

УДК 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538

**Для цитирования:** Харьков А. М., Ситников М. Н., Аплеснин С. С. Магнитоимпеданс в тулий марганцевом халькогениде // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 531–538. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538.

**For citation:** Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Aplesnin S. S. [Magnetoimpedance in thulium manganese chalcogenide]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 531–538. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538.

---

## Магнитоимпеданс в тулий марганцевом халькогениде

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: kharkanton@mail.ru

Управление транспортными характеристиками под действием магнитного поля является перспективным с точки зрения создания датчиков магнитного поля устойчивых к радиации. Исследуется импеданс и его компоненты в тулий марганцевом халькогениде в интервале частот  $10^2$ – $10^6$  Гц. Найдена область температур с превалирующим вкладом реактивной и активной частей импеданса. Компоненты импеданса описываются в модели Дебая. При замещении марганца ионами туния частоты максимумов мнимой компоненты импеданса смещаются в сторону высоких частот в селениде марганца на два порядка. С ростом концентрации замещения ионами туния в селенидах найдено два времени релаксации по сравнению с сульфидами. Найден активационный характер времени релаксации, энергия активации от концентрации ионов туния. Установлено увеличение импеданса в магнитном поле в области малых концентраций и смена знака импеданса по температуре для больших концентраций. Магнитоимпеданс в халькогенидах проходит через максимум при нагревании образцов. Увеличение импеданса в магнитном поле обусловлено изменением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле, которая пропорциональна проводимости. Положительное значение магнитоимпеданса описывается в модели электрически неоднородной среды. Из импеданса можно получить информацию об электрической неоднородности материала.

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

## Magnetoimpedance in thulium manganese chalcogenide

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: kharkanton@mail.ru

*Control of transport characteristics under the influence of a magnetic field is promising from the point of view of creating magnetic field sensors resistant to radiation. The impedance and its components in thulium manganese chalcogenide in the frequency range of  $10^2$ – $10^6$  Hz are studied. The temperature range with a prevailing contribution of the reactive and active parts of the impedance is found. The impedance components are described in the Debye model. When manganese is replaced by thulium ions, the frequencies of the maxima of the imaginary component of the impedance shift toward high frequencies in manganese selenide by two orders of magnitude. With an increase in the concentration of substitution by thulium ions in selenides, two relaxation times are found, compared with sulfides. The activation nature of the*

relaxation time, the activation energy from the concentration of thulium ions are found. An increase in impedance in a magnetic field in the region of low concentrations and a change in the sign of the impedance with temperature for high concentrations are established. Magnetoimpedance in chalcogenides passes through a maximum when heating the samples. The increase in impedance in a magnetic field is due to a change in the diagonal component of the permittivity in a magnetic field, which is proportional to the conductivity. A positive value of magnetoimpedance is described in the model of an electrically inhomogeneous medium. From the impedance, information can be obtained about the electrical inhomogeneity of the material.

*Keywords:* semiconductors, magnetoimpedance, Debye model.

## 1. Введение

Управление транспортными характеристиками в полупроводниках под действием внешнего магнитного поля представляет интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения [1–4]. В полупроводниках с неоднородным распределением электрического заряда транспортные характеристики зависят от степени неоднородности [5–8]. В спектре электронных возбуждений в запрещенной зоне образуется конечная электронная плотность на уровне химпотенциала в результате локализации заряда. При слабом легировании волновая функция электрона остается локализованной. С ростом концентрации замещения в центре зоны формируются делокализованные состояния и при некотором критическом значении возникает бесконечный кластер, при котором волновые функции электрона представляют в виде плоских волн, распространяющихся по всему кристаллу [9; 10].

Регулировать электрическую неоднородность можно за счет флуктуации валентности, концентрации и температуры [11–13]. Например, ион туния обнаруживает трехвалентное состояние в TmS [14; 15], состояние промежуточной валентности в TmSe [16] и двухвалентное состояние в TmTe [17]. Электронная конфигурация иона  $Tm^{2+\delta}$  зависит от халькогена. Поэтому замещение иона марганца в халькогенидах MnS и MnSe ионами туния приведет к разной энергии делокализации электронов. Введение в систему TmSe нестехиометрии способствует увеличению валентности ионов туния до  $Tm^{3+}$ .

