

УДК 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755

Для цитирования: Магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$ / А. М. Живулько, К. И. Янушкевич, Е. Г. Даниленко и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 748–755. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755.

For citation: Zhivulko A. M., Yanushkevich K. I., Danilenko E. G. et al. [Magnetic properties of $Mn_{1-x}Gd_xSe$ solid solutions]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 748–755. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755.

Магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$

А. М. Живулько¹, К. И. Янушкевич¹, Е. Г. Даниленко^{2*},
Ф. В. Зеленов², О. Н. Бандурина²

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19, пом. 5

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

*E-mail: evg.danilenko@mail.ru

Исследуются возможные материалы для спинтроники, функционирующие в экстремальных условиях, на основе селенидов марганца, замещенных гадолинием. Приводится технология синтеза твердых растворов на основе твердофазных реакций с использованием соединений $MnSe$ и $GdSe$. В результате синтезированы твердые растворы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ с концентрациями $x = 0,05; 0,1; 0,15$ и $0,5$. Синтез осуществлен в условиях вакуума 10^{-2} Па. Продукты первичного синтеза подвергались тщательному измельчению в порошки, из которых под давлением делались таблетки для гомогенизирующего отжига при 1370 К. После двухчасовой выдержки продукты синтеза закалялись в холодной воде. На завершающем этапе получены однородные прочные слитки серовато-серебристого цвета. Рентгенофазовый анализ синтезированных твердых растворов системы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ выполнен в $Si-K_{\alpha}$ -излучении в режиме измерений по точкам с шагом сканирования по углу $\Delta 2\theta = 0,03$ degree, время набора информации в точке отсчета $\Delta t = 3$ с. Определена пространственная группа симметрии и параметр элементарной кристаллической ячейки твердых растворов системы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ из рентгеноструктурного анализа. Найдена зависимость величины параметра кристаллической решетки твердых растворов от концентрации ионов гадолиния. Измерена удельная намагниченность пондеромоторным методом в магнитном поле с индукцией $B = 0,86$ Тесла и определена магнитная восприимчивость образцов в интервале температур $80 \leq T \leq 950$ К. Проведенные циклы в режиме «нагрев – охлаждение» изменения свойств не обнаружили. Определены температуры Нееля и парамагнитная температура Кюри из закона Кюри – Вейсса в зависимости от концентрации редкоземельного элемента. Установлено уменьшение температуры магнитного фазового перехода.

Ключевые слова: спинтроника, магнитная восприимчивость, пондеромоторный метод, температура Нееля, закон Кюри – Вейсса.

Magnetic properties of $Mn_{1-x}Gd_xSe$ solid solutions

A. M. Zhivulko¹, K. I. Yanushkevich¹, E. G. Danilenko²,
F. V. Zelenov², O. N. Bandurina²

¹Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus
19, P. Brovki St., Minsk, 220072, Belarus

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: evg.danilenko@mail.ru

Study of the materials for spintronics operating under extreme conditions based on manganese selenides substituted with gadolinium are investigated. The technology of synthesis of solid solutions based on solid-phase reactions using MnSe and GdSe compounds is presented. As a result, $Mn_{1-x}Gd_xSe$ solid solutions with concentrations $x = 0.05; 0.1; 0.15$ and 0.5 were synthesized. The synthesis was carried out under vacuum conditions of 10^{-2} Pa. The products of the primary synthesis were subjected to thorough grinding into powders, from which tablets were made under pressure for homogenizing annealing at 1370 K. After two hours of exposure, the synthesis products were tempered in cold water. At the final stage, homogeneous strong ingots of grayish-silver color were obtained. X-ray phase analysis of synthesized solid solutions of the $Mn_{1-x}Gd_xSe$ system was performed in $Cu-K_\alpha$ radiation in the point-by-point measurement mode with a scanning step along the angle $\Delta 2\theta = 0,03$ degree, the time of information collection at the reference point $\Delta\tau = 3$ seconds. The spatial symmetry group and the parameter of the elementary crystal cell of solid solutions of the $Mn_{1-x}Gd_xSe$ system from X-ray diffraction analysis are determined. The dependence of the parameter value of the crystal lattice of solid solutions on the concentration of gadolinium ions is found. The specific magnetization was measured by the ponderomotor method in a magnetic field with an induction of $B = 0.86$ Tesla and the magnetic susceptibility of the samples was determined in the temperature range of $80 \leq T \leq 950$ K. The cycles carried out in the heating – cooling mode did not detect a change in properties. The Neel temperatures and the paramagnetic Curie temperature are determined from the Curie – Weiss law depending on the concentration of a rare earth element. A decrease in the temperature of the magnetic phase transition is established.

