

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-11-52-59>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДИРАКОВСКОГО 3D ПОЛУМЕТАЛЛА Cd_3As_2 С НАНОГРАНУЛАМИ MnAs

© Луиза Абдурахмановна Сайпулаева^{1*}, Нина Владимировна Мельникова², Магомед Магомедович Гаджиалиев¹, Александр Владимирович Тебенков², Алексей Николаевич Бабушкин², Василий Сергеевич Захвалинский³, Мохаммад Хассан Али Аль-Онаизан⁴, Алексей Игоревич Риль⁵

¹ Институт физики ДФИЦ РАН, Россия, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94; *e-mail: l.sayplaeva@gmail.com

² Уральский федеральный университет, Институт естественных наук и математики, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 48.

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

⁴ НИТУ «МИСИС», Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 4.

⁵ Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 31.

*Статья поступила 13 апреля 2013 г. Поступила после доработки 3 мая 2023 г.
Принята к публикации 27 июля 2023 г.*

В работе представлены результаты исследования электро- и магнетосопротивления композитного материала, состоящего из 70 % мол. дираковского полуметалла Cd_3As_2 и 30 % мол. ферромагнетика MnAs , при давлениях до 50 ГПа, а также намагниченности при гидростатических давлениях до 6 ГПа в режиме комнатных температур и в интервале 180 – 350 К при атмосферном давлении. В качестве среды, передающей давление, использовали смесь метанола с этанолом в соотношении 4:1. Элементный анализ композитов Cd_3As_2 + 30 % мол. MnAs показал, что большая часть объема составляет фаза Cd_3As_2 , доля включений фазы MnAs — менее 5 %. Присутствует также значительная область несмешивания расплавов фаз Cd_3As_2 и MnAs . Установлено, что при увеличении давления во всей исследованной барической области наблюдается отрицательное магнетосопротивление материала (максимум — при 22 – 26 ГПа). При дальнейшем росте давления до максимального уровня на кривой появляются несколько экстремумов, при этом отрицательное магнетосопротивление не превышает 4 %. В режиме сброса давления от 50 ГПа отрицательное магнетосопротивление сменяется положительным (при 40 ГПа), и в районе 20 ГПа наблюдается максимальное значение положительного магнетосопротивления (~5,3 %). Выявлены признаки неустойчивости моноклинной структуры Cd_3As_2 в результате ее частичного разложения при декомпрессии. Полученные результаты могут быть использованы в спинтронике при применении соответствующих композитных материалов.

Ключевые слова: дираковский полуметалл Cd_3As_2 ; наногранулы; магнетосопротивление; ферромагнетик MnAs .

STUDY OF THE ELECTROPHYSICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF A DIRAC 3D SEMIMETAL Cd_3As_2 WITH NANOGRANULES OF MnAs

© Luiza A. Saypulaeva^{1*}, Nina V. Melnikova², Magomed M. Gadzhialiev¹, Alexander V. Tebenkov², Aleksey N. Babushkin², Vasiliy S. Zakhvalinskii³, Mohammad H. Al-Onaizan⁴, Aleksey I. Ril⁵

¹ Institute of Physics, DFRC RAS, 94, ul. M. Yaragского, Makhachkala, 367015, Russia; *e-mail: l.sayplaeva@gmail.com

² Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, 48, ul. Kuibysheva, Yekaterinburg, 620002, Russia.

³ Belgorod State National Research University, 85, ul. Pobedu, Belgorod, 308015, Russia.

⁴ National University of Science and Technology “MISIS”, 4, Leninsky prosp., Moscow, 119991, Russia.

⁵ Institute of General and Inorganic Chemistry, RAS, 31, Leninsky prosp., Moscow, 119991, Russia.

Received April 13, 2013. Revised May 3, 2023. Accepted July 27, 2023.

We report on the main results of studying the electrical and magnetoresistance (MR) of a composite material consisting of 70 % mol. Dirac semi-metal Cd_3As_2 and 30 % mol. ferromagnet MnAs at pressures up to 50 GPa in a diamond anvil cell with a “rounded cone-flat” type anvils, as well as magnetization at hydro-

static pressures up to 6 GPa in a toroid-shaped high-pressure cell, both at room temperature and in the temperature range of 180 – 350 K at atmospheric pressure. A mixture of methanol and ethanol in a ratio of 4:1 was used as a pressure transmitting medium. Elemental analysis of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ mol MnAs composites showed that much of the volume is occupied by the Cd_3As_2 phase. The proportion of MnAs phase inclusions is less than 5 %. The feature of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ is the presence of a significant region of non-mixing of the Cd_3As_2 and MnAs phase melts. A negative MR was revealed with increasing pressure in the entire studied baric zone. The maximum negative MR is observed in the baric zone of 22 – 26 GPa. Further increase in the pressure up to the maximum level result in the appearance of several extrema on the $\Delta R/R_0(P)$ curve, with negative MR not exceeding 4 %. Upon pressure release from 50 GPa, the baric dependence of $\Delta R/R_0(P)$ is characterized by an inversion of the MR sign: at pressures around 40 GPa, a negative MR is replaced by a positive MR, and at around 20 GPa, the maximum value of positive MR of $\sim 5.3\%$ is observed. Signs of the instability of the monoclinic structure of Cd_3As_2 resulted from its partial decomposition upon decompression were revealed. The results obtained can be used in spintronics when using appropriate composite materials.

Keywords: Dirac semimetal Cd_3As_2 ; nanogranules; magnetoresistance; MnAs ferromagnet.

Введение

Материал Cd_3As_2 — дираковский полуметалл, обладающий чрезвычайно высокой подвижностью носителей заряда и линейным положительным магнетосопротивлением (МС) без насыщения [1 – 3], что широко используется в ряде практических применений. Отметим, что нарушение симметрии в 3D дираковском полуметалле может превратить его в топологический изолятор или вейлевский полуметалл, а с приложением всестороннего давления реализуется состояние, связанное с топологической сверхпроводимостью [4].