Цель работы – выявить влияние ионов халькогена на время релаксации носителей тока, импедансные характеристики и их изменение в магнитном поле.

## 2. Влияние иона халькогена на частотную зависимость импеданса

Твердые растворы  $Tm_xMn_{1-x}S$  синтезировали флюсовым методом из поликристаллического сульфида марганца и моносульфида туния [18]. Образцы  $(MnSe)_{1-x}(Tm_{0,76}Se)_x$  получены методом твердофазной реакции в вакуумированных кварцевых ампулах в однозонной печи сопротивления. Подробно методика синтеза описана в [19]. Рентгеноструктурное исследование халькогенидов дает рентгенограмму, соответствующую ГЦК-решетке типа NaCl.

Импеданс, компоненты импеданса реагируют на изменение электронной структуры и локальной деформации решетки, которые меняют функцию распределения электронной плотности. Определение времени релаксации носителей тока является важной характеристикой определения механизма диссипации носителей тока. Релаксация может иметь как активационный, так и безактивационный тип [20].

Релаксация носителей тока на частотах выше 1 кГц проявляется при температурах выше комнатной, поэтому зависимость импеданса от частоты без поля и в магнитном поле измерим при температурах выше комнатной. На рис. 1 приведены частотные зависимости импеданса  $Z(\omega)$  и  $Im(Z(\omega))$  для  $Tm_{0,05}Mn_{0,95}S$  и  $(MnSe)_{1-x}(Tm_{0,76}Se)_x$ . При замещении марганца ионами туния частоты максимумов  $Im(Z(\omega))$  смещаются в сторону высоких частот в селениде марганца на два порядка. Независимо от иона халькогена время релаксации резко меняется в окрестности 400 К (вставки на рис. 1). Ниже  $T = 400$  К в системе существует одно время релаксации в области частот  $10^2$ – $10^6$  Гц и компоненты импеданса описываются в модели Дебая:

$$\text{Im} Z(\omega) = \frac{B\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время релаксации носителей тока; В – параметр. Выше 420 К в системе появляется спектр времен релаксации. Время релаксации от температуры зависит экспоненциально  $\tau = \tau_0 \exp(E_g/T)$  с энергией активации  $E_g = 0,47$  эВ в  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$  для  $x = 0,05$ .

