

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 537.622: 537.638.5

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-118-124>

Поступила в редакцию 21.02.2018

Received 21.02.2018

Г. А. Говор<sup>1</sup>, А. О. Ларин<sup>1</sup>, В. И. Митюк<sup>1</sup>, Г. С. Римский<sup>1</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, БеларусьМАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ 

**Аннотация.** Методом Стокбаргера – Бриджмена были получены монокристаллы  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ . Исследовано влияние внешнего магнитного поля напряженностью до 10 Тл на фазовые переходы в монокристалле  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ . Установлено, что магнитоструктурный фазовый переход в  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  сопровождается изменением энтропии  $\Delta S_m$ , что обусловлено трансформацией кристаллической структуры. При температуре выше температуры магнитоструктурного перехода  $T_u = 290$  К выявлено существование нестабильной магнитной структуры. Магнитокалорические характеристики исследуемого материала определялись косвенным методом расчета на основе термодинамических соотношений Максвелла и уравнения Клапейрона – Клаузиуса.

**Ключевые слова:** магнитокалорический эффект, фазовый переход, кристалл, намагниченность, энтропия

**Для цитирования.** Магнитокалорические свойства кристалла  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  / Г. А. Говор [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 118–124. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-118-124>

G. A. Govor<sup>1</sup>, A. O. Larin<sup>1</sup>, V. I. Mitsiuk<sup>1</sup>, G. S. Rimskiy<sup>1</sup>, T. M. Tkachenka<sup>2</sup><sup>1</sup>Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, BelarusMAGNETOCALORIC PROPERTIES OF THE SINGLE CRYSTAL  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ 

**Abstract.** The Stockbargard – Bridgman method yielded single crystals  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ . The effect of an external magnetic field with an intensity of up to 10 T on phase transitions in the single crystal  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  is studied. It is established that the magnetostructural phase transition in  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  is accompanied by a change in the entropy  $\Delta S_m$ , which is due to the transformation of the crystal structure. At temperatures above the temperature of the magnetostructural transition  $T_u = 290$  K, the existence of an unstable magnetic structure is obtained. The magnetocaloric characteristics of the material under study are determined by an indirect calculation method based on the Maxwell thermodynamic relations and the Clapeyron – Clausius equation.

**Keywords:** magnetocaloric effect, phase transition, single crystal, magnetization, entropy

**For citation.** Govor G. A., Larin A. O., Mitsiuk V. I., Rimskiy G. S., Tkachenka T. M. Magnetocaloric properties of the single crystal  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ . *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 118–124. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-118-124>

**Введение.** В последние годы значительно вырос интерес к возможностям магнитного охлаждения с помощью магнитных – твердотельных хладагентов и созданию рефрижераторов, основанных на таком охлаждении [1–3]. Причиной этого интереса является перспектива снижения в магнитных рефрижераторах затрат энергии на 20–30 % по сравнению с холодильными устройствами, работающими по технологии газового сжатия. Кроме того, использование магнитных рефрижераторов позволило бы исключить выброс вредных газовых составляющих.

Магнитокалорический эффект (МКЭ) достигает наибольшего значения в области магнитных фазовых переходов. К числу материалов, обладающих данным эффектом, относятся соединения  $Gd_5(Si_2Ge_2)$  [4–5], Fe-Rh [6–8], сплавы Гейслера [9–11], а также  $MnAs$  [12–15].

<sup>1</sup> Материал для магнитного холодильника: пат. 19913 Респ. Беларусь, МПК F 25B 21/00, F 25B 9/00, C 09K 5/14, H 01L 37/04 / В. И. Митюк, Г. А. Говор, Н. Ю. Панкратов, С. А. Никитин; заявитель НПЦ НАН Беларуси по материаловедению. № а 20121487; заявл. 25.10.2012; опубл. 28.02.2016 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2016. № 1. С. 111–112; Материал для магнитных рефрижераторов на основе монокристаллов арсенида марганца: пат. 16493 Респ. Беларусь, МПК С 30В 29/10, H 01F 1/01, C 01G 45/00 / В. И. Митюк, Г. А. Говор, В. М. Рыжковский; НПЦ НАН Беларуси по материаловедению. № а 20101785; заявл. 10.12.2010; опубл. 30.10.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2012. № 4. С. 120–121.