С помощью рентгеновской дифракции при высоком давлении выявлено наличие в Cd_3As_2 моноклинной пространственной группы $P2_1/c$ [5]. Для облегчения управления спиновым ансамблем высокоподвижных носителей заряда в веществах с электронными состояниями, защищенными топологией k -пространства, необходимы топологические изоляторы и родственные им материалы с внедренными катионами переходных элементов (Mn, Fe, Cr, Co, V). Актуально создание на их основе ферромагнитных полупроводников [6 – 8].

Наличие в кристаллах Cd_3As_2 одновременно полуметаллических свойств и магнитных включений, например, наногранул MnAs, представляет потенциальный интерес для спинтроники. Такие нанокомпозиты известны как магнито-гранулированные структуры, в которых, как и в сверхрешетках, характерно преобладание эффекта МС [9].

Исследования композитов $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ показали, что марганец растворяется в Cd_3As_2 , образуя в некотором интервале концентраций широкий ряд тройных твердых растворов $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ [10]. Превышение предельной концентрации приводит к образованию эвтектического сплава, содержащего наряду с твердым раствором $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ наноразмерные ферромагнитные включения MnAs с элементарной

ячейкой симметрии $P63/mmc$ и параметрами: $a = 3,72 \text{ \AA}$, $c = 5,71 \text{ \AA}$. При комнатной температуре MnAs при достижении давления 0,45 ГПа претерпевает переход из гексагональной структуры типа NiAs с симметрией $P63/mmc$ в орторомбическую типа MnP с симметрией $Pnma$ [11]. Высокое значение точки Кюри в MnAs (318 K) делает его перспективным материалом для использования в различных элементах спиновой электроники, функционирующих в терагерцовом диапазоне [12 – 14].

В структуре $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ с содержанием 20, 30 и 44,7 % мол. MnAs установлено наличие индуцированного давлением отрицательного МС [15 – 18]. Исследования МС $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ в области давлений до 9 ГПа позволили обнаружить интервалы давлений, в которых проявляется отрицательное МС. Так, в образце $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 44,7\%$ мол. MnAs в области 7,8 ГПа максимальное значение отрицательного МС составило $\Delta\rho/\rho_0 \sim 0,36\%$. Кроме отрицательного МС, выявлено преобладание положительного МС в области давлений, соответствующих обнаруженным ранее фазовым переходам в полупроводниковой матрице композита Cd_3As_2 и ферромагнитных гранулах MnAs.

Заметим, что на барических зависимостях удельного электросопротивления, коэффициента Холла и МС в области 3 – 4 ГПа обнаружены особенности поведения, связанные с фазовым переходом [15 – 18]. В композитах с другим содержанием MnAs в окрестности 4 ГПа также наблюдались особенности поведения этих характеристик. Так, в $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 44,7\%$ мол. MnAs при исследованиях термоЭДС — одного из чувствительных параметров — была установлена особенность в районе $P \sim 33$ ГПа, которая интерпретировалась как второй фазовый переход [19]. Можно предположить, что в композитах $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ под воздействием высокого давления наблюдается результат совмещенных фазовых переходов (структурного фазового перехода в матрице

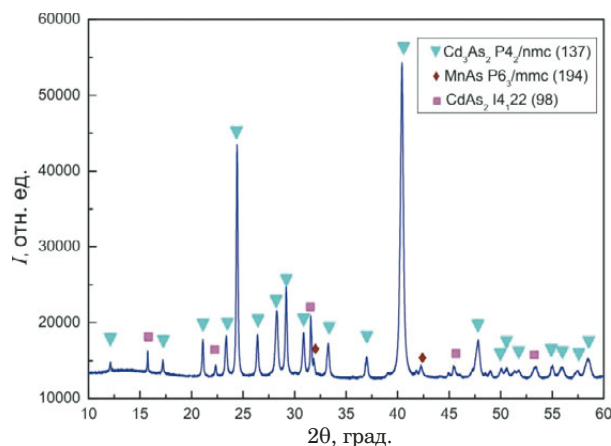


Рис. 1. Рентгенограмма образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of a sample $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ mol. MnAs

Cd_3As_2 и спин-переориентационного магнитного фазового перехода в наноклстерах MnAs), оказывающих влияние на транспорт носителей и МС композита. По этой причине интерес представляет исследование МС в области давлений, близких ко второму фазовому превращению [19]. Вместе с тем магнитные превращения в MnAs -кластерах, которые, скорее всего, прогнозируются при относительно небольших давлениях, близких к первому фазовому переходу (до 5 ГПа), могут быть изучены путем измерения намагниченности под давлением.

Цель работы — исследование влияния давления на электрические и магнетотранспортные свойства композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs .

Материалы, методика, оборудование

Синтез кристаллов $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs проводили вакуумно-ампульным методом из соединений Cd_3As_2 и MnAs при температуре плавления арсенида марганца [20]. Образцы композита включали наноразмерные ферромагнитные гранулы MnAs , хаотически расположенные в объеме полупроводниковой матрицы Cd_3As_2 . При исследовании образцов использовали методы рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии.

Элементный анализ композитов $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs показал, что большая часть объема составляет фаза Cd_3As_2 , доля включений фазы MnAs — менее 5 %. Анализ рентгенограммы выявил содержание двух основных фаз: $\alpha\text{-CdAs}$ — тетрагональной и MnAs — гексагональной (рис. 1). Кроме того, присутствует незначительное количество фазы CdAs_2 . На микроструктурах наблюдали фазу Cd_3As_2 и эвтектику $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$. Особенность $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ — наличие значительной области несмешивания

расплавов фаз Cd_3As_2 и MnAs . При значениях MnAs 30 % мол. гранулы при электронно-микроскопических исследованиях не удается визуализировать, возможно, из-за характерных малых размеров.