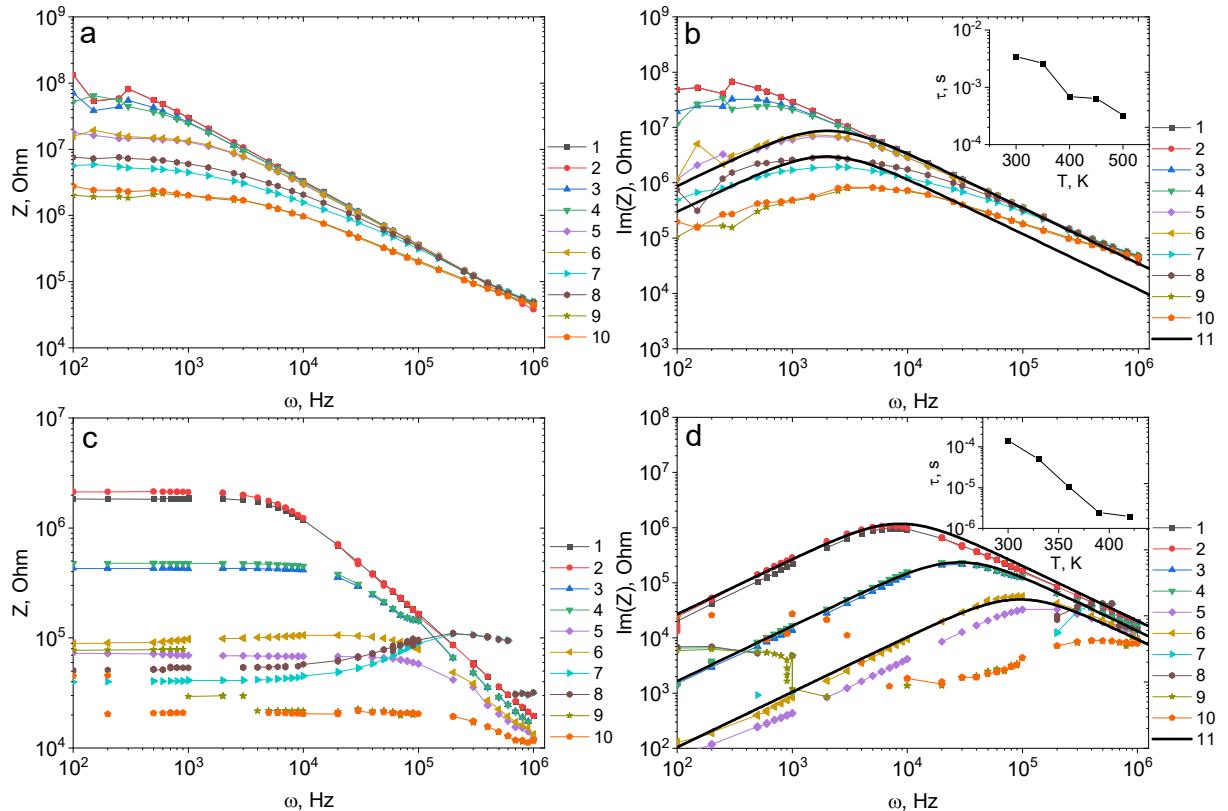


Рис. 1. Частотные зависимости импеданса  $Z$  (*a, c*) и мнимой части импеданса (*b, d*) для образцов  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  (*a, b*), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в поле 8 кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 К (9, 10), и для образцов  $\text{Tm}_{0,04}\text{Mn}_{0,95}\text{Se}$  (*c, d*), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в поле 12 кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при  $T = 300$  (1, 2), 330 (3, 4), 360 (5, 6), 390 (7, 8), 420 К (9, 10). Вставки: температурные зависимости времени релаксации  $\tau$ . Результаты эксперимента описаны в рамках модели Дебая (сплошные линии 11)

Fig. 1. Frequency dependences of impedance  $Z$  (*a, c*) and imaginary part of impedance (*b, d*) for  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  samples (*a, b*) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a field of 8 kOe (2, 4, 6, 8, 10) at  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 K (9, 10) and for  $\text{Tm}_{0,04}\text{Mn}_{0,95}\text{Se}$  samples (*c, d*) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a field of 12 kOe (2, 4, 6, 8, 10) at  $T = 300$  (1, 2), 330 (3, 4), 360 (5, 6), 390 (7, 8), 420 K (9, 10). Inserts: temperature dependences of the relaxation time  $\tau$ . The experimental results are described within the Debye model (solid lines 11)

Компоненты импеданса от частоты в  $\text{Tm}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  (рис. 2, *a*) можно описать в модели Дебая с одним временем релаксации, которое имеет активационный вид до  $T = 450$  К с энергией активации  $E_g = 0,72$  эВ (вставка на рис. 2, *b*). В  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$  с  $x = 0,1$   $\text{Im}(Z(\omega))$  хорошо описывается в модели Дебая:

$$\text{Im} Z(\omega) = \frac{A\omega\tau_1}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{B\omega\tau_2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \quad (2)$$

с двумя временами релаксации (рис. 2, *c*) и с энергией активации  $E_g = 0,6$  эВ для  $\tau_1$  меньше, чем в  $\text{Tm}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$ .

