

УДК 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-613-620

**Для цитирования:** Харьков А. М., Ситников М. Н., Аплеснин С. С. Магнитоимпеданс в нестехиометричном сульфиде марганца // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 613–620. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-613-620.

**For citation:** Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Aplesnin S. S. [Magnetic impedance in nonstoichiometric manganese sulfide]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 613–620. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-613-620.

## Магнитоимпеданс в нестехиометричном сульфиде марганца

А. М. Харьков, М. Н. Ситников, С. С. Аплеснин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: khark.anton@mail.ru

*Исследуется роль дефектов на динамические характеристики сульфида марганца методом импедансной спектроскопии в интервале частот  $10^2$ – $10^6$  Гц и температур 80–500 К. Нестехиометрия играет важную роль в формировании новых транспортных и магнитных свойств, так как приводит к электрически неоднородным состояниям. Фазовый состав и кристаллическая структура нестехиометричного сульфида марганца исследовались на рентгеновской установке ДРОН-3 с использованием  $\text{SiK}_\alpha$  – излучения при комнатной температуре. Согласно рентгеноструктурному анализу, синтезированные соединения являются однофазными и имеют кубическую решетку типа NaCl. Из частотных зависимостей компонент импеданса, измеренных без поля и в магнитном поле, найдено время релаксации носителей тока в модели Дебая. Обнаружено резкое уменьшение времени релаксации и ее корреляция с проводимостью. Установлен вклад в импеданс активной и реактивной частей импеданса на частотах меньше и больше времени релаксации. Определена емкость из годографа импеданса в модели эквивалентных схем. В дефектном сульфиде марганца импеданс от температуры имеет активационный характер. Определена энергия активации в интервале 250–500 К, которая приписывается энергии возбуждения решеточных поляронов. Влияние магнитного поля на динамические характеристики носителей тока исследовалось в результате изменения компонент импеданса в магнитном поле при фиксированных температурах. Импеданс увеличивается в магнитном поле и достигает максимума в области температуры зарядового упорядочения вакансий. Увеличение импеданса в магнитном поле объясняется уменьшением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле в электрически неоднородной среде. Экспериментальные данные объясняются в модели Дебая.*

*Ключевые слова:* полупроводники, импеданс, магнитоимпеданс, модель Дебая.

## Magnetic impedance in nonstoichiometric manganese sulfide

A. M. Kharkov, M. N. Sitnikov, S. S. Aplesnin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: khark.anton@mail.ru

*The role of defects on the dynamic characteristics of manganese sulfide is studied by impedance spectroscopy in the frequency range  $10^2$ – $10^6$  Hz and temperatures 80–500 K. Nonstoichiometry plays an important role in the formation of new transport and magnetic properties, as it leads to electrically inhomogeneous states. The phase composition and crystal structure of nonstoichiometric manganese*

*sulfide were studied on a DRON-3 X-ray unit using  $CuK_{\alpha}$  – radiation at room temperature. According to X-ray diffraction analysis, the synthesized compound is single-phase and has a NaCl-type cubic lattice. From the frequency dependences of the impedance components measured in the absence of a field and in a magnetic field, the relaxation time of the current carriers in the Debye model is found. A sharp decrease in the relaxation time and its correlation with conductivity were found. The contribution to the impedance of the active and reactive parts of the impedance at frequencies below and above the relaxation time is established. The capacitance from the impedance hodograph in the equivalent circuit model is determined. In defective manganese sulfide, the temperature-dependent impedance has an activation character. The activation energy is determined in the range 250–500 K, which is attributed to the excitation energy of lattice polarons. The effect of a magnetic field on the dynamic characteristics of current carriers was studied as a result of a change in the impedance components in a magnetic field at fixed temperatures. The impedance increases in a magnetic field and reaches a maximum in the temperature range of charge ordering of vacancies. An increase in the impedance in a magnetic field is explained by a decrease in the diagonal component of the permittivity in a magnetic field in an electrically inhomogeneous medium. The experimental data are explained in the Debye model.*

