментальный и практический интерес. В связи с этим в настоящей работе изучаются магнитные и электрические свойства системы соединений Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) и закономерности их поведения при изменении  $Z$ -компоненты.

#### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплавы Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) синтезированы методом дуговой плавки в ат-

**Рис. 1.** Рентгенограммы сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ).

мосфере очищенного аргона с последующим отжигом при 800 К в течение 48 ч. Атомное содержание элементов в поликристаллическом сплаве контролировали с помощью растрового электронного микроскопа FEI Company Quanta 200, оборудованного устройством рентгеновского микроанализа EDAX. Элементный состав определяли, как минимум, в трех разных точках каждого из исследованных образцов. Отклонение от стехиометрического состава во всех образцах оказалось незначительным.

Все соединения кристаллизовались в кубическую структуру  $L2_1$ . Соответствующие данные о типе структуры и параметрах решетки представлены в табл. 1. Рентгенограммы продемонстрированы на рис. 1.

Намагниченность  $M$  измеряли на СКВИД-магнитометре MPMS-XL-5 фирмы Quantum Design. Электросопротивление измеряли стандартным четырехзондовым методом на постоянном токе с коммутацией электрического тока, протекающего через образец. Исследования структуры и магнитных свойств выполнены в Центре коллективного пользования “Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов” ИФМ УрО РАН.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены температурные зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho(T)$  исследованных сплавов. Видно, что  $\rho(T)$  всех сплавов имеет металлический вид, т.е. электросопротивление возрастает с ростом температуры. По величине удельного сопротивления это либо хорошие металлы ( $\text{Co}_2\text{MnSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGe}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnSn}$ ), либо высокорезистивные металлические соединения ( $\text{Co}_2\text{MnAl}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ ).

Необходимо отметить следующее. Несмотря на достаточно высокие значения  $\rho \sim 240\text{--}290$  мкОм см сплавов  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ , что можно было бы объяснить наличием в них беспорядка, их температурный коэффициент сопротивления (ТКС) положителен. С другой стороны, известно так называемое правило Муиджи (Mooij rule) [24], согласно которому в металлических системах с небольшим статическим беспорядком, т.е. с удельным сопротивлением  $\rho > 150\text{--}200$  мкОм см, обычно наблюдается отрицательный ТКС. Возможно, что в случае соединений Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  правило Муиджи не выполняется из-за особенностей их электронной структуры, что требует дополнительных исследований.

На рис. 3 и 4 приведены полевые зависимости намагниченности изученных сплавов при  $T = 5$  К и  $T = 300$  К, соответственно. Видно, что в полях свыше 3–5 кЭ намагниченность всех сплавов вы-

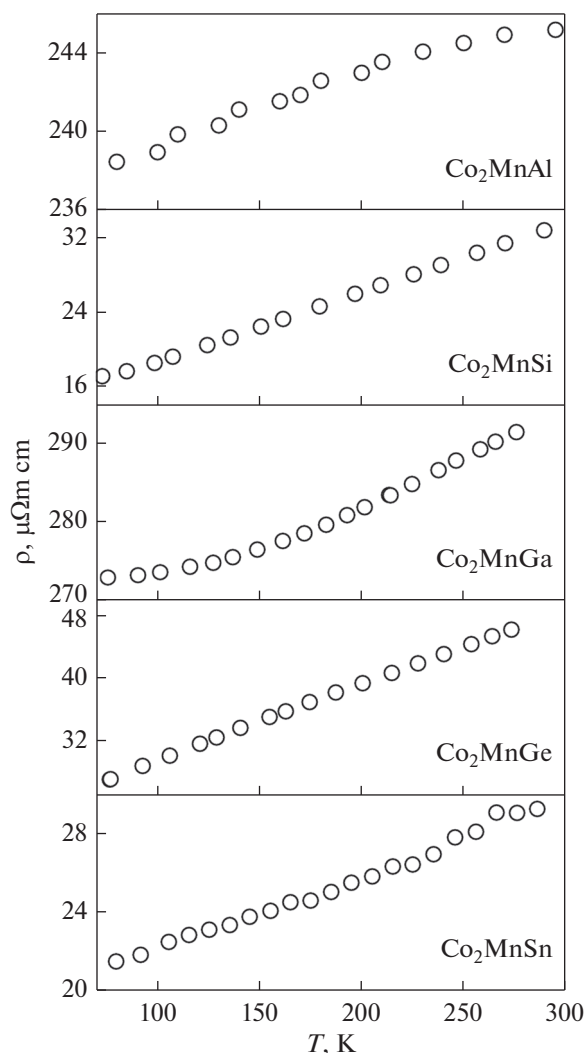


Рис. 2. Температурные зависимости электросопротивления сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ).

