

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 539.21:537.86

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-451-458

For citation: Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Aplesnin S. S., Romanova O. B. Influence of the magnetic field on transport properties of holmium – manganese sulfide. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 451–458. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-451-458

Для цитирования: Влияние магнитного поля на транспортные свойства гольмий-марганцевого сульфида / М. Н. Ситников, А. М. Харьков, С. С. Аплеснин, О. Б. Романова // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 451–458. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-451-458

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON TRANSPORT PROPERTIES OF HOLMIUM – MANGANESE SULFIDE

M. N. Sitnikov¹, A. M. Kharkov^{1*}, S. S. Aplesnin¹, O. B. Romanova²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center
KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok 50, bld. 38

*E-mail: khark.anton@mail.ru

Holmium-manganese sulfide with giant magnetoresistance refers to new magnetic sulfide compounds of holmium and manganese that have the effect of giant magnetoresistance (i. e., with special magnetoelectric properties), which can be used as components of sensor technology, magnetic memory, and spintronics. The technology of manufacturing polycrystals HoX_{Mn}1-XS grown by crystallization from the melt of the obtained powdered sulfides with a purity not lower than 99,9 %, in glass-carbon crucibles and a quartz reactor in an argon atmosphere is presented. According to the results of x-ray diffraction analysis, HoX_{Mn}1-XS holmium-manganese sulfides have a HCC structure of the NaCl type. As the degree of cationic substitution increases, the unit cell parameter increases linearly with the concentration. No concomitant impurity phases are detected in the synthesized samples. To determine the state of the spin glass, magnetic moment measurements are conducted at several frequencies $\omega = 1$ kHz, 10 kHz and 100 kHz. The dependence of magnetic characteristics on the frequency of measurements is found. The damping of the magnetic moment and its increase with a decrease in temperature is revealed, which is connected with the formation of metastable States. Measurements of electrical resistance without a field and in a magnetic field are conducted. Anomalies in the temperature dependence of the conductivity are found. A change in the magnetoresistance sign is detected with the increase of temperature below and above room temperature.

Keywords: solid solutions, resistance, magnetic permeability, the effect of giant magnetoresistance.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГОЛЬМИЙ-МАРГАНЦЕВОГО СУЛЬФИДА

М. Н. Ситников¹, А. М. Харьков^{1*}, С. С. Аплеснин¹, О. Б. Романова²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38
*E-mail: khark.anton@mail.ru

Гольмий-марганцевый сульфид с гигантским магнитосопротивлением относится к новым магнитным сульфидным соединениям гольмия и марганца, обладающим эффектом гигантского магнитосопротивления, то есть с особыми магнитоэлектрическими свойствами, которые могут быть использованы в качестве составляющих компонент сенсорной техники, магнитной памяти для спинтроники. Приведена технология изготовления поликристаллов $\text{HoMn}_1\text{-XS}$, выращенных кристаллизацией из расплава полученных порошковых сульфидов чистотой не ниже 99,9 % в стеклоуглеродных тиглях и кварцевом реакторе в атмосфере аргона. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, гольмий-марганцевые сульфиды $\text{HoMn}_1\text{-XS}$ имеют ГЦК структуру типа NaCl . С увеличением степени катионного замещения параметр элементарной ячейки линейно увеличивается с концентрацией. Сопутствующих примесных фаз в синтезированных образцах не обнаружено. Для установления состояния спинового стекла проведены измерения магнитного момента на нескольких частотах $\omega = 1, 10$ и 100 kHz. Обнаружена зависимость магнитных характеристик от частоты измерений. Найдено затухание магнитного момента и его увеличение с понижением температуры, что связывается с образованием метастабильных состояний. Проведены измерения электросопротивления без поля и в магнитном поле. Найдены аномалии в температурной зависимости проводимости. Обнаружена смена знака магнитосопротивления с ростом температуры ниже и выше комнатной температуры.

Ключевые слова: твердые растворы, электросопротивление, магнитная проницаемость, эффект гигантского магнитосопротивления.

Введение. Элементная база микроэлектроники, функционирующая на основе магниторезистивного эффекта [1], может работать в экстремальных условиях. Материалы с эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС) могут использоваться в качестве составляющих компонент сенсорной техники [2], магнитной памяти [3] и способны в несколько раз менять свое электрическое сопротивление при приложении внешнего магнитного поля [4–7].

Обобщая, можно сказать, что все известные на сегодня ГМС-вещества являются сложными (оксидными) фазами на основе оксидов марганца, ферромагнетизм ионов которого и несет ответственность за появление ГМС-эффекта [8]. Известны оксидные соединения марганца типа $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($\text{A} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ и т.д.) и способы их получения [8; 9]. Максимальная амплитуда этого эффекта наблюдается в непосредственной окрестности перехода в ферромагнитное состояние, при высоких значениях температуры Кюри $T_C \sim 250 \div 400$ К и открывает широкие перспективы их технологического применения.

Недостатком указанных веществ является высокая чувствительность манганитов лантана к концентрации двухвалентной примеси, высокая температура плавления $T \sim 1800\text{--}1900$ °С, стоимость входящих в их состав элементов и реализация эффекта ГМС в узком температурном интервале вблизи температуры магнитного перехода.