*Keywords: semiconductors, impedance, magnetoimpedance, Debye model.*

## **Введение**

Разработка электронных устройств, которые смогут функционировать в экстремальных условиях, например в малых космических аппаратах, где температура окружающей среды меняется от 200 до 400 К, является актуальной задачей. Поэтому привлекает внимание спинтроника [1–4]. Управление транспортными характеристиками в полупроводниках под действием внешнего магнитного поля представляет интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения [5–8]. В электрически неоднородных полупроводниках транспортные характеристики на постоянном и переменном токе могут качественно отличаться [9]. Это связано с радиусом неоднородности и временем релаксации носителей тока, которое определяется взаимодействием с магнитной и упругой подсистемами. Регулировать электрическую неоднородность можно электронным допированием, концентрацией и температурой.

Например, в манганитах при неизовалентном замещении найдены переходы, связанные с орбитальным, зарядовым и магнитным упорядочением [10–13]. В окислах железа  $Fe_3O_4$  выше температуры Вервея найден электронный нематик с радиусом корреляции 5–8 нм. Переход Вервея связан с конкуренцией зарядового и структурного порядка в результате электрон-фононного взаимодействия [14]. Можно получить зарядовое упорядочение в сульфиде марганца, где носителями тока являются решеточные поляроны за счет нестехиометрии. Сульфид марганца магнитный полупроводник с температурой Нееля 150 К, щель в спектре электронных возбуждений 3 эВ [15; 16]. Вырождение в области зарядового упорядочения снимается магнитным полем, т. е. топология электрически неоднородного состояния меняется в магнитном поле, что приводит к изменению частотной зависимости диэлектрической проницаемости в магнитном поле, и создаются предпосылки для магнитоимпеданса.

Цель работы – установить влияние магнитного поля на сопротивление на переменном токе и компоненты импеданса в нестехиометричном образце  $Mn_{0.9}S$ .

## **Материалы и методы**

Фазовый состав и кристаллическая структура образца  $Mn_{0.9}S$  исследовались на рентгеновской установке ДРОН-3 с использованием  $CuK_{\alpha}$  – излучения при комнатной температуре. Согласно рентгеноструктурному анализу синтезированные соединения являются однофазными и имеют кубическую решетку типа NaCl, как в исходном сульфиде марганца [15].

Импеданс, активная и реактивная части импеданса измерены на анализаторе компонентов АМ-3028 в частотном интервале  $\omega = 10^2$ – $10^6$  Гц при температурах 77–500 К, амплитуда переменного напряжения составляла 1 В. Для расчета спектров импеданса применялось программное обеспечение ZView (Scribner Associates Inc.).

**Результаты и обсуждение**

Неоднородное электрическое состояние, образование объемного заряда установим из импедансной спектроскопии [17]. Из импеданса установим динамические характеристики носителей тока, время релаксации, механизм рассеяния носителей тока выявим из импеданса. На рис. 1 представлены частотные зависимости компонент импеданса без поля и в магнитном поле, которые хорошо описываются в модели Дебая [18]:

$$\operatorname{Re} Z(\omega) = \frac{A}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad \operatorname{Im} Z(\omega) = \frac{B\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время релаксации носителей тока,  $A$  и  $B$  параметры.

Время релаксации уменьшается при нагревании в пять раз и достигает минимума при 450 К (вставка на рис. 1, *b*). При этой температуре проводимость достигает максимума.