Keywords: spintronics, magnetic susceptibility, ponderomotive method, Neel temperature, Curie – Weiss law.

Введение

В космической отрасли микроэлектроника должна работать в экстремальных условиях. Малые космические аппараты находятся на околоземной орбите, где температура меняется от 180 до 400 К и электроника должна функционировать при этих температурах, поэтому повышен интерес к магнитным полупроводникам, способным работать в широком диапазоне температур. В магнитных полупроводниках транспортные свойства зависят от магнитной структуры [1–6]. Корреляция намагниченности и проводимости детально исследовалась теоретически и экспериментально в манганитах [7–11]. Магнитные характеристики зависят от упругой системы, и при некоторых критических параметрах магнитная структура кардинально меняется [12–16]. Дальний магнитный порядок зависит от размерности системы [17–20]. В сульфидах марганца, замещенных 3d элементами, меняется магнитная структура [21–23]

В связи с этим, представляет интерес синтез, изучение магнитных свойств в зависимости от химического состава, температуры, магнитного поля твердых растворов при катионном замещении в системе $Mn_{1-x}Gd_xSe$. Моноселенид марганца – антиферромагнетик и полупроводник p -типа [24]. Предполагалось, что замещение катионов марганца ферромагнитным металлом Gd в твердых растворах может создать условия для проявления ферромагнитных свойств. При сохранении полупроводниковых свойств основной матрицы MnSe создается возможность для перехода от антиферромагнитного полупроводника p -типа к ферромагнитному полупроводнику с проводимостью n -типа. Цель настоящей работы – синтез твердых растворов в квазибинарном разрезе MnSe – GdSe, изучение особенностей их кристаллической структуры, а также магнитных характеристик твердых растворов в зависимости от состава и температуры.

Синтез твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$ и методы эксперимента

Образцы твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$ синтезированы методом твердофазных реакций. Моноселениды марганца и гадолиния синтезированы из порошков исходных химических элементов: electrolytic manganese metal (99,6 %); gadolinium (–40mesh, 99 % metals basis) Aldrich

chemistry; селен элементарный (осч. 17–4). На основе базовых соединений MnSe и GdSe синтезированы твердые растворы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ составов $x = 0,05; 0,1; 0,15$ и $0,5$. Синтез осуществлен в условиях вакуума 10^{-2} Па. Продукты первичного синтеза подвергались тщательному измельчению в порошки. Под давлением сформированы таблетки для гомогенизирующего отжига при 1370 К. После двухчасовой выдержки продукты синтеза закалялись в холодной воде. На завершающем этапе получены однородные прочные слитки серовато-серебристого цвета. Рентгенофазовый анализ синтезированных твердых растворов системы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ выполнен в $Cu-K\alpha$ -излучении в режиме измерений по точкам: шаг сканирования по углу $\Delta 2\theta = 0,03$ degree, время набора информации в точке отсчета $\Delta t = 3$ с. Температурные зависимости удельной магнитной восприимчивости изучены пондеромоторным методом в магнитном поле с индукцией $B = 0,86$ Тесла и интервале температур $\sim 80 \leq T \leq 950$ К [25–26]. Погрешность измерения магнитной восприимчивости образца известной массы – $\Delta\chi \pm 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$. Погрешность измерения удельной намагниченности, отнесенной к массе измеряемого образца, составляет $\Delta\sigma \pm 0,005 \text{ А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$.