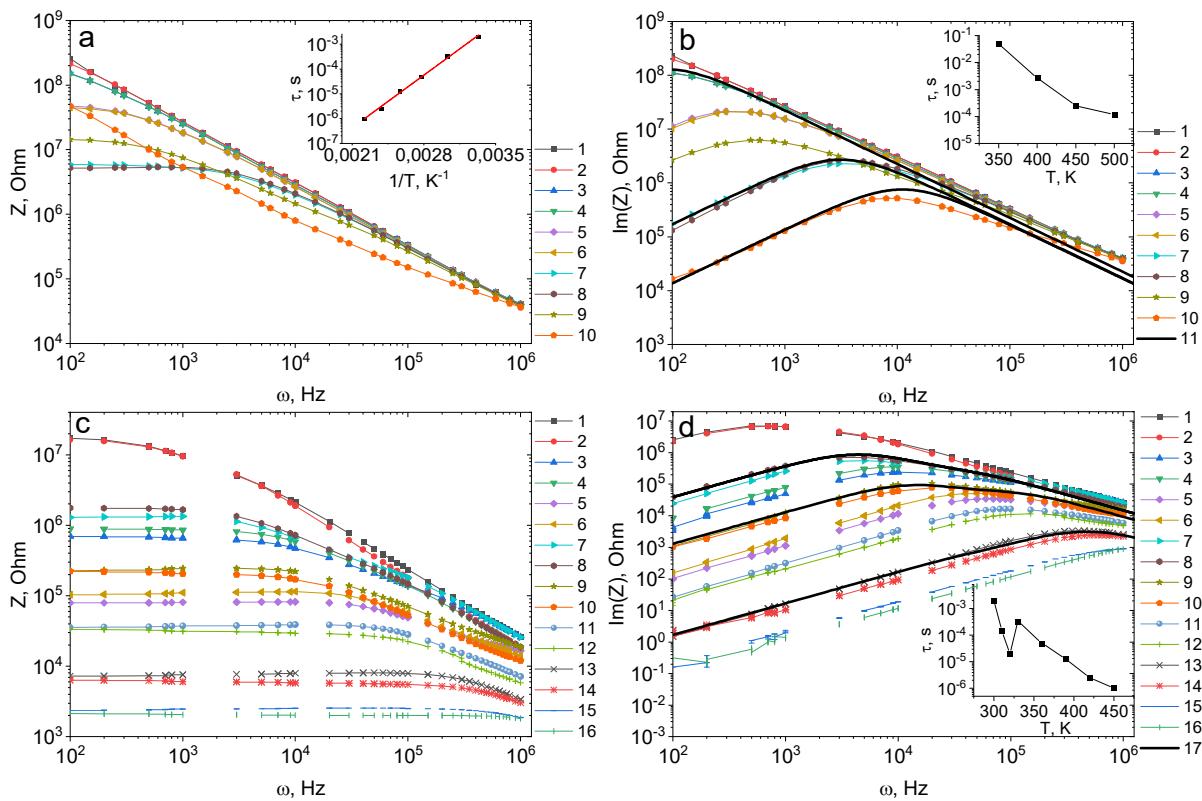


Рис. 2. Частотные зависимости импеданса  $Z$  ( $a, c$ ) и мнимой части импеданса ( $b, d$ ) для образцов  $Tm_{0.1}Mn_{0.9}S$  ( $a, b$ ), измеренные в нулевом магнитном поле ( $1, 3, 5, 7, 9$ ) и в поле  $8$  кЭ ( $2, 4, 6, 8, 10$ ) при  $T = 300$  ( $1, 2$ ),  $350$  ( $3, 4$ ),  $400$  ( $5, 6$ ),  $450$  ( $7, 8$ ),  $500$  К ( $9, 10$ ), и для образцов  $Tm_{0.08}Mn_{0.9}Se$  ( $c, d$ ), измеренные в нулевом магнитном поле ( $1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ ) и в поле  $12$  кЭ ( $2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$ ) при  $T = 300$  ( $1, 2$ ),  $310$  ( $3, 4$ ),  $320$  ( $5, 6$ ),  $330$  ( $7, 8$ ),  $360$  ( $9, 10$ ),  $390$  ( $11, 12$ ),  $420$  ( $13, 14$ ),  $450$  К ( $15, 16$ ). Вставки: температурные зависимости времени релаксации  $\tau$ . Результаты эксперимента описаны в рамках модели Дебая (сплошные линии  $11, 17$ )