Влияние высокого давления (до 50 ГПа) на электрофизические свойства композитов исследовали в камере высокого давления (КВД) с алмазными наковальнями типа «закругленный конус – плоскость» [21 – 23]. Электрические характеристики материала определяли непосредственно в процессе деформаций при приложении давления. В связи с особенностями КВД минимальное давление, при котором возможно измерение электрофизических характеристик сжимаемых образцов, не может быть меньше 15 ГПа. Кроме того, известно, что при смене (возрастании или снижении) давления требуется некоторое время для установления не меняющегося во времени значения электросопротивления. Толщина образцов при сжатии составляла ~15 мкм, диаметр образца в КВД — ~200 мкм.

При измерении МС КВД помещали в панцирный магнит для создания поперечного магнитного поля ($0 \leq B \leq 1$ Тл), при этом изменение и контроль давления и магнитного поля осуществляли непосредственно в ходе эксперимента. При каждом фиксированном значении давления относительное МС в процентах оценивали по формуле:

$$MR = 100 \frac{R(B) - R(0)}{R(0)},$$

где $R(B)$, $R(0)$ — электросопротивления в поперечном магнитном поле с индукцией B и в отсутствие магнитного поля.

В области 16 – 50 ГПа погрешность определения давления не превышала 10 % [22, 23].

Магнитные измерения при давлении до 6 ГПа выполняли на установке Торойд [24], как в режиме комнатных температур, так и в интервале 180 – 350 К при атмосферном давлении. Изотермическую намагниченность под давлением измеряли индукционным методом. При испытаниях образец цилиндрической формы (длина ~3,5, диаметр ~1,2 мм) помещали в две индуктивно-связанные катушки (максимальное число витков $n = 10$). Абсолютная погрешность измерений не превышала 5 %. Внешнее магнитное поле создавалось с помощью многovitкового соленоида с напряженностью $H \leq 5$ кЭ. В качестве рабочей ячейки использовали тефлоновую капсулу (рабочий объем ~80 мм³). Непроводящую смесь этанола и метанола (4:1) использовали в качестве передающей давление среды. Давление внутри капсулы контролировали манганиновым датчиком, откалиброванным по фазовым переходам в висмуте.

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлена зависимость сопротивления R композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs от давления P при двух последовательных циклах измерений (подъем и сброс давления) в области комнатных температур.

В барическом интервале 15 – 25 ГПа первого цикла преобладает значительное снижение R с повышением P , что в целом согласуется с результатами исследований для Cd_3As_2 [4]. Сопротивление в этой области давлений меняется почти линейно со средним темпом $dR/dP = -24,9$ Ом/ГПа. При $P > 34$ ГПа величина барического коэффициента составляет $-1,1$ Ом/ГПа, что указывает на слабую зависимость R от P . При сбросе P с 50 ГПа зависимость $R(P)$ в обоих циклах демонстрирует гистерезисное поведение. Преобладание гистерезиса R в диапазоне 15 – 50 ГПа может свидетельствовать о структурном переходе в Cd_3As_2 (выше 4,67 ГПа структура материала уже моноклинная ($P2_1/c$)) [4].

Заметим, что моноклинную фазу регистрировали до 17,8 ГПа [4]. Вместе с тем ее преобладание до давлений 50 ГПа носит гипотетический характер. Поскольку в данном случае *in situ* рентгеновские исследования при высоком давлении для $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs не проводили, можно предположить, что наличие в композите незначительной фазы CdAs_2 также может оказывать определенное влияние на появление гистерезиса зависимости $R(P)$.

По данным определений удельного сопротивления и коэффициента Холла для CdAs_2 в области 5,5 ГПа фиксировали обратимое структурное превращение [25]. Возникновение гистерезисного поведения электротранспорта может быть ассоциировано с частичным разложением композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (барическим разложением), а не с возникновением структурного перехода в области давлений выше 17,8 ГПа. На это также указывает то, что значение R после первого цикла не восстанавливается до исходного, а ширина гистерезиса увеличивается на втором цикле (см. рис. 2). Отметим, что в качестве одного из структурно чувствительных параметров к структурным превращениям или барическому разложению в композитах может выступать магниторезистивный эффект [26 – 28].

На рис. 3 для $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs приведены зависимости МС от индукции магнитного поля, полученные при различных давлениях (комнатная температура). Измерения проводили в режимах подъема и сброса давления, что позволило качественно установить связь между наблюдаемым гистерезисом на зависимости $R(P)$ и поведением МС. Величину поперечного МС рассчитывали по формуле (1).

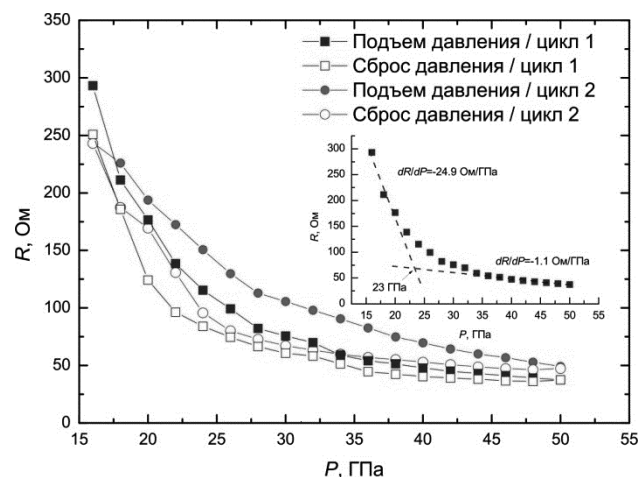


Рис. 2. Зависимости электрического сопротивления R $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs от давления P при двух последовательных циклах измерений (на вставке — зависимость $R(P)$ первого цикла при подъеме давления, штрихованные линии соответствуют определению наклонов dR/dP)

Fig. 2. Dependences of the electrical resistance R of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ mol. MnAs on the pressure P for two successive measurement cycles (in the inset — the dependence of $R(P)$ of the first cycle when the pressure rises, the dashed lines correspond to the determination of slopes dR/dP)

Видно, что при $P = 16$ ГПа в композите наблюдается положительное МС. Похожее положительное МС, ранее отмечавшееся при сравнительно небольшом давлении (7,7 ГПа), объяснялось конкуренцией между влиянием силы Лоренца и спин-зависимого рассеяния носителей заряда на MnAs -кластерах [16]. По-видимому, положительное МС распространяется до 16 ГПа, однако его величина постепенно уменьшается. Дальнейший рост P приводит к смене знака МС. Максимальную величину отрицательного МС ($\sim 20\%$) регистрировали при 22 ГПа в поле 1 Т. Заметим, что в данной области давления резко меняется темп dR/dP на зависимости $R(P)$.

