

UDC 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-264-271

**Для цитирования:** Ситников М. Н., Харьков А. М., Аплеснин С. С. Термоэмиссионный и пирозлектрический ток в халькогенидах марганца // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 264–271. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-264-271.

**For citation:** Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Aplesnin S. S. [Thermal emission and pyroelectric current in manganese chalcogenides]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 2, P. 264–271. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-264-271.

## Термоэмиссионный и пирозлектрический ток в халькогенидах марганца

М. Н. Ситников, А. М. Харьков\*, 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

*Исследуются халькогениды марганца, перспективные для изготовления термоэлементов. Измеряется ток в интервале температур 80–500 К и в отсутствие внешнего напряжения, который может быть вызван градиентом температуры (термоЭДС), изменением электрической поляризации (пирозлектрический ток), возникновением разности потенциалов при деформации образца (пьезозлектрический ток) или термоэлектронной эмиссией (термоэмиссионный ток). Найдены температуры аномалий тока и их связь с термоэмиссионным током и током поляризации. Изменение электрической поляризации по температуре вызовет пирозлектрический ток. Компенсация избыточного электрического заряда приведет к локальной электрической поляризации. Частичная декомпенсация вызовет образование электрического поля в образце. Определены критические температуры исчезновения электрической поляризации для разных концентраций. В области концентрации протекания ионов тулия по решетке установлен активационный характер термоэмиссионного тока и найдена энергия активации. Пирозлектрический ток имеет меньшую величину по сравнению с термоэмиссионным током. Механизм тока обусловлен эмиссией электронов с глубоких ловушек, и температуры максимумов термоэмиссионного тока коррелируют с температурами исчезновения ИК поглощения. Вычислена плотность электрического тока и ее величина от типа замещенного редкоземельного элемента.*

*Ключевые слова:* полупроводники, термоэмиссионный ток, пирозлектрический ток.

## Thermal emission and pyroelectric current in manganese chalcogenides

M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov\*, 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

*Manganese chalcogenides, which are promising for the manufacture of thermoelements, are being studied. The current is measured in the temperature range of 80–500 K, in the absence of external voltage, which can be caused by a temperature gradient (thermopower), a change in electrical polarization (pyroelectric current), piezoelectric current (when the sample is deformed, a potential difference arises) or thermionic emission (thermal emission current). Temperatures of current anomalies and their relationship with thermionic current and polarization current are found. A change in electrical polarization with tem-*

perature will cause a pyroelectric current. Compensation for excess electrical charge will result in local electrical polarization. Partial decompensation will cause the formation of an electric field in the sample. The critical temperatures for the disappearance of electric polarization were determined for different concentrations. In the region of concentration of thulium ions flowing through the lattice, the activation nature of the thermionic current was established and the activation energy was found. The pyroelectric current has a smaller value compared to the thermionic current. The current mechanism is determined by the emission of electrons from deep traps and the temperatures of the maximum thermionic current correlate with the temperatures at which IR absorption disappears. The electric current density and its value depend on the type of substituted rare earth element are calculated.

*Keywords: semiconductors, thermal emission current, pyroelectric current.*

## Introduction

Electric energy storage devices are used in the aerospace industry. Rechargeable batteries and supercapacitors are mainly used [1–3]. To manufacture supercapacitors, it is necessary to use a material with a high dielectric constant, which depends on the electric polarization [4–8]. Semiconductors with migration and dipole polarization can be applied in capacitors [9–11]. Another aspect consists of alternative energy sources, the conversion of thermal energy into electrical energy [12–15].

Nonstoichiometric replacement of manganese ions with thulium forms electrically inhomogeneous states in the sample [16–17]. Hybridization of the wave functions of cations is accompanied by the participation of a chalcogen ion, which will lead to a charge gap. The excess charge on  $Tm^{3+}$  is compensated by the displacement of anions and free current carriers. Electric polarization with a p-n junction occurs at the interface between  $TmSe$  nanoregions. When phonons are absorbed by electrons in the region of the p-n junction, a thermionic current will arise.