Цель работы – синтез монокристалла и поликристаллического порошка  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ , изучение магнитных свойств и МКЭ в твердом растворе  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$ , обладающем магнитным фазовым переходом в области комнатных температур.

**Методики эксперимента.** Монокристаллы  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  были получены выращиванием по методу Стокбаргера – Бриджмена в вакуумированных кварцевых ампулах с коническим накопечником. Диаметр используемой ампулы составлял 6–10 мм при угле конуса ампулы  $45^\circ$ . Ампула опускалась из зоны расплава вдоль зоны кристаллизации со скоростью 2–3 мм/ч. Для улучшения условий зарождения и роста монокристаллов внутренняя поверхность кварцевой ампулы покрывалась тонким слоем оксида алюминия.

Для определения фазового состава были измерены дифрактограммы в  $CuK_\alpha$ -излучении на порошковых образцах при  $T = 285$  К. Анализ дифрактограмм показал, что образцы являются однофазными. Из результатов рентгенографических исследований следует, что  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  обладает кристаллической структурой типа NiAs с пространственной группой  $P6/mmm$ .

Для определения изотермического изменения энтропии в области перехода были проведены измерения намагниченности в статических полях до 10 Тл. Изотермы намагничивания измерялись по индукционной методике на вибрационном магнитометре Vibrating sample magnetometer (VSM) компании Cryogenic Limited.

**Исследование магнитных свойств в области фазового перехода.** Результаты измерений температурных зависимостей намагниченности  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  при напряженности магнитного поля 0,02 и 1,0 Тл приведены на рис. 1, 2.

Из приведенных результатов видно, что разрушение упорядоченного ферромагнитного состояния для  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  в результате магнитоструктурного фазового перехода 1-го рода наблюдается при нагреве при температуре  $T_u = 290$  К и «появление» магнитного порядка – при  $T_{u1} = 280$  К.

Результаты измерений температурных зависимостей намагниченности монокристалла  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  в полях до 1,0 Тл приведены на рис. 3. Видно, что имеет место восстановление ферромагнитного состояния выше температуры фазового магнитного перехода 1-го рода  $T_u = 290$  К. Были выполнены измерения полевых зависимостей намагниченности в магнитном поле до 1,0 Тл при последовательном повышении температуры (с небольшим шагом  $\Delta T$ ) перехода (см. рис. 3). При температурах вблизи  $T_u$  наблюдаются скачки намагниченности в полях, превышающих

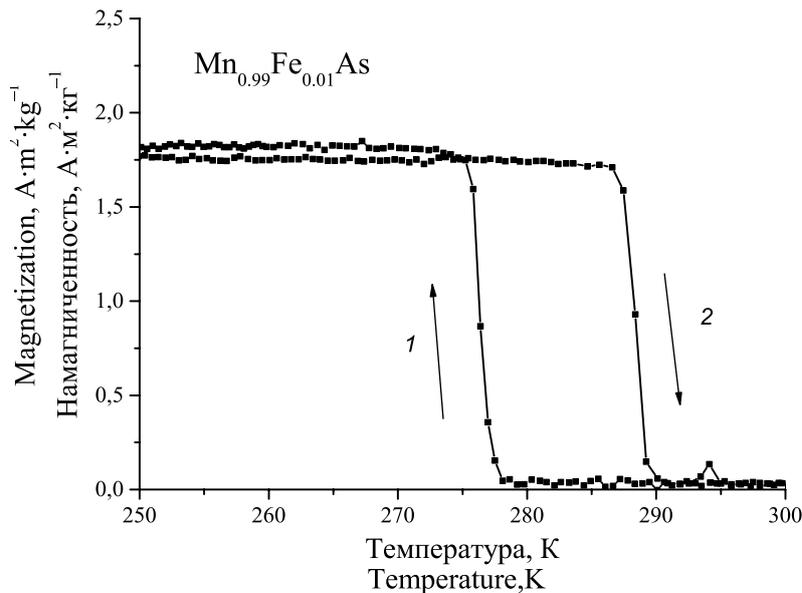


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  в магнитном поле напряженностью 0,02 Тл при нагреве и охлаждении (1 и 2 соответственно)