При увеличении давления во всей исследованной барической области наблюдали отрицательное МС. Максимум отрицательного МС фиксировали в области 22 – 26 ГПа (рис. 4).

В режиме сброса давления барическая зависимость $\Delta R/R_0(P)$ характеризуется инверсией знака МС: при давлении около 40 ГПа отрицательное МС сменяется положительным, и при 20 ГПа наблюдается максимальное положительное МС $\sim 5,3\%$. Смена знака МС может указывать на то, что в $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs имеет место необратимость структурных свойств, обусловленная частичным разложением материала после декомпрессии. В то же время наличие максимумов отрицательного и положительного МС, предположительно, связано с природой фазовых превращений в электронной подсистеме матрицы Cd_3As_2 исследуемого композита [19].

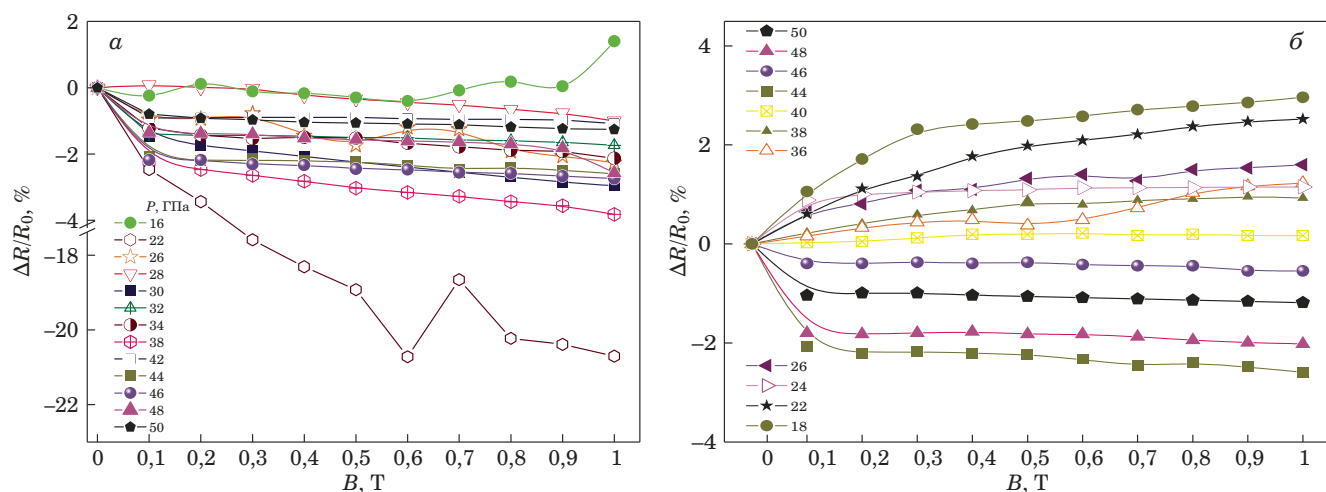


Рис. 3. Зависимости $\Delta R/R_0$ от индукции магнитного поля B , измеренные в режиме увеличения (а) и последующего уменьшения (б) давления

Fig. 3. Dependences of $\Delta R/R_0$ on the induction of magnetic field B measured in the mode of increasing (a) and subsequent decreasing (b) pressure

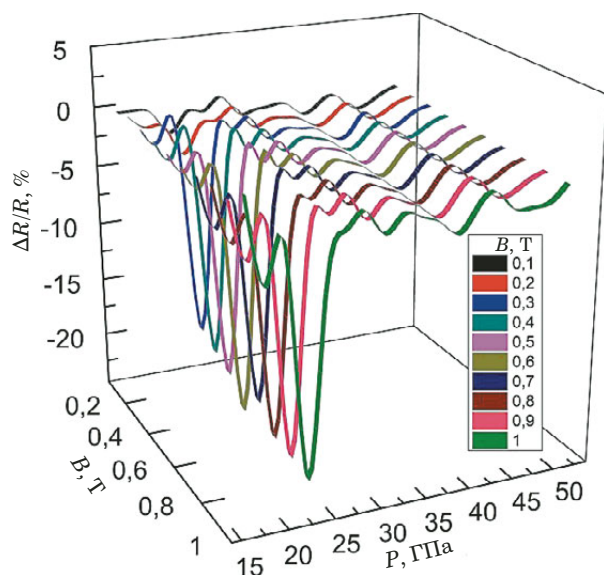


Рис. 4. Зависимости $\Delta R/R_0$ композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs от давления P при различных значениях индукции поперечного магнитного поля B

Fig. 4. Dependences of $\Delta R/R_0$ of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ mol. MnAs composite on the pressure P at different values of transverse magnetic field induction B

Отметим, что наличие MnAs -кластеров в композитной структуре может иметь отношение к природе наблюдаемого МС. Однако магнитная фазовая диаграмма для объемного соединения MnAs хорошо изучена лишь до давлений 1,1 ГПа [29]. Нейтронные исследования показали, что орторомбическая фаза типа MnP остается устойчивой до 1,26 ГПа, далее формируется спиральная структура [30]. Поскольку исследование магнитных свойств MnAs -кластеров при давлениях, сопоставимых с определениями МС, представляет

ся крайне затруднительным, измерения изотермической намагниченности ограничились областью до 5 ГПа.

На рис. 5 приведены температурные зависимости намагниченности $M(T)$ $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs , полученные в магнитных полях ($H = 0, 2,5, 3,6$ кЭ) при атмосферном давлении. Видно, что качественный ход кривых идентичен: с охлаждением наблюдается резкий рост M вблизи $T_C \approx 318$ К. Это связано с магнитным превращением из немагнитного состояния в ферромагнитное [29].

