

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: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-254-265

For citation: Aplesnin S. S., Yanushkevich K. I. Change in magnetoresistance in manganese chalcogenides $MnSe_{1-x}TeX$ from bulk to thin-film samples. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 254–265. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-254-265.

Для цитирования: Аплеснин С. С., Янушкевич К. И. Изменение магнитосопротивления в халькогенидах марганца $MnSe_{1-x}TeX$ при переходе от объемных образцов к тонкопленочным // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 254–265. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-254-265.

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ В ХАЛЬКОГЕНИДАХ МАРГАНЦА $MnSe_{1-x}TeX$ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ К ТОНКОПЛЕНОЧНЫМ

С. С. Аплеснин^{1*}, К. И. Янушкевич²

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

²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 19

*E-mail aplesnin@sibsau.ru

Исследованы электрические и оптические свойства анион-замещенных антиферромагнитных полупроводников $MnSe_{1-x}TeX$ ($0,1 \leq X \leq 0,4$) в области температур 77–300 К и магнитных полей до 13 кЭ в объемных образцах и поликристаллических тонких пленках. В твердых растворах $MnSe_{1-x}TeX$ обнаружено отрицательное магнитосопротивление в окрестности температуры Нееля для $X = 0,1$ и для состава с $X = 0,2$ в парамагнитной области до 270 К. Установлена корреляция спин-стекольного состояния и магнитосопротивления для $X = 0,1$ и 0,2. Измерены спектры оптического поглощения в интервале частот $2000 \text{ см}^{-1} < \omega < 12000 \text{ см}^{-1}$. Обнаружено уменьшение щели в спектре электронных возбуждений и ряд пиков поглощения вблизи дна зоны проводимости. В поликристаллических пленках системы $MnSe_{1-x}TeX$ найдено сосуществование двух кристаллических фаз методом рентгеноструктурного анализа. Обнаружены максимумы сопротивления в области полиморфного и магнитного переходов. Предложена модель локализованных спин-поляризованных электронов с радиусом локализации, меняющимся в магнитном поле в результате конкуренции ферромагнитных и антиферромагнитных взаимодействий. В парамагнитной области отрицательное магнитосопротивление вызвано туннелированием спин-поляризованных электронов при орбитальном упорядочении.

Ключевые слова: халькогениды марганца, магнитосопротивление, проводимость, тонкие пленки, ВAX.

CHANGE IN MAGNETORESISTANCE IN MANGANESE CHALCOGENIDES $MnSe_{1-x}TeX$ FROM BULK TO THIN-FILM SAMPLES

S. S. Aplesnin^{1*}, K. I. Yanushkevich²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Scientific-Practical Materials Research Center NAS of Belarus

19, Brovki St., Minsk, 220072, Belarus

*E-mail aplesnin@sibsau.ru

The electrical and optical properties of anion-substituted antiferromagnetic semiconductors MnSe₁-XTeX ($0.1 \leq X \leq 0.4$) in the temperature range 77–300 K and magnetic fields up to 13 kOe in bulk samples and in polycrystalline thin films are investigated. Negative magnetoresistance was found in the MnSe₁-XTeX solution in the neighbourhood with a Néel temperature for $X = 0.1$ and for a composition with $X = 0.2$ in the paramagnetic region up to 270 K. A correlation was established between the spin-glass state and magnetoresistance for $X = 0.1$ and 0.2. The optical absorption spectra were measured in the frequency range $2000 \text{ cm}^{-1} < \omega < 12000 \text{ cm}^{-1}$. A decrease in the gap in the spectrum of electronic excitations and a several of absorption peaks near the bottom of the conduction band were found. Coexistence of two crystalline phases was found in polycrystalline films of the MnSe₁-XTeX system by X-ray diffraction analysis. Resistance maxima were established in the region of polymorphic and magnetic transitions. A model of localized spin-polarized electrons with a localization radius varying in a magnetic field as a result of competition between ferromagnetic and antiferromagnetic interactions is proposed. In the paramagnetic region, negative magnetoresistance is caused by tunneling of spin-polarized electrons during orbital ordering.

Keywords: manganese chalcogenides, magnetoresistance, conductivity, thin films, current-voltage curve.

Введение. Для управления космическими аппаратами, находящихся в экстремальных условиях с перепадом температур в 200–300° необходимо создать элементную электронную микроэлектронику, функционирующую в этих условиях. Традиционная электроника работает на полупроводниках из кремния и германия, оперирующих с зарядом электрона. Но у электрона есть спиновый и орбитальный угловой момент, что важно в спинтронике, в которой используются преимущества как энергонезависимой магнитной памяти, так и быстродействующих электрических систем обработки информации. В спинтронике [1; 2] для преобразования электрического сигнала используется не только зарядовая степень свободы электрона, но также и спин, что позволяет создавать принципиально новые спинтронные устройства. У электрона имеются орбитальные степени свободы, воздействуя на которые можно регулировать транспортные и диэлектрические характеристики в магнитном поле.

В халькогенидах существует взаимосвязь параметров магнитной и электрической подсистем [3–7] и эффект магнитосопротивления [8–12]. На сегодняшний день интенсивно исследуются окисные соединения марганца (манганиты типа LaMnO₃) [13–17], халькогениды европия, селениды CdCr₂Se₄, HgCr₂Se₄ [18–20]. В сульфидных системах MeXMn₁-XS (Me = 3d металл), синтезированных на основе моносulfида α -MnS и претерпевающих переход металл – диэлектрик [21–24], обнаружен эффект КМС, сравнимый с его величиной в манганитах [25–28].

Халькогениды марганца MnSe и MnTe являются антиферромагнетиками (AFM) и испытывают структурный и магнитный переходы с увеличением степени гибридизации катионов марганца с анионами Se и Te [29; 30]. При этом возможно изменение транспортных свойств от полупроводниковых к металлическим вблизи комнатных температур. MnTe кристаллизуется в гексагональной структуре типа NiAs [29]. Моноселенид марганца MnSe обнаруживает структурный фазовый переход из кубической фазы в NiAs структуру в области температур $248 \text{ K} < T < 266 \text{ K}$ [30], а ниже этой температуры наблюдается сосуществование фаз в образце.

Антиферромагнетик MnTe состоит из ферромагнитно упорядоченных спинов в плоскости, которые ориентированы антиферромагнитно вдоль гексагональной оси. Спины расположены в базисной плоскости и имеют анизотропию типа легкая плоскость с температурой Неел а в гексагональной фазе NiAs она совпадает с температурой структурного перехода $T_S = 272$ К. Халькогениды марганца – полупроводники с р-типом проводимости, имеющие энергетическую щель в спектре одночастичных электронных возбуждений для MnSe (2,0–2,5) eV и MnTe (0,9–13) eV с поляронным типом носителей заряда [32]. На образцах MnSe обнаружен эффект магнитосопротивления в магнитоупорядоченной кубической фазе при приближении к температуре Нееля с величиной удельного электросопротивления $\rho = 104\text{--}103$ Ом·см [33]. Уменьшение длины связи металл – анион Mn–Te, согласно теоретическим расчетам зонной структуры [34], индуцирует изменение кристаллической структуры от гексагональной к кубической с антиферромагнитным типом упорядочения с энергией связи на одну пару Mn–Te $E_{ZB,H} = -0,31$ eV/bond с длиной связи $RAF = 2,70$ Å, и с ферромагнитным упорядочением $E_{ZB,H} = -0,51$ eV/bond с $RF = 2,71$ Å. При этом в структуре NiAs длина связи составляет $R(Mn\text{--}Te) = 0,273$ Å. Постоянная решетки $a = 5,44$ Å в MnSe со структурой NaCl находится где-то посередине между $2RF$ и $2RH$, поэтому при замещении селена теллуром при небольших концентрациях возможно образование ферромагнитных связей Mn–Te–Mn с анизотропией типа легкая плоскость. В результате возможно образование угловой фазы и усиление магниторезистивного эффекта в анион-замещенных твердых растворах $MnSe_{1-x}TeX$. Замещение селена теллуром приводит к подавлению гексагональной фазы и однофазному состоянию системы $MnSe_{1-x}TeX$ с ГЦК структурой с пространственной группой (225) [35] в области температур $120\text{ K} < T < 300\text{ K}$ и в интервале концентраций $0,1 \leq X \leq 0,4$ [36]. Возможны локальные некоррелированные деформации решетки, которые вызовут изменение электронной структуры и изменение сопротивления при прыжковом типе проводимости совместно с изменениями магнитных свойств [37; 38].