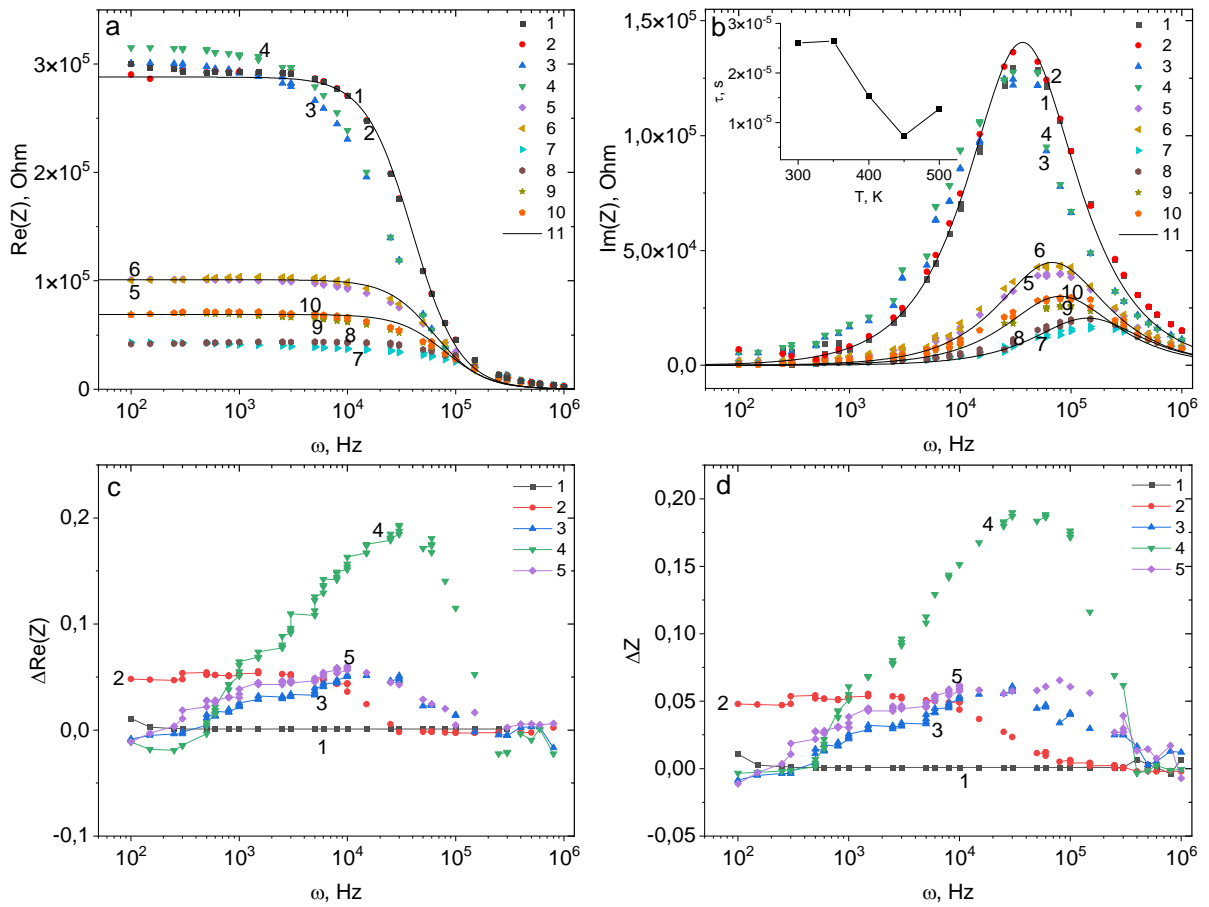


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (*a*) и мнимой (*b*) частей импеданса для образца  $\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  без поля  $H = 0$  (1, 3, 5, 7, 9) и в магнитном поле  $H = 12$  кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при температурах  $T = 300$  К (1, 2), 350 К (3, 4), 400 К (5, 6), 450 К (7, 8), 500 К (9, 10). Подгоночные функции (11). Вставка: температурная зависимость времени релаксации  $\tau$ . Частотные зависимости магнитоимпеданса для действительной его части (*c*) и магнитоимпеданса  $\Delta Z$  (*d*) в магнитном поле  $H = 12$  кЭ при температурах  $T = 300$  К (1), 350 К (2), 400 К (3), 450 К (4), 500 К (5) для образца  $\text{Mn}_{0.9}\text{S}$