С повышением H до 3,6 кЭ температура Кюри (определяли как dM/dT для кривых M в режиме нагрева) незначительно смещается в сторону высоких температур (до $T_C = 321$ К). Это подтверждает, что нановключения MnAs в матрице Cd_3As_2 демонстрируют схожие с их объемным аналогом магнитные свойства.

Особенность ферромагнитного перехода — отсутствие характерного гистерезиса M , являющегося признаком фазового перехода первого рода в объемном MnAs . Магнитный переход первого рода происходит с изменением немагнитной β -фазы (орторомбической) в ферромагнитную α -фазу (гексагональную) (ширина гистерезиса около 8 – 12 К). Отсутствие гистерезиса M может быть равносильно ситуации, наблюдающейся в эпитаксиальных слоях $\text{MnAs}(001)/\text{GaAs}(111)$, в которых преобладает область сосуществования фаз $\alpha + \beta$ [31].

На рис. 6 представлены зависимости изотермической M от давления P ($T = 293$ К).

При атмосферном давлении ($P = 0$ ГПа) $M = 0,05$ и $7,69$ Ам²/кг в магнитных полях 500 и 5000 Э соответственно [32]. Максимумы на зависимости $M(P)$ свидетельствуют о магнитном пре-

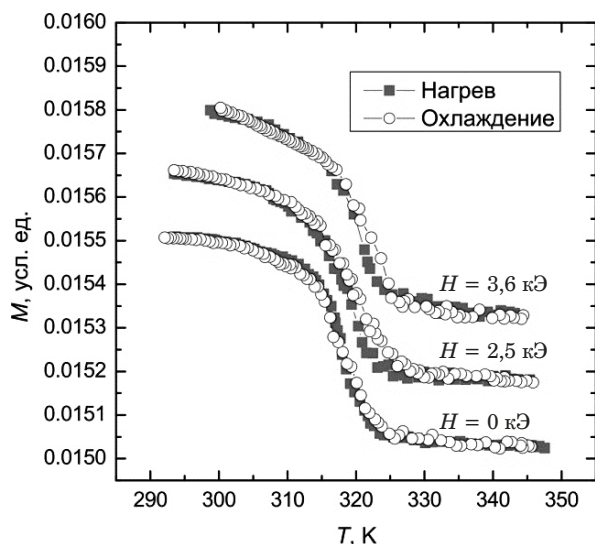


Рис. 5. Температурные зависимости намагниченности $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs в области магнитного перехода парамагнетик — ферромагнетик

Fig. 5. Temperature dependences of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ mol. MnAs magnetization in the region of the paramagnet — ferromagnet transition

вращении, происходящем в MnAs -кластерах. При этом возрастание M в области максимумов достигает 80 (500 Э) и 23 % (5000 Э) от начальных значений. Кроме того, с ростом напряженности магнитного поля область фазового превращения смещается в сторону высокого давления (от 0,77 до 0,9 ГПа). Это указывает на изменение ферромагнитного состояния MnAs -кластеров в антиферромагнитное упорядочение. Антиферромагнитная фаза — следствие метамгнитного перехода, который может быть вызван одновременным действием H и P ниже T_C в объемном соединении MnAs .

Поскольку с дальнейшим ростом P (до 5 ГПа) M монотонно убывает (см. рис. 6), можно предположить, что MnAs -кластеры в условиях более высоких давлений будут, скорее всего, находиться в немагнитном состоянии. Поэтому появление отрицательного МС в диапазоне 16 – 50 ГПа (см. рис. 3) не следует ассоциировать с их влиянием. Так как примесь Mn растворяется в матрице Cd_3As_2 в предельно минимальном количестве, отрицательное МС может возникать вследствие индуцированного магнитной примесью топологического фазового перехода и формирования магнитных поляронов, за счет которых поддерживается спин-зависимое рассеяние в легированном Cd_3As_2 [33].

Заключение

Таким образом, проведены исследования электросопротивления R и МС композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 30\%$ мол. MnAs при давлении P до

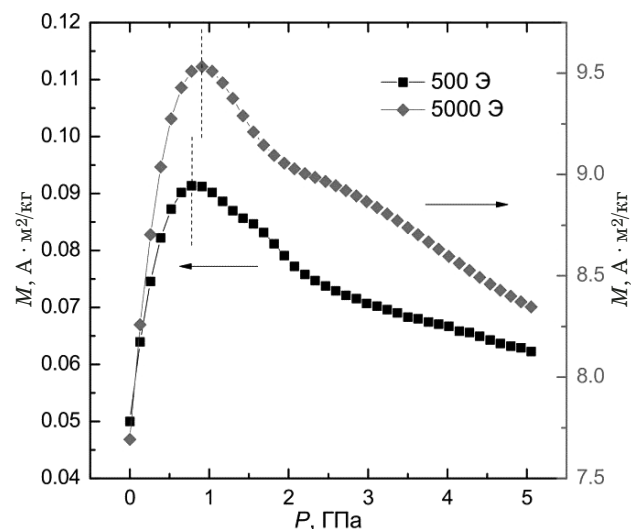


Рис. 6. Барические зависимости изотермической намагниченности, измеренные в магнитных полях 500 и 5000 Э

Fig. 6. Baric dependences of the isothermal magnetization measured in magnetic fields 500 and 5000 Oe

50 ГПа, а также магнитных свойств MnAs -кластеров до 5 ГПа. Определение R при циклировании P выявило гистерезисную характеристику в широком диапазоне давлений, связанную с нестабильностью моноклинной структуры Cd_3As_2 при $P > 16$ ГПа, с ее частичным разложением после сброса давления. Это подтверждается результатами измерений МС при подъеме и сбросе давления, фиксирующими смену знака МС с отрицательного на положительный. На зависимости $\Delta R/R_0(P)$ отмечены выраженные максимумы МС: при повышении давления максимум отрицательного МС составил ~ 20 , в режиме сброса давления максимум положительного МС — $\sim 5,3\%$. Максимумы, вероятно, связаны с влиянием магнитной примеси Mn в результате топологического фазового превращения. Влияние на МС магнитных MnAs -кластеров в диапазоне 16 – 50 ГПа исключается, поскольку, по данным барической зависимости намагниченности, в кластерах происходит магнитное превращение в антиферромагнитное состояние (до 1 ГПа), и до 5 ГПа намагниченность монотонно понижается.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 0203-2019-0008, тема № 46.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Z., Weng H., Wu Q., et al. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 / Phys. Rev. 2013. Vol. 88. N 12. P. 125427. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.125427

