

УДК 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-195-203

**Для цитирования:** Влияние магнитного поля на диэлектрические характеристики в сульфиде марганца, замещенного тулием / Харьков А. М., Аплеснин С. С., Коновалов С. О. и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 195–203. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-195-203.

**For citation:** Kharkov A. M., Aplesnin S. S., Konovalov S. O. et al. [Influence of magnetic field on the dielectric characteristics in manganese sulfide substituted with thulium]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 195–203. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-195-203.

## **Влияние магнитного поля на диэлектрические характеристики в сульфиде марганца, замещенного тулием**

А. М. Харьков, С. С. Аплеснин, С. О. Коновалов, А. Н. Павлова, О. С. Никитинский

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 свойства твердого раствора сульфида марганца, замещенного тулием, приготовленного плавлением исходных чистых образцов сульфида марганца и сульфида тулия. Проведен рентгеноструктурный анализ. Определена гранецентрированная кубическая решетка, найдено уменьшение интенсивности пиков. Проведены измерения диэлектрической проницаемости в интервале частот  $10\text{--}10^6$  Гц и температур  $300\text{--}500$  К в магнитных полях до  $12$  кЭ в твердых растворах  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0,15$ ). Из частотной зависимости диэлектрической проницаемости найдено время релаксации и механизм релаксации дипольных моментов. Исключен ток утечки, оценен вклад миграционной поляризации, обусловленной зарядами в области с химическим фазовым расслоением. Действительная и мнимая компоненты диэлектрической проницаемости образцов  $Tm_xMn_{1-x}S$  описываются в модели Дебая. Максимум мнимой компоненты диэлектрической проницаемости смещается в сторону высоких частот при нагревании и время релаксации описывается функцией Аррениуса. Диэлектрические потери вызваны электрон-фононным взаимодействием. Найдена частота кроссовера от Дебаевской релаксации к релаксационной проводимости, связанной с поглощением и испусканием фононов. Частота кроссовера растет при нагревании образца по степенному закону. В магнитном поле диэлектрическая проницаемость уменьшается и наибольшее изменение  $2,5\%$  достигается при  $T = 450$  К. При остальных температурах магнетоемкость не превышает  $0,5\%$ . Смещение максимума мнимой компоненты диэлектрической проницаемости к низким частотам в магнитном поле приводит к изменению знака диэлектрических потерь с положительного на отрицательное. Установлено качественное отличие  $\varepsilon(\omega)$  в окрестности концентрации протекания ионов тулия по ГЦК решетке, где диэлектрическая проницаемость не описывается в модели Дебая и магнетоемкость отсутствует. Определен механизм снижения диэлектрических потерь в магнитном поле.*

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, время релаксации, модель Дебая, магнетоемкость.

## **Influence of magnetic field on the dielectric characteristics in manganese sulfide substituted with thulium**

A. M. Kharkov, S. S. Aplesnin, S. O. Konovalov, A. N. Pavlova, O. S. Nikitinskiy

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

*The properties of a solid solution of thulium-substituted manganese sulfide prepared by melting the initial pure samples of manganese sulfide and thulium sulfide are studied. X-ray diffraction analysis was carried out. The face-centered cubic lattice is determined, and the decrease in the intensity of the peaks is found. Dielectric permittivity was measured in the frequency range  $10^2$ – $10^6$  Hz and temperatures 300–500 K in magnetic fields up to 12 kOe in  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solutions ( $0 < x < 0,15$ ). From the frequency dependence of the permittivity, the relaxation time and the relaxation mechanism of the dipole moments are found. The leakage current is excluded, and the contribution of migration polarization due to charges in the region with chemical phase separation is estimated. The real and imaginary components of the permittivity of  $Tm_xMn_{1-x}S$  samples are described in the Debye model. The maximum of the imaginary component of the permittivity shifts towards higher frequencies upon heating, and the relaxation time is described by the Arrhenius function. Dielectric losses are caused by electron-phonon interaction. The frequency of the crossover from Debye relaxation to relaxation conduction associated with the absorption and emission of phonons is found. The crossover frequency increases as the sample is heated according to a power law. In a magnetic field, the permittivity decreases and the largest change of 2.5 % is achieved at  $T = 450$  K. At other temperatures, the magnetocapacitance does not exceed 0.5 %. The shift of the maximum of the imaginary component of the permittivity to low frequencies in a magnetic field leads to a change in the sign of dielectric losses from positive to negative. A qualitative difference in  $\varepsilon(\omega)$  is established in the vicinity of the concentration of thulium ion flow through the FCC lattice, where the permittivity is not described in the Debye model and there is no magnetocapacitance. The mechanism for reducing dielectric losses in a magnetic field is determined.*

*Keywords: permittivity, relaxation time, Debye model, magnetocapacitance.*

## **Введение**

В космических аппаратах электроника функционирует в экстремальных условиях, где изменения температур происходят в интервале сотни градусов. Необходимо найти материалы, например, на основе мультиферроиков, которые смогут проявить стабильность работы в этих условиях.