ходит на насыщение. Были определены значения намагниченности насыщения  $M_{S\text{exp}}$ , которые определяли как значения  $M$  в поле 30 кЭ при  $T = 5$  К (см. табл. 2). Для сравнения в таблице представлены данные расчетов намагниченности насыщения  $M_{S\text{calc}}$  взятые из работ [25, 26].

Как видно из табл. 2, экспериментальные и расчетные значения  $M_S$  хорошо согласуются, за исключением сплава  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ , для которого различие между экспериментальными и расчетными данными составляет около 17%.

В табл. 2 также представлены данные об электросопротивлении при комнатной температуре, расчетные значения коэффициента спиновой поляризации носителей тока, рассчитанные с использованием данных [25, 26], и температуры Кюри [27] системы сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ).

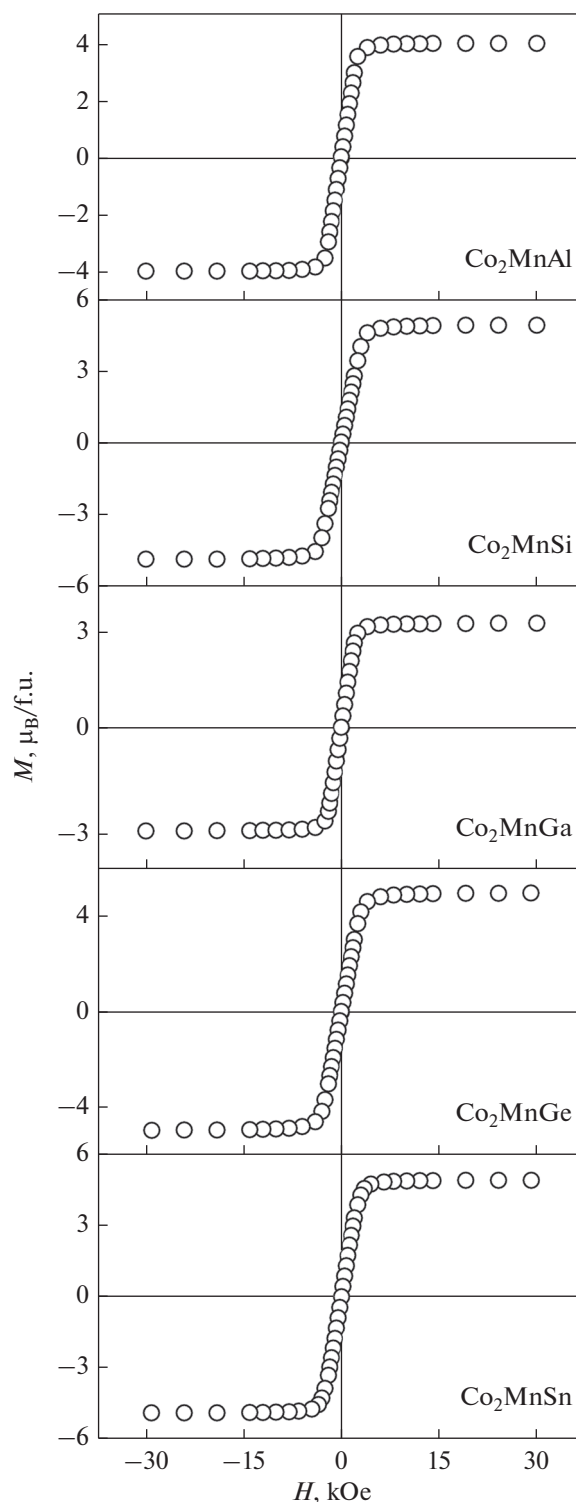
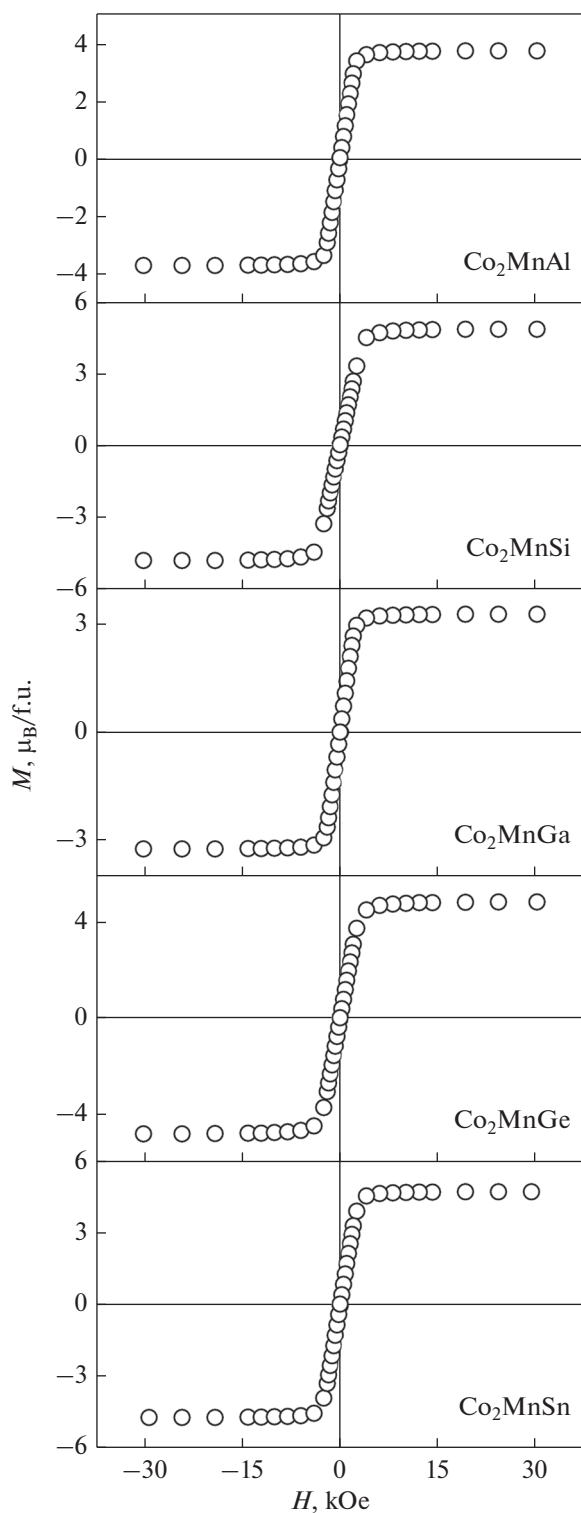