Целью данной работы является обнаружение магниторезистивного эффекта и выяснение микроскопического механизма влияния магнитного поля на транспортные свойства твердых растворов $MnSe_{1-x}TeX$ ($0,1 \leq X \leq 0,4$) на основе комплексного исследования, удельного электросопротивления, вольт-амперных характеристик и спектров оптического поглощения в зависимости от температуры и величины магнитного поля.

Материалы и методы исследования. Измерения удельного электросопротивления проведены стандартным четырехзондовым компенсационным методом на постоянном токе в интервале температур $77\text{--}300$ К в магнитном поле до 13 кЭ. На рис. 1 приведены температурные зависимости сопротивления твердых растворов $MnSe_{1-x}TeX$ для всех составов ($0,1 \leq X \leq 0,4$). При $T < T_N$ наблюдается отклонение от линейной зависимости $\ln\rho = \ln\rho_0 + \Delta E/T$. Величина энергии активации $\Delta E \approx (0,07\text{--}0,09)$ eV практически не зависит от состава у этих образцов.

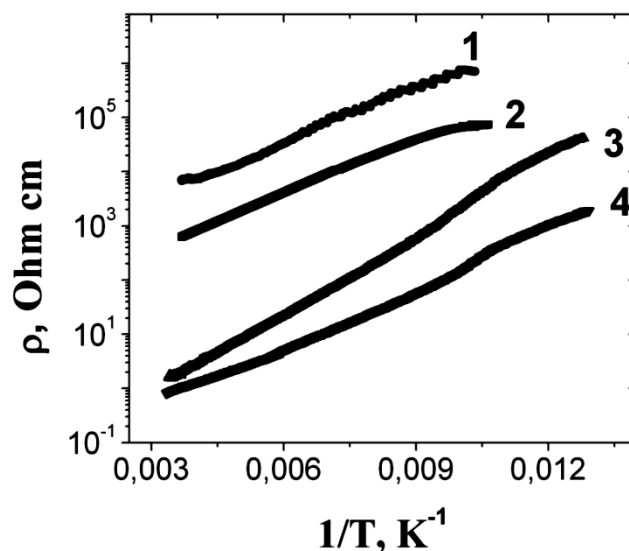


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления для твердых растворов $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ с концентрацией замещения $X = 0,1$ (1), $0,2$ (2), $0,3$ (3), $0,4$ (b).

Fig. 1. Temperature dependence of the electrical resistivity $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ solutions with concentration of $X = 0.1$ (1), 0.2 (2), 0.3 (3), 0.4 (b).

Влияние магнитного поля на транспортные свойства исследовалось двумя способами. Во-первых, измерялось изменение сопротивления по температуре твердых растворов $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$, находящихся как в магнитном поле, так и его отсутствии. Во-вторых, при фиксированной температуре изучались вольтамперные характеристики в нулевом магнитном поле и поле $H = 13$ кЭ. На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики халькогенидов марганца $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ для состава $X = 0,1$ при температурах (100, 140 и 190 К). Зависимости $U(I)$ линейны и не зависят от величины магнитного поля при $T < 100$ К. Установлено, что в магнитном поле сопротивление образцов уменьшается и наибольшее изменение обнаружено в окрестности температуры Нееля у состава с $X = 0,1$ порядка 100 % (рис. 3, a). Для концентрации с $X = 0,2$ уменьшение сопротивления обнаружено в парамагнитной области при температуре выше температуры Нееля и в интервале температур $160 \text{ K} < T < 270 \text{ K}$ составляет 5 % (рис. 3, b). Для больших концентраций магнитосопротивление (MR) не обнаружено.

Измерение магнитного момента образцов проведено в магнитном поле 0,8 Т в интервале температур $80 \text{ K} < T < 700 \text{ K}$ в двух режимах: охлаждение в нулевом магнитном поле и магнитном поле 0,8 Т. Найдена зависимость восприимчивости от предыстории образца. Так, восприимчивость образца, охлажденного в магнитном поле, имеет меньшее значение, по сравнению с образцом в нулевом поле. Относительное изменение магнитного момента $(\sigma(H) - \sigma(0))/\sigma(0)$ изображено на рис. 3 (кривая 3 и 4) и качественно согласуется с температурным поведением магнитосопротивления.

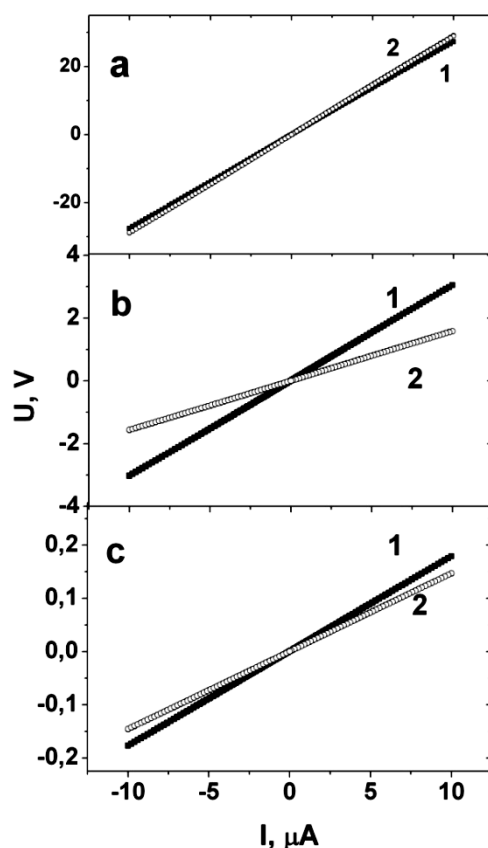


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика твердого раствора $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ($X = 0,1$) в магнитном поле $H = 1$ Т (2) и нулевом магнитном поле (1) при разных температурах T : 100 К (а), 140 К (б), 190 К (в)

Fig. 2. The current-voltage characteristic of the $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solution ($X = 0.1$) in a magnetic field $H = 1$ Т (2) and in a zero magnetic field (1) at different temperatures T : 100K (a), 140K (b), 190K (c)

Для $X = 0,1$ относительное изменение магнитного момента резко увеличивается в окрестности температуры Нееля и уменьшается по абсолютной величине при $T = 220$ К, где магнитосопротивление исчезает. Для состава с $X = 0,2$ наблюдается количественное согласие изменения магнитного момента и магнитосопротивления от температуры. Парамагнитная температура Кюри (θ), определенная из высокотемпературной обратной восприимчивости, плавно уменьшается с ростом концентрации теллура. В приближении молекулярного поля $\theta = 2/3S(S+1)zJ\text{Se}$ для MnSe и для малых концентраций парамагнитную температуру Кюри твердого раствора $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ можно представить в виде $\theta = 2/3S(S+1)(zJ\text{Se}(1-x) + J\text{Te})$ или нормированная зависимость $\theta(x)/\theta(\text{MnSe}) = 1 + x(\lambda - 1)$ используется для определения знака обмена $J(\text{Mn-Te-Mn})$. Подгоночные функции с отношением параметров обмена $\lambda = J(\text{Mn-Te-Mn}) / J(\text{Mn-Se-Mn}) = -1,25$ и $-0,25$ хорошо описывают экспериментальные результаты. Для концентраций $X < 0,3$ знак обменного взаимодействия меняется на ферромагнитный с уменьшением величины обмена с ростом длины связи, согласно теоретическому предсказанию [34].