Fig. 1. Frequency dependences of the real (*a*) and imaginary (*b*) parts of the impedance for the  $\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  sample without a field  $H = 0$  (1, 3, 5, 7, 9) and in a magnetic field  $H = 12$  kOe (2, 4, 6, 8, 10) at temperatures  $T = 300$  K (1, 2), 350 K (3, 4), 400 K (5, 6), 450 K (7, 8), 500 K (9, 10). Fitting functions (11). Insert: temperature dependence of relaxation time  $\tau$ . Frequency dependences of the magnetoimpedance for its real part (*c*) and magnetoimpedance  $\Delta Z$  (*d*) in a magnetic field  $H = 12$  kOe at temperatures  $T = 300$  K (1), 350 K (2), 400 K (3), 450 K (4), 500 K (5) for the  $\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  sample

Влияние магнитного поля на динамические характеристики носителей тока исследовалось в результате изменения компонент импеданса в магнитном поле при фиксированных температурах:

$$\Delta R = \text{Re}(Z(H, \omega)) - \text{Re}(Z(H = 0, \omega)) / \text{Re}(Z(H = 0, \omega));$$

$$\Delta Z = (Z(H, \omega) - Z(H = 0, \omega)) / Z(H = 0, \omega) \quad (2)$$

Импеданс увеличивается в магнитном поле и достигает максимума в области температуры зарядового упорядочения вакансий (рис. 1, d). Увеличение  $\text{Re}(Z)$  в магнитном поле вызвано уменьшением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле (рис. 1, c). Проводимость пропорциональна диэлектрической проницаемости  $\sigma = i\omega\epsilon$ . В электрически неоднородной среде продольная компонента диэлектрической проницаемости имеет вид [19]:

$$\text{Re}[\epsilon_{xx}(\omega)] = \frac{\epsilon(1 - \beta^2 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2)}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2}, \quad (3)$$

где  $\beta = \mu H$ ;  $\mu$  – подвижность;  $\tau = \epsilon/\sigma$ .

Наличие объемного заряда, который создается дефектами, можно оценить из годографа импеданса. На рис. 2 изображены годографы импеданса  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$ . В модели эквивалентных схем годограф описывается последовательным сопротивлением  $R_1$  и параллельной составляющей  $R_2$  и  $C$  (рис. 2). Сопротивление  $R_1$  на порядок меньше  $R_2$  и емкость порядка  $C \sim 100$  пФ.

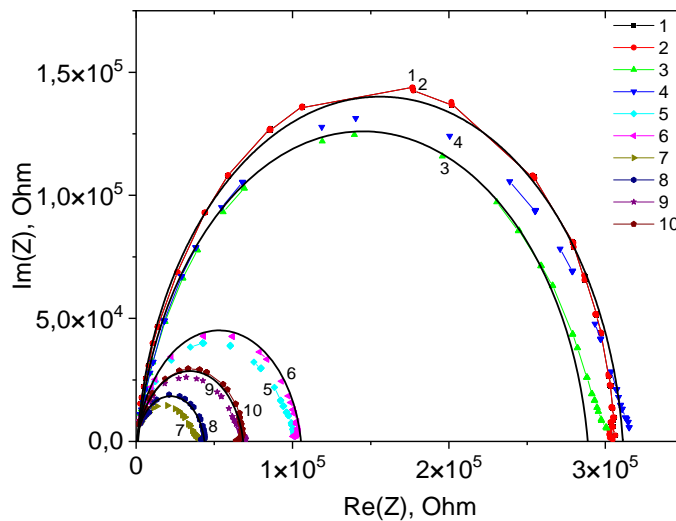


Рис. 2. Годографы импеданса для образца  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в магнитном поле  $H = 12$  кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при температурах  $T = 300$  К (1, 2), 350 К (3, 4), 400 К (5, 6), 450 К (7, 8), 500 К (9, 10)

Fig. 2. Impedance hodographs for the  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  sample in a zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a magnetic field  $H = 12$  kOe (2, 4, 6, 8, 10) at temperatures  $T = 300$  К (1, 2), 350 К (3, 4), 400 К (5, 6), 450 К (7, 8), 500 К (9, 10)