Материалы, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств [1–4], магнитоэлектрики и мультиферроики [5–8], представляют интерес как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Особое внимание привлекают материалы, обнаруживающие магнитоэлектрические свойства в области комнатных и более высоких температур в связи с практическим применением в микроэлектронике для записи и хранения информации. К таким изученным материалам относится феррит висмута  $BiFeO_3$  [9–11]. Эффект гигантской магнетоемкости наблюдался в  $LuFe_2O_4$  [12] при комнатной температуре и объясняется флуктуацией заряда с разной величиной спина в ионах  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  в результате снятия вырождения между двумя типами зарядового порядка внешним магнитным полем.

Магнетоемкость в электрически неоднородной среде может быть обусловлена эффектом Максвелла – Вагнера [13] в результате тензорного характера взаимодействия носителей тока с магнитным и электрическим полем и смешивания продольных и поперечных компонент проводимости. В модели магнетоемкость положительна при условии, что размер электрической неоднородности на порядок превышает длину свободного пробега электрона, время измерения  $1/\omega$  превышает время рассеяния и матрица является диэлектрической [14].

Как изменится магнетоемкость в электрически неоднородных полупроводниках с компенсацией заряда областей с химическим фазовым расслоением, остается неясным. В этом случае необходимо учитывать подвижность электронов и дырок, кулоновское взаимодействие и рекомбинацию зарядов. В твердых растворах  $Tm_xMn_{1-x}S$  выше комнатной температуры обнаружен магнитоимпеданс, в частности, рост реактивного сопротивления в магнитном поле. Этот эффект может быть обусловлен изменением емкости и индуктивности образца под действием магнитного поля [15; 16].

Цель исследования – установить тип электрической поляризации, механизм релаксации, влияние магнитного поля на диэлектрические характеристики и диэлектрические потери при

электронном допировании полупроводников в зависимости от размера электрической неоднородности, которая определяется концентрацией замещения разновалентных ионов.

### Результаты и обсуждение

Твердые растворы  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0,15$ ) приготовлены методом плавления исходных поликристаллических сульфидов марганца и сульфидов тулия [16]. Рентгеноструктурный анализ, выполненный на установке ДРОН-3, установил кубическую решетку типа NaCl. На рис. 1 представлена дифракционная картина твердого раствора  $Tm_xMn_{1-x}S$ . С ростом концентрации замещения марганца ионами тулия интенсивность пиков уменьшается, что связано с некогерентным рассеянием.

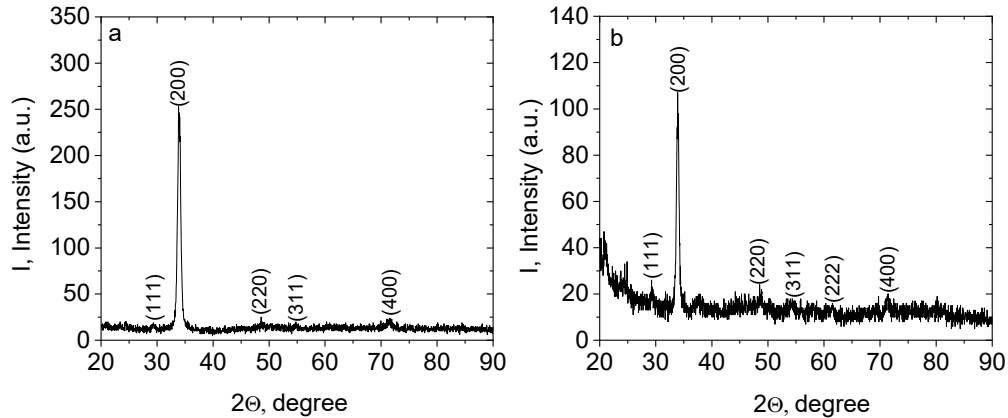


Рис. 1. Рентгенограммы твердых растворов  $Tm_xMn_{1-x}S$  для концентраций  $x = 0,05$  (a),  $x = 0,1$  (b)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solutions for concentrations  $x = 0.05$  (a),  $x = 0.1$  (b).

Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери определены из измерения емкости и тангенса угла потерь, измеренных на приборе АМ-3028, компонентный анализатор в диапазоне частот  $10^2$ – $10^6$  Гц при температурах 300–500 К. Магнитоемкость образца определялась как

$$\Delta\varepsilon = \frac{C(H) - C(0)}{C(0)}, \quad (1)$$

где  $C(H)$  – емкость образца, измеренного в магнитном поле  $H = 12$  кЭ, приложенном параллельно пластинам конденсатора;  $C(0)$  – емкость без магнитного поля. Для исключения токов утечки между образцом и пластинами конденсатора помещалась слюда, толщиной несколько микрометров.

Из частотной зависимости диэлектрической проницаемости можно оценить время релаксации и механизм релаксации дипольных моментов [17–19]. Исключение тока утечки позволит оценить вклад миграционной поляризации, обусловленной зарядами в области с химическим фазовым расслоением и размером этой области при приближении к точке протекания ионов тулия по решетке.

На рис. 2 представлены частотные зависимости реальной и мнимой части диэлектрической проницаемости от температуры. На частотной зависимости  $\varepsilon(\omega)$  можно выделить две области частот: низкочастотную  $\omega < \omega_c$  и высокочастотную  $\omega > \omega_c$ . В низкочастотной области  $\varepsilon(\omega)$  описывается соотношением Дебая с максимумом диэлектрических потерь:

$$\text{Re}(\varepsilon) = \varepsilon_0 + \frac{\chi_0}{1 + (\omega\tau_c)^2}, \quad (2)$$

$$\text{Im}(\varepsilon) = \frac{\chi_0\omega\tau_c}{1 + (\omega\tau_c)^2}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  – высокочастотный вклад в проницаемость;  $\chi_0$  – статическая восприимчивость диполей. Максимум  $\text{Im}(\epsilon(\omega))$  смещается в сторону высоких частот при нагревании и время релаксации, найденное из соотношения  $\omega\tau_c = 1$ , описывается функцией Аррениуса  $\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/kT)$ , где  $\Delta E$  – энергия активации,  $\Delta E = 0,55$  эВ. В области высоких частот  $\omega > \omega_c$  комплексная диэлектрическая проницаемость линейно зависит от частоты.

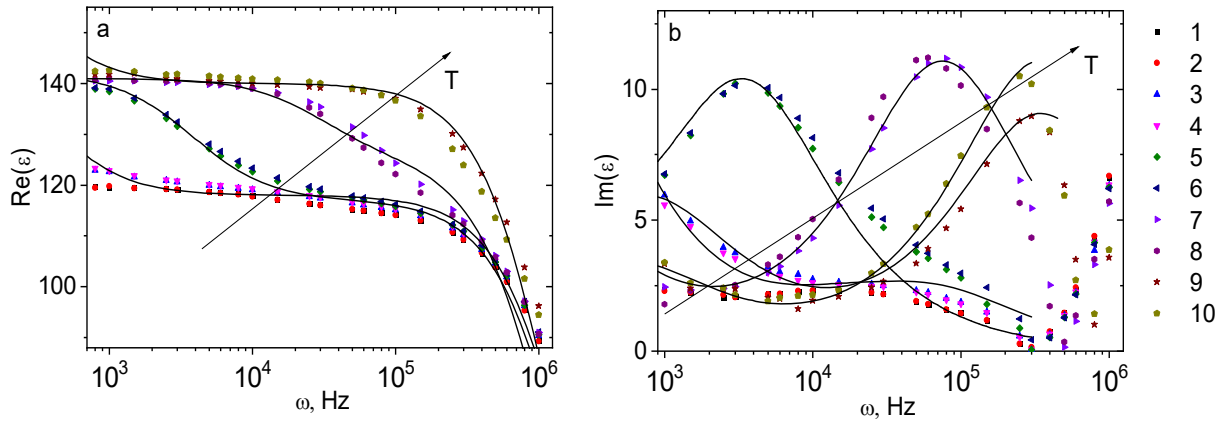


Рис. 2. Действительная  $\text{Re}(\epsilon)$  (a) и мнимая  $\text{Im}(\epsilon)$  (b) компоненты диэлектрической проницаемости образца  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  без поля  $H = 0$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1),  $350$  (3),  $400$  (5),  $450$  (7),  $500$  (9) К и в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (2),  $350$  (4),  $400$  (6),  $450$  (8),  $500$  (10) К на частоте  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость в модели Дебая (сплошная линия) (a, b)

Fig. 2. The real  $\text{Re}(\epsilon)$  (a) and imaginary  $\text{Im}(\epsilon)$  (b) parts of the permittivity of the sample  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  without field  $H = 0$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1),  $350$  (3),  $400$  (5),  $450$  (7),  $500$  (9) K and in magnetic field  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (2),  $350$  (4),  $400$  (6),  $450$  (8),  $500$  (10) K on the frequency  $\omega$ . The permittivity in the Debye model (solid line) (a, b)

