

УДК 537.622.4;539.89;541.123:546.21'831'832

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

© 2019 г. Л. А. Сайпулаева¹, М. М. Гаджиалиев¹, А. Г. Алибеков¹, Н. В. Мельникова²,
В. С. Захвалинский³, А. И. Риль^{4,*}, С. Ф. Маренкин^{4,5},
Т. Н. Эфендиева¹, И. В. Федорченко⁴, А. Ю. Моллаев¹

¹Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ Российской академии наук,
ул. М. Ярагского, 94, Махачкала, 367003 Россия

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт естественных наук,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

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

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

⁵Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский пр., 4, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ril_alexey@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 29.04.2019 г.

Изучено влияние гидростатического давления на гальваномагнитные свойства сплава системы $\text{Cd}_3\text{As}_2\text{—MnAs}$, содержащего 20 мол. % MnAs , в поперечном магнитном поле до 4 кЭ. На барических зависимостях удельного электросопротивления и коэффициента Холла обнаружены обратимые фазовые переходы. Показано, что проявление отрицательного магнетосопротивления в этом сплаве индуцировано давлением.

Ключевые слова: высокое гидростатическое давление, эффект Холла, удельное электросопротивление, отрицательное магнетосопротивление, структурный фазовый переход

DOI: 10.1134/S0002337X1909015X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к сплавам системы $\text{Cd}_3\text{As}_2\text{—MnAs}$ обусловлен тем, что в их состав входят узкозонный полупроводник Cd_3As_2 [1–3] и известный ферромагнетик MnAs [4]. Компоненты системы представляют интерес для создания гранулированных структур спинтроники [5]. Cd_3As_2 , по результатам теоретических и экспериментальных работ, рассматривается как объемный дираковский полуметалл (3D-TDS). С помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением [1] и сканирующей туннельной микроскопии было продемонстрировано существование 3D дираковских фермионов в этом соединении. В объемных дираковских полуметаллах наблюдаются необычные явления: квантовый спиновый эффект Холла, гигантский диамагнетизм и др. Для изучения этих явлений арсенид кадмия более перспективен, чем известные 3D-TDS-соединения, например Na_3Bi ,

так как они гигроскопичны. Cd_3As_2 представляет собой базовое соединение для исследования уникальных фаз, таких как полуметаллы Вейля, аксионные диэлектрики и топологические сверхпроводники. В качестве материалов спинтроники интересен не только Cd_3As_2 [6, 7], но и разбавленные магнитные полупроводники на его основе [8–10].

Разбавленные магнитные полупроводники изучаются в качестве инжекторов поляризованных по спину носителей заряда. Однако существует проблема, связанная с тем, что коэффициент спиновой инжекции электронов через границу раздела ферромагнитный металл–полупроводник невысок из-за рассогласования сопротивлений слоев. Эта проблема решается применением разбавленных магнитных полупроводников, таких как GaMnAs и магнитные полуметаллические соединения типа MnB^V (MnP , MnAs , MnSb) [10–13].

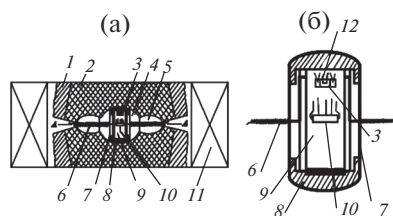


Рис. 1. Устройство для получения гидростатического давления до 9 ГПа: 1 — стальная матрица, 2 — вставка из твердого сплава ВК-6, 3 — анганиновый манометр, 4 — катленитовый тороид, 5 — кольцо уплотнительное из катленита, 6 — электроввод, 7 — фторопластовая капсула, 8 — медные крышки, 9 — среда передающая давление, 10 — образец, 11 — соленоид, 12 — реперный датчик, висмут (а) и фторопластовая капсула (б).

Твердые растворы разбавленных магнитных полупроводников при температурах ниже температуры Кюри (T_C) обладают внутренним магнитным полем, величина обменного взаимодействия между ионами Mn обычно возрастает с ростом их концентрации за счет уменьшения расстояния Mn—Mn. Сплав системы Cd_3As_2 —MnAs с 20 мол. % MnAs состоит из твердого раствора $(Cd_{1-x}Mn_x)_3As_2$ с включениями второй ферромагнитной фазы — MnAs с $T_C = 318$ К [14, 15]. Таким образом, в сплаве присутствуют две взаимодействующие магнитные подсистемы: раствор ионов Mn в высокопроводящей среде дираковского полуметалла Cd_3As_2 и ферромагнитный MnAs, что позволяет предположить возможность создания инжекционного материала с высокой степенью поляризации.