As promising materials, we consider chalcogenides, a number of which are used for the manufacture of thermoelements [18–20]. We consider manganese chalcogenides substituted with 3d elements as current sources.

## Pyroelectric current in thulium-substituted manganese selenide

A current in the absence of an external voltage can be caused by a temperature gradient (thermoEMF), a change in electrical polarization (pyroelectric current), the appearance of a potential difference when the sample is deformed (piezoelectric current), or thermionic emission (thermionic current).

Chalcogenides with variable valence have unique properties – transport, magnetic and thermoelectric [21–23]. A change in the valence of the ion changes the electronic structure and leads to lattice deformation [24]. Valence changes both with temperature and with increasing pressure [25]. Compensation for excess electrical charge will lead to local electrical polarization. Partial decompensation will cause the formation of an electric field in the sample and dipole polarization. A change in electric polarization with temperature will cause a pyroelectric current  $j_p = (dP/dT) (dT/dt)$ . The current in zero electric field has the form:

$$j = \sigma E_{in} \pm \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

where  $\sigma$  – sample conductivity;  $E_{in}$  – internal electric field.

The current in zero electric field was measured on a 6517B/E electrometer and is presented in Fig. 1, a for  $Tm_{0.04}Mn_{0.95}Se$ . When heated, the current changes sign at 110 K from negative to positive. The current passes through a maximum at 220 K, reaches a minimum at 285 K, and increases sharply above room temperature. Integrating the current will give polarization  $P \sim \int j dT$ , the relative value of which is shown in Fig. 1, b. Electric polarization in this sample disappears in the range of 220–240 K.

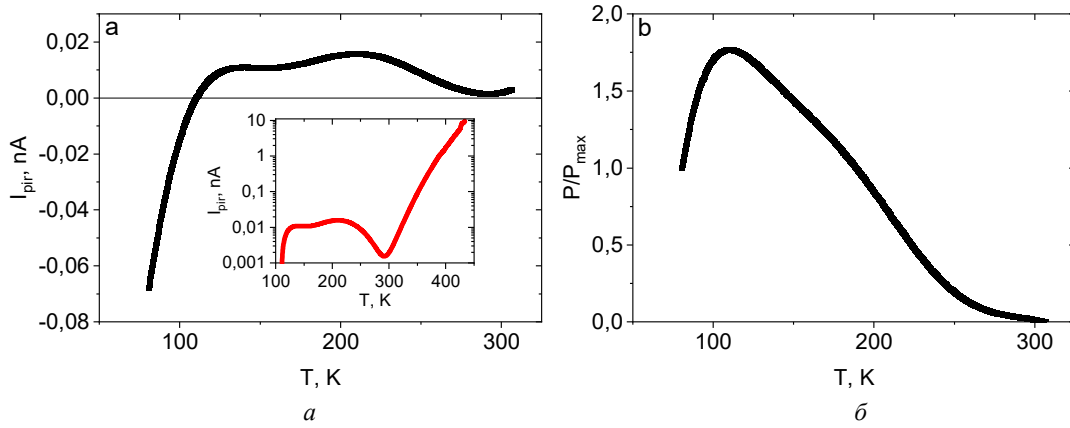


Рис. 1. Температурная зависимость пиротока (а) и относительное изменение поляризации (б) для  $Tm_{0,04}Mn_{0,95}Se$ . Вставка: Температурная зависимость пиротока для  $Tm_{0,04}Mn_{0,95}Se$

Fig. 1. Temperature dependence of the pyrocurrent (a) and relative change in polarization (b) for  $Tm_{0,04}Mn_{0,95}Se$ . Inset: Temperature dependence of the pyrocurrent for  $Tm_{0,04}Mn_{0,95}Se$

Let us highlight two temperature ranges up to 240 K, where the current is caused by a change in polarization and above this temperature a thermionic current appears.