Диэлектрические потери вызваны электрон-фононным взаимодействием. Мнимая часть диэлектрической проницаемости связана с вещественной частью оптической проводимости  $\sigma$  соотношением  $\text{Im}(\epsilon) = \sigma/\omega$ . В неупорядоченных полупроводниках с прыжковым типом проводимости может реализоваться резонансный и релаксационный механизм проводимости. Если энергия кулоновского отталкивания электронов, расположенных на расстоянии  $R$ , меньше тепловой энергии  $e^2/\epsilon R \ll kT$ , то превалирует релаксационная оптическая проводимость [20]:

$$\sigma(\omega) = \frac{1}{3} \pi^2 e^2 a g^2 h \omega^2 R^4, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус локализации электрона;  $g$  – электронная плотность состояний на уровне Ферми. В этом случае  $\text{Im}(\epsilon) = A\omega$ . Частота кроссовера  $\omega_c$  от Дебаевской релаксации к релаксационной проводимости, связанной с поглощением и испусканием фононов, обусловлена радиусом локализации электрона и электронной плотностью состояний  $g$ . Если предположить, что электрон локализован в области химического фазового расслоения, созданного ионами тулия, и радиус локализации не зависит от температуры, то рост  $\omega_c$  выше 400 К связан с увеличением электронной плотности состояний на уровне химпотенциала  $g \sim T^2$ .

В магнитном поле время Дебаевской релаксации увеличивается, точка перегиба  $\text{Re}(\epsilon)$  и максимум  $\text{Im}(\epsilon)$  смещается в сторону низких частот. В результате диэлектрическая проницаемость уменьшается в магнитном поле при  $\omega\tau = 1$  на 0,5, 2,4 и 3,3 % при  $T = 400, 450$  и  $500$  К. Более существенные изменения обнаружены в тангенсе угла диэлектрических потерь, который зависит от активных потерь, в результате увеличения рассеяния электронов на локальных деформациях и фононах в области расположения ионов тулия. Диэлектрические потери возрастают на 14 и 36 % при  $T = 450$  и  $500$  К и уменьшаются до 15 % в области низких частот при  $T = 350$  и  $400$  К.

С ростом концентрации увеличивается радиус локализации электронов, связанных с ионами тулия. На рис. 3 изображены компоненты диэлектрической проницаемости образца  $Tm_xMn_{1-x}S$  от частоты для концентрации  $x = 0,1$ . В этих образцах также реализуется Дебаевской и электрон-фононный механизм релаксации индуцированной электрической поляризации [21]. При нагревании максимум  $Im(\epsilon)$  смещается в область высоких частот. Энергия активации  $\Delta E = 0,2$  эВ ( $1550 \text{ см}^{-1}$ ) в два раза меньше, чем для  $x = 0,05$ . Частота кроссовера, найденная из минимума  $Im(\epsilon(\omega))$ , растет при нагревании образца по степенному закону  $\omega_c \sim T^{3/2}$ .