Fig. 2. Frequency dependences of impedance  $Z$  ( $a, c$ ) and imaginary part of impedance ( $b, d$ ) for  $Tm_{0.1}Mn_{0.9}S$  samples ( $a, b$ ) measured in zero magnetic field ( $1, 3, 5, 7, 9$ ) and in a field of  $8$  kOe ( $2, 4, 6, 8, 10$ ) at  $T = 300$  ( $1, 2$ ),  $350$  ( $3, 4$ ),  $400$  ( $5, 6$ ),  $450$  ( $7, 8$ ),  $500$  K ( $9, 10$ ) and for  $Tm_{0.08}Mn_{0.9}Se$  samples ( $c, d$ ) measured in zero magnetic field ( $1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ ) and in a field of  $12$  kOe ( $2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$ ) at  $T = 300$  ( $1, 2$ ),  $310$  ( $3, 4$ ),  $320$  ( $5, 6$ ),  $330$  ( $7, 8$ ),  $360$  ( $9, 10$ ),  $390$  ( $11, 12$ ),  $420$  ( $13, 14$ ),  $450$  K ( $15, 16$ ). Inserts: temperature dependences of the relaxation time  $\tau$ . The experimental results are described within the Debye model (solid lines  $11, 17$ )

### 3. Магнитоимпеданс

Импеданс зависит от магнитного поля и иона халькогена. На рис. 3 приведены изменения импеданса в магнитном поле, вычисленным по формуле

$$\Delta Z = (Z(\omega, H) - Z(\omega, H = 0)) / Z(\omega, H = 0), \quad (3)$$

где  $Z(\omega, H)$  импеданс в магнитном поле и без поля для  $Z(\omega, H = 0)$ . Для концентраций замещения  $x < 0,05$  импеданс увеличивается в магнитном поле и магнитоимпеданс достигает максимума  $\Delta Z = 0,35$  при  $T = 450$  К для образцов  $Tm_{0,05}Mn_{0,95}S$  и  $\Delta Z = 0,56$  при  $T = 360$  К. С ростом концентрации изменение импеданса в магнитном поле уменьшается. При нагревании магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре (рис. 3,  $c, d$ ).

Импеданс в халькогенидах увеличивается в магнитном поле и проходит через максимум при нагревании образцов. Увеличение импеданса обусловлено изменением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле, которая пропорциональна проводимости  $\sigma(\omega) = i\omega\epsilon$ , импеданс  $Z^2 = 1/\sigma^2 + 1/(\omega C)^2 \approx 1/\epsilon^2$ . В электрически неоднородной среде продольная компонента диэлектрической проницаемости имеет вид [21; 22]:

$$\operatorname{Re}[\varepsilon_{xx}(\omega)] = \frac{\varepsilon(1 - \beta^2 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2)}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2}, \quad (4)$$

где  $\beta = \mu H$ ,  $\mu$  – подвижность,  $\tau = RC$ . Относительное изменение импеданса [23]

$$\frac{(Z(H) - Z(0))}{Z(H)} = \frac{(\varepsilon(0) - \varepsilon(H))}{\varepsilon(0)} = \frac{\beta^2}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2} \quad (5)$$

и его компонент удовлетворительно описывается этой функцией в области малых концентраций (рис. 3). В результате из импеданса можно получить информацию об электрической неоднородности [24] и диэлектрической проницаемости в среде [25; 26].