Импеданс определяется активной частью  $R$  и реактивной  $(\omega L - 1/\omega C)$  частью. Вклады в импеданс зависят от температуры. Температурная зависимость импеданса  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  дана на рис. 3. На временах измерений меньше времени релаксации  $\tau < \tau_c$  до 200 К импеданс обусловлен реактивной частью. Примесные заряженные дефектные состояния экранированы, и емкость практически от температуры не зависит. Деполяризация вызывает незначительный рост сопротивления на постоянном токе и увеличивает вклад в импеданс от реактивной части. При нагревании

импеданс уменьшается на 4–5 порядков выше 200 К. Изменение импеданса от температуры имеет активационный характер  $Z(T) = Z_0 \exp(\Delta E/kT)$  с энергией активации  $\Delta E = 0,11 - 0,13$  эВ в интервале 250–500 К. Эта энергия соответствует энергии возбуждения решеточных поляронов, которые наблюдались в манганитах  $\text{La}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{MnO}_3$  и приписываются Ян-Теллеровским поляронам [20–21].

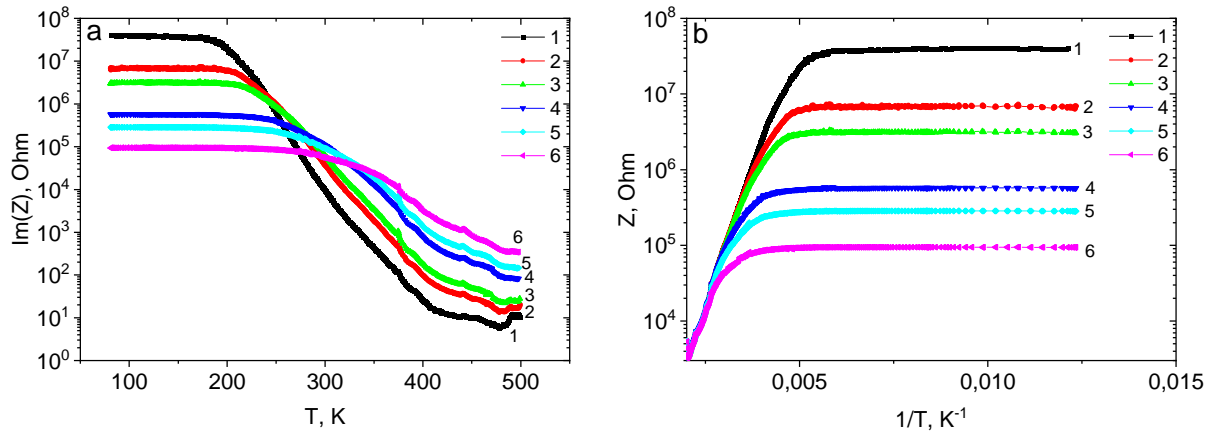


Рис. 3. Температурная зависимость мнимой части импеданса (a) и импеданса от обратной температуры (b)  $\omega = 1$  кГц (1), 5 кГц (2), 10 кГц (3), 50 кГц (4), 100 кГц (5), 1000 кГц (6) для образца  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$

Fig. 3. Temperature dependence of imaginary part of impedance (a) and impedance on inverse temperature (b)  $\omega = 1$  kHz (1), 5 kHz (2), 10 kHz (3), 50 kHz (4), 100 kHz (5), 1000 kHz (6) for the  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  sample

### Заключение

Сравнение компонент импеданса в сульфиде марганца с дефектами в катионной системе марганца указывает на основной вклад в магнитоимпеданс электросопротивления. Найдена температура максимума магнитоимпеданса и время релаксации носителей тока. Годограф импеданса описывается одним RC контуром с последовательным сопротивлением и электропроводность определяется объемными свойствами кристаллита. Дефекты в сульфиде марганца  $\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  обуславливают емкостной вклад в импеданс ниже 200 К. Деполяризация примесных центров при 200 К индуцирует максимум проводимости и переход к активационной зависимости импеданса от температуры, связанной с решеточными поляронами. Найдена температура, при которой минимум релаксации носителей тока вызывает максимум проводимости и увеличение импеданса в магнитном поле.