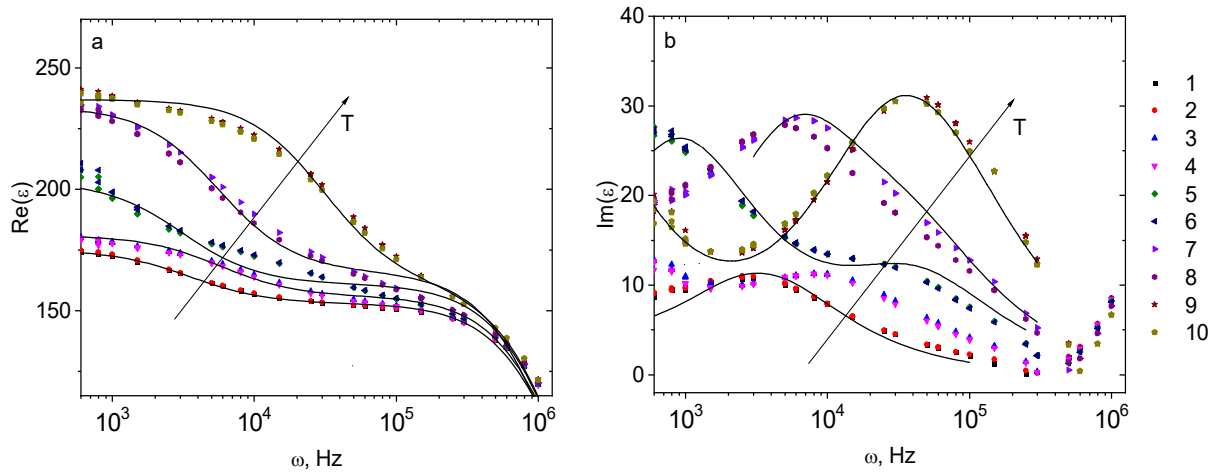


Рис. 3. Действительная  $Re(\epsilon)$  (a) и мнимая  $Im(\epsilon)$  (b) компоненты диэлектрической проницаемости образца  $Tm_{0,1}Mn_{0,9}S$  без поля  $H = 0$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 350 (3), 400 (5), 450 (7), 500 (9) К и в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (2), 350 (4), 400 (6), 450 (8), 500 (10) К на частоте  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость в модели Дебая (сплошная линия) (a, b)

Fig. 3. The real  $Re(\epsilon)$  (a) and imaginary  $Im(\epsilon)$  (b) parts of the permittivity of the sample  $Tm_{0,1}Mn_{0,9}S$  without field  $H = 0$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1), 350 (3), 400 (5), 450 (7), 500 (9) K and in a magnetic field  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (2), 350 (4), 400 (6), 450 (8), 500 (10) K on the frequency  $\omega$ . The permittivity in the Debye model (solid line) (a, b)

Возможно, это связано со смещением химпотенциала по температуре и увеличением электронной плотности  $g \sim T^{3/4}$ . В магнитном поле диэлектрическая проницаемость уменьшается и наибольшее изменение  $\Delta\epsilon = 2,5 \%$  достигается при  $T = 450$  К. При остальных температурах магнитоёмкость не превышает 0,5 %. Смещение максимума мнимой компоненты диэлектрической проницаемости к низким частотам в магнитном поле приводит к изменению знака диэлектрических потерь с положительного на отрицательное с  $\delta(Im(\epsilon)) = 0,024$  до  $-0,08$  при  $T = 450$  К.

При приближении к концентрации протекания ионов тулия на ГЦК решетке  $x_c = 0,17$  [22] частотная зависимость  $\epsilon(\omega)$  качественно меняется (рис. 4). В интервале частот  $10^2 - 10^6$  Гц диэлектрическая проницаемость не описывается в модели Дебая. Протекание обменных связей Tm-Tm по решетке приводит к шунтированию обкладок конденсатора и отсутствию миграционной поляризации на границе раздела ионов Mn-Tm. Рост  $\epsilon(\omega)$  ниже 100 Гц вызван накоплением зарядов вблизи пластин конденсатора. Мнимая компонента диэлектрической проницаемости уменьшается в магнитном поле до 9 % при  $T = 450$  и 500 К в результате уменьшения проводимости  $\sigma(H, \omega) < \sigma(0, \omega)$  (рис. 4, c).

Частота, при которой диэлектрическая проницаемость обусловлена релаксационной проводимостью за счет фононов, не зависит от температуры. Это связано с сохранением электронной плотности состояний на уровне химпотенциала при нагревании. Для концентрации  $x = 0,15$  магнитоёмкость отсутствует ( $\Delta\epsilon < 0,005$ ). Снижение диэлектрических потерь в магнитном поле вызвано уменьшением проводимости.