Fig. 1. Temperature dependences of the magnetization of  $Mn_{0,99}Fe_{0,01}As$  in a magnetic field with an intensity of 0.02 T at heating and cooling (1 and 2, respectively)

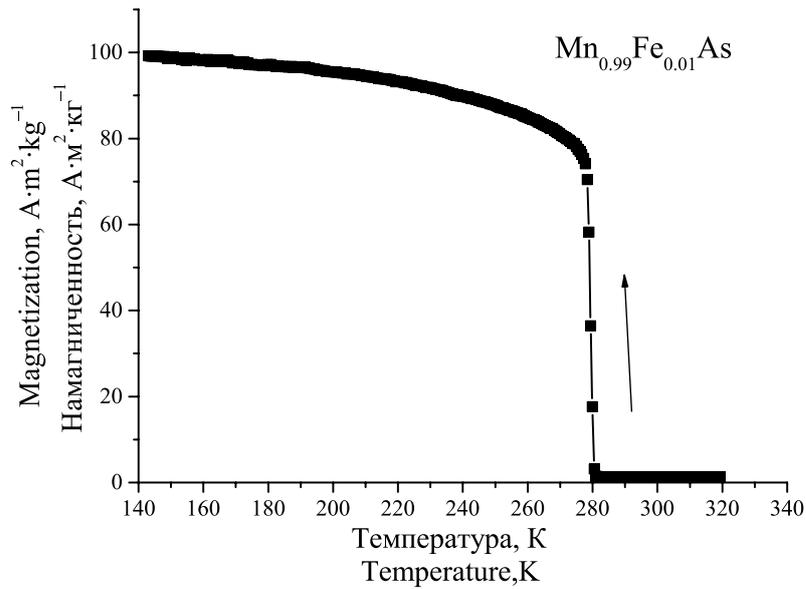


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  при напряженности магнитного поля 1,0 Тл  
 Fig. 2. Temperature dependences of the magnetization of  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  at a magnetic field intensity of 1.0 T

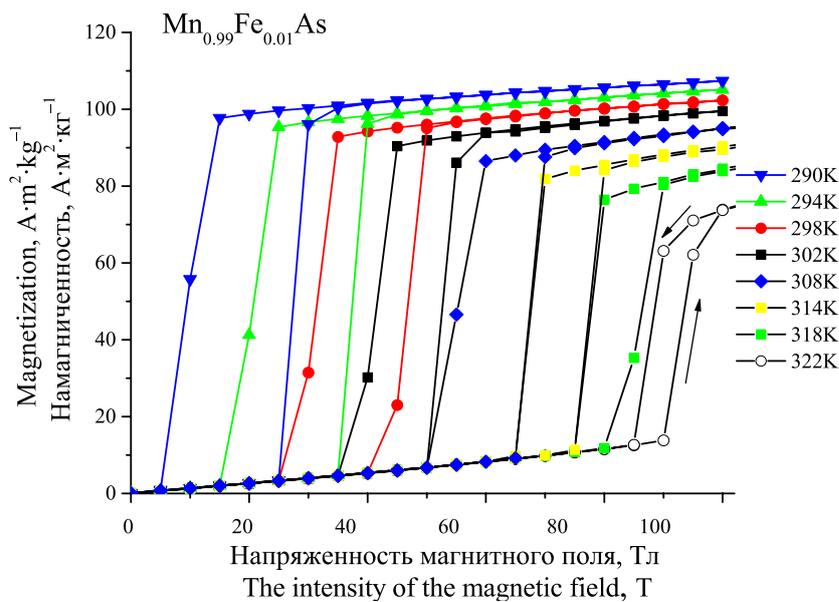


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  при нагреве и охлаждении вблизи температуры фазового перехода

Fig. 3. Field dependences of the magnetization of  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  during heating and cooling near the phase transition temperature

критическое значение  $H_{cr}$ . Этот эффект связан с тем, что при  $H > H_{cr}$  магнитное поле индуцирует в парамагнитной фазе ферромагнитное упорядочение. Вблизи  $H_{cr}$  наблюдается заметный полевой гистерезис, что указывает на сосуществование метастабильных парамагнитных и ферромагнитных фаз.