With increasing concentration, the current exhibits a maximum at 480 K in  $Tm_{0,08}Mn_{0,9}Se$ , which is associated with electrical polarization (Fig. 2). It is possible to form dipole polarization at low temperatures, which disappears when heated and migration polarization appears. The pyroelectric current reaches a value of 10 nA, current density  $j = 0.2 \mu A/cm^2$ .

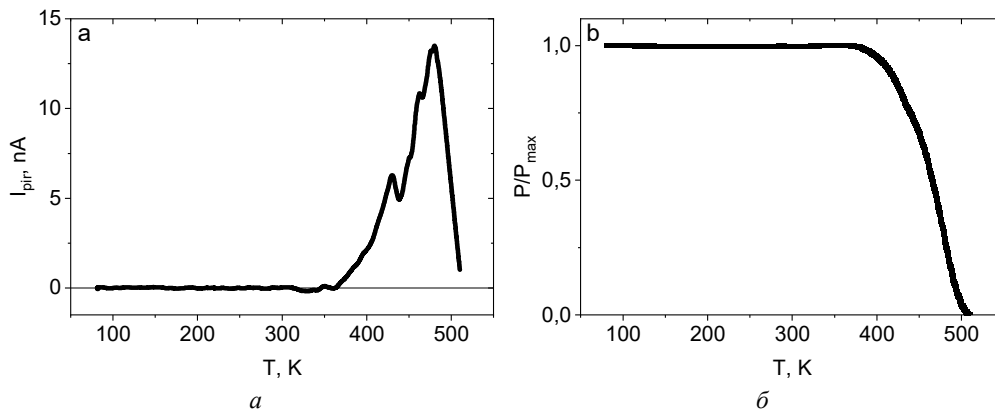


Рис. 2. Температурная зависимость пиротока (а) и относительное изменение поляризации (б) для  $Tm_{0,08}Mn_{0,9}Se$

Fig. 2. Temperature dependence of the pyrocurrent (a) and relative change in polarization (b) for  $Tm_{0,08}Mn_{0,9}Se$

In the case of replacement of manganese ions with thulium in the concentration region where thulium ions flow through the lattice, the current changes sign above room temperature and has two small maxima at  $T = 110$  and  $280$  K (Fig. 3).

At high temperatures, the current density is  $j = 0.05 \text{ mA/cm}^2$ . In the free electron gas model  $j = env$ , the electron concentration increases exponentially with heating  $n = n_0 \exp(-\Delta E/T)$ . The current is well described by the exponential dependence depicted in Fig. 3, b, with activation energy  $\Delta E = 0.82 \text{ eV}$ . The wave functions of electrons on thulium ions are interrupted and form an impurity subband. As a result of thermal fluctuations, electrons move from the impurity subband to the conduction band and an electric current appears in the electric field of defects.