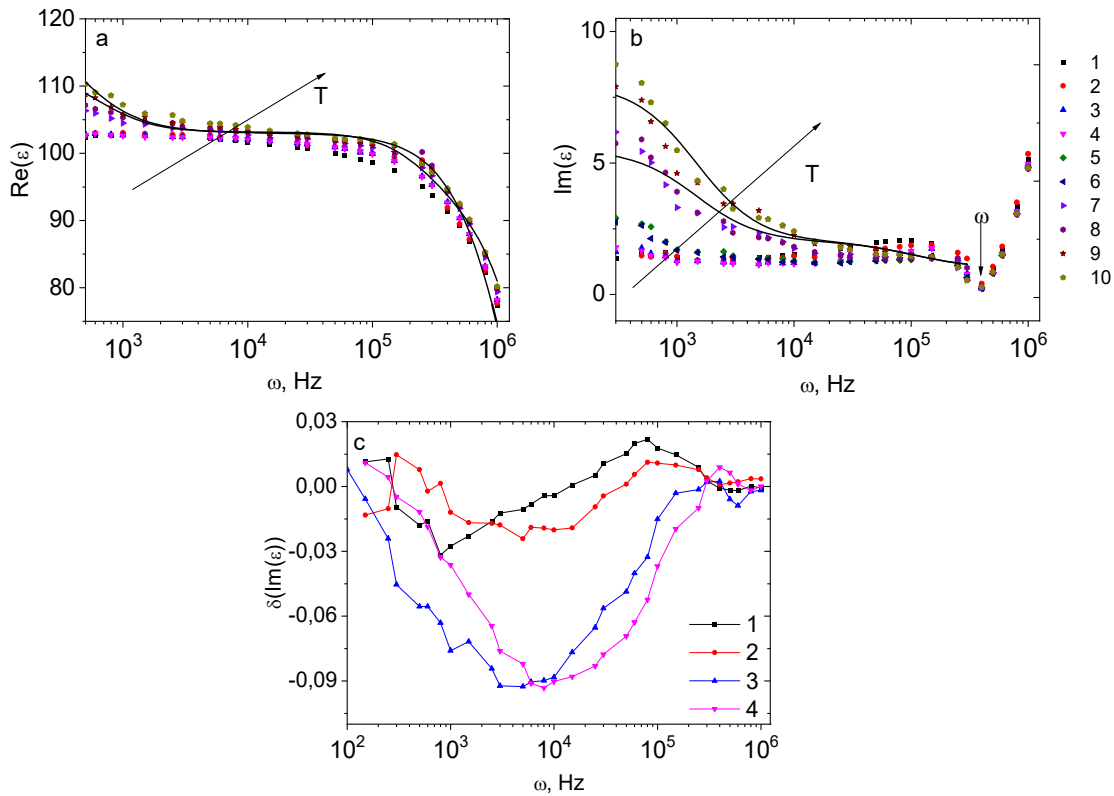


Рис. 4. Действительная  $Re(\epsilon)$  (a) и мнимая  $Im(\epsilon)$  (b) компоненты диэлектрической проницаемости образца  $Tm_{0.15}Mn_{0.85}S$  без поля  $H = 0$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 350 (3), 400 (5), 450 (7), 500 (9) К и в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (2), 350 (4), 400 (6), 450 (8), 500 (10) К на частоте  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость в модели Дебая (сплошная линия) (a, b). Относительное изменение мнимой части диэлектрической проницаемости  $\delta(Im(\epsilon))$  в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 350$  (1), 400 (2), 450 (3), 500 (4) К в зависимости от частоты  $\omega$  (c)

Fig. 4. The real  $Re(\epsilon)$  (a) and imaginary  $Im(\epsilon)$  (b) parts of the permittivity of the sample  $Tm_{0.15}Mn_{0.85}S$  without field  $H = 0$  kOe at temperatures  $T = 300$  K(1), 350 K(3), 400 K(5), 450 K(7), 500 K(9) and in magnetic field  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  K(2), 350 K(4), 400 K(6), 450 K(8), 500 K(10) on the frequency  $\omega$ . The permittivity in the Debye model (solid line) (a, b). The relative change of the imaginary part of the permittivity  $\delta(Im(\epsilon))$  in magnetic field  $H = 8$  kOe at temperatures  $T=350$ K(1), 400K(2), 450K(3), 500K(4) versus frequency  $\omega$  (c)

## Заключение

Диэлектрическая проницаемость в интервале частот до одного мегагерца при электронном допировании в  $Tm_xMn_{1-x}S$  обусловлена миграционной поляризацией локализованных электронов и релаксационной проводимостью. В модели Дебая найдено время релаксации электрической поляризации, которая имеет активационный характер и описывается законом Аррениуса. В окрестности концентрации протекания ионов тулия по решетке исчезает вклад миграционной поляризации и диэлектрические характеристики обусловлены релаксационной проводимостью в области высоких частот, интервал которых не зависит от температуры. В магнитном поле диэлектрическая проницаемость уменьшается на несколько процентов и практически не меняется в образце с концентрацией вблизи концентрации протекания. Увеличение времени релаксации в магнитном поле приводит к сдвигу максимума диэлектрических потерь в область низких частот и смене знака диэлектрических потерь в магнитном поле по частоте. Найдена высокая индуктивность образца в магнитном поле.