Актуальным является уточнение зонной структуры полупроводника Cd_3As_2 . Эти исследования проводятся достаточно давно, и в ряде работ наряду с бесщелевым состоянием предполагается инверсия зон [1, 16–18]. Эволюция зон в тройных и четверных твердых растворах на основе арсенида кадмия представляет интерес как отдельная задача, но одновременно расширяет понимание свойств Cd_3As_2 как трехмерного дираковского полуметалла. Существование 3D-дираковских фермионов позволяет объяснить аномально высокую подвижность носителей заряда в монокристаллах этого соединения [3]. При этом концентрацию носителей заряда можно регулировать путем легирования, в частности введением марганца.

Данная статья является продолжением комплексных исследований электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств сплавов системы Cd_3As_2 —MnAs [15, 19, 20] в широком диапазоне температур, давлений и магнитных полей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сплав системы Cd_3As_2 —MnAs, содержащий 20 мол. % MnAs, представляет собой композит, который состоит из ферромагнитных наногранул MnAs и полупроводниковой матрицы Cd_3As_2 . Синтез сплава проводили вакуумно-ампульным методом в кварцевых графитизированных ампулах из соединений Cd_3As_2 и MnAs при температуре плавления арсенида марганца [20]. Согласно данным ДТА и РФА, сплав представляет собой композит, в котором преобладает α -фаза Cd_3As_2 .

Для создания высокого давления использовалась камера типа “Тороид” создающая высокое гидростатическое давление до 9 ГПа. На рис. 1 представлено схематическое изображение камеры и ячейки высокого давления.

Исследование кинетических и гальваномагнитных свойств — удельного сопротивления, коэффициента Холла, магнетосопротивления — проводили стандартным четырехзондовым методом. Для создания магнитного поля использовался многovitковый соленоид с напряженностью магнитного поля $H \sim 5$ кЭ. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами $3 \times 1.0 \times 1.0$ мм. Ток, протекающий через образец, контролировался цифровым мультиметром Kethley 2000. Для характеристики исследуемой системы рассматривались: магнитное поле H , ток I через образец, холловское напряжение V_x , удельное электросопротивление ρ и давление p . Измерения проводились при двух противоположных направлениях тока и поля.

Удельное сопротивление образца вычислялось по формуле:

$$\rho = \frac{V_x ab}{Il_3},$$

где V_x — измеряемое напряжение, a — ширина образца, b — толщина образца, I — ток на образце, l_3 — расстояние между зондами.

Исследование эффекта Холла R_x проводилось методом постоянного тока I и постоянного магнитного поля H . Постоянное магнитное поле напряженностью 4 кЭ генерировалось катушкой. Уменьшение вклада посторонних поперечных ЭДС в измеряемую ЭДС Холла V_x осуществлялось усреднением результатов измерений общего поперечного напряжения для двух направлений тока I^- , I^+ и двух направлений поля B^- , B^+ :

$$V_x = \frac{+V_{I^+B^+} - V_{I^-B^+} + V_{I^-B^-} - V_{I^+B^-}}{4},$$

$$R_x = \frac{V_x d}{IH},$$

где d — толщина образца. Величину R_x с хорошей точностью можно считать константой материала.