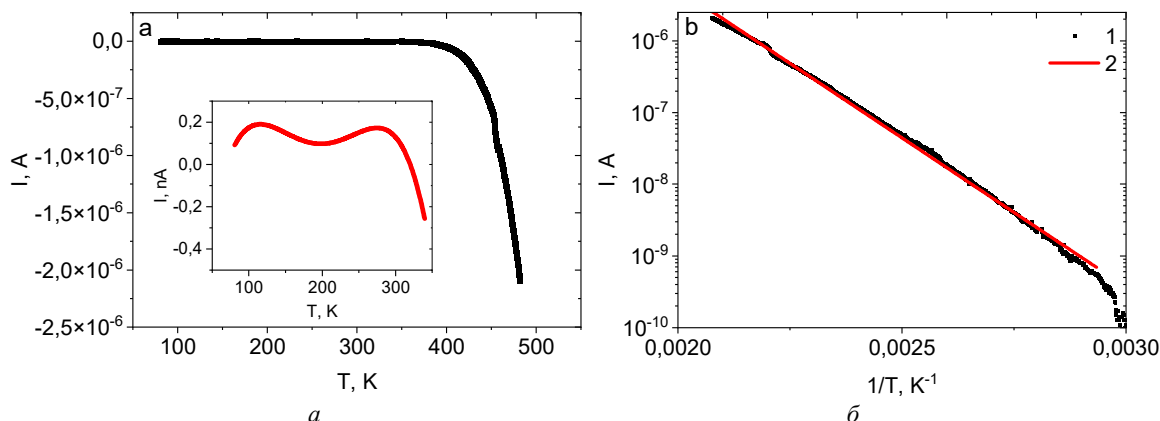


Рис. 3. Температурная зависимость тока (а) и экспоненциальная зависимость тока от обратной температуры (б) для  $Tm_{0,2}Mn_{0,8}Se$ .

Вставка: Температурная зависимость тока для  $Tm_{0,2}Mn_{0,8}Se$

Fig. 3. Temperature dependence of the current (a) and exponential dependence of the current on the inverse temperature (b) for  $Tm_{0,2}Mn_{0,8}Se$ .

Inset: Temperature dependence of the current for  $Tm_{0,2}Mn_{0,8}Se$

#### Thermionic current in manganese sulfide substituted with thulium

Let us consider how the chalcogen anion affects the current in a zero field and what causes it. Fig. 4 shows the temperature dependence of the current for  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solutions with  $x = 0.05$ ;  $0.15$  in the temperature range  $80$ – $380$  K. The maximum current value is achieved at temperatures of  $320$  K for  $x = 0.05$  and  $355$  K for  $x = 0.15$ . These maxima are due to the emission of electrons from deep traps, and the temperatures of the thermionic current maxima correlate with the temperatures at which IR absorption disappears at the frequency  $\omega_1 = 3116 \text{ cm}^{-1}$  [26].

For a composition with  $x = 0.15$ , the sign of the thermoEMF changes at  $T = 350$  K, which is possibly caused by an increase in the thermionic current. It is possible that at this temperature the dissociation of vibronic states formed by the strong interaction of electrons and vibration modes of the octahedron occurs.

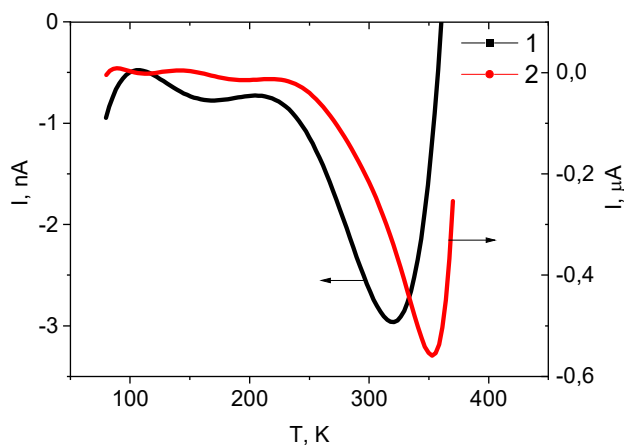


Рис. 4. Температурная зависимость термоэмиссионного тока для образцов  $Tm_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,05$  (1);  $0,15$  (2)

Fig. 4. Temperature dependence of the thermionic current for samples  $Tm_xMn_{1-x}S$  with  $x = 0.05$  (1);  $0.15$  (2)

The replacement of manganese by ions of variable valence causes local deformation of the lattice, which is accompanied by a change in the magnitude of the ion charge. How will the current change in

a zero external electric field when replacing manganese with a rare earth ion with constant valence, for example, holmium. In Fig. 5 the current for  $\text{Ho}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  is given. The current magnitude decreases compared to the current in  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  with  $x = 0.05; 0.15$ , there is an additional maximum at 205 K and a sharp peak at 348 K. Substitution with holmium enhances the electrical heterogeneity, the excess charge is compensated by holes and creates a charge density wave. As a result, a potential difference and an internal electric field  $E_{\text{in}}$  arise on the surface of the sample. A change in electrical polarization induces a pyrocurrent  $j_p = dP/dt$ . The polarization obtained by integrating the current is shown in Fig. 5, b. When heated,  $P(T)$  has an anomaly at 200 K and disappears above  $T = 350$  K.