**Благодарности.** Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

**Acknowledgments.** The work was supported by the Russian Medium Fund, the Government of the Krasnoyarsk Territory and the Krasnoyarsk Science Foundation project No. 23-22-10016.

### Библиографические ссылки

1. Epitaxial  $\text{BiFeO}_3$  multiferroic thin film heterostructures / J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng et al. // Science. 2003. Vol. 299. P. 1719.
2. Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroics // Usp. Fiz. Nauk. 2004. Vol. 174, Is. 4. P. 465.

3. Multiferroics: Promising materials for microelectronics, spintronics, and sensor technique / A. K. Zvezdin, A. S. Logginov, G. A. Meshkov et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. Vol. 71. P. 1561.
4. Аплеснин С. С. Основы спинтроники // СПб. : Лань, 2022. 288 с.
5. Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications / I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel et al. // Sensors. 2016. Vol. 16, Is. 6. P. 904.
6. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, W. Zinn // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. P. 4828.
7. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Yanushkevich K. I. Magnetoresistance effect in anion-substituted manganese chalcogenides // Phys. Stat. Sol. B Basic Research. 2015. Vol. 252, Is. 8. P. 1792.
8. Magnetoelectric and magnetoresistive properties of the  $Ce_xMn_{1-x}S$  semiconductors / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, O. B. Romanova et al. // Phys. Stat. Sol. B Basic Research. 2016. Vol. 253, Is. 9. P. 1771.
9. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfides / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // Appl. Phys. A. 2022. Vol. 128. P. 124.
10. Structural, magnetic, and dielectric properties of charge-order phases in manganite  $La(Ca_{0.8}Sr_{0.2})_2Mn_2O_7$  / J. H. Zhang, S. H. Zheng, Y. S. Tang et al. // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 127. P. 104301.
11. Papavassiliou J. The Pinch Technique at Two Loops // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 2782.
12. Electronic phase separation in lanthanum manganites: Evidence from  $^{55}Mn$  NMR / G. Allodi, R. De Renzi, G. Guidi et al. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. P. 6036.
13. Liquidlike Spatial Distribution of Magnetic Droplets Revealed by Neutron Scattering in  $La_{1-x}Ca_xMnO_3$  / M. Hennion, F. Moussa, G. Biotteau et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. P. 1957.
14. Verwey transition as evolution from electronic nematicity to trimerons via electron-phonon coupling / W. Wang, J. Li, Z. Liang et al. // Sci. Adv. 2023. Vol. 9. P. 8220.
15. Spin-dependent transport in  $\alpha$ -MnS single crystals / S. S. Aplesnin, L. I. Ryabinkina, G. M. Abramova et al. // Phys. Sol. St. 2004. Vol. 46, Is. 11. P. 2067.
16. Conductivity, weak ferromagnetism, and charge instability in an  $\alpha$ -MnS single crystal / S. S. Aplesnin, L. I. Ryabinkina, G. M. Abramova et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71, Is. 12. P. 125204.
17. Electrochemical impedance spectroscopy / S. Wang, J. Zhang, O. Gharbi et al. // Nat. Rev. Meth. Prim. 2021. Vol. 1. P. 41.
18. Holm S. Time domain characterization of the Cole-Cole dielectric model // J. Electr. Bioimpedance. 2020. Vol. 11, Is. 1. P. 101.
19. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 166602.
20. Yang Y.-F., Held K. Localization of strongly correlated electrons as Jahn-Teller polarons in manganites // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. P. 212401.
21. Magnetic-field-induced suppression of Jahn-Teller phonon bands in  $(La_{0.6}Pr_{0.4})_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ : the mechanism of colossal magnetoresistance shown by Raman spectroscopy / S. Merten, O. Shapoval, B. Damaschke et al. // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. P. 2387.

## References

1. Wang J., Neaton J.B., Zheng H. Epitaxial  $BiFeO_3$  multiferroic thin film heterostructures. *Science*. 2003, Vol. 299, P. 1719.
2. Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroics. *Usp. Fiz. Nauk*. 2004, Vol. 174, Is. 4, P. 465.