**Библиографические ссылки**

1. Корреляция магнитных и транспортных свойств с полиморфными переходами в пиро-  
статанате 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. Eerenstein W., Mathur N. D., Scott J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*  
2006. Vol. 442. P. 759.
3. A Strain-Driven Morphotropic Phase Boundary in  $\text{BiFeO}_3$  / R. J. Zeches, M. D. Rossell,  
J. X. Zhang et al. // *Science*. 2009. Vol. 326. P. 977.
4. Спин-зависимый транспорт в монокристалле  $\alpha\text{-MnS}$  / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина,  
Г. М. Абрамова и др. // Физика твёрдого тела. 2004. Т. 46, № 11. С. 2000–2005.
5. 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.
6. Взаимосвязь магнитных и электрических свойств халькогенидов  $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  / С. С. Ап-  
леснин, О. Н. Бандурина, Л. И. Рябинкина и др. // Известия РАН. Серия Физическая. 2010.  
Т. 74, № 5. С. 741–743.
7. Colossal Magnetoresistance Without  $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  Double Exchange in the Stoichiometric  
Pyrochlore  $\text{Tl}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$  / M. A. Subramanian, B. H. Toby et al. // *Science*. 1996. Vol. 273. P. 81.
8. Spaldin A. N., Cheong S.-W., Ramesh R. Multiferroics: Past present and future // *Phys. Today*  
2010. Vol. 63. P. 38.
9. Interfacial-Strain Controlled Ferroelectricity in Self-Assembled  $\text{BiFeO}_3$  Nanostructures /  
J. F. Song, S. H. Zhuang, M. Martin et al. // *Adv. Funct. Mater.* 2021. Vol. 31. P. 2102311.
10. Zhang C. C., Dai J. Q., Liang X. L. Enhanced ferroelectric properties of (Zn, Ti) equivalent co-  
doped  $\text{BiFeO}_3$  films prepared via the sol-gel method // *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47. P. 16776.
11. Chemical pressure exerted by rare earth substitution in  $\text{BiFeO}_3$ : Effect on crystal symmetry,  
band structure and magnetism / F. Mumtaz, S. Nasir, G. H. Jaffari, S. I. Shah // *J. Alloy. Compd.* 2021.  
Vol. 876. P. 160178.
12. Charge and spin ordering process in the mixed-valence system  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ : Charge ordering /  
Y. Yamada, K. Kitsuda, S. Nohdo, N. Ikeda // *Phys. Rev. B* 2000. Vol. 62. P. 12167.
13. Maxwell J. C. *Treatise on Electricity and Magnetism* // 3rd ed. Dover. New York. 1991.  
P. 5–531.
14. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media // *Phys.*  
*Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. P. 166602.
15. Магнитотранспортные эффекты и электронное фазовое расслоение в сульфидах марган-  
ца с электрон-дырочным допированием / О. Б. Романова, С. С. Аплеснин, М. Н. Ситников,  
Л. В. Удод // *ЖЭТФ*. 2021. Т. 159. С. 1–14. Doi: 10.31857/S0044451021030000.
16. 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. Doi: 10.1002/pssb.201900043.
17. Dipole relaxation process and giant dielectric permittivity in  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{CdMoO}_4$  single  
crystal / B. Sawicki, E. Tomaszewicz, T. Gron et al. // *J. Materiomics*. 2021. Vol. 7, Is. 4. P. 845.
18. Coexistence of the electric polarization and conductive current in the bismuth–neodymium  
ferrite garnet films / S. S. Aplesnin, A. N. Masyugin, M. N. Volochaev, T. Ishibashi // *J Mater Sci:*  
*Mater Electron*. 2021. Vol. 32. P. 3766. Doi: 10.1007/s10854-020-05121-9.
19. Dielectric and electrical properties of polymorphic bismuth pyrostannate  $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$  / L. V. Udod,  
S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, M. S. Molochev // *Phys. Sol. Stat.* 2014. Vol. 56, Is. 7. P. 1315.
20. Efros A. L. On the theory of a.c. conduction in amorphous semiconductors and chalcogenide  
glasses // *Philos. Mag. B*. 1981. Vol. 43. P. 829.
21. Aplesnin S. S. Nonadiabatic interaction of acoustic phonons with spins  $S = 1/2$  in the two-  
dimensional Heisenberg model // *JETP*. 2003. Vol. 97, Is. 5. P. 969.

22. Magnetism without Magnetic Ions: Percolation, Exchange, and Formation Energies of Magnetism-Promoting Intrinsic Defects in CaO / J. Osorio-Guillen, S. Lany, S. V. Barabash, A. Zunger // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 96. P. 107203.