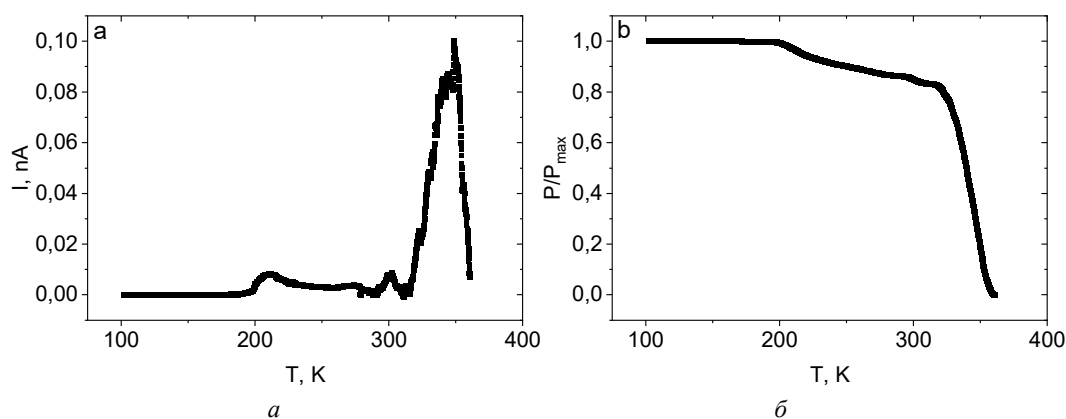


Рис. 5. Температурная зависимость тока (а) и относительное изменение поляризации (б) для  $\text{Ho}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$

Fig. 5. Temperature dependence of the current (a) and relative change in polarization (b) for  $\text{Ho}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$

Polarization occurs due to the displacement of sulfur ions from octahedral positions; the angle between the bonds of magnetic ions and the ligand changes, affecting the magnitude of the exchange field. As a result, this will cause a change in magnetic characteristics.

### Conclusion

Anomalies in the temperature dependence of the current in a zero external field make it possible to distinguish the emission current and the pyrocurrent caused by electric polarization. A pyroelectric current was found in selenide solid solutions below the percolation concentration, as well as upon substitution with holmium ions. In manganese sulfides replaced by thulium, deep traps are formed, which are a source of thermionic current.

### Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 23-22-10016, the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

### Библиографические ссылки

1. Castro-Gutiérrez J., Celzard A., Fierro V. Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes // *Front. Mater.* 2020. Vol. 7. P. 217.
2. Electrocatalytic and supercapacitor performance of phosphorous and nitrogen co-doped porous carbons synthesized from aminated tannins / V. G. Bairi, U. B. Nasini et al. // *Electrochim. Acta.* 2015. Vol. 182. P. 987.
3. Advances in high-voltage supercapacitors for energy storage systems: materials and electrolyte tailoring to implementation / J. M. Lim, Y. S. Jang et al. // *Nanoscale Adv.* 2023. Vol. 5. P. 615–626.