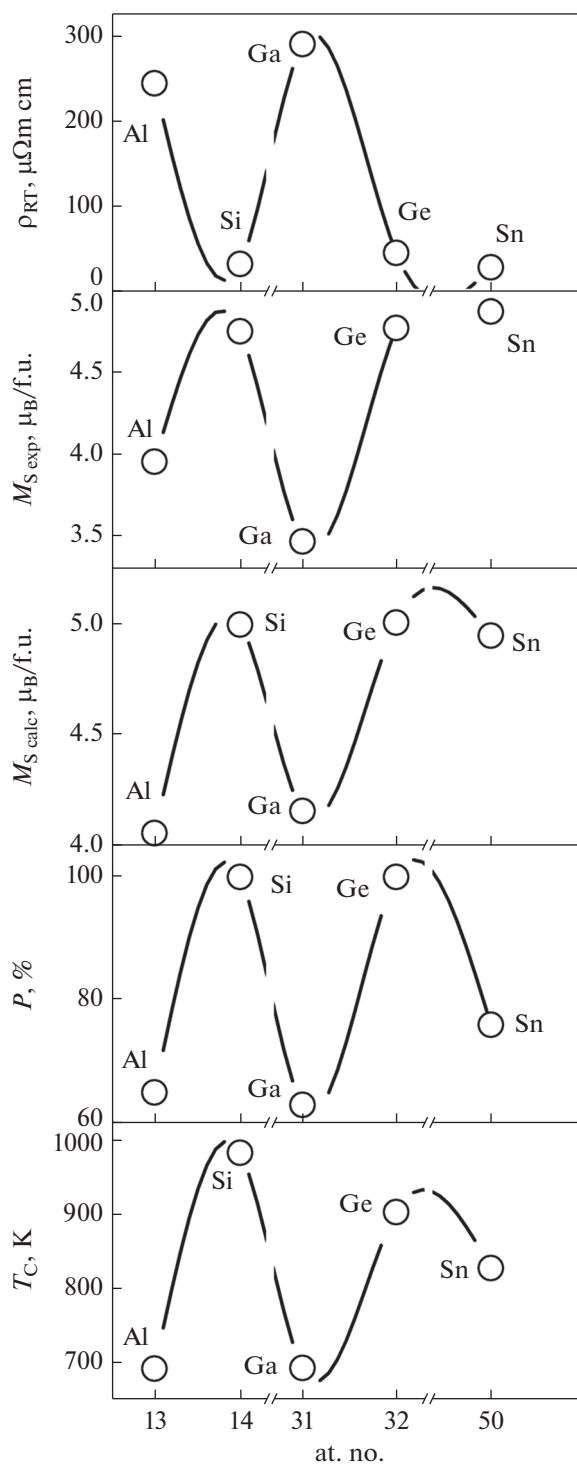
Рис. 3. Кривые намагничивания сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) при  $T = 5$  К.