Изотермическое изменение энтропии ( $\Delta S$ ) при заданном изменении магнитного поля  $H$  рассчитано с помощью соотношения Максвелла:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_{P,H}, \quad (1)$$

где  $S$  – энтропия,  $I$  – намагненность. Для изотермически-изобарического процесса получим

$$dS = \left( \frac{\partial I}{\partial T} \right)_H dH. \tag{2}$$

Отсюда для изменения энтропии по (1) при изменении внешнего магнитного поля от 0 до  $H_0$  можно с учетом (2) приближенно записать

$$\Delta S = \frac{1}{T_2 - T_1} \left[ \int_0^{H_0} I(T_2, H) dH - \int_0^{H_0} I(T_1, H) dH \right]. \tag{3}$$

Соотношение в виде (3) использовалось для численного определения температурной зависимости изменения энтропии  $\Delta S(T)$  из серии экспериментальных изотерм намагничивания, снятых последовательно через небольшой интервал температур  $\Delta T$ .

Расчетная температурная зависимость магнитокалорического эффекта в монокристалле  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  приведена на рис. 4. Максимальное значение магнитокалорического эффекта наблюдается при температуре фазового магнитного перехода 1-го рода  $T_u = 290$  К.

Из изотерм намагничивания были рассчитаны изотермические изменения энтропии ( $\Delta S$ ) при заданном изменении магнитного поля для ряда температур и построены зависимости  $-\Delta S(T)$ . Было найдено, что максимальное изменение магнитной энтропии для  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  составляет примерно 28 Дж/кг·К для изменения магнитного поля от 0 до 1 Тл.

Оценка, вычисленная по формуле (3), является несколько некорректной, поскольку при таких вычислениях не учитывается наличие сильного гистерезиса намагненности в области перехода, что является характерным для фазовых переходов 1-го рода.

Оценить изменение энтропии магнитной подсистемы можно на основе уравнения Клапейрона – Клаузиуса, справедливого для фазовых переходов 1-го рода. Если при этом переходе происходит скачок намагненности  $\Delta I$  при критическом поле  $H_{cr}$ , то выполняется соотношение

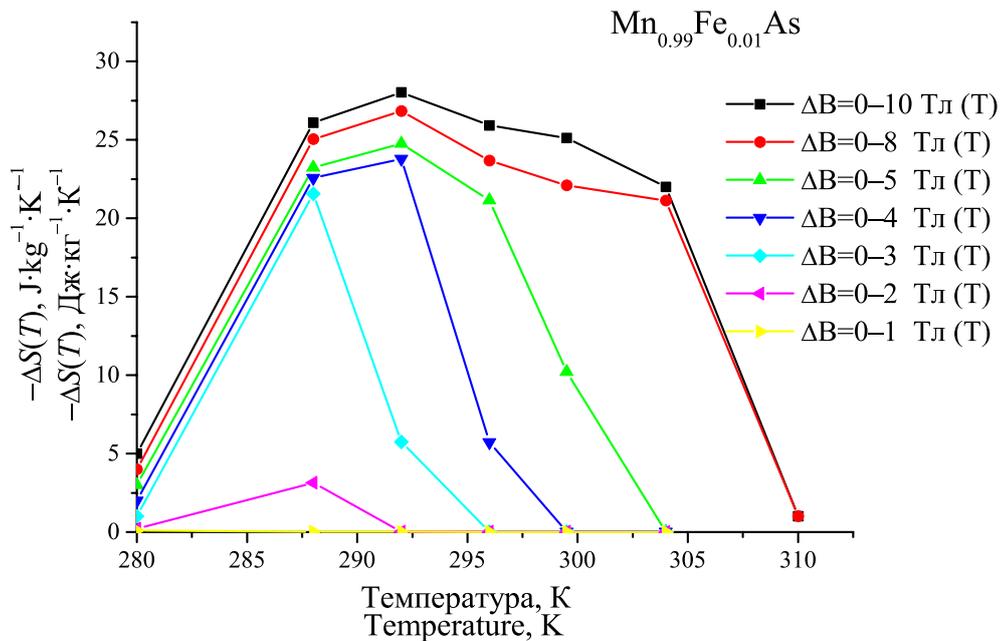


Рис. 4. Зависимость магнитокалорического эффекта в монокристалле  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  при соответствующем увеличении магнитного поля