Известен также ванадиевый дисульфид хрома-меди $\text{CuV}_x\text{Cr}_{1-x}\text{S}_2$ (ромбоэдрическая структура, пространственная группа $R\bar{3}m$), который относится к классу смешанных электрон-ионных полупроводников и является антиферромагнетиком с критическими температурами суперионного ($T_{\text{su}} = 670$ К) и магнитного ($T_N \sim 40$ К) переходов [10]. Эффект отрицательного магнитосопротивления в этом соединении наблюдается при 77 К в магнитном поле 10 кОе и составляет -40 %. Этот эффект наблюдается только в

поликристаллических образцах и не наблюдается в монокристаллических образцах с дефицитом меди.

Недостатком дисульфидов $\text{CuV}_x\text{Cr}_{1-x}\text{S}_2$ является не простая слоистая структура, сложность технологии роста кристаллов из-за высокой подвижности ионов меди и низкие значения температуры, при которой имеет место отрицательное магнитосопротивление.

В исходном моносulfиде марганца $\alpha\text{-MnS}$ (антиферромагнетик с ГЦК решеткой типа NaCl) найдена анизотропия удельного электросопротивления для двух кристаллографических направлений [111] и [100] в интервале температур 77–300 К [11–13]. Обнаружено отрицательное магнитосопротивление, величина которого в поле 10 кОе составляет –12 % и наиболее ярко проявляется в плоскости (111) [14]. С ростом магнитного поля величина магнитосопротивления не меняется, но минимум смещается в область низких температур.

Основными недостатками моносulfида марганца являются малая величина магниторезистивного эффекта, энергозатратность технологии синтеза и низкие рабочие температуры магниторезистивных элементов на основе таких материалов.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому изобретению является железомарганцевый сульфид $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ [15–17], содержащий компоненты при следующем соотношении, атом %: Fe 12,5–20; Mn 30–37,5 и S-50 и имеющий простую кубическую структуру типа NaCl. С возрастанием степени катионного замещения (X) в системе $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ наблюдается переход полупроводник – полуметалл с $X_c=0,4$ и рост намагниченности, при этом температура Нееля возрастает от 150 К для $X=0$ до 210 К для $X = 0,2$. Железомарганцевый сульфид обладает ГМС в диапазоне температур 50–250 К с максимальным развитием эффекта ГМС ($\delta_H=-83\%$) при температурах 160 К в магнитном поле $H = 10$ кОе и $\delta_H=-450\%$ при 50 К в поле $H = 30$ кОе.

Недостатком известных железомарганцевых сульфидов $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ является плохая повторяемость полученных соединений, сложность и длительность синтеза.

Цель работы получение магнитных соединений гольмий – марганцевых сульфидов с кубической решеткой NaCl – типа, обладающих устойчивым и повторяющимся эффектом гигантского магнитосопротивления в широкой области температур.

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Метод получения и рентгенограмма. Были подготовлены три состава $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, которые приведены в таблице № 1 в атомных %.

Таблица 1

Состав	Ho	Mn	S
I	10 %	40 %	50 %
II	17,5 %	32.5 %	50 %
III	20 %	30 %	50 %

Кристаллы $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ выращены кристаллизацией из расплава полученных порошковых сульфидов чистотой не ниже 99,9 %, в стеклоуглеродных тиглях и кварцевом реакторе в атмосфере аргона, в качестве сульфидирующих реагентов – NH_4CNS . Рассчитанная смесь оксидов в стеклоуглеродной лодочке помещалась в кварцевую трубу. После вытеснения воздуха аргоном и продуктами разложения роданида аммония из отдельного реактора включалась печь. Синтез выполнялся в два этапа: нагрев смеси до 500 °С с выдержкой при этой температуре в течение 1 часа; после перетирания – повторное сульфидирование в течение 3-х часов при 750–800 °С. Для полноты сульфидирования и гомогенизации получаемого порошкового сульфида проводился отжиг в течение 30 часов в сульфидирующей атмосфере при 800 °С с неоднократным

измельчением сульфидов. Полнота сульфидирования контролировалась методом рентгенофазового анализа и весовым контролем.

Для кристаллизации из расплава сульфида был использован высокочастотный нагрев графитового тигля диаметром 10 мм, заполненного 6–7 г порошка сульфида. Кварцевый реактор с тиглем протягивался со скоростью от 0,5 до 1 см/час через одновитковый индуктор. Инертная атмосфера в реакторе поддерживалась аргоном. Для получения расплава сульфида экспериментально определялись необходимые параметры мощности, подаваемой на индуктор. В результате синтеза получались вещества в виде плотных слитков. Полученные образцы были однородными по составу и использовались для физических измерений.