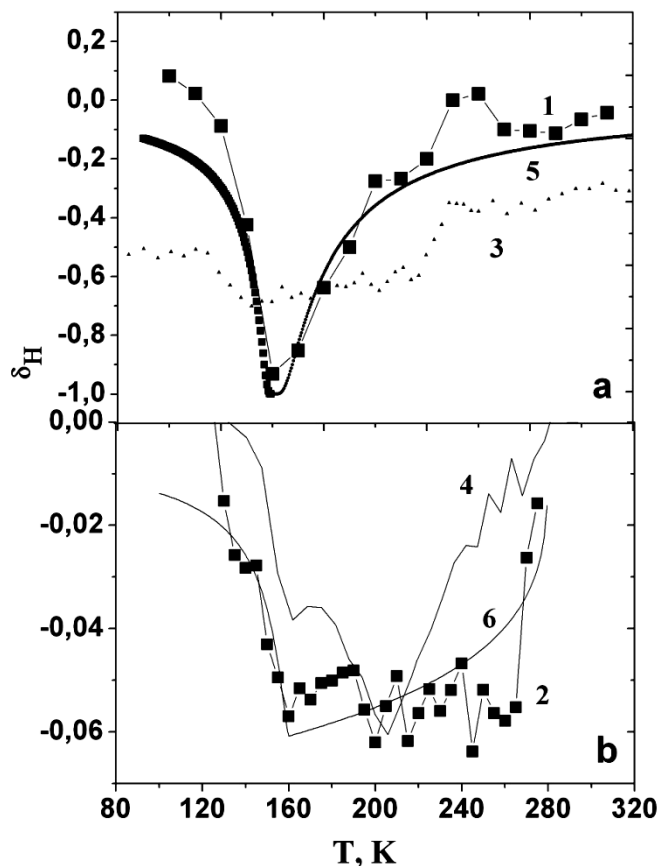


Рис. 3. Температурные зависимости магнитосопротивления халькогенида $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ с $X = 0,1$ (1) (a) и $0,2$ (2) (b) при $H = 13$ кЭ. Относительное изменение магнитного момента $\sigma(H) - \sigma(0)/\sigma(0)$ для $X = 0,1$ (3) и $X = 0,2$ (4). Подгоночные функции: для концентрации $X = 0,1$ (5) из уравнения (1) при $H = 0,8$ Т, $B = 0,13$ Т – 1 в области $T > T_N$, и $B = 0,05$ Т – 1 в $T < T_N$; для $X = 0,2$ (6) из уравнения (5) с параметрами $T_0 = 280$ К, $T^* = 160$ К, $n = 2/3$, $\lambda = 0,1$, концентрация кластеров $x = 0,08$

Fig. 3. Temperature dependences of the magnetoresistance of $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ chalcogenide with $X = 0.1$ (1) (a) and 0.2 (2) (b) at $H = 13$ kOe. The relative change in the magnetic moment $\sigma(H) - \sigma(0) / \sigma(0)$ for $X = 0.1$ (3) and $X = 0.2$ (4). Fitting functions: for a concentration of $X = 0.1$ (5) from equation (1) at $H = 0.8$ T, $B = 0.13$ T – 1 in the region of $T > T_N$, and $B = 0.05$ T – 1 in $T < T_N$; for $X = 0.2$ (6) from equation (5) with parameters $T_0 = 280$ K, $T^* = 160$ K, $n = 2/3$, $\lambda = 0.1$, cluster concentration $x = 0.08$

Образование поляронов или областей с повышенной концентрацией электронной плотности можно проследить из спектров оптического поглощения, приведенных на рис. 4 для составов $X = 0,2$ и $0,4$ в области значений энергии $2000 \text{ cm}^{-1} - 12000 \text{ cm}^{-1}$. Электромагнитное излучение может поглощаться носителями заряда в процессе межзонных переходов, свободными носителями зарядов в пределах одной энергетической зоны и колебаниями кристаллической решетки. Спектр поглощения со стороны низких энергий дает информацию о фоновых спектрах и плазменных колебаниях в полупроводниках, в области высоких энергий о ширине запрещенной зоны, структуре валентной зоны и зоны проводимости вблизи их экстремумов. Для частот $\omega < 5000 \text{ cm}^{-1}$ наблюдается рост поглощения электромагнитного излучения, вызванного увеличением концентрации электронов и металлизацией образцов. Однако данные составы твердых растворов $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ сохраняют активационный тип проводимости. Резкое уменьшение интенсивности поглощения ниже максимума с энергией $\hbar\omega = 9700 \text{ cm}^{-1}$ для $X = 0,4$ соответствует ширине запрещенной зоны MnTe $\hbar\omega = 9100 \text{ cm}^{-1}$, т. е. при этой концентрации происходит протекание связей Mn-Te-Mn по решетке. Вблизи дна зоны проводимости

наблюдаются дополнительные максимумы поглощения с $\hbar\omega_1 = 6300 \text{ см}^{-1}$ и с $\hbar\omega_2 = 8700 \text{ см}^{-1}$, расположенные по энергии ниже дна зоны проводимости на величину $\Delta E_1 = 3400 \text{ см}^{-1}$ и $\Delta E_2 = 1000 \text{ см}^{-1}$. Возможно, эти линии соответствуют связанным состояниям электрона и дырки, которые образуют водородоподобный спектр экситонов. Энергии линии спектра описываются формулой $E_n = 1,2 - 0,42/n^2 \text{ eV}$ с энергией связи экситона $E_b = 0,42 \text{ eV}$. Радиус экситона оценим из формулы $R_n = n^2 \epsilon m_{av} / \mu$, где m – масса свободного электрона; a_B – Боровский радиус атома водорода; ϵ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость для экситона малого радиуса $\epsilon = 8$ для MnSe [39]; μ – приведенная масса электрона и дырки. При значении $\mu = 0,5$ м радиус экситона $R_1 = 0,8 \text{ nm} = 1,4 \text{ Å}$. Экситоны малого радиуса перемещаются по системе Mn–Te и при разных эффективных массах электрона и дырки дают вклад в проводимость.

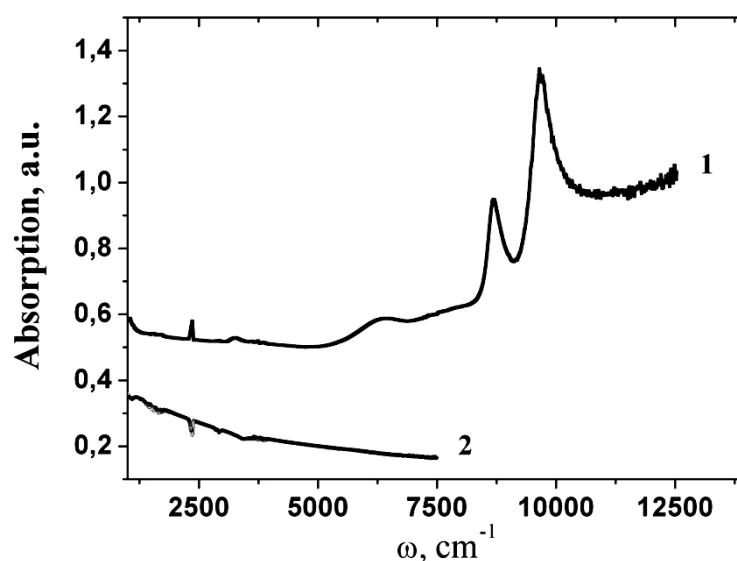


Рис. 4. Спектры оптического поглощения для твердых растворов $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ с $X = 0,2$ (1), $0,4$ (2) при $T = 300 \text{ K}$

Fig. 4. Optical absorption spectra for $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solutions with $X = 0.2$ (1), 0.4 (2) at $T = 300 \text{ K}$

Модель магнитосопротивления. При анионном замещении возникает химическое давление и изменение кристаллического поля октаэдра в результате разницы ионных радиусов селена и теллура. При малых концентрациях, когда октаэдр состоит из пяти атомов селена и одного атома теллура, длины связей в октаэдре становятся не равноценными, что приводит к локальному увеличению кристаллического поля и изменению электронной плотности между t_{2g} и e_g орбиталями, т. е. к образованию электрона на t_{2g} орбитали и дырки на e_g орбитали и изменению спинового состояния ионов марганца в окрестности ионов теллура. Поменяется также знак обменного взаимодействия в результате двойного обмена электронами на e_g орбиталях и кинетического обмена в t_{2g} подсистеме. Искажение октаэдра индуцирует расщепление t_{2g} и e_g орбиталей с разной проекцией орбитального момента $\pm L^z$ на выделенную ось. Энергия деформированного октаэдра уменьшается в результате разворота октаэдров в области температур $200\text{--}250 \text{ K}$ в зависимости от концентрации теллура и при дальнейшем понижении температуры возможно смещение ионов марганца с локальным изменением симметрии решетки, например, орторомбического типа.