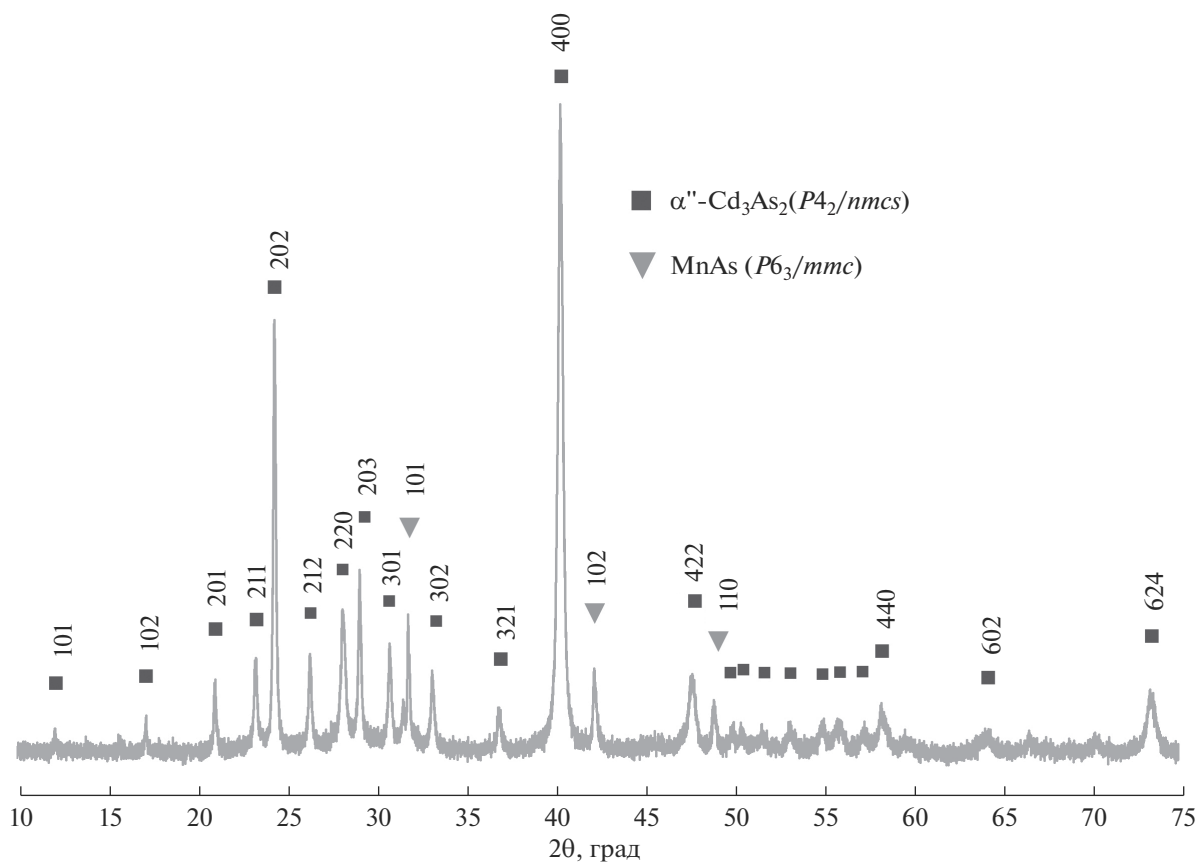


Рис. 2. Рентгенограмма образца состава 80 мол. % Cd_3As_2 + 20 мол. % MnAs .

Значение R_x определяется концентрацией и подвижностью электронов и дырок в веществе. Когда носителями тока являются только свободные электроны, $R_x = 1/(ne)$, где n — концентрация электронов, e — заряд электрона. Магнетосопротивление (MR) определили согласно $\frac{MR - MR_0}{MR_0} \times 100\%$.

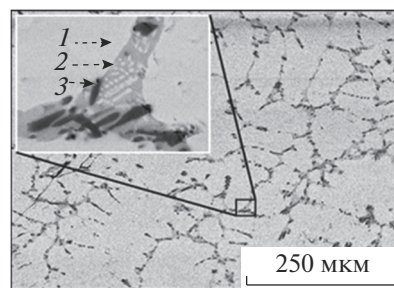
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Идентификация образцов. На рис. 2 представлены результаты порошковой рентгеновской дифрактометрии сплава Cd_3As_2 с 20 мол. % MnAs . На дифрактограмме наряду с α'' -фазой Cd_3As_2 наблюдаются пики фазы MnAs .

Результаты ДТА и РФА подтверждает исследование поверхности сплава методом РЭМ. На рис. 3 представлены изображения поверхности сплава 80 мол. % Cd_3As_2 + 20 мол. % MnAs . Большая часть объема имеет однородный состав, соответствующий, как показывает элементный анализ, соединению Cd_3As_2 .