Ранее в работах [20–22, 28, 29] было продемонстрировано, что при изменении одной из компонент в ПМФ- и СБП-сплавах Гейслера  $X_2YZ$ , т.е. при варьировании числа валентных электронов,



**Рис. 4.** Кривые намагничивания сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) при  $T = 300 \text{ K}$ .

имеют место изменения их электронных и магнитных характеристик. Для исследованных нами сплавов  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  число валентных электронов равно 28, а для сплавов  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ ,



**Рис. 5.** Зависимость электросопротивления при комнатной температуре  $\rho_{\text{RT}}$ , намагниченности насыщения  $M_{\text{S exp}}$  и  $M_{\text{S calc}}$  [25, 26], коэффициента спиновой поляризации  $P$  [25, 26] и температуры Кюри  $T_{\text{C}}$  [27] от атомного номера элемента  $Z$  сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ). Каждой точке на графиках соответствует конкретное соединение системы  $\text{Co}_2\text{MnZ}$ , но для удобства указаны лишь элементы  $Z$ .

**Таблица 2.** Электрическое сопротивление при комнатной температуре  $\rho_{RT}$ , экспериментальное и расчетное значение намагниченности насыщения  $M_{S\text{exp}}$  и  $M_{S\text{calc}}$ , коэффициент спиновой поляризации  $P$  и температура Кюри  $T_C$  системы сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn}$ )

Соединение	At. no. (Al, Si, Ga, Ge, Sn)	$M_{S\text{exp}}$ , $\mu_B/\text{f.u.}$ $T = 5 \text{ K}$	$\rho_{RT}$ , мкОм см	$M_{S\text{calc}}$ , $\mu_B/\text{f.u.}$	$P$ , %	$T_C$ , К [27]
$\text{Co}_2\text{MnAl}$	13	3.96	245	4.06 [25]	65 [25]	693
$\text{Co}_2\text{MnSi}$	14	4.76	33	5.00 [25]	100 [25]	985
$\text{Co}_2\text{MnGa}$	31	3.47	291	4.16 [25]	63 [25]	694
$\text{Co}_2\text{MnGe}$	32	4.78	46	5.01 [25]	100 [25]	905
$\text{Co}_2\text{MnSn}$	50	4.88	29	4.95 [26]	76 [26]	829

$\text{Co}_2\text{MnGe}$  и  $\text{Co}_2\text{MnSn}$  это число равно 29, следовательно, заметные изменения электронных и магнитных свойств (см. табл. 2) нельзя объяснить разницей в числе валентных электронов.

На рис. 5 показаны зависимости электросопротивления при комнатной температуре  $\rho_{RT}$ , намагниченности насыщения  $M_{S\text{exp}}$  и  $M_{S\text{calc}}$ , коэффициента спиновой поляризации  $P$  и температуры Кюри  $T_C$  от атомного номера компоненты  $Z$  сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$ . Видно, что существует определенная корреляция между электронными и магнитными параметрами исследованных соединений. Так минимумы на кривых электросопротивления соответствуют максимумам на кривых намагниченности насыщения, коэффициента спиновой поляризации и температуры Кюри, а максимальным значениям  $\rho_{RT}$  сплавов  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  соответствуют минимальные значения  $M_{S\text{exp}}$ ,  $M_{S\text{calc}}$ ,  $P$  и  $T_C$ .

Особый интерес представляют два соединения из этой системы:  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGe}$ . Согласно работам [23, 25, 30], эти соединения являются ПМФ-материалами с близкой к 100% спиновой поляризацией носителей тока.

Как видно из рис. 5, значения электросопротивления для них относительно малы, а значения намагниченности, напротив, достаточно большие. Именно так и должно быть, когда в проводимости участвуют только “металлические” носители тока, которые дают большой вклад в намагниченность, что, по-видимому, и приводит к высокой спиновой поляризации носителей. В области комнатных температур такое возможно в сплавах Гейслера с относительно высокими значениями температуры Кюри (рис. 5).