Микроскопическую модель можно представить в виде ферромагнитных кластеров в окрестности ионов теллура со случайной ориентацией осей анизотропии и орбитальными моментами. В твердом растворе $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ выделим две области температур, для $X = 0,1$ в окрестности температуры Нееля и для $X = 0,2$ в парамагнитной области выше температуры

Нееля. Для состава с $X = 0,1$ величина ферромагнитного обмена в кластерах превышает антиферромагнитный обмен в матрице MnSe и образуется угловая фаза со случайной ориентацией слабого магнитного момента в кластере в антиферромагнитной области. При нагревании взаимодействие между кластерами уменьшается и магнитные моменты ориентируются по направлению магнитного поля, в результате увеличивается ферромагнитная спин-спиновая корреляционная функция по поперечным компонентам спина, растет радиус корреляции. Выше температуры Нееля спин-спиновые корреляции и радиус корреляции уменьшаются в результате тепловых флуктуаций спинового момента. В недиагональной модели Андерсона это соответствует изменению ширины потенциальной ямы и связано с температурной зависимостью радиуса локализации электрона в виде $\xi = A|1 - T/T_N|$. Магнитосопротивление в полупроводниках, проводимость которых описывается в модели с переменной длиной прыжка, имеет экспоненциальную зависимость

$$(\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0) = \exp(-BH\xi) - 1 = \exp\left(-BH / \left|1 - T/T_N\right|\right) - 1, \quad (1)$$

где B – параметр; H – внешнее магнитное поле; ξ – радиус локализации электрона [40; 41]. Экспериментальные данные по магнитосопротивлению удовлетворительно описываются в рамках этой модели с полем $H = 0,8$ Т и параметром $B = 0,13$ Т⁻¹ для $T > T_N$, и $B = 0,05$ Т⁻¹ в магнитоупорядоченной области. Подгоночные функции представлены на рис. 3, а (кривая 5).

Для состава $X = 0,2$ величина ферромагнитного обмена много меньше антиферромагнитного взаимодействия и электроны локализованы в пределах постоянной решетки в потенциальных ямах, ширина которых фиксирована и меняется потенциальный барьер от температуры. Здесь можно использовать модель туннелирования спин поляризованных электронов между потенциальными ямами в виде

$$(\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0) = 1 / (1 + xP_1P_2 \cos \theta) - 1, \quad (2)$$

где x – концентрация ям; $P_{1,2}$ – степень поляризации электронов; угол θ между осями поляризаций электронов. Спиновая поляризация электронов обусловлена орбитальным упорядочением. Предположим, что величина поляризации $P_{1,2}$ для всех кластеров одинаковая и исчезает при температуре орбитального упорядочения T_0 по степенному закону $P_{1,2} = P_0(1 - T/T_0)^{1/4}$. Для качественного понимания процессов туннелирования электронов между кластерами, оси поляризаций которых находятся в интервале углов от $0 < \theta < \pi$, рассмотрим простую модель, когда поле анизотропии H_A параллельно внешнему магнитному полю и ортогонально ему. В результате конкуренции зеемановского взаимодействия и поля анизотропии спин электрона направление поляризации будет поворачиваться по направлению внешнего магнитного поля с ростом температуры. Корреляция между спинами задается орбитальным упорядочением. Энергия магнитной системы имеет вид

$$E = -SH \cos \theta - SH_A \cos(\gamma - \theta), \quad (3)$$

где H_A – поле анизотропии; γ – угол между внешним магнитным полем и полем анизотропии. Минимальное значение энергии достигается при угле:

$$\cos \theta = 1 / \sqrt{\left(1 + H_A^2 \sin^2 \gamma / (H + H_A \cos \gamma)^2\right)}. \quad (4)$$

Поле анизотропии уменьшается с ростом температуры по степенному закону в виде $H_A = K(1 - T / T^*)^n$, где T^* является температурой, при которой исчезает поле анизотропии, вызванное ромбическим искажением. Отношение магнитного поля к константе анизотропии обозначим через $\lambda = H/K$. Тогда зависимость магнитосопротивления от температуры представим в виде

$$(\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0) = 1 / \left(1 + x P_0^2 (1 - T / T_0)^{1/2} / \sqrt{1 + (1 - T / T^*)^{2n} / \lambda^2} \right) \quad (5)$$

На рис. 3, *b* функция (5) хорошо описывает экспериментальные результаты с параметрами $T_0 = 280$ К, $T^* = 160$ К, $n = 2/3$, $\lambda = 0,1$, концентрация кластеров $x = 0,08$. Модель туннелирования спин-поляризованных электронов с орбитальным упорядочением объясняет экспериментальные результаты по магнитным свойствам и магнитосопротивлению.

Структура и электрические свойства тонких пленок. С изменением размерности системы меняются физические свойства материалов. В объемных образцах теллурида марганца сопротивление не зависит от магнитного поля, однако в тонкопленочных соединениях $MnTe$ [42] обнаружено магнитосопротивление с максимумом в области 200 К.

Положительное магнитосопротивление найдено в топологических изоляторах [43]. В объемном образце Bi_2Te_3 магнитосопротивление (MR) порядка 15 % при комнатной температуре, а в тонких пленках Bi_2Te_3 эффект гигантского MR достигает 600 % при комнатной температуре [44; 45]. Наблюдаемые большие значения MR при комнатной температуре непосредственно связаны с уменьшением размерности топологического изолятора. Магнитосопротивление на пленках Bi_2Se_3 размером 200 нм имеет линейную температурную зависимость и сохраняется в сильных магнитных полях, включая область высоких температур [46]. Эффект MR объясняется наличием двух каналов с высокой подвижностью носителей заряда, который сосуществует с обычным объемным каналом с подвижностью $60 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ при высоких температурах в тонких пленках Bi_2Se_3 [47]. С понижением температуры, плотность носителей в канале с высокой подвижностью значительно уменьшается и свободные носители замораживаются ниже 85 К, оставляя в пленке только проводящий объемный канал.

Положительное MR может быть обусловлено конкуренцией вырожденных орбитальных состояний электрона и сильных электронных корреляций [48]. В окрестности температуры перехода орбитально упорядоченной фазы в парафазу «спектральный вес» смещается к уровню Ферми. В этой области температур магнитное поле приводит снова к увеличению ширины щели и стабилизации орбитального порядка. Для узкозонных полупроводников с шириной $W = 1$ эВ соответствующая температура для магниторезистивного эффекта $T \approx 600$ К [48].

Рост сопротивления в магнитном поле в тонких пленках антиферромагнетиков Sr_2CrWO_6 связывается с подавлением дальнего антиферромагнитного порядка и образованием флуктуационной области с ближним порядком, которые усиливают рассеяние электронов [49].

При переходе от объемных образцов к тонкопленочным в халькогенидах $MnSe$ и $MnTe$ температуры Нееля, энергия активации уменьшаются в несколько раз [50]. В пленках $MnSe$ и $MnTe$ стабилизируется соответственно кубическая структура $NaCl$ [51] и гексагональная $NiAs$ структура [52]. Возможно в поликристаллических тонкопленочных соединениях, по сравнению с объемными образцами системы $MnSe_{1-x}Te_x$, обнаружить усиление магнитоэлектрического эффекта.