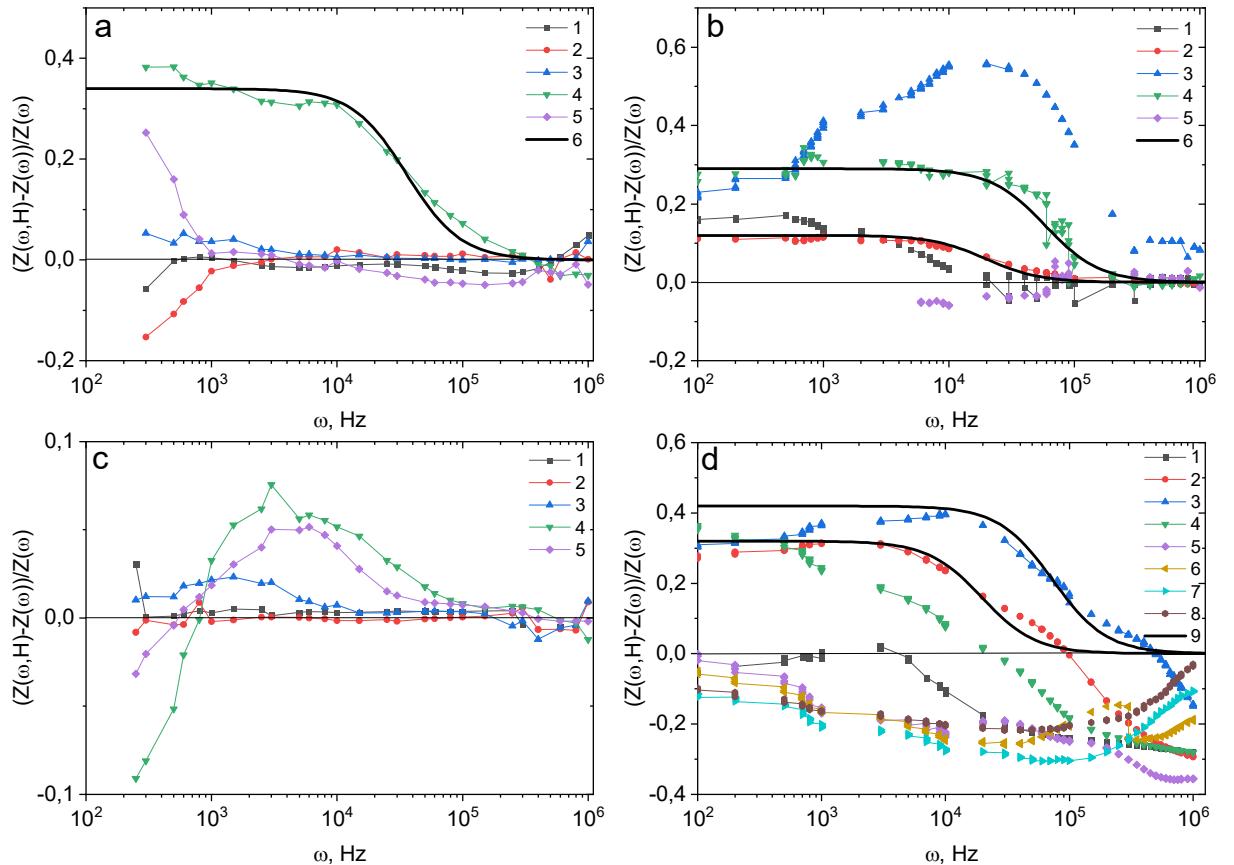


Рис. 3. Магнитоимпеданс в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1),  $350$  (2),  $400$  (3),  $450$  (4),  $500$  К (5) для образцов  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  (a); в магнитном поле  $H = 12$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1),  $330$  (2),  $360$  (3),  $390$  (4),  $420$  К (5) для  $\text{Tm}_{0.04}\text{Mn}_{0.95}\text{Se}$  (b); в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1),  $350$  (2),  $400$  (3),  $450$  (4),  $550$  К (5) для образцов  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  (c); в магнитном поле  $H = 12$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1),  $310$  (2),  $320$  (3),  $330$  (4),  $360$  (5),  $390$  (6),  $420$  (7),  $450$  К (8) для  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  (d). Результаты эксперимента описаны формулой (5) (сплошные линии 6, 9)

Fig. 3. Magnetoimpedance in a magnetic field of  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1),  $350$  (2),  $400$  (3),  $450$  (4),  $500$  K (5) for  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  samples (a); in a magnetic field of  $H = 12$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1),  $330$  (2),  $360$  (3),  $390$  (4),  $420$  K (5) for  $\text{Tm}_{0.04}\text{Mn}_{0.95}\text{Se}$  (b); in a magnetic field of  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1),  $350$  (2),  $400$  (3),  $450$  (4),  $550$  K (5) for  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  samples (c); in a magnetic field  $H = 12$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1),  $310$  (2),  $320$  (3),  $330$  (4),  $360$  (5),  $390$  (6),  $420$  (7),  $450$  K (8) for  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  (d). The experimental results are described by formula (5) (solid lines 6, 9)

#### 4. Заключение

$\text{B}(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0.76}\text{Se})_x$  найдено превалирование реактивной части импеданса, в сульфиде  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  преобладает реальная часть импеданса. С ростом концентрации замещения мар-

ганса тулием импеданс и его компоненты увеличиваются на порядок. Возможно образование зарядового упорядочения и увеличение емкости на два порядка. Релаксация носителей заряда описывается в модели Дебая. Найден активационный характер времени релаксации и энергия активации. Для малых концентраций импеданс увеличивается в магнитном поле в халькогенидах. С ростом концентрации магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре. Увеличение импеданса в поле вызвано уменьшением диэлектрической проницаемости в магнитном поле.