4. Dielectric gels with ultra-high dielectric constant, low elastic modulus, and excellent transparency / L. Shi, R. Yang, S. Lu et al. // *NPG Asia Mater* 2018. Vol. 10. P. 821–826.
5. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant / Q. M. Zhang et al. // *Nature* 2002. Vol. 419. P. 284–287.
6. Dielectric and electrical properties of polymorphic bismuth pyrostannate  $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$  / L. V. Udod et al. // *Phys. Sol. St.* 2014. Vol. 56, No. 7. P. 1315–1319.
7. Magnetodielectric effect and spin state of iron ions in iron-substituted bismuth pyrostannate / L. V. Udod, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Eur. Phys. J. Plus* 2020. Vol. 135. P. 776.
8. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Semiconductors upon Temperature and Frequency Variation / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov, H. Abdelbaki // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023. Vol. 34. P. 284.
9. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Filipson G. Yu. Magnetic capacitance in variable-valence manganese sulfides // *Phys. Status Solidi B.* 2020. Vol. 257, № 5. P. 1900637.
10. Dielectric and transport properties, electric polarization at the sequential structural phase transitions in iron-substituted bismuth pyrostannate / S. S. Aplesnin, L. V. Udod, M. N. Sitnikov, O. B. Romanova // *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47, № 2. P. 1704–1711.
11. Defect-induced dipole polarization engineering of electromagnetic wave absorbers: Insights and perspectives / C. Gong, J. Ding et al. // *Composites Part B: Engineering* 2023. Vol. 252. P. 110479.
12. Исследование магнитоэлектрического эффекта и термоЭДС в композитном железозамещенном пиростанате висмута  $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})_2\text{O}_7/\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  / Л. В. УДОД, С. С. АПЛЕСНИН, М. Н. СИТНИКОВ, О. Б. РОМАНОВА // *ФТТ.* 2023. Т. 65, Вып. 8. С. 1361–1367.
13. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. Regulation of the thermopower and ultrasound by magnetic field in manganese sulfide doped with variable-valence ions // *Eur. Phys. J. Plus.* 2024. Vol. 139. P. 247.
14. Ultralow thermal conductivity and high thermopower of a novel high-entropy  $(\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Eu}_{0.2}\text{Pb}_{0.2})\text{Nb}_2\text{O}_6$  with tungsten bronze structure / M. Zhu, D. Ma et al. // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2024. Vol. 44, Is. 4. P. 2198–2205.
15. High performance ( $ZT > 1$ ) n-type oxide thermoelectric composites from earth abundant materials / M. Acharya, S. S. Jana, M. Ranjan, T. Maiti // *Nano Energy* 2021. Vol. 84. P. 105905.
16. Electroacoustic and asymmetry of the I–V characteristic induced by ultrasound in the  $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Re} = \text{Tm}, \text{Yb}$ ) / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, O. B. Romanova et al. // *Eur. Phys. J. Plus.* 2022. Vol. 137. P. 226.
17. Structural and electronic transitions in thulium-substituted manganese selenide / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48, Is. 20. P. 29822–29828.
18. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements / M. Shtern, M. Rogachev et al. // *J. All. Comp.* 2021. Vol. 877. P. 160328.
19. Thermoelectric Silver-Based Chalcogenides / S. Y. Tee, D. Ponsford, C. L. Lay et al. // *Adv Sci.* 2022. Vol. 9, No. 36. P. 2204624.
20. A record thermoelectric efficiency in tellurium-free modules for low-grade waste heat recovery / Z. Bu, X. Zhang, Y. Hu et al. // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. P. 237.
21. Insight into the structural, vibrational and thermodynamic properties of  $\text{SmX}$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) chalcogenides: First-principles investigations / A. Bakar, A. Afaq et al. // *Phys. B: Cond. Matt.* 2020. Vol. 576. P. 411715.
22. Pressure-Induced Valence Anomaly in  $\text{TmTe}$  Probed by Resonant Inelastic X-Ray Scattering / I. Jarrige, J.-P. Rueff, S. R. Shieh et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. P. 127401.
23. Electronic structure and spectroscopic properties of thulium monochalcogenides / S. Lebegue, G. Santi, A. Svane et al. // *Phys. Rev. B.* 2005. Vol. 72. P. 245102.

24. Electronic configuration mixing in  $\text{Sm}_{1-x}\text{Y}_x\text{S}$  / M. Avignon, S. Ghatak, J. Coey et al. // *JMMM*. 1976. Vol. 3. P. 88.
25. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange-Induced Valence Transition // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. P. 871.
26. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // *Phys. Status Solidi B*. 2019. Vol. 256. P. 1900043.