Fig. 4. Dependence of the magnetocaloric effect in the single crystal  $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$  with a corresponding increase in the magnetic field

$$\frac{dH_{cr}}{dT} = \frac{-\Delta S_T}{\Delta I}, \quad (4)$$

где  $\Delta S_T$  – скачок энтропии вследствие структурной трансформации кристаллической решетки.

Учитывая, что  $\Delta I = \Delta\sigma \cdot \rho$ ,  $\Delta\sigma = 100 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^{-1}$ ,  $\rho = 6,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $dH_{cr}/dT = 2,0 \text{ Тл}/\text{К}$  [14], из (4) получим  $\Delta S_m = 16,3 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса учитывает, что вследствие магнитоупругого перехода происходят скачки как намагниченности, так и объема элементарной кристаллической ячейки. Вычисления по формуле Максвелла могут давать завышенные значения  $\Delta S$ , поскольку вносится ошибка из-за скачкообразного изменения намагниченности почти вблизи  $H_{cr}$ , а также сосуществования ферро- и парамагнитной фаз в области перехода.

**Заключение.** Как следует из полученных данных, магнитоупругий фазовый переход в  $\text{Mn}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}\text{As}$  сопровождается сильным изменением магнитной энтропии  $\Delta S_m$  и энтропии, связанной с трансформацией кристаллической структуры. В величину  $\Delta S_m$  должны входить магнитоупругие вклады, обусловленные зависимостью обменных интегралов от межатомных расстояний и намагниченности от объема элементарной ячейки  $V_0$ . Скачок энтропии в области перехода также происходит из-за того, что энергия электронной подсистемы резко зависит от объема  $V_0$ . Следовательно, магнитоупругие взаимодействия играют важную роль в области перехода, что, по-видимому, проявляется в колоссальном магнитокалорическом эффекте, который индуцируется при комбинированном воздействии магнитного поля и давления.

На полевых зависимостях намагниченности при температурах вблизи магнитоупругого фазового перехода 1-го рода наблюдаются скачки намагниченности в полях, превышающих критическое значение  $H_{cr}$ . Этот эффект связан с тем, что при  $H > H_{cr}$  магнитное поле индуцирует в парамагнитной фазе ферромагнитное упорядочение. Наблюдается заметный полевой гистерезис  $H_{cr}$ , что также указывает на существование метастабильных парамагнитных и ферромагнитных фаз.

Таким образом, реализация высоких значений магнитокалорического эффекта за счет изменения магнитной энтропии в области магнитного перехода лимитируется наличием неоднородных магнитных состояний и смеси гексагональных и ромбоэдрических кристаллических фаз в области перехода.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т16Р-170).

**Acknowledgements.** The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. T16P-170).

### Список использованных источников

1. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices / V. Franco [et al.] // Prog. Mater. Sci. – 2018. – Vol. 93. – P. 112–232. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.005>
2. Gschneidner, K. A. The Magnetocaloric Effect, Magnetic Refrigeration and Ductile Intermetallic Compounds / K. A. Gschneidner // Acta Mater. – 2009. – Vol. 57, № 1. – P. 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.08.048>
3. Gschneidner, K. A. Recent developments in magnetocaloric materials / K. A. Gschneidner, V. K. Pecharsky, A. V. Tsokol // Rep. Progr. Phys. – 2005. – Vol. 68, № 6. – P. 1479–1539. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/R04>
4. Melikhov, Y.  $\text{Gd}_3(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$  system – updated phase diagram / Y. Melikhov, R. L. Hadimani, A. Raghunathan // J. Magn. Magn. Mater. – 2015. – Vol. 395. – P. 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.062>
5. Zou, J. D. Magnetocaloric and barocaloric effects in a  $\text{Gd}_3\text{Si}_2\text{Ge}_2$  compound / J. D. Zou // Chin. Phys. B. – 2012. – Vol. 21, № 5. – P. 037503. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/3/037503>
6. The magnetocaloric effect in  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  compound. / S. A. Nikitin [et al.] // Phys. Lett. A. – 1990. – Vol. 148, № 6/7. – P. 363–366. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(90\)90819-A](https://doi.org/10.1016/0375-9601(90)90819-A)
7. Giant adiabatic temperature change in FeRh alloys evidenced by direct measurements under cyclic conditions / A. Chirkova [et al.] // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 106. – P. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.11.054>
8. Barocaloric and magnetocaloric effects in  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  / E. Stern-Taulats [et al.] // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 89, № 21. – P. 214105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.214105>