### **Благодарности**

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

### **Acknowledgements**

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-22-10016, the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

### **Библиографические ссылки**

1. Magnetic-field-induced miniband conduction in semiconductor superlattices / D. Fowler, D. P. A. Hardwick, A. Patanè et al. // Phys. Rev. B 2007. Vol. 76. P. 245303.
2. Hod O., Baer R., Rabani E. Magnetoresistance of nanoscale molecular devices based on Aharonov–Bohm interferometry // J. Phys.: Cond. Matt. 2008. Vol. 20. P. 383201.
3. Resolving electron and hole transport properties in semiconductor materials by constant light-induced magneto transport / A. Musiienko, F. Yang, T. W. Gries et al. // Nat. Comm. 2024. Vol. 15. P. 316.
4. Charge transport in mixed metal halide perovskite semiconductors / S. P. Senanayak, K. Dey, R. Shivanna et al. // Nat. Mater. 2023. Vol. 22. P. 216–224.
5. Hu J., Rosenbaum T. F., Betts J. B. Current Jets, Disorder, and Linear Magnetoresistance in the Silver Chalcogenides // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 186603.
6. 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.
7. Electrosound 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.
8. Апленчин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100, вып. 2. С. 104–110.
9. Evers F., Mirlin A. D. Anderson transitions // Rev. Mod. Phys. 2008. Vol. 80. P. 1355.
10. Nakayama T., Yakubo K. Anderson Transition // Fract. Conc. Cond. Matt. Phys. 2003. Vol. 140. P. 115–147.
11. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. P. 871.
12. Kaldus E., Fritzler B. Valence and phase instabilities in TmSe crystals // Prog. Sol. St. Chem. 1982. Vol. 14. P. 95–139.
13. Understanding the valency of rare earths from first-principles theory / P. Strange, A. Svane, W. M. Temmerman et al. // Nature 1999. Vol. 399. P. 756.
14. Wachter P. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths // Phys. Rev. B. 1989. P. 132.
15. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. P. 871.
16. Valence and magnetic ordering in intermediate valence compounds: TmSe versus  $\text{SmB}_6$  / J. Derr, G. Knebel, G. Lapertot et al. // J. Phys.: Cond. Matt. 2006. Vol. 18. P. 2089.

17. 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.
18. Magnetic properties and the metal-insulator transition in  $Gd_xMn_{1-x}S$  solid solutions / O. B. Romanova, L. I. Ryabinkina, V. V. Sokolov et al. // Sol. St. Comm. 2010. Vol. 150. P. 602–604.
19. 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.
20. 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.
21. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 166602.
22. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the  $Ho_xMn_{1-x}S$  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.
23. Апленчин С. С., Харьков А. М., Ситников М. Н. Регулирование энергии активации и магнитоимпеданса частотой переменного тока в сульфиде марганца с частичным замещением ионами самария // ФТТ. 2023. Т. 65, вып. 11. С. 1882–1888.
24. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Stat. Sol. B 2019. Vol. 256. P. 1900043.
25. Petrovsky V., Manohar A., Dogan F. Dielectric constant of particles determined by impedance spectroscopy // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 014102.
26. Gonzalez J. R., Sinclair D. C., West A. R. Impedance and Dielectric Spectroscopy of Functional Materials: A Critical Evaluation of the Two Techniques // J. Electrochem. Soc. 2023. Vol. 170, No. 11. P. 6504.