## References

1. Castro-Gutiérrez J., Celzard A., Fierro V. Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes. *Front. Mater.* 2020, Vol. 7, P. 217.
2. Bairi V. G., Nasini U. B. et al. Electrocatalytic and supercapacitor performance of phosphorous and nitrogen co-doped porous carbons synthesized from aminated tannins. *Electrochim. Acta*. 2015, Vol. 182, P. 987.
3. Lim J. M., Jang Y. S. et al. Advances in high-voltage supercapacitors for energy storage systems: materials and electrolyte tailoring to implementation. *Nanoscale Adv.* 2023, Vol. 5, P. 615–626.
4. Shi L., Yang R., Lu S. et al. Dielectric gels with ultra-high dielectric constant, low elastic modulus, and excellent transparency. *NPG Asia Mater.* 2018, Vol. 10, P. 821–826.
5. Zhang Q. M. et al. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant. *Nature* 2002, Vol. 419, P. 284–287.
6. Udod L. V. et al. Dielectric and electrical properties of polymorphic bismuth pyrostannate  $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ . *Phys. Sol. St.* 2014, Vol. 56, No. 7, P. 1315–1319.
7. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. et al. Magnetodielectric effect and spin state of iron ions in iron-substituted bismuth pyrostannate. *Eur. Phys. J. Plus* 2020, Vol. 135, P. 776.
8. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Abdelbaki H. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Semiconductors upon Temperature and Frequency Variation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023, Vol. 34, P. 284.
9. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Filipson G. Yu. Magnetic capacitance in variable-valence manganese sulfides. *Phys. Status Solidi B*. 2020, Vol. 257, No. 5, P. 1900637.
10. Aplesnin S. S., Udod L. V., Sitnikov M. N., Romanova O. B. Dielectric and transport properties, electric polarization at the sequential structural phase transitions in iron-substituted bismuth pyrostannate. *Ceram. Int.* 2021, Vol. 47, No. 2, P. 1704–1711.
11. Gong C., Ding J. et al. Defect-induced dipole polarization engineering of electromagnetic wave absorbers: Insights and perspectives. *Composites Part B: Engineering*. 2023, Vol. 252, P. 110479.
12. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B. [Study of the magnetoelectric effect and thermopower in composite iron-substituted bismuth pyrostatate  $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})_2\text{O}_7/\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ ]. *FTT*. 2023, Vol. 65, Is. 8, P. 1361–1367 (In Russ.).
13. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. Regulation of the thermopower and ultrasound by magnetic field in manganese sulfide doped with variable-valence ions. *Eur. Phys. J. Plus*. 2024, Vol. 139, P. 247.
14. Zhu M., Ma D. et al. Ultralow thermal conductivity and high thermopower of a novel high-entropy  $(\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Eu}_{0.2}\text{Pb}_{0.2})\text{Nb}_2\text{O}_6$  with tungsten bronze structure. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2024, Vol. 44, Is. 4, P. 2198–2205.
15. Acharya M., Jana S. S., Ranjan M., Maiti T. High performance ( $ZT > 1$ ) n-type oxide thermoelectric composites from earth abundant materials. *Nano Energy*. 2021, Vol. 84, P. 105905.
16. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B. et al. Electroacoustic and asymmetry of the I–V characteristic induced by ultrasound in the  $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Re} = \text{Tm}, \text{Yb}$ ). *Eur. Phys. J. Plus*. 2022, Vol. 137, P. 226.

17. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. et al. Structural and electronic transitions in thulium-substituted manganese selenide. *Ceram. Int.* 2022, Vol. 48, Is. 20, P. 29822–29828.
18. Shtern M., Rogachev M. et al. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements. *J. All. Comp.* 2021, Vol. 877, P. 160328.
19. Tee S. Y., Ponsford D., Lay C. L. et al. Thermoelectric Silver-Based Chalcogenides. *Adv Sci.* 2022, Vol. 9, No. 36, P. 2204624.
20. Bu Z., Zhang X., Hu Y. et al. A record thermoelectric efficiency in tellurium-free modules for low-grade waste heat recovery. *Nat. Commun.* 2022, Vol. 13, P. 237.
21. Bakar A., Afaq A. et al. Insight into the structural, vibrational and thermodynamic properties of SmX (X = S, Se, Te) chalcogenides: First-principles investigations. *Phys. B: Cond. Matt.* 2020, Vol. 576, P. 411715.
22. Jarrige I., Rueff J.-P., Shieh S. R. et al. Pressure-Induced Valence Anomaly in TmTe Probed by Resonant Inelastic X-Ray Scattering. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 127401.
23. Lebègue S., Santi G., Svane A. et al. Electronic structure and spectroscopic properties of thulium monochalcogenides. *Phys. Rev. B.* 2005, Vol. 72, P. 245102.
24. Avignon M., Ghatak S., Coey J. et al. Electronic configuration mixing in Sm<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>S. *JMMM.* 1976, Vol. 3, P. 88.
25. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange-Induced Valence Transition. *Phys. Rev. Lett.* 1985, Vol. 55, P. 871.
26. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M. et al. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S solid solution. *Phys. Status Solidi B.* 2019, Vol. 256, P. 1900043.

© Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Aplesnin S. S., 2024

---

**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.

**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.

**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.

**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.

**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.

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

---



## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Файлы со статьей принимаются по электронной почте [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru).

**Электронная копия.** Статья набирается в программе Microsoft Office Word 2003 (**расширение имени файла DOC!**)

**Объем статьи:** 5–20 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 4–5 страниц, обзорная статья – до 20 страниц.

**Параметры страницы.** Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

**Текст.** Шрифт Times New Roman 11. Подзаголовки: шрифт Times New Roman 11 bold.

**Межстрочный интервал** – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается.

**Абзацный отступ** равен 0,5 см.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

Статья должна содержать предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Страницы не нумеруются.

### СТРУКТУРА СТАТЬИ:

**1. Индекс УДК** предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

**2. Название статьи:** не более 15 слов. Аббревиатуры и сокращения в названии не допускаются.

**3. Авторы.** Инициалы и фамилия. Количество авторов одной статьи не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

**4. Аффiliation автора при публикации:** название и адрес организации, а также электронная почта автора-корреспондента. Если авторов несколько, у каждой фамилии и соответствующей организации проставляется цифровой верхний индекс. Если все авторы статьи работают в одной организации, она указывается один раз.

**5. Аннотация:** минимум 230–250 слов (следует ориентироваться на объем англоязычной аннотации). Структура аннотации: цель исследования, методы, результаты, заключение. Курсивом.

**6. Ключевые слова:** не более 5–7 слов или словосочетаний. Курсивом.

**7. Название статьи** на английском языке.

**8. Авторы** на английском языке.

**9. Аффiliation автора** на английском языке.

**10. Аннотация** на английском языке.

**11. Ключевые слова (Keywords)** на английском языке.

**12. Основной текст** строится по следующей схеме и содержит обязательные подзаголовки:

– **Введение.**

– **Тематические подзаголовки** по основной части текста.

– **Заключение.**

**13. Благодарности** (если есть указание на источники финансирования, гранты).

**14. Acknowledgements** (Благодарности дублируются на английском языке).

**15. Библиографические ссылки.** Библиографические ссылки должны содержать не менее 15 источников! Библиографические ссылки оформляются на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5–2008. Ссылки на источники расставляются по тексту в квадратных скобках в порядке нумерации по мере цитирования.

**16. References.** Библиографические ссылки в романском алфавите оформляются по требованиям, представленным на сайте. Используется система транслитерации BGN ([translit.net](http://translit.net))

**17. Сведения об авторах на русском и английском языках.** В сведениях указывается Ф.И.О. автора, ученая степень, ученое звание, должность, название организации. Например:

**Иванов Иван Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [sen@sibsau.ru](mailto:sen@sibsau.ru).

**Ivanov Ivan Ivanovich** – Dr. Sc, Professor, Head of the Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [sen@sibsau.ru](mailto:sen@sibsau.ru).