Дополнительные включения занимают менее 5% от площади образца, содержание в них мышьяка выше, а содержание кадмия ниже, чем в

основном объеме образца. На увеличенном фрагменте микроструктуры (вставка на рис. 3) видно, что распределение элементов имеет сложный характер, образец содержит субмикронные включения, по составу близкие к Cd_3As_2 . Элементный



Точка	Cd	As	Mn
1	56.9	38.8	4.3
2	37.7	62.3	—
3	3.6	48.4	48.0

Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности и результаты определения количественного содержания элементов на участках, указанных стрелками на вставке.

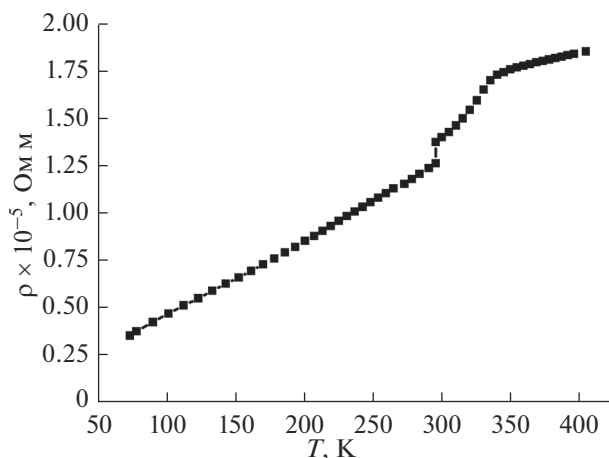


Рис. 4. Температурная зависимость удельного электросопротивления.

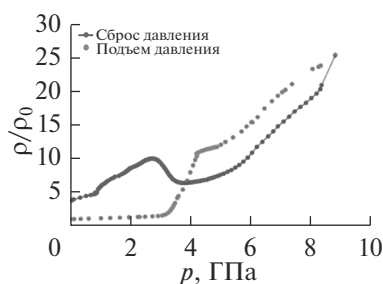


Рис. 5. Барическая зависимость изменения сопротивления при подъеме и сбросе давления.

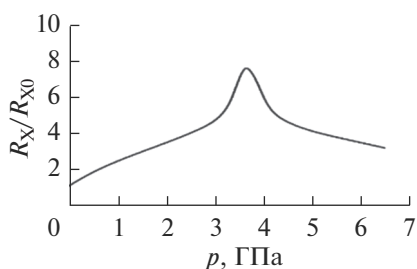


Рис. 6. Барическая зависимость изменения коэффициента Холла для образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + 20$ мол. % MnAs (R_x и R_{x0} – сопротивление образца в магнитном поле и при нулевом поле).

анализ в темной области включения показывает, что второй фазой является CdAs_2 .

Электрическое сопротивление. Электрические свойства зависят от размеров гранул, от плотности их упаковки. Если средняя плотность частиц мала, то проводимость такого материала будет весьма низкой. При большой плотности, когда значительное число частиц соприкасается друг с другом, в структуре могут образоваться достаточ-

но протяженные кластеры, проводимость такой структуры не будет подчиняться правилу аддитивности. Реальная проводимость сплава будет определяться проводимостью фаз MnAs , Cd_3As_2 , переходного слоя между ними и формой гранул. Вероятность туннелирования носителей заряда определяется размерами и расстоянием между гранулами, высотой, шириной и формой туннельных барьеров, температурой.

На рис. 4 приведена температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ сплава Cd_3As_2 с 20 мол. % MnAs в диапазоне температур 77–450 К. Для сплава характерен металлический тип проводимости.

Барическая зависимость удельного сопротивления при подъеме и сбросе давления представлена на рис. 5. С ростом давления до 2.8 ГПа удельное электросопротивление очень медленно монотонно растет, затем наблюдается его резкий рост с максимумом при $p = 4.2$ ГПа. При сбросе давления удельное электросопротивление падает с различными барическими коэффициентами и при $p = 2.75$ ГПа наблюдается максимум удельного электросопротивления.