### References

1. Fowler D., Hardwick D. P. A., Patanè A. et al. Magnetic-field-induced miniband conduction in semiconductor superlattices. *Phys. Rev. B* 2007, Vol. 76, P. 245303.
2. Hod O., Baer R., Rabani E. Magnetoresistance of nanoscale molecular devices based on Aharonov–Bohm interferometry. *J. Phys.: Cond. Matt.* 2008, Vol. 20, P. 383201.
3. Musiienko A., Yang F., Gries T. W. et al. Resolving electron and hole transport properties in semiconductor materials by constant light-induced magneto transport. *Nat. Comm.* 2024, Vol. 15, P. 316.
4. Senanayak S. P., Dey K., Shivanna R. et al. Charge transport in mixed metal halide perovskite semiconductors. *Nat. Mater.* 2023, Vol. 22, P. 216–224.
5. Hu J., Rosenbaum T. F., Betts J. B. Current Jets, Disorder, and Linear Magnetoresistance in the Silver Chalcogenides. *Phys. Rev. Lett.* 2005, Vol. 95, P. 186603.
6. 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.
7. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B. et al. Electrosound and asymmetry of the I–V characteristic induced by ultrasound in the  $Re_xMn_{1-x}S$  ( $Re = Tm, Yb$ ). *Eur. Phys. J. Plus*. 2022, Vol. 137, P. 226.
8. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the paramagnetic state in  $Gd_xMn_{1-x}S$ ]. *Letters to JETP*. 2014, Vol. 100, Is. 2, P. 104–110 (In Russ.).
9. Evers F., Mirlin A. D. Anderson transitions. *Rev. Mod. Phys.* 2008, Vol. 80, P. 1355.
10. Nakayama T., Yakubo K. Anderson Transition. *Fract. Conc. Cond. Matt. Phys.* 2003, Vol. 140, P. 115–147.
11. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition. *Phys. Rev. Lett.* 1985, Vol. 55, P. 871.
12. Kaldis E., Fritzler B. Valence and phase instabilities in TmSe crystals. *Prog. Sol. St. Chem.* 1982, Vol. 14, P. 95–139.

13. Strange P., Svane A., Temmerman W. M., et al. Understanding the valency of rare earths from first-principles theory. *Nature* 1999, Vol. 399, P. 756.
14. Wachter P. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. *Phys. Rev. B* 1989, P. 132.
15. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange-Induced Valence Transition. *Phys. Rev. Lett.* 1985, Vol. 55, P. 871.
16. Derr J., Knebel G., Lapertot G. et al. Valence and magnetic ordering in intermediate valence compounds: TmSe versus SmB<sub>6</sub>. *J. Phys.: Cond. Matt.* 2006, Vol. 18, P. 2089.
17. 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.
18. Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Sokolov V. V. et al. Magnetic properties and the metal-insulator transition in Gd<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S solid solutions. *Sol. St. Comm.* 2010, Vol. 150, P. 602–604.
19. 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.
20. 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.
21. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 166602.
22. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Abdelbaki H. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the Ho<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S Semiconductors upon Temperature and Frequency Variation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023, Vol. 34, P. 284.
23. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. [Turning of activation energy and magnetoimpedance by alternating current frequency in manganese sulfide with partial substitution by samarium ions]. *FTT*. 2023, Vol. 65, Is. 11, P. 1882–1888 (In Russ.).
24. 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. Stat. Sol. B* 2019, Vol. 256, P. 1900043.
25. Petrovsky V., Manohar A., Dogan F. Dielectric constant of particles determined by impedance spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2006, Vol. 100, P. 014102.
26. Gonzalez J. R., Sinclair D. C., West A. R. Impedance and Dielectric Spectroscopy of Functional Materials: A Critical Evaluation of the Two Techniques. *J. Electrochem. Soc.* 2023, Vol. 170, No. 11, P. 6504.

© Харьков А. М., Ситников М. Н., Апеснин С. С., 2024

---

**Харьков Антон Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kharkanton@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0954-9094>

**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. <https://orcid.org/0000-0001-7163-1801>

**Апеснин 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. <https://orcid.org/0000-0001-6176-4248>

**Kharkov Anton Mikhailovich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kharkanton@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0954-9094>

**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. <https://orcid.org/0000-0001-7163-1801>

**Aplesnin Sergey Stepanovich** – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: aplesnin@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6176-4248>

---

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; принята к публикации 08.10.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 07.10.2024; accepted for publication 08.10.2024; published 26.12.2024