9. Структура и свойства  $\text{MnNi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$  ( $0,10 \leq x \leq 0,25$ ) / М. Будзинский [и др.] // ФТТ. – 2015. – Т. 57, № 12. – С. 2339–2344.
10. Magnetostrictive and magnetocaloric effects in  $\text{Mn}_{0,89}\text{Cr}_{0,11}\text{NiGe}$  / A. P. Sivachenko [et al.] // *Low Temperature Physics*. – 2013. – Vol. 39, № 12. – P. 1051–1054. <https://doi.org/10.1063/1.4843196>
11. Direct measurement of the magnetocaloric effect in  $\text{MnZnSb}$  intermetallic compound / N. Y. Pankratov [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – Vol. 470. – P. 46–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.035>
12. Mitsiuk, V. I. Phase transitions and magnetocaloric effect in  $\text{MnAs}$ ,  $\text{MnAs}_{0,99}\text{P}_{0,01}$ , and  $\text{MnAs}_{0,98}\text{P}_{0,02}$  single crystals / V. I. Mitsiuk, G. A. Govor, M. Budzynski // *Inorg. Mater.* – 2013. – Vol. 49. – P. 14–17. <https://doi.org/10.1134/S002016851301007X>
13. Features of the formation of magnetocaloric phenomena in the systems  $\text{Mn}_{1-r}\text{Ti}_r\text{As}$  and  $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{NiGe}$  / V. I. Val'kov [et al.] // *Phys. Solid State*. – 2018. – Vol. 60, № 6. – P. 1113–1121. <https://doi.org/10.1134/S1063783418060343>
14. Magnetostructural phase transitions in manganese arsenide single crystals / V. I. Mitsiuk [et al.] // *Physics of the Solid State*. – 2012. – Vol. 54, № 10. – P. 1865–1872. <https://doi.org/10.1134/S106378341806034310.1134/S1063783412100241>
15. Giant magnetocaloric effect in the region of magnetic phase transition in  $\text{Mn}(\text{As,Sb})$  intermetallic compounds / N. Yu. Pankratov [et al.] // *Solid State Phenomena*. – 2012. – Vol. 190. – P. 343–345. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.190.343>