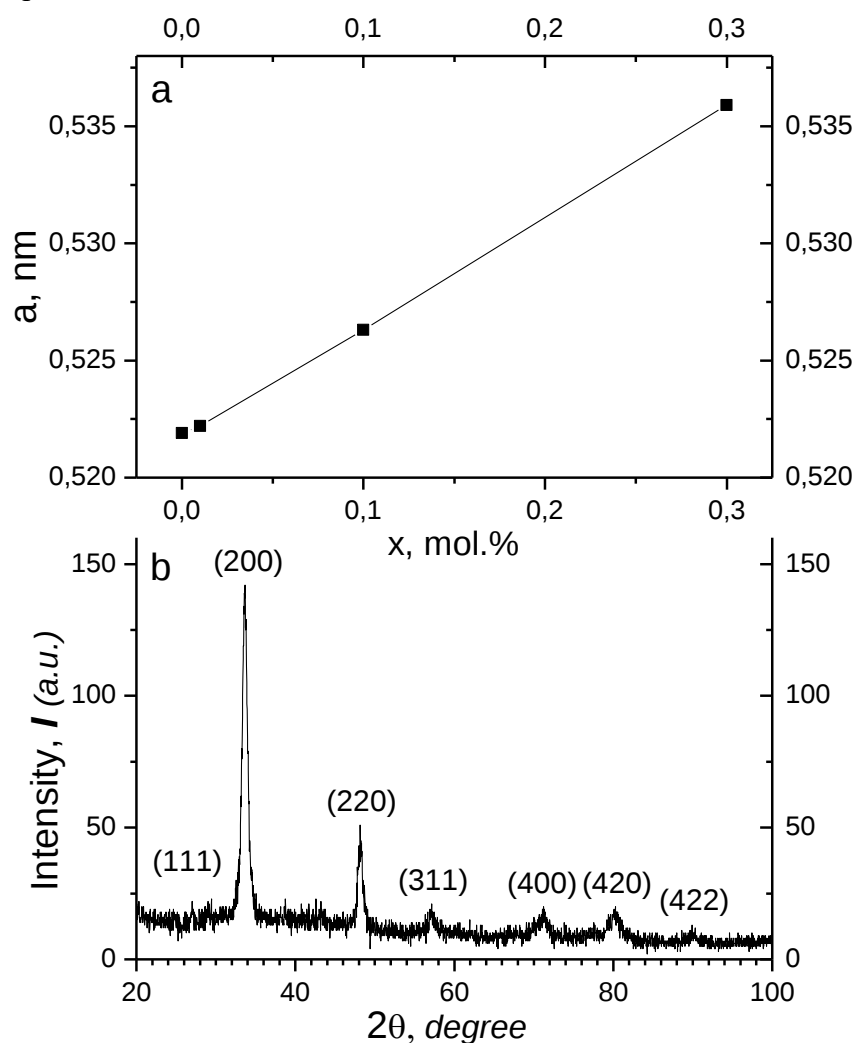


Рис. 1. Постоянная решетки гольмий-марганцевого сульфида $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ от концентрации и рентгенограмма для $x = 0,3$

Fig. 1. The lattice constant of holmium-manganese sulfide $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ versus concentration and x-ray for $x = 0.3$

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа гольмий-марганцевые сульфиды $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ имеют ГЦК структуру типа NaCl [18]. С увеличением степени катионного замещения параметр элементарной ячейки a увеличивается (рис. 1). Сопутствующих примесных фаз в синтезированных образцах обнаружено не было.

Намагниченность и магнитосопротивление. Замещение марганца ионами гольмия приводит к значительному изменению магнитных свойств образцов гольмий-марганцевой системы $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. Резкому уменьшению парамагнитной температуры Кюри в результате конкуренции обменных взаимодействий и уменьшению эффективного

магнитного момента. Микроскопический механизм уменьшения обмена и магнитного момента связан с изменением электронной структуры ионов марганца взаимодействующих с ионами гольмия. Ферромагнитное обменное взаимодействие между ионами марганца и гольмия приводит к росту магнитной восприимчивости с понижением температуры.

В результате конкуренции обменных взаимодействий возможно два варианта событий: исчезновение дальнего магнитного порядка с образованием состояния спинового стекла [19; 20], либо с сохранением магнитного порядка по одной из компонент спина и с замороженными поперечными компонентами спинов (асперромагнитное состояние) [21; 22]. Для установления природы этого состояния проведем измерения магнитного момента на нескольких частотах.