Результаты эксперимента

Синтезированы соединения MnSe, GdSe и твердые растворы $Mn_{0,95}Gd_{0,05}Se$, $Mn_{0,9}Gd_{0,1}Se$, $Mn_{0,85}Gd_{0,15}Se$. На рентгенограммах твердых растворов на основе MnSe рефлекс индицируется исходя из кубической ячейки пространственной группы Fm3m. По результатам рентгенографических исследований определены величины параметра a элементарной кристаллической ячейки твердых растворов системы $Mn_{1-x}Gd_xSe$. Зависимость $a = f(x)$ представлена на рис. 1.

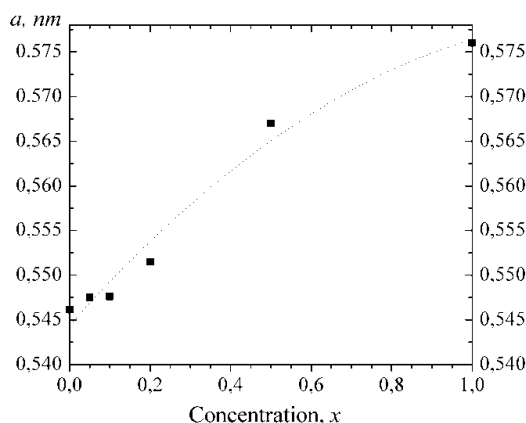


Рис. 1. Параметр a элементарной кристаллической ячейки твердых растворов системы $Mn_{1-x}Gd_xSe$ от концентрации

Fig. 1 Parameter a of the elementary crystal cell of solid solutions of the $Mn_{1-x}Gd_xSe$ system from the concentration

Результаты измерений температурной зависимости магнитной восприимчивости $10^{-2}/\chi = f(T)$ твердых растворов $Mn_{0,95}Gd_{0,05}Se$, $Mn_{0,9}Gd_{0,1}Se$, и соединения GdSe приведены на рис. 2 – рис. 5. С увеличением содержания гадолиния от $x = 0,05$ до $x = 0,15$ температура Нееля твердых растворов уменьшается от значения $T_N = 120$ К у $Mn_{0,95}Gd_{0,05}Se$ до $T_N = \sim 100$ К у $Mn_{0,85}Gd_{0,15}Se$. Следует отметить, что прогрев твердых растворов до температуры ~ 900 К не приводит к необратимым изменениям величины магнитной восприимчивости, поскольку ход зависимостей $10^{-2}/\chi = f(T)$ при измерениях в режиме «нагрев – охлаждение» идентичен. Выявленная особенность имеет практическое значение.

Магнитная восприимчивость твердых растворов увеличивается с ростом содержания в них гадолиния. Увеличение содержания гадолиния в твердых растворах приводит к уменьшению температуры Нееля от $T_N \sim 135$ К у MnSe до $T_N \sim 90$ К в $Mn_{0,85}Gd_{0,15}Se$.

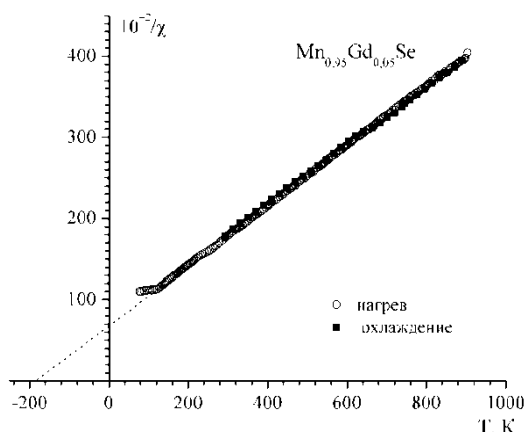


Рис. 2. Обратная магнитная восприимчивость $\text{Mn}_{0.95}\text{Gd}_{0.05}\text{Se}$ от температуры