2. **Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., et al.** Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal / *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113. N 2. P. 027603. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.027603
3. **Feng J., Pang Y., Wu D., et al.** Large linear magnetoresistance in Dirac semimetal Cd_3As_2 with Fermi surfaces close to the Dirac points / *Phys. Rev.* 2015. Vol. 92. N 8. P. 081306. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.081306
4. **He L., Jia Y., Zhang S., et al.** Pressure-induced superconductivity in the three-dimensional topological Dirac semimetal Cd_3As_2 / *Quantum Mater.* 2016. Vol. 1. N 1. P. 1 – 5. DOI: 10.1038/npjquantmats.2016.14
5. **Zhang S., Wu Q., Schoop L., et al.** Breakdown of three-dimensional Dirac semimetal state in pressurized Cd_3As_2 / *Phys. Rev.* 2015. Vol. 91. N 16. P. 165133. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.165133
6. **Arushanov E. K.** PbV_2 compounds and alloys / *Crystal Growth and Character.* 1992. Vol. 25. N 3. P. 131 – 201. DOI: 10.1016/0960-8974(92)90030-T
7. **Lu H., Zhang X., Bian Y., Jia S.** Topological phase transition in single crystals of $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ / *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. N 1. P. 3148. DOI: 10.1038/s41598-017-03559-2
8. **Cisowski J.** Semimagnetic semiconductors based on $\text{II} - \text{V}$ compounds / *Phys. Stat. Sol.* 1997. Vol. 200. N 2. P. 311 – 350.
9. **Baibich M., Broto J., Fert A., et al.** Giant magnetoresistance of (001) $\text{Fe}/(001)$ Cr magnetic superlattices / *Phys. Rev. Lett.* 1988. Vol. 61. N 21. P. 2472. DOI: 10.1103/PhysRevLett.61.2472
10. **Ril A. I., Marenkin S. F.** Cadmium Arsenides: Structure, Synthesis of Bulk and Film Crystals, Magnetic and Electrical Properties (Review) / *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. Vol. 66. N 14. P. 2005. DOI: 10.1134/S0036023621140059
11. **Грибанов И., Завадский А., Сиваченко А.** Низкотемпературные магнитные превращения в орторомбическом арсениде марганца / *ФТН.* 1979. Т. 5. № 10. С. 1219.
12. **Spezzani C., Ferrari E., Allaria E., et al.** Magnetization and microstructure dynamics in $\text{Fe}/\text{MnAs}/\text{GaAs}$ (001): Fe magnetization reversal by a femtosecond laser pulse / *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113. N 24. P. 247202. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.247202
13. **Hubmann J., Bauer B., Körner H., et al.** Epitaxial growth of room-temperature ferromagnetic MnAs segments on GaAs nanowires via sequential crystallization / *Nano Lett.* 2016. Vol. 16. N 2. P. 900. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b03658
14. **Новоторцев В. М., Маренкин С. Ф., Федорченко И. В., Кочура А. В.** Физико-химические основы синтеза новых ферромагнетиков из халькопиритов $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{CV}_2$ / *Журнал неорганической химии.* 2010. Т. 55. № 11. С. 1868 – 1880. DOI: 10.1134/S0036023610110136
15. **Сайпулаева Л. А., Гаджиалиев М. М., Алибеков А. Г. и др.** Влияние гидростатического давления до 9 ГПа на гальваномагнитные свойства сплава системы $\text{Cd}_3\text{As}_2\text{-MnAs}$ (20 % мол.) в поперечном магнитном поле / *Неорганические материалы.* 2019. Т. 55. № 9. С. 927 – 932. DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-3-30-36
16. **Алибеков А. Г., Моллаев А. Ю., Сайпуллаева Л. А. и др.** Эффект холла, электро- и магнетосопротивление в композите $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (30 %) при высоком давлении / *Журнал неорганической химии.* 2017. Т. 62. № 1. С. 87 – 91. DOI: 10.7868/S0044457X17010032
17. **Алибеков А. Г., Моллаев А. Ю., Сайпуллаева Л. А. и др.** Магнитотранспортные явления в гранулированных структурах $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ при высоком давлении / *Неорганические материалы.* 2016. Т. 52. № 4. С. 402 – 405. DOI: 10.7868/S00022337X16040011
18. **Сайпулаева Л. А., Гаджиалиев М. М., Алибеков А. Г. и др.** Влияние высокого давления на электрические и гальваномагнитные свойства композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 20$ % mol. MnAs / *Физика твердого тела.* 2020. Т. 62. Вып. 6. С. 834 – 838. DOI: 10.21883/FTT.2020.06.49333.32M
19. **Мельникова Н. В., Тебеньков А. В., Суханова Г. В. и др.** Термоэлектрические свойства ферромагнитного полупроводника на основе дираковского полуметалла Cd_3As_2 при высоком давлении / *Физика твердого тела.* 2018. Т. 60. Вып. 3. С. 490 – 494. DOI: 10.1134/S1063783418030174
20. **Риль А. И., Кочура А. В., Маренкин С. Ф. и др.** Микроструктура кристаллов системы $\text{Cd}_3\text{As}_2 - \text{MnAs}$ / *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: техника и технологии.* 2017. Т. 7. № 2. С. 120 – 134.
21. **Vereshchagin L. F., Yakovlev E. N., Vinogradov B. V., et al.** Megabar pressure between anvils / *High Temp. — High Press.* 1974. Vol. 6. N 5. P. 499 – 504.
22. **Babushkin A. N., Pilipenko G. I., Gavrilov F. F.** The electrical conductivity and thermal electromotive force of lithium hydride and lithium deuteride at 20 – 50 GPa / *J. Phys. Condens. Matter.* 1993. Vol. 5. N 46. P. 8659. DOI: 10.1088/0953-8984/5/46/005
23. **Babushkin A. N.** Electrical conductivity and thermal EMF of CsI at high pressures / *High Press. Res.* 1991. Vol. 6. N 6. P. 349 – 356. DOI: 10.1080/08957959208201042
24. **Khvostantsev L. G., Slesarev V. N., Brazhkin V. V.** Toroid type high-pressure device: history and prospects / *High Press. Res.* 2004. Vol. 24. N 3. P. 371 – 383. DOI: 10.1080/08957950412331298761
25. **Mollaev A. Y., Saypulaeva L. A., Arslanov R. K., et al.** Electrophysical Properties of ZnAs_2 and CdAs_2 at Hydrostatic Pressure up to 9 GPa / *High Press. Res.* 2002. Vol. 22. N 1. P. 181 – 184. DOI: 10.1080/08957950211335
26. **Arslanov T., Kilanski L., López-Moreno S., et al.** Changes in the magnetization hysteresis direction and structure-driven magnetoresistance of a chalcopyrite-based magnetic semiconductor / *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2016. Vol. 49. N 12. P. 125007. DOI: 10.1088/0022-3727/49/12/125007
27. **Сайпулаева Л. А., Пирмагомедов З. Ш., Гаджиалиев М. М. и др.** Спин-поляризованный электрический ток в нанокompозите $\text{Cd}_{48,6}\text{Mn}_{11,4}\text{As}_{40}$ / *Физика твердого тела.* 2021. Т. 63. Вып. 4. С. 427 – 433.
28. **Самохвалов А. А., Евстигнеева С. А., Морченко А. Т. и др.** Определение малых величин магнитострикции в аморфных микропроводах с произвольным типом магнитной анизотропии / *Завод. лаб. Диагност. мат.* 2022. Т. 88. № 1(I). С. 62 – 68.
29. **Menyuk N., Kafalas J., Dwight K., Goodenough J.** Effects of pressure on the magnetic properties of MnAs / *Phys. Rev.* 1969. Vol. 177. N 2. P. 942. DOI: 10.1103/PhysRev.177.942
30. **Andresen A., Fjellvåg H., Lebech B.** Neutron diffraction investigation of MnAs under high pressure / *Magn. Mater.* 1984. Vol. 43. N 2. P. 158 – 160. DOI: 10.1016/0304-8853(84)90093-3
31. **Mattoso N., Eddrief M., Valada J., et al.** Enhancement of critical temperature and phases coexistence mediated by strain in MnAs epilayers grown on GaAs (111) B / *Phys. Rev.* 2004. Vol. 70. N 11. P. 115324. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.115324
32. **Kochura A. V., Marenkin S. F., Ril A. I., et al.** Growth and Characterization of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ Composite / *J. Nano-Electron. Phys.* 2015. Vol. 7. N 4. P. 4079.
33. **Liu Y., Tiwari R., Narayan A., et al.** Cr doping induced negative transverse magnetoresistance in Cd_3As_2 thin films / *Phys. Rev.* 2018. Vol. 97. N 8. P. 085303. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.085303