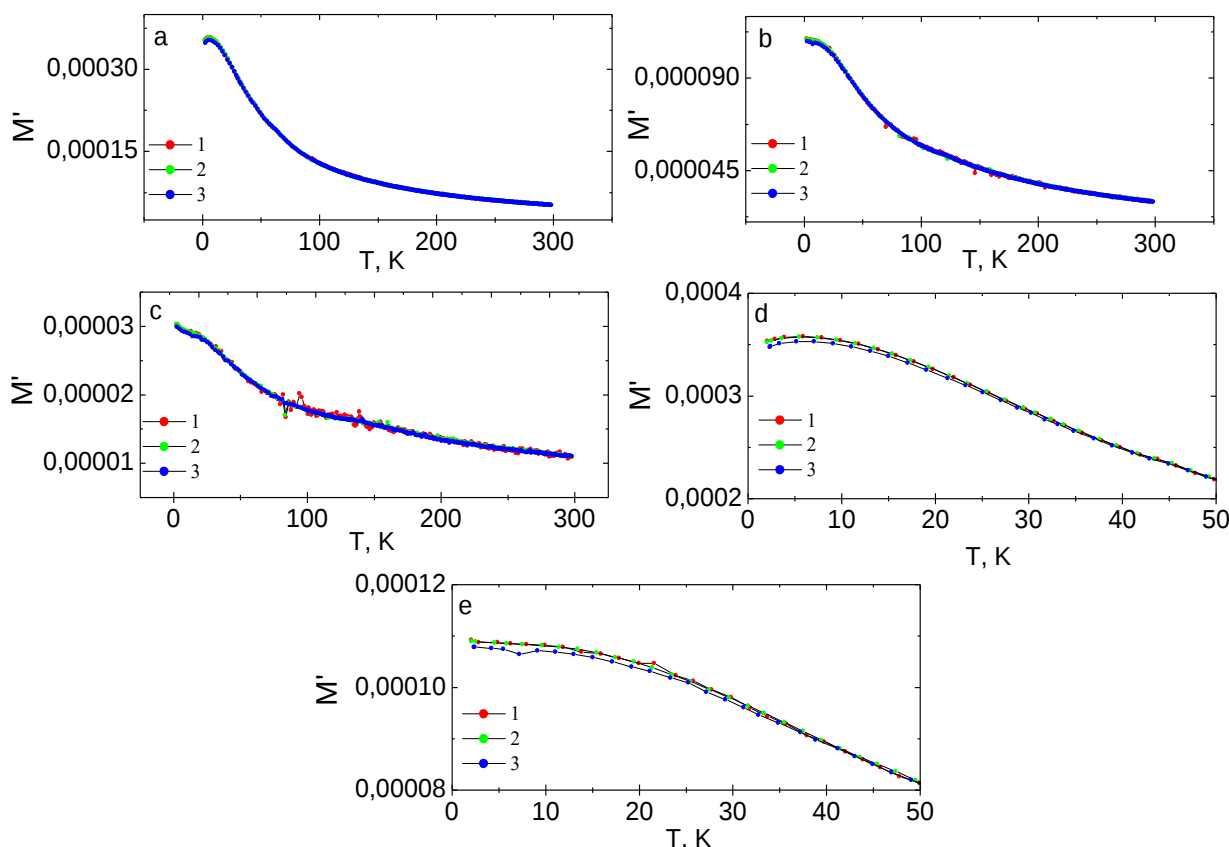


Fig. 2. The Real part of the magnetic permeability (a, b, c) and the imaginary part (d, e) of the temperature for HoXMn1-XS with $x = 0.3$ (a, d), 0.1 (b, e), 0.05 (c) at three frequencies $\omega = 1$ kHz (1), 10 kHz (2), 100 kHz (3)

Рис. 2. Реальная часть магнитной проницаемости (a, b, c) и мнимая часть (d, e) от температуры для HoXMn1-XS с $x = 0,3$ (a, d), $0,1$ (b, e), $0,05$ (c) на трех частотах $\omega = 1$ kHz (1), 10 kHz (2), 100 kHz (3)

В состоянии спинового стекла время, в течение которого устанавливается термодинамическое равновесие, зависит от температуры и магнитные характеристики зависят от частоты измерений. Магнитный момент в переменном магнитном поле, изображенный на рис. 2, ниже $T = 30$ K зависит от частоты. Так относительное изменение $\text{Re}(M(\omega=10\text{kHz}) - M(\omega=100\text{Hz})) / \text{Re}(M(\omega=100\text{Hz}))$ увеличивается с ростом концентрации гольмия и $\text{Re}(M(T))$ обнаруживает максимум при $T = 5$ K, который отсутствует в HoS.

Мнимая часть практически не зависит от температуры и имеет величину $\text{Im}(M(T)) \sim 10^{-7}$ для концентраций $x \leq 0.1$ и $\text{Im}(M(T))$ качественно отличается в области низких температур (рис. 2, d) для состава с $x = 0,3$. Величина $\text{Im}(M(T))$, характеризующая затухание магнитного момента, растет с понижением температуры и производная $d\text{Im}(M)/dT$ проходит через максимум при $T = 39$ K на частоте $\omega = 1$ kHz, при $T = 44$ K для $\omega = 10$ kHz.

Рост температуры максимума производной мнимой части магнитного момента с увеличением частоты также связан с образованием метастабильных состояний и является характерным признаком спин-стекольного поведения. Возможно, механизм релаксации спинов связан с обменным взаимодействием локализованных и делокализованных электронов и энергия из спиновой системы переходит в кинетическую энергию носителей тока [23; 24].