Представленные на рис. 5 результаты демонстрируют связь между электронными и магнитными характеристиками исследованных соединений Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  и атомным номером элемента  $Z$ , что, по-видимому, указывает на изменения электронной зонной структуры, возникающей при варьировании  $Z$ -компоненты. Подобные корреляции должны иметь место как между другими электронными и магнитными параметрами этих соедине-

ний, так и в других сплавах Гейслера  $X_2YZ$ . Это может быть использовано при подборе материалов с оптимальными характеристиками для устройств спинтроники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований магнитных и электрических характеристик соединений Гейслера  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn}$ ) установлено, что в сплавах  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  и  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  электросопротивление  $\rho \sim 240\text{--}290$  мкОм см, а температурный коэффициент сопротивления является положительным, в то время, как согласно работам Муиджи, при таких высоких значениях  $\rho$  этот коэффициент должен быть отрицательным.

Установлена корреляция между электронными и магнитными характеристиками исследованных соединений и атомным номером элемента  $Z$ , что указывает на изменения электронной зонной структуры в сплавах  $\text{Co}_2\text{MnZ}$ . По-видимому, подобная взаимосвязь должна иметь место и в других сплавах Гейслера  $X_2YZ$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема “Спин” № АААА-А18-118020290104-2), при частичной поддержке РФФИ № 20-32-90065 и Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006). Авторы выражают благодарность Н.Г. Бебенину за полезное обсуждение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graf T., Felser C., Parkin S.S.P. Simple rules for the understanding of Heusler compounds // Prog. Solid. State Ch. 2011. V. 39. P. 1.
2. Manna K., Sun Y., Muechler L., Kübler J., Felser C. Heusler, Weyl, and Berry // Nat. Rev. Mater. 2018. V. 3. P. 244.
3. Elphick K., Frost W., Samiepour M., Kubota T., Takahashi K., Sukegawa H., Mitani S., Hirohata A. Heusler alloys for spintronic devices: review on recent develop-