Коэффициент Холла. На рис. 6 представлена барическая зависимость коэффициента Холла $R_x(p)$. Коэффициент Холла при $p \approx 3.65$ ГПа проходит через максимум. Его поведение коррелирует с барической зависимостью $\rho(p)$, для которой также характерно наличие четкого пика при $p \approx 4.2$ ГПа. Обратимые пики на барических зависимостях $\rho(p)$ и $R_x(p)$ свидетельствуют о структурном превращении в сплаве.

Магнетосопротивление. На рис. 7 представлены зависимости магнетосопротивления от магнитного поля при фиксированных значениях давления. Исследования магнетосопротивления в зависимости от давления при фиксированном магнитном поле представлены на рис. 8. На этих зависимостях было обнаружено отрицательное магнетосопротивление (ОМС), максимум которого достигает $\sim 1\%$ в интервале давлений ≈ 1 –2.6 ГПа. Кроме ОМС, в сплаве установлены особенности поведения положительного магнетосопротивления в области давлений, соответствующих фазовым переходам в полупроводниковой матрице композита Cd_3As_2 и в ферромагнитных гранулах MnAs [19, 21].

На барических зависимостях удельного электросопротивления, коэффициента Холла и магнетосопротивления в области давлений 3–4 ГПа обнаружены особенности поведения, которые связаны с фазовым переходом. Величина пика на барической зависимости приведенного магнетосопротивления растет с увеличением напряженности магнитного поля. В композитах с другим содержанием MnAs также в окрестности 4 ГПа наблюдали особенности в поведении электрических характеристик [14, 19, 21].

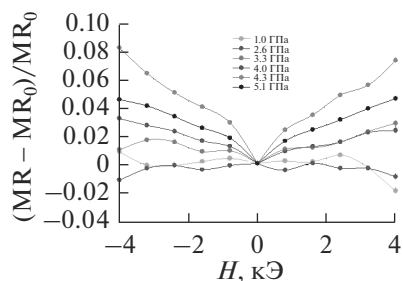


Рис. 7. Магнетополевые зависимости магнетосопротивления образца Cd_3As_2 с 20 мол. % MnAs при фиксированных давлениях.

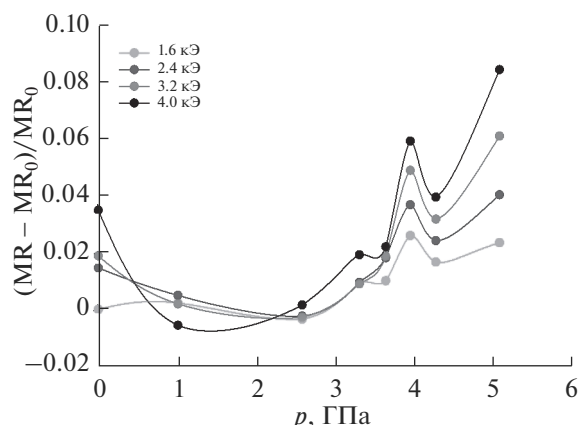


Рис. 8. Барические зависимости магнетосопротивления сплава Cd_3As_2 с 20 мол. % MnAs при фиксированных значениях магнитного поля.

Таким образом, можно предположить, что в сплаве Cd_3As_2 с 20 мол. % MnAs под воздействием высокого давления имеет место совмещенный фазовый переход в матрице Cd_3As_2 и ферромагнетике MnAs . В интервале 2.6–4.0 ГПа в Cd_3As_2 происходит переход из тетрагональной в моноклинную структуру, что подтверждает данные [22, 23]. При давлении 3.5–3.8 ГПа наблюдаются спин-переориентационные переходы в MnAs , оказывающие влияние на электрические свойства и магнетосопротивление композита.

Механизм возникновения ОМС в гранулированных структурах представлен в работах [24–26]. В гранулированных структурах в отсутствие магнитного поля угол между магнитными моментами ферромагнитных кластеров случаен, а при приложении магнитного поля магнитные моменты выстраиваются вдоль поля, что приводит к заметному падению сопротивления. Величина магнетосопротивления пропорциональна магнитному полю, косинусу угла между магнитными моментами и количеству ферромагнитных кластеров.