Fig. 2. Inverse magnetic susceptibility $\text{Mn}_{0.95}\text{Gd}_{0.05}\text{Se}$ from temperature

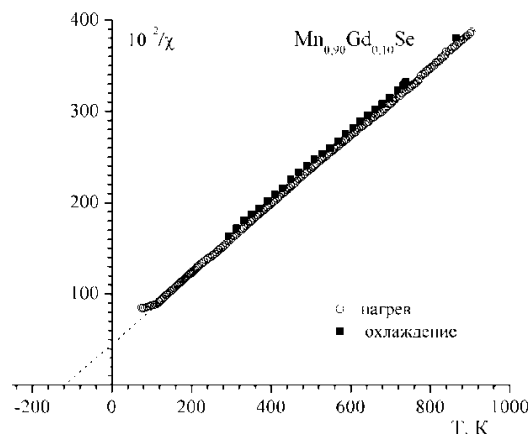


Рис. 3. Обратная магнитная восприимчивость $\text{Mn}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Se}$ от температуры

Fig. 3. Reverse magnetic susceptibility $\text{Mn}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Se}$ from temperature

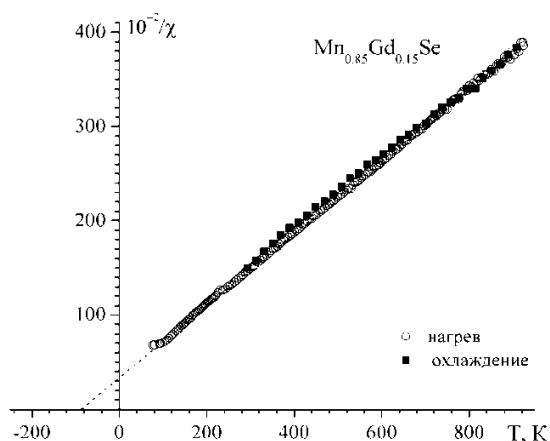


Рис. 4. Обратная магнитная восприимчивость $\text{Mn}_{0.85}\text{Gd}_{0.15}\text{Se}$ от температуры

Fig. 4. Reverse magnetic susceptibility $\text{Mn}_{0.85}\text{Gd}_{0.15}\text{Se}$ from temperature

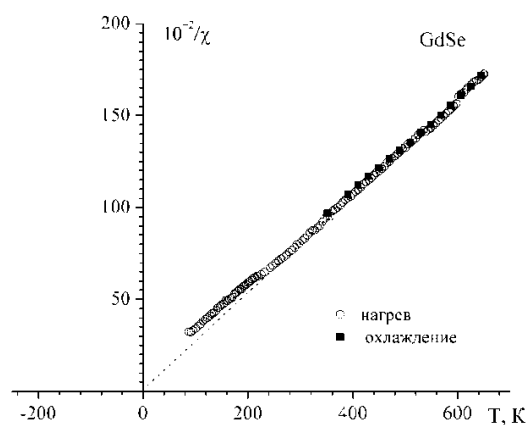


Рис. 5. Обратная магнитная восприимчивость антиферромагнетика GdSe от температуры

Fig. 5. Inverse magnetic susceptibility of the GdSe antiferromagnet to temperature

Парамагнитная температура Кюри – Вейсса также уменьшается с ростом концентрации от $\theta_{\text{eff}} \approx |-200| \text{ K}$ для $x = 0$ до $\theta_{\text{eff}} \approx |-90| \text{ K}$ для $x = 0,15$ в твердых растворах $\text{Mn}_{0.1-x}\text{Gd}_x\text{Se}$. Используя $\text{tg} \alpha$ угла наклона к оси температур прямолинейной части зависимости $10^{-2}/\chi = f(T)$, определена величина магнитного момента твердых растворов. Увеличение содержания гадолиния в твердых растворах приводит к увеличению магнитного момента.