3. Zvezdin A. K., Logginov A. S., Meshkov G. A. et al. Multiferroics: Promising materials for microelectronics, spintronics, and sensor technique. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2007, Vol. 71, P. 1561.
4. Aplesnin S. S. *Osnovi spintroniki* [Fundamentals of spintronics]. St. Petersburg, Lan Publ., 2022, 288 p.
5. Ennen I., Kappe D., Rempel T. et al. Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications. *Sensors*. 2016, Vol. 16, Is. 6, P. 904.
6. Binash G., Grunberg P., Saurenbach F., Zinn W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys. Rev. B*. 1989, Vol. 39, P. 4828.
7. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Yanushkevich K. I. Magnetoresistance effect in anion-substituted manganese chalcogenides. *Phys. Stat. Sol. B Basic Research*. 2015, Vol. 252, Is. 8, P. 1792.
8. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B. et al. Magnetoelectric and magnetoresistive properties of the  $Ce_xMn_{1-x}S$  semiconductors. *Phys. Stat. Sol. B Basic Research*. 2016, Vol. 253, Is. 9, P. 1771.
9. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. et al. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfides. *Appl. Phys. A*. 2022, Vol. 128, P. 124.
10. Zhang J. H., Zheng S. H., Tang Y. S. et al. Structural, magnetic, and dielectric properties of charge-order phases in manganite  $La(Ca_{0.8}Sr_{0.2})_2Mn_2O_7$ . *J. Appl. Phys.* 2020, Vol. 127, P. 104301.
11. Papavassiliou J. The Pinch Technique at Two Loops. *Phys. Rev. Lett.* 2000, Vol. 84, P. 2782.
12. Allodi G., De Renzi R., Guidi G. et al. Electronic phase separation in lanthanum manganites: Evidence from  $^{55}Mn$  NMR. *Phys. Rev. B*. 1997, Vol. 56, P. 6036.
13. Hennion M., Moussa F., Biotteau G. et al. Liquidlike Spatial Distribution of Magnetic Droplets Revealed by Neutron Scattering in  $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ . *Phys. Rev. Lett.* 1998, Vol. 81, P. 1957.
14. Wang W., Li J., Liang Z. et al. Verwey transition as evolution from electronic nematicity to trimerons via electron-phonon coupling. *Sci. Adv.* 2023, Vol. 9, P. 8220.
15. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. Spin-dependent transport in  $\alpha$ -MnS single crystals. *Phys. Sol. St.* 2004, Vol. 46, Is. 11, P. 2067.
16. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. Conductivity, weak ferromagnetism, and charge instability in an  $\alpha$ -MnS single crystal. *Phys. Rev. B*. 2005. Vol. 71. Is. 12. P. 125204.
17. Wang S., Zhang J., Gharbi O. et al. Electrochemical impedance spectroscopy. *Nat. Rev. Meth. Prim.* 2021, Vol. 1, P. 41.
18. Holm S. Time domain characterization of the Cole-Cole dielectric model. *J. Electr. Bioimpedance*. 2020, Vol. 11, Is. 1, P. 101.
19. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 166602.
20. Yang Y.-F., Held K. Localization of strongly correlated electrons as Jahn-Teller polarons in manganites. *Phys. Rev. B*. 2007, Vol. 76, P. 212401.
21. Merten S., Shapoval O., Damaschke B. et al. Magnetic-field-induced suppression of Jahn-Teller phonon bands in  $(La_{0.6}Pr_{0.4})_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ : the mechanism of colossal magnetoresistance shown by Raman spectroscopy. *Sci. Rep.* 2019, Vol. 9, P. 2387.

**Харьков Антон Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: khark.anton@mail.ru.

**Ситников Максим Николаевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kineru@mail.ru.

**Аплеснин Сергей Степанович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

**Kharkov Anton Mikhailovich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: khark.anton@mail.ru.

**Sitnikov Maksim Nikolaevich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kineru@mail.ru.

**Aplesnin Sergey Stepanovich** – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

---