Тонкопленочные поликристаллические соединения халькогенидов марганца $MnSe_{1-x}Te_x$ получены напылением заранее синтезированных твердых растворов на предметные стекла

методом вспышки. Прекурсоры представляли собой порошки зернистостью от 0,1 до 0,3 мм. Напыление производилось в вакуумной установке для напыления пленок типа УВН-71Р-2. Давление в реакционной камере во время напыления составляло 10^{-2} – 10^{-3} Па. Температура танталового испарителя поддерживалась ~ 2000 °С. Подложки располагались на расстоянии 10 см от испарителя. Температура подложек составляла 250–300 °С.

Температура испарителя была значительно выше температуры плавления твердых растворов. Поэтому при попадании малой массы вещества на испаритель происходит мгновенное его испарение, что обеспечивает после кристаллизации на подложке, находящейся на значительном расстоянии от испарителя, состав и структуру, соответствующие объемным веществам. Подача прекурсора к испарителю осуществлялась устройством на основе ударной вибрации. Толщина пленок варьировалась от 157 до 960 nm. В качестве подложек использовался кварц.

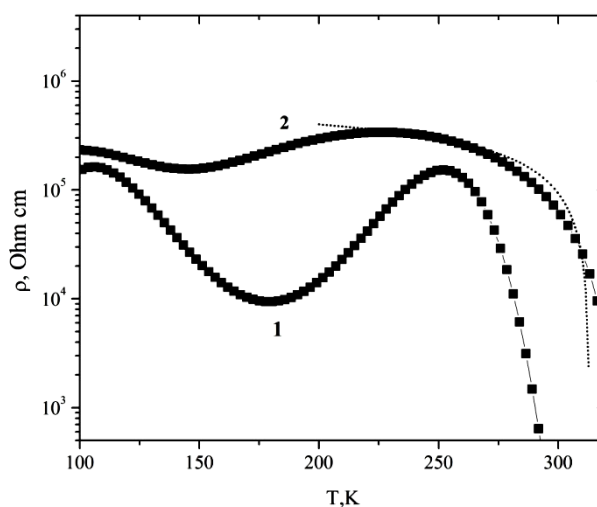


Рис. 5. Зависимость электросопротивления от температуры для пленок $\text{MnSe}_{0.9}\text{Te}_{0.1}$ (1) и $\text{MnSe}_{0.8}\text{Te}_{0.2}$ (2). Пунктирная линия указывает, что зависимость сопротивления от температуры описывается степенной функцией (6)

Fig. 5. The temperature dependence of the electrical resistivity for films $\text{MnSe}_{0.9}\text{Te}_{0.1}$ (1) and $\text{MnSe}_{0.8}\text{Te}_{0.2}$ (2). The dotted line indicates the temperature dependence of the resistance is described by a power function (6)

Рентгеноструктурный анализ тонкопленочных халькогенидных соединений $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ проводился на установке DRON-3 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при температуре 300 К после их получения и после проведения измерений магнитных и электрических свойств. Структура тонкопленочных соединений отличается от гранецентрированной кубической (ГЦК) структуры объемных поликристаллических $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ той же концентрации [51]. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, замещение селена теллуром в тонкопленочных халькогенидных соединениях системы $\text{MnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ приводит к уменьшению интенсивности пиков, свойственных для кубической структуры, и появлению никель-арсенидной (NiAs) гексагональной структуры. Параметр решетки возрастает с ростом концентрации замещающего элемента, а величина отношения $c/a \sim 1,4$ меньше 1,63, характерной для объемного MnTe с гексагональной структурой NiAs типа, что свидетельствует о сжатии гексагональной плотно упакованной структуры.

На температурной зависимости сопротивления для $X = 0,1$ наблюдаются максимум, обусловленный полиморфным переходом (рис. 5). С ростом концентрации замещения максимум сглаживается. Перенос носителей заряда может осуществляться в результате перескока электронов между доменными границами либо за счет диффузии границ. Это

активационные процессы, где подвижность электронов определяется выражением $\mu = \mu_0 \exp(-E_a / k_0 T)$, где $\mu_0 = \frac{ba^2 v}{k_0 T}$, где v – частота перескоков, равная частоте фононов ($\sim 10^{13}$ Hz); a – расстояние между доменными границами [53]. Возможен процесс диффузии границ в результате взаимодействия с акустическими спиновыми волнами. Поток границ пропорционален коэффициенту диффузии $j \sim D \sim v\lambda$, где v – скорость спиновых волн; λ – длина свободного пробега, которая пропорциональна радиусу спиновой корреляции $\lambda \sim \xi = B/(1 - T/T_N)$. Чем больше спинов отклоняется от антиферромагнитного расположения, тем с меньшей потерей энергии будет перемещаться граница. Диффузия доменных границ в антиферромагнитной матрице увеличивается с ростом температуры как $D \sim 1/(1 - T/T_N)$. Функциональную зависимость проводимости от температуры представим в виде

$$\sigma = \frac{A}{T \exp(-E_a / kT)} + \frac{B}{\left(1 - \frac{T}{T_N}\right)}, \quad (6)$$

где A и B подгоночные параметры. Для состава с $X = 0,2$ функция (1) хорошо описывает экспериментальные результаты с $A = 1 \cdot 10^{-3}$, $B = 0,4 \cdot 10^{-6}$, $E_a = 0,021$ eV. Выше 200 K превалирует диффузионный вклад, а ниже перескоковый механизм туннелирования носителей тока.

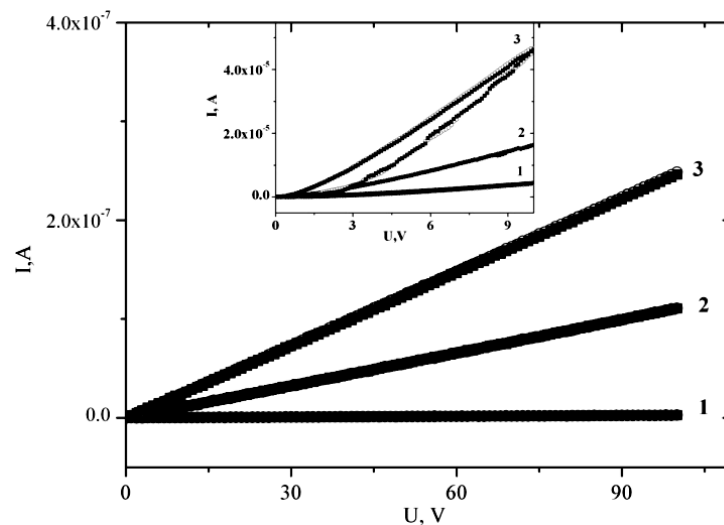


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики, измеренные в нулевом магнитном поле (светлые кружки) и поле 12 кЭ (черные кружки). MnSe_{0,9}Te_{0,1} при T = 80 K (1), 180 K (2) и 220 K (3). Вставка: MnSe_{0,8}Te_{0,2} при T = 80 K (1), 180 K (2) и 280 K (3)

Fig. 6. The current-voltage characteristics measured in a zero magnetic field (empty circles) and field 12 kOe (black circles). MnSe_{0.9}Te_{0.1} at T = 80 K (1), 180 K (2) and 220 K (3). Insert: MnSe_{0.8}Te_{0.2} at T = 80 K (1), 180 K (2) and 280 K (3)

Существование доменных границ выше полиморфного перехода подтверждается из вольт-амперных характеристик (ВАХ), измеренных при фиксированных температурах в нулевом магнитном поле и поле 12 kOe. На рис. 6 представлены ВАХ на поликристаллических пленках системы MnSe_{1-X}Te_X ($X = 0,1$ и $0,2$). Для образцов с малой концентрацией замещения $X = 0,1$ ВАХ являются линейными и не зависят от величины

приложенного поля во всей области температур. С ростом концентрации выше температуры полиморфного перехода обнаружен гистерезис ВАХ, ширина которого уменьшается в магнитном поле и при напряжении выше 6 В изменение ширины гистерезиса составляет 10–20 %. С ростом магнитного поля плотность доменных стенок и их подвижность уменьшаются.