Закключение

Синтезированы твердые растворы в системе $\text{Mn}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 0,5$). Опираясь на зависимость изменения параметра a элементарной кубической кристаллической ячейки от концентрации $a = f(x)$, можно считать, с некоторой погрешностью, что непрерывные твердые растворы в этой системе при используемом режиме синтеза существуют в области концентраций ($0 \leq x < 0,2$). Изучены температурные зависимости магнитной восприимчивости твердых растворов $\text{Mn}_{0.95}\text{Gd}_{0.05}\text{Se}$, $\text{Mn}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Se}$, $\text{Mn}_{0.85}\text{Gd}_{0.15}\text{Se}$ и соединения GdSe . Установлено:

а) с увеличением содержания гадолиния температура Нееля твердых растворов уменьшается от значения $T_N = 135 \text{ K}$ у $\text{Mn}_{0.95}\text{Gd}_{0.05}\text{Se}$ до $T_N \approx 100 \text{ K}$ у $\text{Mn}_{0.85}\text{Gd}_{0.15}\text{Se}$;

б) магнитная восприимчивость твердых растворов увеличивается с ростом содержания в них гадолиния;

в) ход зависимостей $10^{-2}/\chi = f(T)$ идентичен при измерениях в режиме «нагрев – охлаждение» в интервале температур ~80–900 К;

г) магнитный момент твердых растворов увеличивается с увеличением содержания ферромагнитной компоненты Gd.

Библиографические ссылки

1. Корреляция магнитных и транспортных свойств с полиморфными переходами в пиро-
статанте висмута $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$ / С. С. Аплеснин, Л. В. Удод, М. Н. Ситников и др. // Физика
твёрдого тела. 2015. Т. 57, вып. 8. С. 1590–1595.
2. Solid Influence of magnetic ordering on the resistivity anisotropy of A-MNS single crystal /
S. S. Aplesnin, G. A. Petrakovskii, L. I. Ryabinkina et al. // State Communications. 2004. Vol. 129.
Is. 3. P. 195–197.
3. Metal-insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions
 $\text{ME}_x\text{MN}_{1-x}\text{S}$ / L. I. Ryabinkina, G. A. Petrakovskii, G. V. Loseva, S. S. Aplesnin // Journal of Magnet-
ism and Magnetic Materials. 1995. Vol. 140–144, Is. 1. P. 147–148.
4. Спин-зависимый транспорт в монокристалле ALPHA-MNS / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябин-
кина, Г. М. Абрамова и т. д. // Физика твёрдого тела. 2004. Т. 46, № 11. С. 2000–2005.
5. Metal-semiconductor transition in SMXMN1-XS solid solutions / S. Aplesnin, O. Romanova,
A. Har'kov et al. // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2012. Vol. 249, Is. 4.
P. 812–817.
6. Низкотемпературные электронные и магнитные переходы в антиферромагнитном полу-
проводнике $\text{CR}_{0.5}\text{MN}_{0.5}\text{S}$ / Г. А. Петраковский, Л. И. Рябинкина, Д. А. Великанов и др. // Физика
твёрдого тела. 1999. Т. 41, № 9. С. 1660–1664.
7. Magnetization reversal processes in magnetic bicrystal junctions / Gunnarsson R., Hanson M. //
Phys. Rev. 2006. Vol. 73. P. 014435.
8. Бойков Ю. А., Клаесон Т., Данилов В. А. Магнетосопротивление эпитаксиальных плёнок
 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$, выращенных на подложке с малым рассогласованием в параметрах кристалли-
ческих решёток // Физика твёрдого тела. 2005. Т. 47, вып. 12. С. 2189–2194.
9. Cheng S. L., Du C. H., Chuang T. H., Lin J. G. Atomic replacement effects on the band struc-
ture of doped perovskite thin films // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 7828.
10. Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites / A. Asamitsu, Y. Tomi-
oka, H. Kuwahara, Y. Tokura // Nature. 1997. Vol. 388. P. 50–52.
11. Бебенин Н. Г., Зайнуллина Р. И., Устинов, В. В. Манганиты с колоссальным магнетосо-
противлением // УФН. 2018. Т. 188, № 8. С. 801–820.
12. Аплеснин С. С. Неадиабатическое взаимодействие акустических фононов со спинами
 $S = 1/2$ в двумерной модели гейзенберга // Журнал экспериментальной и теоретической физики.
2003. Т. 124, № 5. С. 1080–1089.
13. Aplesnin S. S. Dimerization of antiferromagnetic chains with four-spin interactions // Physics
of the Solid State. 1996. Vol. 38, № 6. P. 1031–1036.
14. Aplesnin S. S. A study of anisotropic heisenberg antiferromagnet with $S = 1/2$ on a square lat-
tice by monte-carlo method // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 1998. Vol. 207,
№ 2. P. 491–49
15. Aplesnin S. S. Quantum monte carlo analysis of the 2d heisenberg antiferromagnet with
 $S = 1/2$: the influence of exchange anisotropy // Journal of Physics: Condensed Matter. 1998. Vol. 10,
№ 44. P. 10061–10065.
16. Aplesnin S. S. Existence of massive singlet excitations in an antiferromagnetic alternating
chain with $S=1/2$ // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. 2000. Vol. 61,
№ 10. P. 6780–6784.