REFERENCES

1. **Wang Z., Weng H., Wu Q., et al.** Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 / *Phys. Rev.* 2013. Vol. 88. N 12. P. 125427. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.125427
2. **Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., et al.** Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal / *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113. N 2. P. 027603. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.027603
3. **Feng J., Pang Y., Wu D., et al.** Large linear magnetoresistance in Dirac semimetal Cd_3As_2 with Fermi surfaces close to the Dirac points / *Phys. Rev.* 2015. Vol. 92. N 8. P. 081306. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.081306
4. **He L., Jia Y., Zhang S., et al.** Pressure-induced superconductivity in the three-dimensional topological Dirac semimetal

- Cd₃As₂ / Quantum Mater. 2016. Vol. 1. N 1. P 1 – 5.
DOI: 10.1038/npjquantmats.2016.14
5. **Zhang S., Wu Q., Schoop L., et al.** Breakdown of three-dimensional Dirac semimetal state in pressurized Cd₃As₂ / Phys. Rev. 2015. Vol. 91. N 16. P 165133.
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.165133
 6. **Arushanov E. K.** II3V2 compounds and alloys / Crystal Growth and Charact. 1992. Vol. 25. N 3. P 131 – 201.
DOI: 10.1016/0960-8974(92)90030-T
 7. **Lu H., Zhang X., Bian Y., Jia S.** Topological phase transition in single crystals of (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ / Sci. Rep. 2017. Vol. 7. N 1. P 3148. DOI: 10.1038/s41598-017-03559-2
 8. **Cisowski J.** Semimagnetic semiconductors based on II – V compounds / Phys. Stat. Sol. 1997. Vol. 200. N 2. P 311 – 350.
 9. **Baibich M., Broto J., Fert A., et al.** Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices / Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 61. N 21. P 2472.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.61.2472
 10. **Ril A. I., Marenkin S. F.** Cadmium Arsenides: Structure, Synthesis of Bulk and Film Crystals, Magnetic and Electrical Properties (Review) / Russ. J. Inorg. Chem. 2021. Vol. 66. N 14. P 2005. DOI: 10.1134/S0036023621140059
 11. **Gribanov I., Zavatsky A., Sivachenko A.** Low-Temperature Magnetic Transformations in Orthorhombic Manganese Arsenide / FTM. 1979. Vol. 5. N 10. P 1219 [in Russian].
 12. **Spezzani C., Ferrari E., Allaria E., et al.** Magnetization and microstructure dynamics in Fe/MnAs/GaAs (001): Fe magnetization reversal by a femtosecond laser pulse / Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. N 24. P 247202.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.247202
 13. **Hubmann J., Bauer B., Körner H., et al.** Epitaxial growth of room-temperature ferromagnetic MnAs segments on GaAs nanowires via sequential crystallization / Nano Lett. 2016. Vol. 16. N 2. P 900. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b03658
 14. **Novotortsev V. M., Marenkin S. F., Fedorchenko I. V., Kochura A. V.** Physicochemical foundations of synthesis of new ferromagnets from chalcopyrites A^{II}B^{IV}CV₂ / Zh. Neorg. Khim. 2010. Vol. 55. N 11. P 1762 [in Russian].
DOI: 10.1134/S0036023610110136
 15. **Saypulaeva L. A., Gadzhialiev M. M., Alibekov A. G., et al.** Effect of hydrostatic pressures of up to 9 GPa on the galvanomagnetic properties of Cd₃As₂ – MnAs (20 % mol. MnAs) alloy in a transverse magnetic field / Inorg. Mater. 2019. Vol. 55. N 9. P 873 – 878. DOI: 10.1134/S0020168519090152
 16. **Alibekov A. G., Mollaev A. Y., Saipullaeva L. A., et al.** Hall effect, electrical and magnetic resistance in Cd₃As₂ + MnAs (30 %) composite at high pressures / Zh. Neorg. Khim. 2017. Vol. 62. N 1. P 90 – 93 [in Russian].
DOI: 10.7868/S0044457X17010032