Заключение. В антиферромагнитных образцах $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$ с кубической структурой обнаружен эффект магнитосопротивления в окрестности температуры Нееля порядка 100 % у состава с концентрацией замещения $X = 0,1$. Уменьшение сопротивления в магнитном поле обусловлено увеличением радиуса локализации электрона в потенциальных ямах в результате конкуренции ферромагнитных, антиферромагнитных взаимодействий и сокращением ширины потенциального барьера. Для состава с $X = 0,2$ обнаружено отрицательное магнитосопротивление в парамагнитном состоянии, причиной которого является туннелирование спин поляризованных электронов при орбитальном упорядочении и изменение с температурой угла между направлениями поляризации электронов в потенциальных ямах в результате конкуренции взаимодействия спина с внешним магнитным полем и полем анизотропии. Обнаружена корреляция спин-стекольного поведения намагниченности образцов, охлажденных в магнитном поле и без поля, с температурной зависимостью магнитосопротивления.

Обнаружены максимумы в спектрах оптического поглощения $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$ для состава с $X = 0,4$. Вблизи дна зоны проводимости наблюдаются дополнительные максимумы поглощения, расположенные по энергии ниже дна зоны проводимости. Возможно, эти линии соответствуют связанным состояниям электрона и дырки, которые образуют водородоподобный спектр экситонов.

В тонких поликристаллических пленках $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$ для $x < 0,2$ магнитосопротивление отсутствует. Найдено существование доменов и доменных границ из гистерезиса ВАХ, который уменьшается в магнитном поле и вызван уменьшением плотности доменных границ в магнитном поле.

Библиографические ссылки

1. Борухович А. С. Физика материалов и структур сверхпроводящей и полупроводниковой спиновой электроники. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 175 с.
2. Аплеснин С. С. Основы спинтроники. СПб. : Лань, 2010. 288 с.
3. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Zhivul'ko A. M. Change in the Magnetocapacity in the Paramagnetic Region in a Cation-Substituted Manganese Selenide // *Physics of the Solid State*. 2018. Vol. 60, No. 4. P. 673–680.
4. Polymorphism in $\text{MnSe}_{1-x}\text{TeX}$ thin-films / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Solid State Communications*. 2019. Vol. 287. P. 72–76.
5. Magnetoimpedance and magnetocapacitance of anion-substituted manganese / S.S. Aplesnin, O. B. Romanova, V. V. Korolev et al. // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 121. P. 075701–7.
6. Гальваномагнитные свойства поликристаллического селенида марганца $\text{Gd}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Se}$ / О. Б. Романова, С. С. Аплеснин, А. М. Харьков и др. // *Физика твердого тела*. 2017. Т. 59, В. 7. С. 1290–1294.
7. Аплеснин С. С. Магнитные и электрические свойства сильнокоррелированных магнитных полупроводников с четырехспиновым взаимодействием и с орбитальным упорядочением. М. : Физматлит, 2013. 176 с.
8. Аплеснин С. С. Аномалии транспортных свойств в магнитоупорядоченной области на кондо-решетке // *Письма в ЖЭТФ*. 2005. Т. 81. С. 74–79.
9. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в $\text{GdXMn}_{1-x}\text{S}$. // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 100, В. 1-2. С. 104–110.

10. 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.
11. Спин-зависимый транспорт в монокристалле α -MNS / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, Г. М. Абрамова и др. // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, В. 11. С. 2000–2005.
12. Магнитные и электрические свойства катионзамещенных сульфидов $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$) / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // ФТТ. 2009. Т. 51, В. 4. С. 661–664.
13. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, В. 8. С. 832–858.
14. Колоссальное магнитосопротивление при комнатных температурах в эпитаксиальных тонких пленках $\text{La}_{1-x}\text{Ag}_x\text{MnO}_3$ / Р. В. Демин, Ю. О. Горбенко, А. Р. Кауль и др. // ФТТ. 2005. Т. 47, В. 12. С. 2195–2199.
15. Каган М. Ю., Кугель К. И. Неоднородные зарядовые состояния и фазовое расслоение в манганитах // УФН. 2001. В. 171. С. 577–596.
16. Характеристики фазово-расслоенного состояния манганитов и их связь с транспортными и магнитными свойствами / К. И. Кугель, А. Л. Рахманов, А. О. Сбойчаков и др. // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. С. 648.
17. Мелкомасштабное фазовое расслоение и электронный транспорт в манганитах / М. Ю. Каган, А. В. Клапцов, И. В. Бродский и др. // УФН. 2003. В. 173. С. 877.
18. Тонкопленочный ферромагнитный композит для спинтроники / А. С. Борухович, Н. И. Игнатьева, А. И. Галяс и др. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84, В. 9. С. 592–595.
19. Нормальная шпинель $\text{CuCr}_{1.6}\text{Sb}_{0.4}\text{S}_4$ -новый материал с гигантским магнитосопротивлением / Л. И. Королева, Р. В. Демин, Д. Варчевский и др. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72, В. 11. С. 813–818.
20. Magnetic polaron conductivity in FeCr_2S_4 with the colossal magnetoresistance effect / Y. Zhaorong, T. Shun, C. Zhiwen et al. // Phys.Rev. B. 2000. Vol. 62, Iss. 21. P. 13872.
21. Metall-semiconductors transition in $\text{SmXMn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions / S. Aplesnin., O. Romanova, A. Har'kov et al. // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2012. Vol. 249, Iss. 4. P. 812–817.
22. 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.
23. Рябинкина Л. И., Романова О. Б., Аплеснин С. С. Сульфидные соединения $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Cr}, \text{Fe}, \text{V}, \text{Co}$): технология, транспортные свойства и магнитное упорядочение // Известия российской академии наук. Серия физическая. 2008. Т. 72, В. 8. С. 1115–1117.
24. Ryabinkina L. I., Petrakovskii G. A., Loseva G. V., Aplesnin S. S. Metal-insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1995. Vol. 140–144, Iss. 1. P. 147–148.
25. Спин-зависимый транспорт в монокристалле α -MnS / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, Г. М. Абрамова и др. // ФТТ. 2000. Т. 46, В. 11. С. 2004.
26. Низкотемпературные электронные и магнитные переходы в антиферромагнитном полупроводнике $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$ / Г. А. Петраковский, Л. И. Рябинкина, Д. А. Великанов и др. // ФТТ. 1999. Т. 41, В. 9. С. 1660–1664.
27. Явление колоссального магнитосопротивления в сульфидах $\text{Me}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Fe}, \text{Cr}$) / Г. А. Петраковский, Л. И. Рябинкина, Г. М. Абрамова и др. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72, В. 2. С. 99–102.
28. Эффект Холла в магнитных полупроводниках $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / Л. И. Рябинкина, Г. М. Абрамова, О. Б. Романова и др. // ФТТ. 2004. Т. 46, В. 6. С. 1038–1042.