17. Probing spin susceptibility of a correlated two-dimensional electron system by transport and magnetization measurements / V. M. Pudalov, A. Yu. Kuntsevich, M. E. Gershenson et al. // *Phys. Rev. B*. 2018. Vol. 98. P. 155109.
18. Diversity of quantum ground states and quantum phase transitions of a spin-1/2 Heisenberg octahedral chain / J. Strecka, J. Richter, O. Derzhko et al. // *Phys. Rev.* 2017. Vol. 95. P. 224415.
19. Quantum-size effects in the thermodynamic properties of metallic nanoparticles / Y. Volokitin, J. Sinzig, L. J. de Jongh et al. // *Nature*. 1996. Vol. 384. P. 621–623.
20. Gong C., Zhavg X. Two-dimensional magnetic crystals and emergent heterostructure devices // *Science*. 2019. Vol. 363. P. 6428.
21. Спин-стекольные эффекты в твердых растворах $\text{CO}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2009. Т. 73, № 7. С. 1021–1023.
22. Low-temperature electronic and magnetic transitions in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$ / G. A. Petrakovskii, L. I. Ryabinkina, D. A. Velikanov et al. // *Physics of the Solid State*. 1999. Vol. 41 (9). P. 1520–1524.
23. Взаимосвязь магнитных и электрических свойств халькогенидов $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$ / С. С. Аплеснин, О. Н. Бандурина, Л. И. Рябинкина и др. // *Известия РАН. Серия Физическая*. 2010. Т. 74, № 5. С. 741–743.
24. Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 24450-80 «Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения» Постановление Госкомстата СССР № 5672 от 28 ноября 1980 г.
25. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М. : Издательство МГУ, 1969. 387 с.
26. Янушкевич К. И. Методика выполнения измерений намагниченности и магнитной восприимчивости // Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. МВИ. МИ 3128-2009, НИИ ТЗИ, БелГИМ, Минск, 2009. С. 19.