 17. **Alibekov A. G., Mollaev A. Y., Saipullaeva L. A., et al.** Magnetotransport effects in granular Cd₃As₂ + MnAs structures at high pressures / Inorg. Mater. 2016. Vol. 52. N 4. P 357 – 360. DOI: 10.1134/S0020168516040014
 18. **Saypulaeva L. A., Gadzhialiev M. M., Alibekov A. G., et al.** The effect of high pressure on the electrical and galvanomagnetic properties of the composite Cd₃As₂ – 20 % mol. MnAs / Fiz. Tv. Tela. 2020. Vol. 62. N 6. P 942 – 946 [in Russian]. DOI: 10.1134/S1063783420060256
 19. **Melnikova N. V., Tebenkov A. V., Sukhanova G. V., et al.** Thermoelectric properties of a ferromagnetic semiconductor based on the Dirac semimetal Cd₃As₂ at high pressure / Fiz. Tv. Tela. 2018. Vol. 60. N 3. P 494 – 498 [in Russian].
DOI: 10.1134/S1063783418030174
 20. **Ril A. I., Kochura A. V., Marenkin S. F., et al.** Microstructure of crystals of the system Cd₃As₂ – MnAs / Izv. Yugo-Zapad. Gos. Univ. 2017. Vol. 7. N 2. P 120 – 134 [in Russian].
 21. **Vereshchagin L. F., Yakovlev E. N., Vinogradov B. V., et al.** Megabar pressure between anvils / High Temp. — High Press. 1974. Vol. 6. N 5. P 499 – 504.
 22. **Babushkin A. N., Pilipenko G. I., Gavrilov F. F.** The electrical conductivity and thermal electromotive force of lithium hydride and lithium deuteride at 20 – 50 GPa / J. Phys. Condens. Matter. 1993. Vol. 5. N 46. P 8659.
DOI: 10.1088/0953-8984/5/46/005
 23. **Babushkin A. N.** Electrical conductivity and thermal EMF of CsI at high pressures / High Press. Res. 1991. Vol. 6. N 6. P 349 – 356. DOI: 10.1080/08957959208201042
 24. **Khvostantsev L. G., Slesarev V. N., Brazhkin V. V.** Toroid type high-pressure device: history and prospects / High Press. Res. 2004. Vol. 24. N 3. P 371 – 383.
DOI: 10.1080/08957950412331298761
 25. **Mollaev A. Y., Saypulaeva L. A., Arslanov R. K., et al.** Electrophysical Properties of ZnAs₂ and CdAs₂ at Hydrostatic Pressure up to 9 GPa / High Press. Res. 2002. Vol. 22. N 1. P 181 – 184. DOI: 10.1080/08957950211335
 26. **Arslanov T., Kilanski L., López-Moreno S., et al.** Changes in the magnetization hysteresis direction and structure-driven magnetoresistance of a chalcopyrite-based magnetic semiconductor / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. N 12. P 125007.
DOI: 10.1088/0022-3727/49/12/125007
 27. **Saypulaeva L., Pirmagomedov Z., Galzhialiev M., et al.** Spin -polarized electric current in Cd_{48.6}Mn_{11.4}As₄₀ nanocomposite / Physics of the Solid State. 2021. Vol. 63. N 4. P 427 – 432. DOI: 10.1134/S1063783421040193
 28. **Samokhvalov A. A., Evstigneeva S. A., Morchenko A. T., et al.** Determination of small magnitudes of magnetostriction in amorphous microwires with an arbitrary type of magnetic anisotropy / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 1(I). P 62 – 68 [in Russian].
DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-I-62-68
 29. **Menyuk N., Kafalas J., Dwight K., Goodenough J.** Effects of pressure on the magnetic properties of MnAs / Phys. Rev. 1969. Vol. 177. N 2. P 942. DOI: 10.1103/PhysRev.177.942
 30. **Andresen A., Fjellvåg H., Lebech B.** Neutron diffraction investigation of MnAs under high pressure / Magn. Mater. 1984. Vol. 43. N 2. P 158 – 160. DOI: 10.1016/0304-8853(84)90093-3
 31. **Mattoso N., Eddrief M., Varalda J., et al.** Enhancement of critical temperature and phases coexistence mediated by strain in MnAs epilayers grown on GaAs (111) B / Phys. Rev. 2004. Vol. 70. N 11. P 115324. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.115324
 32. **Kochura A. V., Marenkin S. F., Ril A. I., et al.** Growth and Characterization of Cd₃As₂ + MnAs Composite / J. Nano- Electron. Phys. 2015. Vol. 7. N 4. P 4079.
 33. **Liu Y., Tiwari R., Narayan A., et al.** Cr doping induced negative transverse magnetoresistance in Cd₃As₂ thin films / Phys. Rev. 2018. Vol. 97. N 8. P 085303.
DOI: 10.1103/PhysRevB.97.085303