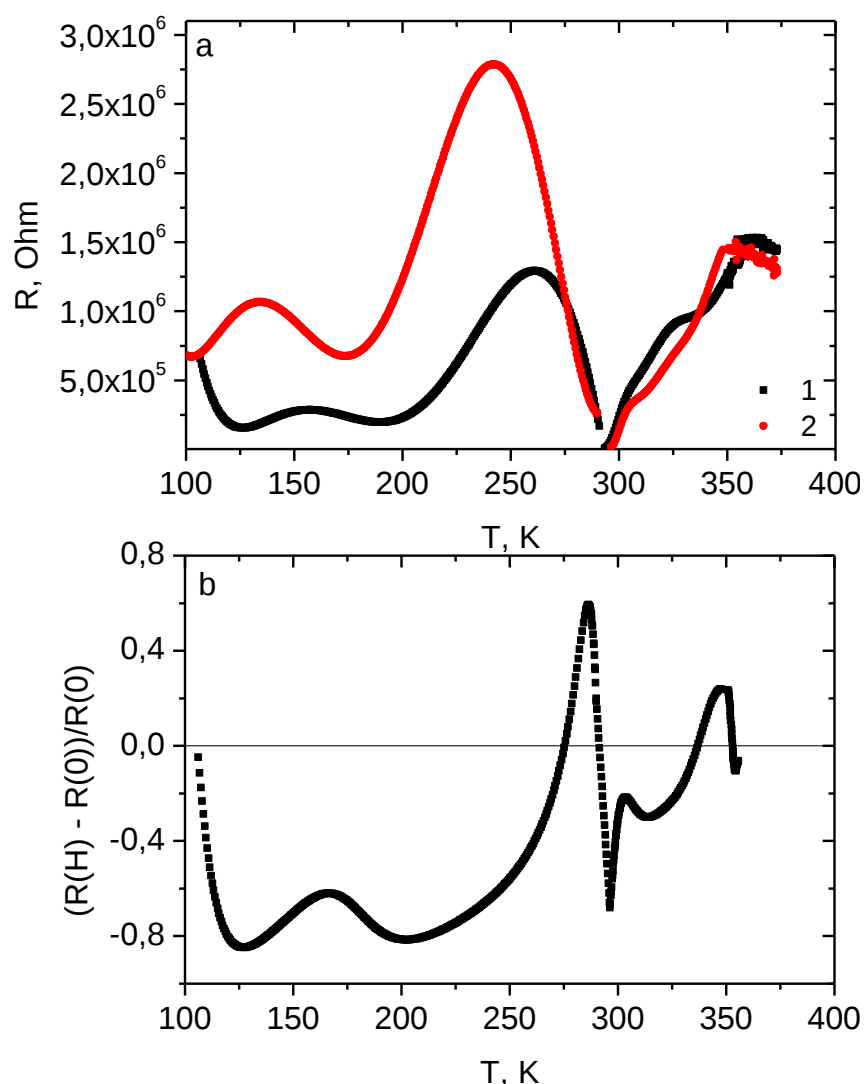


Fig. 3. Resistance $\text{HoXMn}_{1-x}\text{S}$ with $x = 0.1$ measured without a field (2) and in a magnetic field $H = 8$ kOe (1) (a). Magnetoresistance at temperature (b)

Рис. 3. Сопротивление $\text{HoXMn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,1$, измеренное без поля (2) и в магнитном поле $H = 8$ kOe (1) (a). Магнитосопротивление от температуры (b)

Замещение марганца редкоземельным элементом в соединениях $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Re} = \text{Gd}, \text{Sm}, \text{Ho}$) [25; 26] приведет к сдвигу f - уровня. Здесь возможно несколько вариантов, f -уровень попадает в зону проводимости, и электрон переходит с Re иона не на d - уровень редкоземельного иона, а в зону проводимости, оставаясь связанным с донором. Если концентрация подобных центров невелика, меньше критической концентрации для образования примесной зоны или порога протекания, то вещество останется полупроводником. В случае расположения f - уровня в запрещенной зоне вблизи химпотенциала, возможно появление экстремумов в температурной зависимости сопротивления при смещении химпотенциала в условиях повышения температуры [27; 28].

Замещение марганца трехвалентным ионом вызовет электронное допирование и может индуцировать орбитальное упорядочение [29–31], что приведет к расщеплению электронной плотности состояний. В зависимости от расположения уровня Ферми относительно расщепленной плотности состояний электросопротивление может меняться в несколько раз [32; 33].

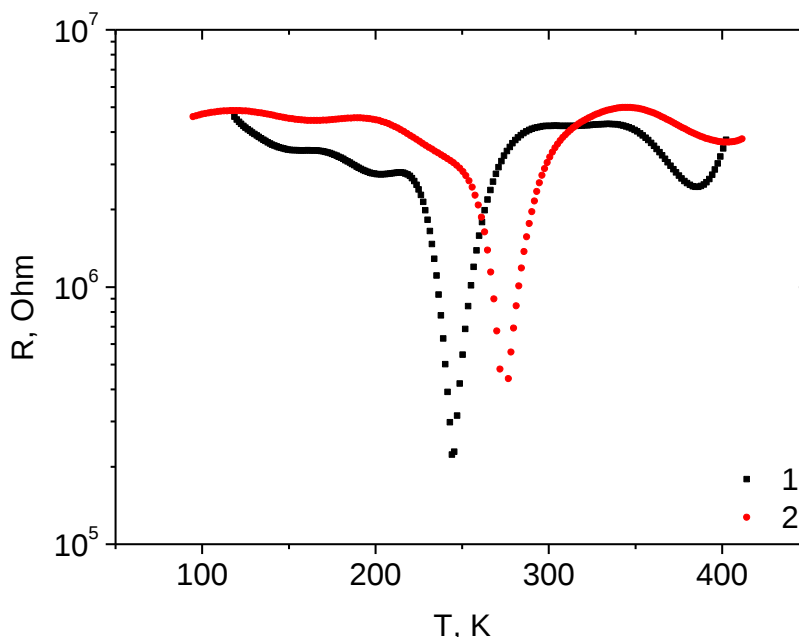


Рис. 4. Сопротивление $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,05$ измеренное без поля и в магнитном поле $H = 8 \text{ kOe}$

Fig. 4. Resistance $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ with $x = 0.05$ measured without a field and in a magnetic field $H = 8 \text{ kOe}$

На рис. 3 и 4 представлены температурные зависимости электросопротивления, измеренные без поля и в магнитном поле. Магнитосопротивление определено по формуле

$$\delta_H^{\text{ex}} = \frac{\rho(H \neq 0) - \rho(H = 0)}{\rho(H \neq 0)} \cdot 100\%, \text{ где } \rho(H = 0) - \text{электросопротивление в нулевом}$$

магнитном поле, $\rho(H \neq 0)$ – электросопротивление в заданном магнитном поле. Магнитосопротивление для составов с $x = 0.05$ и $x = 0.1$ указывает, что в синтезированных веществах в области температур 100 К – 300 К наблюдается эффект гигантского отрицательного магнитосопротивления с максимальным эффектом ГМС в магнитном поле $H = 8 \text{ kOe}$ величина δ_H , % составляет –100 и –80 % соответственно.

В табл. № 2 представлены основные физические характеристики системы гольмий-марганцевого сульфида $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$.