References

1. Aplesnin S. C., Udod L. S., Sitnikov M. N., Eremin Or. S. Molokeev M. S. Tarasova L. S., Yanushkevich K. I., Galis A. I. [Correlation of magnetic and transport properties with polymorphic transitions in bismuth pyro-stannate $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$]. *Solid State Physics*. 2015, Vol. 57, Is. 8, P. 1590–1595 (In Russ.).
2. Aplesnin S. S., Petrakovskii G. A., Ryabinkina L. I., Abramova G. M., Kiselev N. I., Romanova O. B. Solid Influence of magnetic ordering on the resistivity anisotropy of A-MNS single crystal. *State Communications*. 2004, Vol. 129, Is. 3, P. 195–197.
3. Ryabinkina L. I., Petrakovskii G. A., Loseva G. V., Aplesnin S. S. Metal-insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions $\text{ME}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1995, Vol. 140–144, Is. 1, P. 147–148.
4. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I. Abramova G. M., Romanova O. B., Kiselev N. I., Bovina A. F. *Spin-zavisimyy transport v monokristalle ALPHA-MNS* [Spin-dependent transport in a single crystal ALPHA-MNS]. *Solid State Physics*. 2004, Vol. 46, No. 11, P. 2000–2005 (In Russ.).
5. Aplesnin S., Romanova O., Har'kov A., Balaev D., Gorev M., Vorotinov A., Sokolov V., Pichugin A. Metal-semiconductor transition in $\text{SMXMn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 2012, Vol. 249, Is. 4, P. 812–817.
6. Petrakovskiy G. A., Ryabinkina L. I., Velikanov D. A., Aplesnin S. S., Abramova G. M., Kiselev N. I., Bovina A. F. *Nizkotemperaturnye jelektronnye i magnitnye perehody v antiferromagnitnom poluprovodnike $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$* [Low-temperature electronic and magnetic transitions in an antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$]. *Solid State Physics*. 1999, Vol. 41, No. 9, P. 1660–1664 (In Russ.).
7. Gunnarsson R., Hanson M. Magnetization reversal processes in magnetic bicrystal junctions. *Phys. Rev.* 2006, Vol. 73, P. 014435.