В условиях высоких давлений уменьшаются расстояния между гранулами MnAs . В компози-

тах транспортные свойства определяются не только процессами переноса зарядов в гранулах, но и туннелированием носителей между гранулами. Если размеры гранул и магнитных доменов сопоставимы между собой, то в магнитном поле магнитные моменты гранул выстраиваются параллельно, вдоль поля, и это приводит к меньшему рассеянию электронов проводимости и к появлению ОМС. Туннельное сопротивление уменьшается с ростом внешнего магнитного поля по мере того, как оно упорядочивает намагниченность отдельных доменов. С увеличением давления туннельное сопротивление уменьшается благодаря уменьшению расстояний между гранулами, т.е. благодаря уменьшению туннелирующего барьера. Кроме того, необходимо учитывать наличие в самой матрице композита электрически активных дефектов, возникших в процессе синтеза композитных материалов и образования гранул MnAs . Часть дефектов представляет собой некомпенсированные атомы с ненулевым спином, которые играют роль локализованных магнитных моментов или магнитных центров рассеяния носителей в магнитном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано появление в условиях высоких давлений в сплаве системы Cd_3As_2 – MnAs , содержащем 20 мол. % MnAs , ОМС, обусловленного изменением условий туннелирования вследствие уменьшения расстояния между магнитными моментами ферромагнетика и структурным переходом в полупроводниковой матрице.

Поведение магнетосопротивления в сплавах системы Cd_3As_2 – MnAs в условиях высоких гидростатических давлений имеет сложную природу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Z.K., Jiang J., Zhou B., Wang Z.J., Zhang Y., Weng H.M., Prabhakaran D., Mo S.-K., Peng H., Dudin P., Kim T., Hoesch M., Fang Z., Dai X., Shen Z.X., Feng D.L., Hussain Z., Chen Y.L. A Stable Three-Dimensional Topological Dirac Semimetal Cd_3As_2 // *Nature Mater.* 2014. № 7. P. 677–681. <https://doi.org/10.1038/NMAT3990>
2. Лазарев В.Б. Полупроводниковые соединения группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. М.: Наука, 1978. 255 с.
3. Маренкин С.Ф., Трухан В.М. Фосфиды, арсениды цинка и кадмия. Минск: Вараксин А.Н., 2010. 220 с.
4. Okamoto H. The As–Mn (Arsenic–Manganese) System // *Bull. Alloy Phase Diagrams.* 1989. V. 10. № 5. P. 549–554. <https://doi.org/10.1007/BF02882414>
5. Shchelkachev N.M., Yarzhevsky V.G. Influence of Crystal Structure and 3d Impurities on the Electronic Structure of the Topological Material Cd_3As_2 // *Inorg. Mater.* 2018. V. 54. № 11. P. 1093–1098. <https://doi.org/10.1134/S0020168518110110>