29. Low temperature magnetic structure of MnSe / J. B. C. Efreem, D'Sa, P. A. Bhobe et al. // J. Phys. 2004. Vol. 63. P. 227–232.
30. Янушкевич К. И., Вараксин А. Н. Твердые растворы монокалькогенидов 3d-металлов. Минск, 2009. С. 256.
31. Decker D. L., Wild R. L. Optical Properties of a-MnSe // Phys. Rev. 1971. Vol. 4. P. 3425.
32. Neutron scattering study of structural and magnetic properties of hexagonal MnTe / B. Szuszkiewicz, B. Hennion, B. Witkowska et. al. // Physica status solidi. 2005, Vol. 2, Iss 3. P. 1141.
33. Влияние орбитального упорядочения на транспортные и магнитные свойства MnSe и MnTe / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // ФТТ. 2007. Т. 49, В. 11. С. 1984–1989.
34. Su-Huai Wei, Zunger A. Total-energy and band – structure calculations for the semimagnetic $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ semiconductor alloy and its binary constituents // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 35. P. 2340.
35. Пенкаля Т. Очерки кристаллохимии. Химия. Ленинград, 1974. 496 с.
36. Синтез, структурные и магнитные свойства анион-замещенных халькогенидов марганца / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, М. В. Горев и др. // ФТТ. 2012. Т. 54, В. 7. С. 1296–1301.
37. Аплеснин С. С. Неадиабатическое взаимодействие акустических фононов со спинами $S = 1/2$ в двумерной модели гейзенберга // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2003. Т. 124, В. 5. С. 1080–1089.
38. The magnetic and resonance properties of the crystal and amorphous CuGeO_3 / G. A. Petrakovskii, K. A. Sablina, A. M. Vorotynov et al. // Soviet Physics – JETP. 1990. Vol. 71. P. 772–780.
39. Кителъ Ч. Введение в физику твердого тела. М. : Наука, 1978. 791 с.
40. Нгуен В. Л., Спивак Б. З., Шкловский Б. И. Осцилляция Ааронова–Боме с нормальным и сверхпроводящим квантами потока в прыжковой проводимости // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 35–38.
41. Нгуен В. Л., Спивак Б. З., Шкловский Б. И. Туннельные прыжки в неупорядоченных системах // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. С. 1770–1784.
42. Multiple-stable anisotropic magnetoresistance memory in antiferromagnetic MnTe / D. Kriegner, K. Výborný, K. Olejník et al. // Nature Communications. 2016, Vol. 7. P. 11623.
43. Magnetoresistive effect of a topological-insulator waveguide in the presence of a magnetic field / Yuan Li, B. A. Mansoor Jalil, Seng Ghee Tan et al. // Appl. Phys. Lett. 2012, Vol. 101. P. 262403–4.
44. Quantum Oscillations and Hall Anomaly of Surface States in the Topological Insulator Bi_2Te_3 / D. X. Qu, Y. S. Hor, J. Xiong et al. // Science. 2010. Vol. 329. P. 821284.
45. Observation of Time-Reversal-Protected Single-Dirac-Cone Topological-Insulator States in Bi_2Te_2 and Sb_2Te_3 / D. Hsieh, Y. Xia, D. Qian et. al. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103. P. 146401.
46. Molecular-beam epitaxy of topological insulator Bi_2Se_3 (111) and (221) thin films / Z. J. Xu, X. Guo, M. Y. Yao et al. // Adv. Mater. 2013. Vol. 25. P. 1557–1562.
47. Disorder-induced linear magnetoresistance in (221) topological insulator Bi_2Se_3 films / H. T. He, H. C. Liu, B. K. Li et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. P. 031606–4.
48. Peters R., Kawakami N., Pruschke T. Orbital Order, Metal Insulator Transition, and Magnetoresistance-Effect in the two-orbital Hubbard model // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83, No. 12. P. 125110.
49. Giant positive magnetoresistance in half-metallic double-perovskite Sr_2CrWO_6 thin films / Ji Zhang, Wei-Jing Ji, Jie Xu et al. // Sci. Adv. 2017. Vol. 3, No. 11. P. 1–7.
50. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems / Q. John, Jiang Samuel, C. L. Chien, J. Q. Xiao // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68, Iss. 25. P. 3749.

51. Preparation and characterization of MnSe thin films / T. Mahalingam, S. Thanikaikarasan, V. Dhanasekaran et al. // *Mat.Sci. Eng.* 2010. Vol. 174. P. 257–262.
52. A Neutron skattering study of structural and magnetic properties of hexagonal MnTe / W. Szuszkiewicz, B. Hennion, B. Witkowska et al. // *Phys. Stat. Sol. C.* 2005. Vol. 2. P. 1141–1146.
53. Kagan M. Yu., Kugel K. I. Поправки к статье. Неоднородные зарядовые состояния и фазовое расслоение в магнитах // *UFN.* 2001. Vol. 171. P. 577–596.

References

1. Borukhovich A. S. *Fizika materialov i struktur sverkhprovodyashchey i poluprovodnikovoy spinovoy elektroniki* [Physics of materials and structures of superconducting and semiconductor spin electronics]. Yekaterinburg, 2004, 175 p.
2. Aplesnin S. S. *Osnovy spintroniki* [Spintronics]. Sankt-Peterburg, Lan' Publ., 2010, 288 p.
3. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Zhivul'ko A. M. Change in the Magnetocapacity in the Paramagnetic Region in a Cation-Substituted Manganese Selenide. *Physics of the Solid State.* 2018, Vol. 60, No. 4, P. 673–680.
4. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Masyugin A. N., Yanushkevich K. I. Polymorphism in MnSe₁-XTeX thin-films. *Solid State Communications.* 2019, Vol. 287, P. 72–76.
5. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Korolev V. V., Sitnikov M. N., Yanushkevich K. I. Magnetoimpedance and magnetocapacitance of anion-substituted manganese. *J. Appl. Phys.* 2017, Vol. 121, P. 075701–7.
6. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Khar'kov A.M., Masyugin A. N., Yanushkevich K. I. Galvanomagnetic properties of polycrystalline manganese selenide Gd_{0.2}Mn_{0.8}Se. *Physics of the Solid State.* 2017, Vol. 59, Iss. 7, P. 1290–1294.
7. 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 four-spin interaction and orbital ordering]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 176 p.
8. Aplesnin S. S. Anomalies of transport properties in a magnetically ordered region on a condo lattice. *JETP Letters.* 2005, Vol. 81, P. 74–79.
9. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. Magnetotransport effects in the paramagnetic state in GDXMn1–XS. *JETP Letters.* 2014, Vol. 100, Iss. 1–2, P. 104–110.
10. 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 α -MNS single crystal. *Solid State Communications.* 2004, Vol. 129, Iss. 3, P. 195–197.
11. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. Spin-dependent transport in alpha-MNS single crystal. *Physics of the Solid State.* 2004, Vol. 46, Iss. 11, P. 2000–2005.
12. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B. et al. Magnetic and electrical properties of cationically substituted MeXMn1-XS sulfides (Me = Co, Gd). *Physics of the Solid State.* 2009, Vol. 51, Iss. 4, P. 661–664.
13. Nagaev E. L. Lanthanum manganites and other magnetic conductors with giant magnetoresistance. *Phisics Uspekhi.* 1996, Vol. 176, Iss. 8, P. 832–858.
14. Demin R. V., Gorbenko Y. Y., Kaul' A. R. et al. Colossal magnetoresistance at room temperature in La_{1-x}AgyMnO₃ epitaxial thin films. *Physics of the Solid State.* 2005, Vol. 56, Iss. 7, P. 2195–2199.
15. Kagan M. Yu., Kugel' K. I. Inhomogeneous charge states and phase separation in manganites. *Phisics Uspekhi.* 2001, Iss. 171, P. 577–596.