8. Boikov Yu. A., Klaeson T., Danilov V. A. [Magnetoresistance of epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ films grown on a substrate with a small mismatch in the parameters of crystal lattices]. *Solid State Physics*. 2005, Vol. 47, No. 12, P. 2189–2194 (In Russ.).
9. Cheng S. L., Du C. H., Chuang T. H., Lin J. G. Atomic replacement effects on the band structure of doped perovskite thin films. *Scientific Reports*. 2019, Vol. 9, P. 7828.
10. Asamitsu A., Tomioka Y., Kuwahara H., Tokura Y. Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites. *Nature*. 1997, Vol. 388, P. 50–52.
11. Bebenin N. G., Zainullina R. I., Ustinov V. V. *Manganity s kolossal'nyy magnetosoprotivleniye* [Manganites with colossal magnetoresistance]. *UFN*. 2018, Vol. 188, No. 8, P. 801–820 (In Russ.).
12. Aplesnin S. S. [Nonadiabatic interaction of acoustic phonons with spins $S = 1/2$ in the two-dimensional Heisenberg model]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003, Vol. 124, No. 5, P. 1080–1089 (In Russ.).
13. Aplesnin S. S. Dimerization of antiferromagnetic chains with four-spin interactions. *Physics of the Solid State*. 1996, Vol. 38, No. 6, P. 1031–1036.
14. Aplesnin S. S. A study of anisotropic heisenberg antiferromagnet with $S = 1/2$ on a square lattice by monte-carlo method. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 1998, Vol. 207, No. 2, P. 491–49.
15. Aplesnin S. S. Quantum monte carlo analysis of the 2d heisenberg antiferromagnet with $S = 1/2$: the influence of exchange anisotropy. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1998, Vol. 10, No. 44, P. 10061–10065.
16. Aplesnin S. S. Existence of massive singlet excitations in an antiferromagnetic alternating chain with $S=1/2$. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2000, Vol. 61, No. 10, P. 6780–6784.
17. Pudalov V. M., Kuntsevich A. Yu., Gershenson M. E., Burmistrov I. S., Reznikov M. Probing spin susceptibility of a correlated two-dimensional electron system by transport and magnetization measurements. *Phys. Rev.* 2018, Vol. 98, P. 155109.
18. Strecka J., Richter J., Derzhko O., Verkholyak T., Karlova K. Diversity of quantum ground states and quantum phase transitions of a spin-1/2 Heisenberg octahedral chain. *Phys. Rev.* 2017, Vol. 95, P. 224415.
19. Volokitin Y., Sinzig J., de Jongh L. J., Schimid G., Vargaftik M. N., Moiseevi I. I. Quantum-size effects in the thermodynamic properties of metallic nanoparticles. *Nature*. 1996, Vol. 384, P. 621–623.
20. Gong C., Zhavng X. Two-dimensional magnetic crystals and emergent heterostructure devices. *Science*. 2019, Vol. 363, P. 6428.
21. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Bandurina O. N., Gorev M. S., Balaev A. D., Eremin E. V. [Spin-glass effects in solid solutions of $\text{CO}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physical series*. 2009, Vol. 73, No. 7, P. 1021–1023 (In Russ.).
22. Petrakovskii G. A., Ryabinkina L. I., Velikanov D. A., Aplesnin S. S., Abramova G. M., Kiselev N. I., Bobina A. F. Low-temperature electronic and magnetic transitions in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{S}$. *Physics of the Solid State*. 1999, Vol. 41 (9), P. 1520–1524.
23. Aplesnin S. S., Bandurina O. N., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Eremin E. V., Gorev M. V., Vorotynov A. M., Balaev D. A., Vasiliev A. D., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetsky G. I., Yanushkevich K. I. [The relationship of magnetic and electrical properties of chalcogenides $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$]. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*. 2010, Vol. 74, No. 5, P. 741–743 (In Russ.).
24. *State standard of the USSR GOST 24450-80 Kontrol' nerazrushajushhij magnitnyj. Terminy i opredeleniya* [Non-destructive magnetic control. Terms and definitions]. *Resolution of the USSR State Statistics Committee No. 5672 of November 28, 1980* (In Russ.).
25. Chechernikov V. I. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Moscow State University Publishing House, Moscow. 1969, 387 p.

26. Janushkevich K. I. *Metodika vypolneniya izmerenij namagnichennosti i magnitnoy vospriimchivosti. Sistema obespecheniya edinstva izmereniy Respubliki Belarus'* [Methods of performing measurements of magnetization and magnetic susceptibility. The system of ensuring the uniformity of measurements of the Republic of Belarus]. MVI. Minsk, 2009, 19 p.

© Живулько А. М., Янушкевич К. И., Даниленко Е. Г.,
Зеленов Ф. В., Бандурина О. Н., 2022

Живулько Алёна Михайловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов; ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». E-mail: alyona_panasevich@mail.ru.

Янушкевич Казимир Иосифович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов; ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». E-mail: kazimir@ifttp.bas-net.by.

Даниленко Евгения Григорьевна – аспирант кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evg.danilenko@mail.ru.

Зеленов Федор Владимирович – аспирант кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sok@mail.ru.

Бандурина Ольга Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bandurinaon@yandex.ru.

Zhivulko Alena Mikhailovna – Cand. Sc., Senior Researcher at the Laboratory; Physics of Magnetic Materials of the State Scientific Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: alyona_panasevich@mail.ru.

Yanushkevich Kazimir Iosifovich – Dr. Sc., Chief Researcher; Physics of Magnetic Materials of the State Research Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: kazimir@ifttp.bas-net.by.

Danilenko Evgenia Grigorievna – Postgraduate student of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: evg.danilenko@mail.ru.

Zelenov Fedor Vladimirovich – Postgraduate student of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sok@mail.ru.

Bandurina Olga Nikolaevna – Cand. Sc., docent of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: bandurinaon@yandex.ru.