- ment and future perspectives // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2021. V. 22. P. 235.
4. *Buchel'nikov V.D., Sokolovskiy V.V.* Magnetocaloric Effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler Alloys // *Phys. Met. Metal.* 2011. V. 112. P. 633.
  5. *Wang R.L., Yan J.B., Xu L.S., Marchenkov V.V., Chen S.S., Tang S.L., Yang C.P.* Effect of Al doping on the martensitic transition and magnetic entropy change in Ni–Mn–Sn alloys // *Sol. State Comm.* 2011. V. 151. P. 1196.
  6. *Pushin V., Kuranova N., Marchenkova E., Pushin A.* Design and Development of Ti–Ni, Ni–Mn–Ga and Cu–Al–Ni-Based Alloys with High and Low Temperature Shape Memory Effects // *Materials.* 2019. V. 12. P. 2616.
  7. *Klimczuk T., Wang C.H., Gofryk K., Ronning F., Winterlik J., Fecher G.H., Griveau J.-C., Colineau E., Felser C., Thompson J.D., Safarik D.J., Cava R.J.* Superconductivity in the Heusler family of intermetallics // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 85. P. 174505.
  8. *Nishino Y., Kato M., Asano S., Soda K., Hayasaki M., Mizutani U.* Semiconductorlike Behavior of Electrical Resistivity in Heusler-type  $\text{Fe}_2\text{VAl}$  Compound // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79. P. 1909.
  9. *Chadov S., Qi X., Kübler J., Fecher G.H., Felser C., Zhang S.C.* Tunable multifunctional topological insulators in ternary Heusler compounds // *Nature Mater.* 2010. V. 9. P. 541.
  10. *Yan B., de Visser A.* Half-Heusler topological insulators // *MRS Bull.* 2014. V. 39, P. 859.
  11. *Ирхин В.Ю., Кацнельсон М.И.* Полуметаллические ферромагнетики // *УФН.* 1994. Т. 164. С. 705.
  12. *Katsnelson M.I., Irkhin V.Yu., Chioncel L., Lichtenstein A.I., De Groot R.A.* Half-metallic ferromagnets: from band structure to many-body effects // *Rev. Mod. Phys.* 2008. V. 80. P. 315.
  13. *Marchenkov V.V., Kourov N.I., Irkhin V.Yu.* Half-metallic ferromagnets and spin gapless semiconductors // *Phys. Met. Metallog.* 2018. V. 119. P. 64.
  14. *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. С. 1133.
  15. *Wang X.L.* Proposal for a new class of materials: spin gapless semiconductors // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. P. 156404.
  16. *Wang X.T., Cheng Z.X., Wang J.L., Wang X.L., Liu G.D.* Recent advances in the Heusler based spin-gapless semiconductors // *J. Mater. Chem. C.* 2016. V. 4. P. 7176.
  17. *Viglin N.A., Ustinov V.V., Demokritov S.O., Shorikov A.O., Bebenin N.G., Tselikhovskaya V.M., Pavlov T.N., Patrakov E.I.* Electric measurement and magnetic control of spin transport in InSb-based lateral spin devices // *Phys. Rev. B.* 2017. V. 96. P. 235303.
  18. *Osipov V.V., Bratkovsky A.M.* A class of spin injection-precession ultrafast nanodevices // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 2118.
  19. *Fecher G.H., Felser C.* Substituting the main group element in cobalt–iron based Heusler alloys:  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{1-x}\text{Si}_x$  // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 1582.
  20. *Marchenkov V.V., Perevozchikova Yu.A., Kourov N.I., Irkhin V.Yu., Eisterer M., Gao T.* Peculiarities of the electronic transport in half-metallic Co-based Heusler alloys // *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. V. 459. P. 211.
  21. *Марченков В.В., Ирхин В.Ю., Перевозчикова Ю.А., Терентьев П.Б., Семянникова А.А., Марченкова Е.Б., Eisterer M.* Кинетические свойства и полуметаллический магнетизм в сплавах Гейслера  $\text{Mn}_2\text{YAl}$  // *ЖЭТФ.* 2019. Т. 155. С. 1083.
  22. *Перевозчикова Ю.А., Семянникова А.А., Доможирова А.Н., Терентьев П.Б., Марченкова Е.Б., Патраков Е.И., Eisterer M., Коренистов П.С., Марченков В.В.* Экспериментальное наблюдение аномалий электрических, магнитных и гальваномагнитных свойств сплавов Гейслера на основе кобальта при изменении содержания переходных элементов // *ФНТ.* 2019. Т. 45. С. 921.
  23. *Jourdan M., Minar J., Braun J., Kronenberg A., Chadov S., Balke B., Gloskovskii A., Kolbe M., Elmers H.J., Schoenhense G., Ebert H., Felser C., Klaeui M.* Direct observation of half-metallicity in the Heusler compound  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 3974.
  24. *Mooij J.H.* Electrical conduction in concentrated disordered transition metal alloys // *Phys. Stat. Sol. (a).* 1973. V. 17. P. 521.
  25. *Candan A., Ugur G., Charifi Z., Baaziz H., Ellialtuglu M.R.* Electronic structure and vibrational properties in cobalt-based full-Heusler compounds: A first principle study of  $\text{Co}_2\text{MnX}$  (X = Si, Ge, Al, Ga) // *J. Alloys Compd.* 2013. V. 560. P. 215.
  26. *Singh M., Saini H.S., Thakur J., Kashyap M.K.* Enhancement of spin polarization via Fermi level tuning in  $\text{Co}_2\text{MnSn}_{1-x}\text{Sb}_x$  (x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) Heusler alloys // *AIP Conf. Proc.* 2014. V. 1591. P. 1606.
  27. *Webster P.J., Ziebeck K.R.A.* in *Alloys and Compounds of d-Elements with Main Group Elements, Part 2*, Edited by H.R.J. Wijn, Landolt-Bornstein, New Series, Group III, Vol. 19/c. Springer. Berlin. 1988. P. 75.
  28. *Buschow K.H.J., van Engen P.G.* Magnetic and magneto-optical properties of Heusler alloys based on aluminum and gallium // *J. Magn. Magn. Mater.* 1981. V. 25. P. 90.
  29. *Коуров Н.И., Марченков В.В., Белозерова К.А., Вебер Х.В.* Гальваномагнитные свойства сплавов Гейслера  $\text{Fe}_2\text{YZ}$  (Y = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni; Z = Al, Si) // *ЖЭТФ.* 2015. V. 148. P. 966.
  30. *Ouardi S., Fecher G.H., Balke B., Beleanu A., Kozina X., Stryganyuk G., Felser C.* Electronic and crystallographic structure, hard x-ray photoemission, and mechanical and transport properties of the half-metallic Heusler compound  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  // *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84. P. 155122.