16. Kugel K. I., Rakhmanov A. L., Sboyachkov A. O. et al. Characteristics of the phase-layered state of manganites and their relationship with the transport and magnetic properties. *JETP*. 2004, Vol. 125, P. 648.
17. Kagan M. Yu., Klapcov A. V., Brodskij I. V. et al. Small-scale phase separation and electron transport in manganites. *Physics Uspekhi*, 2003, Iss. 173, P. 877.
18. Boruhovich A. S., Ignat'eva N. I., Galyas A. I. et al. Thin-film ferromagnetic composite for spintronics. *JETP Letters*. 2006, Vol. 84, Iss. 9, P. 592–595.
19. Koroleva L. I., Demin R. V., Varchevskij D. et al. Normal spinel $\text{CuCr}_{1.6}\text{Sb}_{0.4}\text{S}_4$ is a new material with giant magnetoresistance. *JETP Letters*. 2000, Vol. 72, Iss. 11, P. 813–818.
20. Zhaorong Y., Shun T., Zhiwen C. et al. Magnetic polaron conductivity in FeCr_2S_4 with the colossal magnetoresistance effect. *Phys. Rev. B*, 2000. Vol. 62, Iss. 21, P. 13872.
21. Aplesnin S., Romanova O., Har'kov A., Balaev D., Gorev M., Vorotinov A., Sokolov V., Pichugin A. Metal-semiconductors transition in $\text{SmXMn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 2012, Vol. 249, Iss. 4, P. 812–817.
22. 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.
23. Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Aplesnin S. S. Sulfide compounds $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ (Me = Cr, Fe, V, Co): technology, transport properties and magnetic ordering. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2008, Vol. 72, Iss. 8, P. 1115–1117.
24. Ryabinkina L. I., Petrakovskii G. A., Loseva G. V., Aplesnin S. S. Metal-insulator transition and magnetic properties in disordered systems of solid solutions $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1995, Vol. 140–144, Iss. 1, P. 147–148.
25. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. Spin-dependent transport in an $\alpha\text{-MnS}$ single crystal. *Physics of the Solid State*. 2000, Vol. 46, Iss. 11, P. 2004.
26. Petrakovskij G. A., Ryabinkina L. I., Velikanov D. A. et al. Low-temperature electronic and magnetic transitions in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{S}$. *Physics of the Solid State*. 1999, Vol. 41, Iss. 9, P. 1660–1664.
27. Petrakovskij G. A., Ryabinkina L. I., Abramova G. M. et al. The phenomenon of colossal magnetoresistance in $\text{MeXMn}_{1-x}\text{S}$ sulfides (Me = Fe, Cr). *JETP Letters*. 2000, Vol. 72, Iss. 2, P. 99–102.
28. Ryabinkina L. I., Abramova G. M., Romanova O. B. et al. Hall effect in magnetic semiconductors $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. *Physics of the Solid State*. 2004, Vol. 46, Iss. 6, P. 1038–1042.
29. Efrem J. B. C., D'Sa, Bhobe P. A. et al. Low temperature magnetic structure of MnSe . *J. Phys.* 2004, Vol. 63, P. 227–232.
30. Yanushkevich K. I. Solid solutions of 3d metal monochalcogenides, *Varaksin AN*. 2009, P. 256.
31. Decker D. L., Wild R. L. Optical Properties of $\alpha\text{-MnSe}$. *Physical Review*. 1971, Vol. 4, P. 3425.
32. Szuszkiewicz B., Hennion B., Witkowska B. et al. Neutron scattering study of structural and magnetic properties of hexagonal MnTe . *Physica status solidi*. 2005, Vol. 2, Iss. 3, P. 1141.
33. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B. et al. The effect of orbital ordering on the transport and magnetic properties of MnSe and MnTe . *Physics of the solid state*. 2007, Vol. 49, Iss. 11, P. 1984–1989.
34. Su-Huai Wei, Zunger A. Total-energy and band –structure calculations for the semimagnetic $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ semiconductor alloy and its binary constituents. *Physical Review B*. 1987, Vol. 35, P. 2340.
35. Penkalya T. *Ocherki kristalloghimii. Khimiya* [Essays on Crystal Chemistry. Chemistry]. Leningrad, 1974, 496 p.
36. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Gorev M. V. et al. Synthesis, structural and magnetic properties of anion-substituted manganese chalcogenides. *Physics of the solid state*. 2012, Vol. 54, Iss. 7, P. 1296–1301.

37. Aplesnin S. S. Nonadiabatic interaction of acoustic phonons with spins $S = 1/2$ in the two-dimensional Heisenberg model. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003, Vol. 124, B. 5, P. 1080–1089.
38. Petrakovskii G. A., Sablina K. A., Vorotynov A. M., Kruglik A. I., Klimenko A. G., Balaev A. D., Aplesnin S. S. The magnetic and resonance properties of the crystal and amorphous CuGeO_3 . *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1990, Vol. 71, P. 772–780.
39. Kitel' Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to Solid State Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 791 p.
40. Nguen V. L., Spivak B. Z., Shklovskiy B. I. [Aharonov-Bohm Oscillation with normal and superconducting flux quanta in jump conductivity]. *JETP Letters*. 1985, Vol. 41, P. 35–38.
41. Nguen V. L., Spivak B. Z., Shklovskiy B. I. [Tunnel jumps in disordered systems]. *JETP Letters*. 1985, Vol. 89, P. 1770–1784.
42. Kriegner D., Výborný K., Olejník K., Reichlová H., Novák V., Marti X., Gazquez J., Saidl V., Nêmec P., Volobuev V. V., Springholz G., Holý V., Jungwirth T. Multiple-stable anisotropic magneto resistance memory in antiferromagnetic MnTe. *Nature Communications*. 2016, Vol. 7, P. 11623.
43. Yuan Li, Mansoor B. A. Jalil, Seng Ghee Tan, Zhou G., Qian Z. Magnetoresistive effect of a topological-insulator waveguide in the presence of a magnetic field. *Applied Physics Letters*. 2012, Vol. 101, P. 262403–4.
44. Qu D. X., Hor Y. S., Xiong J., Cava R. J., Ong N. P. Quantum Oscillations and Hall Anomaly of Surface States in the Topological Insulator Bi_2Te_3 . *Science*. 2010, Vol. 329, P. 821284.
45. Hsieh D., Xia Y., Qian D., Wray L., Meier F., Dil J.H., [et. al.] Observation of Time-Reversal-Protected Single-Dirac-Cone Topological-Insulator States in Bi_2Te_2 and Sb_2Te_3 . *Physical Review Letters*. 2009, Vol. 103, P. 146401.
46. Xu Z. J., Guo X., Yao M. Y., He H. T., Miao L., Jiao L., Liu H. C., Wang J. N., Qian D., Jia J. F., Ho W. K., Xie M. H. Molecular-beam epitaxy of topological insulator Bi_2Se_3 (111) and (221) thin films. *Adv. Mater.* 2013, Vol. 25, P. 1557–1562.
47. He H. T., Liu H. C., Li B. K., Guo X., Xu Z. J., Xie M. H. Disorder-induced liner magnetoresistance in (221) topological insulator Bi_2Se_3 films. *Applied Physics Letters*. 2013, Vol. 103, P. 031606–4.
48. Peters R., Kawakami N., Pruschke T. Orbital Order, Metal Insulator Transition, and Magnetoresistance-Effect in the two-orbital Hubbard model. *Physical Review B*. 2011, Vol. 83, No. 12, P. 125110.
49. Ji Zhang, Wei-Jing Ji, Jie Xu, Xiao-Yu Geng, Jian Zhou, Zheng-Bin Gu, Shu-Hua Yao, Shan-Tao Zhang Giant positive magnetoresistance in half-metallic double-perovskite Sr_2CrWO_6 thin films. *Science Advances*. 2017, Vol. 3, No 11, P. 1–7.
50. John Q., Samuel Jiang, Chien C. L., Xiao J. Q. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems. *Physical Review Letters*. 1992, Vol. 68, Iss. 25, P. 3749.
51. Mahalingam T., Thanikaikarasan S., Dhanasekaran V., Kathalingam A., Velumani S., Rhee Jin-Koo Preparation and characterization of MnSe thin films. *Materials Science and Engineering*. 2010, Vol. 174, P. 257–262.
52. Szuszkiewicz W., Hennion B., Witkowska B., Łusakowska E., Mycielski A. A Neutron scattering study of structural and magnetic properties of hexagonal MnTe. *Physica Status Solidi C*. 2005, No. 2, P. 1141–1146.
53. Kagan M. Yu., Kugel K. I. *Popravki k stat'e. Neodnorodnye zaryadovye sostoyaniya i fazovoe rassloenie v magnitakh* [Amendment to article. Inhomogeneous charge States and phase stratification in magnets]. *Physics-Uspekhi*. 2001, Vol. 171, P. 577–596.

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.

Янушкевич Казимир Иосифович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией магнитных материалов; ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». E-mail: kazimir@mail.ru.

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

Yanushkevich Kazimir Iosifovich – D. Sc., Head of the Lab Magnetic Materials, GO “SPC NAS of Belarus on Material Science”. E-mail: kazimir@mail.ru.