## References

1. Aplesnin S. S., Udod L. V., Sitnikov M. N. et al. [Correlation of magnetic and transport properties with polymorphic transitions in bismuth pyrostannate  $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$ ]. *Solid State Physics*. 2015, Vol. 57, Is. 8, P. 1590–1595 (In Russ.).
2. Eerenstein W., Mathur N. D., Scott J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*. 2006, Vol. 442, P. 759.
3. Zeches R. J., Rossell M. D., Zhang J. X. et al. A Strain-Driven Morphotropic Phase Boundary in  $\text{BiFeO}_3$ . *Science*. 2009, Vol. 326, P. 977.
4. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. [Spin-dependent transport in a single crystal  $\alpha\text{-MnS}$ ]. *Solid State Physics*. 2004, Vol. 46, No. 11, P. 2000–2005 (In Russ.).
5. Petrakovskiy G. A., Ryabinkina L. I., Velikanov D. A. et al. [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.).
6. Aplesnin S. S., Bandurina O. N., Ryabinkina L. I., Romanova O. B. et al. [The relationship of magnetic and electrical properties of chalcogenides  $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ]. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*. 2010, Vol. 74, No. 5, P. 741–743 (In Russ.).
7. Subramanian M. A., Toby B. H., Ramirez A. P. et al. Colossal Magnetoresistance Without  $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  Double Exchange in the Stoichiometric Pyrochlore  $\text{Tl}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ . *Science*. 1996, Vol. 273, P. 81.
8. Spaldin A. N., Cheong S.-W., Ramesh R. Multiferroics: Past present and future. *Phys. Today*. 2010, Vol. 63, P. 38.
9. Song J. F., Zhuang S. H., Martin M. et al. Interfacial-Strain Controlled Ferroelectricity in Self-Assembled  $\text{BiFeO}_3$  Nanostructures. *Adv. Funct. Mater.* 2021, Vol. 31, P. 2102311.
10. Zhang C. C., Dai J. Q., Liang X. L. Enhanced ferroelectric properties of (Zn, Ti) equivalent co-doped  $\text{BiFeO}_3$  films prepared via the sol-gel method. *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47. P. 16776.
11. Mumtaz F., Nasir S., Jaffari G. H. et al. Chemical pressure exerted by rare earth substitution in  $\text{BiFeO}_3$ : Effect on crystal symmetry, band structure and magnetism. *J. Alloy. Compd.* 2021, Vol. 876, P. 160178.
12. Yamada Y., Kitsuda K., Nohdo S., Ikeda N. Charge and spin ordering process in the mixed-valence system  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ : Charge ordering. *Phys. Rev. B* 2000, Vol. 62, P. 12167.
13. Maxwell J. C. Treatise on Electricity and Magnetism. 3rd ed., Dover, New York, 1991, P. 5–531.
14. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 166602.
15. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Udod L. V. [Magnetotransport effects and electron phase separation in manganese sulfides with electron-hole doping]. *ZhETF*. 2021, Vol. 159, P. 1–14 (In Russ.). Doi: 10.31857/S0044451021030000.
16. 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  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution. *Phys. Status Solidi B*. 2019, Vol. 256, P. 1900043. Doi: 10.1002/pssb.201900043.
17. Sawicki B., Tomaszewicz E., Gron T. et al. Dipole relaxation process and giant dielectric permittivity in  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{CdMoO}_4$  single crystal. *J. Materiomics*. 2021, Vol. 7, No. 4, P. 845.
18. Aplesnin S. S., Masyugin A. N., Volochaev M. N., Ishibashi T. Coexistence of the electric polarization and conductive current in the bismuth–neodymium ferrite garnet films. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2021, Vol. 32, P. 3766–3781. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05121-9>.



19. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Molokeev M. S. Dielectric and electrical properties of polymorphic bismuth pyrostannate  $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ . *Phys. Sol. Stat.* 2014, Vol. 56, No. 7, P. 1315.
20. Efros A. L. On the theory of a.c. conduction in amorphous semiconductors and chalcogenide glasses. *Philos. Mag. B.* 1981, Vol. 43, P. 829.
21. Aplesnin S. S. Nonadiabatic interaction of acoustic phonons with spins  $S = 1/2$  in the two-dimensional Heisenberg model. *ZhETF.* 2003, Vol. 97, No. 5, P. 969.
22. Osorio-Guillen J., Lany S., Barabash S. V., Zunger A. Magnetism without Magnetic Ions: Percolation, Exchange, and Formation Energies of Magnetism-Promoting Intrinsic Defects in CaO. *Phys. Rev. Lett.* 2006, Vol. 96, P. 107203.

© Харьков А. М., Аплеснин С. С., Коновалов С. О.,  
Павлова А. Н., Никитинский О. С., 2023

---

**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.

**Коновалов Степан Олегович** – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oleg@yandex.ru.

**Павлова Александра Николаевна** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sashely2008@rambler.ru.

**Никитинский Олег Сергеевич** – студент института информатики и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: onikitinsky@yandex.ru.

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

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

**Konovalev Stepan Olegovich** – post-graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: oleg@yandex.ru.

**Pavlova Aleksandra Nikolaevna** – Cand. Sc., Senior Lecturer of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sashely2008@rambler.ru.

**Nikitinskiy Oleg Sergeevich** – student of the Institute of Informatics and Telecommunications; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: onikitinsky@yandex.ru.

---