## References

1. Franco V., Blazquez J. S., Ipus J. J., Law J. Y., Moreno-Ramirez L. M., Conde A. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 93, pp. 112–232. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.005>
2. Gschneidner K. A. The Magnetocaloric Effect, Magnetic Refrigeration and Ductile Intermetallic Compounds. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, no. 1, pp.18–28. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.08.048>
3. Gschneidner K. A., Pecharsky V. K., Tsokol A. V. Recent developments in magnetocaloric materials. *Reports on Progress in Physics*, 2005, vol. 68, no. 6, pp. 1479–1539. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/R04>
4. Melikhov Y., Hadimani R. L., Raghunathan A.  $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$  system – updated phase diagram. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 395, pp. 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.062>
5. Zou J. D. Magnetocaloric and barocaloric effects in a  $\text{Gd}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$  compound. *Chinese Physics B*, 2012, vol. 21, no. 5, p. 037503. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/3/037503>
6. Nikitin S. A., Myalikguliev G., Tishin A. M., Annaorazov M. P., Asatryan K. A., Tyurin A. L. The magnetocaloric effect in  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  compound. *Physics Letters A*, 1990, vol. 148, no. 6–7, pp. 363–366. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(90\)90819-A](https://doi.org/10.1016/0375-9601(90)90819-A)
7. Chirkova A., Skokov K. P., Schultz L., Baranov N. V., Gutfleisch O., Woodcock T. G. Giant adiabatic temperature change in  $\text{FeRh}$  alloys evidenced by direct measurements under cyclic conditions. *Acta Materialia*, 2016, vol. 106, pp. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.11.054>
8. Stern-Taulats E., Planes A., Lloveras P., Barrio M., Tamarit J.-L., Pramanick S., Majumdar S., Frontera C., Manosa L. Barocaloric and magnetocaloric effects in  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$ . *Physical Review B*, 2014, vol. 89, no. 21, p. 214105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.214105>
9. Budzynski M., Val'kov V. I., Golovchan A. V., Mitsiuk V. I., Surowiec Z., Tkachenko T. M. Structure and properties of  $\text{MnNi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$  ( $0,10 \leq x \leq 0,25$ ). *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 12, pp. 2410–2416. <https://doi.org/10.1134/S1063783415120094>
10. Sivachenko A. P., Mityuk V. I., Kamenev V. I., Golovchan A. V., Val'kov V. I., Griбанov I. F. Magnetostrictive and magnetocaloric effects in  $\text{Mn}_{0,89}\text{Cr}_{0,11}\text{NiGe}$ . *Low Temperature Physics*, 2013. vol. 39, no. 12, pp. 1051–1054. <https://doi.org/10.1063/1.4843196>
11. Pankratov N. Y., Mitsiuk V. I., Ryzhkovskii V. M., Nikitin S. A. Direct measurement of the magnetocaloric effect in  $\text{MnZnSb}$  intermetallic compound. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 470, pp. 46–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.035>
12. Mitsiuk V. I., Govor G. A., Budzynski M. Phase transitions and magnetocaloric effect in  $\text{MnAs}$ ,  $\text{MnAs}_{0,99}\text{P}_{0,01}$ , and  $\text{MnAs}_{0,98}\text{P}_{0,02}$  single crystals. *Inorganic Materials*, 2013, vol. 49, pp. 14–17. <https://doi.org/10.1134/S002016851301007X>
13. Val'kov V. I., Griбанov I. F., Todris B. M., Golovchan A. V., Mitsiuk V. I. Features of the formation of magnetocaloric phenomena in the systems  $\text{Mn}_{1-r}\text{Ti}_r\text{As}$  and  $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{NiGe}$ . *Physics of the Solid State*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1113–1121. <https://doi.org/10.1134/S1063783418060343>
14. Mitsiuk V. I., Pankratov N. Yu., Govor G. A., Nikitin S. A., Smarzhetskaya A. I. Magnetostructural phase transitions in manganese arsenide single crystals. *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 1865–1872. <https://doi.org/10.1134/S106378341806034310.1134/S1063783412100241>
15. Pankratov N. Yu., Mitsiuk V. I., Krokhotin A. I., Smarzhetskaya A. I., Govor G. A., Nikitin S. A., Ryzhkovskii V. M. Giant magnetocaloric effect in the region of magnetic phase transition in  $\text{Mn}(\text{As,Sb})$  intermetallic compounds. *Solid State Phenomena*, 2012, vol. 190, pp. 343–345. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.190.343>

### Информация об авторах

**Говор Геннадий Антонович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: govor@physics.by

**Ларин Артем Олегович** – младший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: larin@physics.by

**Митюк Виктор Иосифович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mitsiuk@physics.by

**Римский Григорий Семенович** – аспирант, младший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: rimskiy@physics.by

**Ткаченко Тамара Михайловна** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры практической подготовки студентов, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: oldtaty@bsatu.by

### Information about the authors

**Gennady A. Govor** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govor@physics.by

**Artem O. Larin** – Junior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: larin@physics.by

**Viktor I. Mitsiuk** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mitsiuk@physics.by

**Grigory S. Rimskiy** – Postgraduate Student, Junior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rimskiy@physics.by

**Tamara M. Tkachenka** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Practical Training of Students, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nesavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oldtaty@bsatu.by