6. Wang H., Weng Q., Wu X., Dai Z. Fang. Three-Dimensional Dirac Semimetal and Quantum Transport in Cd_3As_2 // *Phys. Rev. B*. 2013. V. 88. № 12. 125427. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.125427>
7. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., Zabolotnyy V., Buchner B., Cava R.J. Experimental Realization of a Three-Dimensional Dirac Semimetal // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. № 2. 027603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.027603>
8. Arushanov E.K. Pb_3V_2 Compounds and Alloys // *Prog. Crystal Growth and Charact.* 1992. V. 25. № 3. P. 131–201. [https://doi.org/10.1016/0960-8974\(92\)90030-T](https://doi.org/10.1016/0960-8974(92)90030-T)
9. Lu H., Zhang X., Jia S. Topological phase transition in single crystals of $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. 3148. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03559-2>
10. Прокофьева М.М., Дорохин М.В., Данилов Ю.А., Кудрин А.В., Вихрова О.В. Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с ферромагнитными инжекторами вида $(\text{A}^{\text{III}}\text{Mn})\text{BV}$ и Ni // *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. Вып. 11. С. 1447–1450. <https://doi.org/10.1134/S1063782610110035>
11. Marenkin S.F., Kochura A.V., Izotov A.D., Vasil'ev M.G. Manganese Pnictides MnP , MnAs , and MnSb are Ferromagnetic Semimetals: Preparation, Structure, and Properties (a Survey) // *Russ. J. Neorg. Chem.* 2018. V. 63. № 14. P. 1753–1763. <https://doi.org/10.1134/S0036023618140036>
12. Jungwirth T., Sinova J., Malek J., Kuchera J., MacDonald A.H. Theory of Ferromagnetic (III,Mn)V Semiconductors // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78. № 3. P. 809–863. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.809>
13. Ploog K.H. Epitaxial ferromagnet-semiconductor heterostructures for electrical spin injection // *J. Cryst. Growth*. 2004. V. 268. № 3–4. P. 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.04.050>
14. Melnikova N.V., Tebenkov A.V., Sukhanova G.V., Babushkin A.N., Saipulaeva L.A., Zakhvalinskii V.S., Gabibov S.F., Alibekov A.G., Mollaev A.Y. Thermoelectric Properties of a Ferromagnetic Semiconductor Based on a Dirac Semimetal (Cd_3As_2) under High Pressure // *Phys. Solid State*. 2018. V. 60. № 3. P. 494–498. <https://doi.org/10.1134/S1063783418030174>
15. Govor G.A. First-Order Phase Transition in Manganese Arsenide // *Phys. Solid State*. 2015. V. 57. № 5. P. 871–872. <https://doi.org/10.1134/S1063783415050121>
16. Cisowski J. Semimagnetic Semiconductors Based on II–V Compounds // *Phys. Status Solidi (B)*. 1997. V. 200. № 2. P. 311–350.
17. Ivanov O., Zakhvalinskii V., Nikulicheva T., Yaprincev M., Ivanichikhin S. Asymmetry and Parity Violation in Magnetoresistance of Magnetic Diluted Dirac–Weyl Semimetal $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ // *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.* 2018. V. 12. № 12. P. 1800386. <https://doi.org/10.1002/pssr.201800386>
18. Aubin M.J., Caron L.G., Jay-Gerin J.-P. Band structure of cadmium arsenide at room temperature // *Phys. Rev. B*. 1977. V. 15. № 8. P. 3872–3878. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.15.3872>
19. Alibekov A.G., Mollaev A.Y., Saipullaeva L.A., Marenkin S.F., Fedorchenko I.V., Ril' A.I. Hall Effect, Electrical and Magnetic Resistance in $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (30%) Composite at High Pressures // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62 № 1. P. 90–93. <https://doi.org/10.1134/S003602361701003X>
20. Ril' A.I., Fedorchenko I.V., Marenkin S.F., Kochura A.V., Kuz'ko A.E. Phase Equilibria in the CdAs_2 – Cd_3As_2 – MnAs Ternary System // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62. № 7. P. 976–986. <https://doi.org/10.1134/S0036023617070191>
21. Alibekov A.G., Mollaev A.Yu., Saipullaeva L.A., Marenkin S.F., Fedorchenko I.V. Magnetotransport Effects in Granular $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ Structures at High Pressures // *Inorg. Mater.* 2016. V. 52 № 4. P. 357–360. <https://doi.org/10.1134/S0020168516040014>
22. He L., Jia Y., Zhang S., Hong X., Jin C., Li S. Pressure-Induced Superconductivity in the Three-Dimensional Topological Dirac Semimetal Cd_3As_2 // *Quantum Mater.* 2016. № 1. 16014. <https://doi.org/10.1038/npjquantmats.2016.14>
23. Глазков В.П., Козленко Д.П., Подурец К.М., Савенко Б.Н., Соменков В. А. Нейтронографическое исследование атомной и магнитной структуры MnAs при высоких давлениях // *Кристаллография*. 2003. Т. 48. С. 59–62.
24. Ershov A.A., Krutova J.A. Asymptotics of Magnetoresistance // *Vestn. YuUrGU. Ser. Vych. Matem. Inform.* 2016. V. 5. № 1. P. 5–12. <https://doi.org/10.14529/cmse160101>
25. Marenkin S.F., Izotov A.D., Fedorchenko I.V., Novotortsev V.M. Manufacture of Magnetic Granular Structures in Semiconductor–Ferromagnet Systems // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2015. V. 60. № 3. P. 295–300. <https://doi.org/10.1134/S0036023615030146>
26. Marenkin S.F., Trukhan V.M., Fedorchenko I.V., Trukhanov S.V., Shelkova T.V. Magnetic and Electrical Properties of $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ Composite // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2014. V. 59. № 4. P. 355–359. <https://doi.org/10.1134/S0036023614040111>