Таблица 2

$\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$	a , нм	$-\Theta$, К	T_N , К	δ_H , % ($H = 8 \text{ kOe}$)	ρ , Ом·см $T = 300 \text{ K}$ $H = 0$
I ($X = 0.05$)	0,5242	140	145	100	$2 \cdot 10^7$
II ($X = 0.1$)	0,5256	100	134	80	$3 \cdot 10^5$
III ($X = 0.2$)	0,5303	60	112	30	10^4

где a , нм – параметр кристаллической решетки; Θ , К – парамагнитная температура Кюри; E_a , эВ – энергия активации; T_N , К – температура Нееля; δ_H , % – магнитосопротивление; ρ , Ом·см – удельное сопротивление при 300 К.

Заключение. Замещение марганца гольмием приводит к резкому уменьшению парамагнитной температуры Кюри в результате конкуренции обменных взаимодействий в твердом растворе и к сокращению эффективного магнитного момента в интервале концентраций $0 < X < 0,1$. Микроскопический механизм уменьшения обмена и магнитного момента связан с изменением электронной структуры ионов марганца, взаимодействующих с ионами гольмия. Ферромагнитное обменное взаимодействие между ионами марганца и гольмия вызывает рост магнитной восприимчивости с понижением температуры в магнитоупорядоченной фазе. Обнаружена частотная зависимость магнитной проницаемости в области низких температур и максимум мнимой части магнитной проницаемости для $X = 0,3$, который связан с замораживанием поперечных компонент спина.

В твердых растворах $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ обнаружен острый максимум в проводимости по температуре, который смещается в сторону низких температур в магнитном поле. Обнаружена смена знака магнитосопротивления с ростом температуры ниже и выше комнатной температуры. Полученные результаты могут использоваться в качестве перспективных материалов для спинтроники, в качестве составляющих компонент сенсорной техники, магнитной памяти на основе эффекта ГМС для широкой области температур и магнитных полей.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке молодежного гранта СибГУ, 2020.

Acknowledgments. The work was supported by the Sibgau youth grant, 2020.

References

1. Fert A. Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics. *Rev. Mod. Phys.* 2008, Vol. 80, P. 1517.
2. Barthelemy, A. Handbook of Magnetic Materials / A. Barthelemy, A. Fert, F. Petroff; ed. by K.H.J. Buschow. *Amsterdam: North Holland*. 1999, Vol. 12, P. 1–96.
3. Volkov N. V. [Spintronics: magnetic tunnel structures based on manganites]. *UFN*. 2012, Vol. 182, P. 263 (In Russ.).
4. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Udod L. V., Sitnikov M. N., Kretinin V. V., Yanushkevich K. I., Velikanov D. A. Magnetoresistance, magnetoimpedance, magnetothermopower, and photoconductivity in silverdoped manganese sulfides. *J. Appl. Phys.* 2019, Vol. 125, P. 175706.
5. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Masyugin A. N., Kretinin V. V., Fisenko O. B., Gorev M. V. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spindisordered $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solution. *Phys. Stat. Sol. B*. 2019, P. 1900043.
6. Bebenin N. G., Zainullina R. I., Ustinov V. V. [Manganites with colossal magnetoresistance]. *UFN*. 2018, Vol. 188, P. 801–820 (In Russ.).
7. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the ferromagnetic state in $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$]. *ZhETF*. 2014, Vol. 100, P. 104–110 (In Russ.).
8. Nagaev E. L. [Lanthanum manganites and other magnetic semiconductors with giant magnetoresistance]. *UFN*. 1996, Vol. 166, No. 8, P. 796–857 (In Russ.).
9. Kagan M. U., Kugel K. I. [Inhomogeneous charge states and phase separation in manganites]. *UFN*. 2001, Vol. 171, P. 577–596 (In Russ.).
10. Abramova G. M., Petrakovsky G. A., Vtyurin A. N., Vorotynov A. M., Velikanov D. A., Krylov A. S., Gerasimova Yu., Sokolov V. V., Bovina A. F. Magnetic properties, magnetoresistance, and Raman spectra $\text{CuVXCr}_{1-x}\text{S}_2$. *FTT*. 2009, Vol. 51, Vol. 3, P. 500–504.
11. Aplesnin S. S., Petrakovskii G. A., Ryabinkina L. I., Abramova G. M., Kiselev N. I., Romanova O. B. Influence of magnetic ordering on the resistivity anisotropy of $\alpha\text{-MnS}$ single crystal. *Solid State Communications*. 2004, Vol. 129, Iss. 3, P. 195–197.

12. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Sokolov V. V., Pichugin A. Y., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetski G. I., Yanushkevich K. I. Magnetic and electrical properties of cation-substituted sulfides $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$). *Physics of the Solid State*. 2009, Vol. 51, Iss. 4, P. 698–701.
13. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M., Romanova O. B., Vorotynov A. M., Velikanov D. A., Kiselev N. I., Balaev A. D. Conductivity, weak ferromagnetism, and charge instability in an $\alpha\text{-MnS}$ single crystal. *Phys. Rev. B*. 2005, Vol. 71, No. 1, P. 125204–125212.
14. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B. et al. [Magnetoresistance properties of solid solutions $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$]. *FTT*. 2007, Vol. 49, P. 1984 (In Russ.).
15. Petrakovskii G. A., Loseva G. V., Ryabinkina L. I., Aplesnin S. S. Metal insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions Mn_{1-x}S . *JMMM*. 1995, Vol. 140, P. 147–148.
16. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sokolov V. V. Gigantic magnetocapacitive effect into $\text{Yb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$. *Abstract for Euro-Asian Symposium "Trends in magnetism", EASTMAG, Vladivostok*. 2013, P. 33–34.
17. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. [The influence of strong electron correlations and interactions of electrons with the lattice on the electron orbital ordering]. *ZhETF*. 2010, Vol. 92, No. 4, P. 254–259 (In Russ.).
18. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Sokolov V. V. Spin reduction in the $\text{HoXMn}_{1-x}\text{S}$ solid solution. *JMMM*. 2013, Vol. 347, P. 10–13.
19. Aplesnin S. S. [Role of fluctuation relations for the transport properties in manganites and nickelates]. *ZhETF*. 2007, Vol. 131, No. 5, P. 878–884 (In Russ.).
20. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Bandurina O. N., Gorev M. V., Balaev A. D., Eremin E. V. [Spin-glass effects in solid solutions $\text{CoXMn}_{1-x}\text{S}$]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2009, Vol. 73, P. 1021–1023 (In Russ.).
21. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetski G. I., Yanushkevich K. I. [Magnetic and electric properties of the cation-substituted sulfides Mn_{1-x}S ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$)]. *FTT*. 2009, Vol. 51, P. 661–664 (In Russ.).
22. Aplesnin S. S. *Magnitnye i elektricheskie svoystva sil'nokorrelirovannykh magnitnykh poluprovodnikov s chetyrekhsplinovym vzaimodeystviem i s orbital'nym uporyadocheniem*. [Magnetic and electrical properties of strongly correlated magnetic semiconductors with fourspin interaction and orbital ordering]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 172 p.
23. Aplesnin S. S. Influence of spin-phonon coupling on the magnetic moments in 2D spin-1/2 antiferromagnet. *Phys. Lett. A*. 2003, Vol. 313, P. 122–125.
24. Petrakovskii G. A., Ryabinkina L. I., Velikanov D. A., Aplesnin S. S., Abramova G. M., Kiselev N. I., Bobina A. F. Low-temperature electronic and magnetic transitions in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{S}$. *Phys. Sol. Stat.* 1999, Vol. 41, Iss. 9, P. 1520–1524.
25. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Eremin E. V., Romanova O. B., Balaev D. A., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu. Nonuniform Magnetic States and Electrical Properties of Solid Solutions. *IEEE Transactions on magnetics*. 2011, Vol. 47, P. 4413–4416.
26. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Kharkov A. M., Balaev D. A., Gorev M. V., Vorotynov A. M., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu. Metal-semiconductor transition in $\text{Sm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions. *J. Phys. Status Solidi (b)*. 2012, Vol. 249, P. 812.
27. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Kharkov A. M., Galyas A. I. [Study the transport properties of cationsubstituted solid solutions $\text{YbXMn}_{1-x}\text{S}$]. *FTT*. 2015, Vol. 57, P. 872–876 (In Russ.).
28. Aplesnin S. S., Udod L. V., Sitnikov M. N., Velikanov D. A., Gorev M. V., Molokeev M. S., Galyas A. I., Yanushkevich K. I. Magnetic and electrical properties of bismuth cobaltite $\text{Bi}_{24}(\text{CoBi})\text{O}_{40}$ with charge ordering. *Phys. Sol. Stat.* 2012, Vol. 54, Iss. 10, P. 2005–2014.

29. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. Magnetic structures upon ordering of eg orbitals in a square lattice. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008, Vol. 20, P. 325202–325203.
30. Werner P., Gull E., Troyer M., Millis A. J. Spin Freezing Transition and Non-Fermi-Liquid Self-Energy in a Three-Orbital Model. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 166405.
31. Kugel K. I., Rakhmanov A. L., Sboychakov A. O., Khomskii D. I. Doped orbitally ordered systems: Possible mechanism for phase separation. *Phys. Rev. B*. 2008, Vol. 78, P. 155113.
32. 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, Iss. 8, P. 1792–1798.
33. Peters R., Kawakami N. Orbital order, metal-insulator transition, and magnetoresistance effect in the two-orbital Hubbard model. *Phys. Rev. B*. 2011, Vol. 83, P. 125110.

Библиографические ссылки

1. Fert A. Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics // *Rev. Mod. Phys.* 2008. Vol. 80. P. 1517.
2. Barthelemy A. Handbook of Magnetic Materials / A. Barthelemy, A. Fert, F. Petroff; ed. by K. H. J. Buschow. Amsterdam : North Holland, 1999. Vol. 12. P. 1–96.
3. Волков Н. В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов // *УФН*. 2012. Vol. 182. P. 263.
4. Magnetoresistance, magnetoimpedance, magnetothermopower, and photoconductivity in silver-doped manganese sulfides // O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, L. V. Udod et al. / *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 125. P. 175706.
5. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spindisordered $Tm_xMn_{1-x}S$ solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // *Phys. Stat. Sol. B*. 2019. P. 1900043.
6. Бебенин Н. Г., Зайнуллина Р. И., Устинов В. В. Манганиты с колоссальным магнетосопротивлением // *УФН*. 2018. Т. 188. С. 801–820.
7. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в $Gd_xMn_{1-x}S$ // *ЖЭТФ*. 2014. Т. 100. С. 104–110.
8. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные полупроводники с гигантским магнетосопротивлением // *УФН*, 1996. Т. 166, № 8. С. 796–857.
9. Каган М. Ю., Кугель К. И. Неоднородные зарядовые состояния и фазовое расслоение в манганитах // *УФН*. 2001. Т. 171. С. 577–596.
10. Магнитные свойства, магнетосопротивление и спектры комбинационного рассеяния $CuVxCr_{1-x}S_2$ / Г. М. Абрамова, Г. А. Петраковский, А. Н. Втюрин и др. *ФТТ*. 2009. Т. 51, В. 3. С. 500–504.
11. Influence of magnetic ordering on the resistivity anisotropy of α -MnS single crystal / S. S. Aplesnin, G. A. Petrakovskii, L. I. Ryabinkina et al. // *Solid State Communications*. 2004. Vol. 129, Iss. 3. P. 195–197.
12. Магнитные и электрические свойства катион-замещенных сульфидов $Me_xMn_{1-x}S$ ($Me = Co, Gd$) / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // *ФТТ*. 2009. Т. 51, В. 4. С. 661–664.
13. Conductivity, weak ferromagnetism, and charge instability in an α -MnS single crystal / S. S. Aplesnin, L. I. Ryabinkina, G. M. Abramova et al. // *Phys. Rev. B*. 2005. Vol. 71, No. 1. P. 125204–125212.
14. Магниторезистивные свойства твердых растворов $MnSe_{1-x}Te_x$ / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // *ФТТ*. 2007. Т. 49. С. 1984.
15. Metal insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions $Me_xMn_{1-x}S$ / G. A. Petrakovskii, G. V. Loseva, L. I. Ryabinkina, S. S. Aplesnin // *JMMM*. 1995. Т. 140. С. 147–148.

16. Gigantic magnetocapacitive effect into $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / S. S. Aplesnin, A. M. Kharkov, V. V. Sokolov // Abstract for Euro-Asian Symposium “Trends in magnetism”. EASTMAG. Vladivostok, 2013. P. 33–34.
17. Аплеснин С. С., Москвин А. И. Влияние сильных электронных корреляций и взаимодействия электронов с решеткой на орбитальное упорядочение электронов // ЖЭТФ. 2010. Т. 92, № 4. С. 254–259.
18. Spin reduction in the $\text{HoX}\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solution / S. S. Aplesnin, A. M. Kharkov, M. N. Sitnikov, V. V. Sokolov // JMMM. 2013. Vol. 347. P. 10–13.
19. Аплеснин С. С. Роль флуктуации связей на транспортные свойства в манганитах и никелатах // ЖЭТФ. 2007. Т. 131, № 5. С. 878–884.
20. Спин-стекольные эффекты в твердых растворах $\text{CoX}\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. С. 1021–1023.
21. Магнитные и электрические свойства катион-замещенных сульфидов $\text{Me}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$) / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // ФТТ. 2009. Т. 51. С. 661–664.
22. Аплеснин С. С. Магнитные и электрические свойства сильнокоррелированных магнитных полупроводников с четырехспиновым взаимодействием и с орбитальным упорядочением. М. : Физматлит, 2013. 172 с.
23. Aplesnin S. S. Influence of spin-phonon coupling on the magnetic moments in 2D spin-1/2 antiferromagnet // Phys. Lett. A. 2003. Vol. 313. P. 122–125.
24. Low-temperature electronic and magnetic transitions in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$ / G. A. Petrakovskii, L. I. Ryabinkina, D. A. Velikanov et al. // Phys. Sol. Stat. 1999. Vol. 41, Iss. 9. P. 1520–1524.
25. Nonuniform Magnetic States and Electrical Properties of Solid Solutions / S. S. Aplesnin, A. M. Kharkov, E. V. Eremin et al. // IEEE Transactions on magnetics. 2011. Vol. 47. P. 4413–4416.
26. Metal-semiconductor transition in $\text{Sm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions / Aplesnin S.S., Romanova O.B., Kharkov et al. // J. Phys. Stat. Sol. B. 2012. Vol. 249. P. 812.
27. Исследование транспортных свойств катион-замещенных твердых растворов $\text{YbX}\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, А. М. Харьков, А. И. Галяс // ФТТ. 2015. Т. 57. С. 872–876.
28. Magnetic and electrical properties of bismuth cobaltite $\text{Bi}_{24}(\text{CoBi})\text{O}_{40}$ with charge ordering / S. S. Aplesnin, L. V. Udod, M. N. Sitnikov et al. // Phys. Sol. Stat. 2012. Vol. 54, Iss. 10. P. 2005–2014.
29. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. Magnetic structures upon ordering of eg orbitals in a square lattice // J. Phys.: Condens. Matt. 2008. Vol. 20. P. 325202–325203.
30. Spin Freezing Transition and Non-Fermi-Liquid Self-Energy in a Three-Orbital Model. Werner P., Gull E., Troyer M., Millis A. J. // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 166405.
31. Doped orbitally ordered systems: Possible mechanism for phase separation / K. I. Kugel, A. L. Rakhmanov, A. O. Sboychakov, D. I. Khomskii // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78. P. 155113.
32. 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, Iss. 8. P. 1792–1798.
33. Peters R., Kawakami N. Orbital order, metalinsulator transition, and magnetoresistance effect in the two-orbital Hubbard model // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. P. 125110.

© Ситников М. Н., Харьков А. М., Аплеснин С. С., Романова О. Б., 2020

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

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

Romanova Oksana Borisovna – Cand. Sc., Senior researcher; Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences. E-mail: rob@iph.krasn.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.

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, apl@iph.krasn.ru.

Романова Оксана Борисовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН. E-mail: rob@iph.krasn.ru.