

УДК 53.092

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-51-58

Л.А. Сайпулаева¹, А.Г. Алибеков¹, С.Ф. Маренкин^{4,5}, Н.В. Мельникова², В.С. Захвалинский³, М.М. Гаджиалиев¹, З.Ш. Пирмагомедов¹, Т.Н. Эфендиева¹

Явления переноса в композите на основе дираковского полуметалла диарсенида трикадмия при высоких давлениях

¹ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН; Россия, 367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94; taggadji@rambler.ru;

² Уральский федеральный университет; Институт естественных наук; Россия, 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51;

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

⁴ Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН; Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 31;

⁵ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Россия, 101000, г. Москва, Ленинский пр., 6

Исследованы электрические и магнетопольные свойства композита на основе дираковского полуметалла, диарсенида трикадмия при высоком гидростатическом давлении. Изучены барические и температурные зависимости удельного электросопротивления, а также эффекта Холла и магнетосопротивления в поперечном магнитном поле. На барических зависимостях удельного электросопротивления и коэффициента Холла обнаружены фазовые переходы. Полевые зависимости магнетосопротивления свидетельствуют о появлении отрицательного магнетосопротивления, индуцированного давлением.

Ключевые слова: *высокое давление, эффект Холла, удельное электросопротивление, отрицательное магнетосопротивление, электротранспорт.*

Введение

Цель настоящего исследования – изучение явления переноса в $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%) (эффекта Холла и магнетосопротивления) при высоких гидростатических давлениях до 9 GPa и магнитных полях до 5 кОе в диапазоне комнатных температур.

В ряде работ, посвященных узкозонному полупроводнику диарсениду трикадмия [1, 2], было показано, что это соединение может рассматриваться как дираковский полуметалл. Дираковские полуметаллы на основе диарсенида трикадмия представляют собой перспективные наноматериалы для устройств спинтроники [3–5]. Зонная структура диарсенида трикадмия изучается достаточно давно, наряду с нулевым энергетическим зазором между зонами валентной и проводимости, предполагается также их инверсия [6, 7]. Проведение комплексных исследований явлений переноса материалов $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ [8–9], представляющих собой композит, состоящий из гранул ферромагнитного арсенида марганца, помещенных в полупроводниковую матрицу диарсени-

да трикадмия, в широкой области давлений и индукций магнитного поля позволит получить новую информацию о структуре зон арсенида кадмия и его твердых растворов с марганцем.

Образцы, методика и техника эксперимента.

В дираковском полуметалле на основе трикадмия диарсенида ($Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20 \text{ mass\%}$)) (табл. 1) исследованы эффект Холла, электро- и магнетосопротивление при высоком гидростатическом давлении до 9 ГПа в области комнатных температур. Измерения проводились в аппаратах высокого давления типа «Гороид», образцы имели форму параллелепипеда размером $3 \times 1 \times 1$ мм. Для измерения коэффициента Холла и магнетосопротивления аппарат «Гороид» помещался в соленоид с напряженностью магнитного поля 400 кА/м. Более подробно методика описана в работе [10].

Таблица 1

Соединение	$n, \text{ cm}^{-3}$	$\mu, \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ (300 К)	$\rho, \Omega\cdot\text{cm}$
$Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20 \text{ mass\%}$)	$1.7 \cdot 10^{19}$	4935	$7.7 \cdot 10^{-5}$

На рис. 1 представлены результаты порошковой рентгеновской диффрактометрии образца $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20 \text{ mass\%}$) (штриховые диаграммы приведены для различных полиморфных модификаций арсенида кадмия). При расшифровке рентгенограмм было установлено, что образцы являлись двухфазными композитами и содержали фазы диарсенида трикадмия и арсенида марганца. На некоторых рентгенограммах наблюдались слабые пики, относящиеся к диарсениду кадмия.

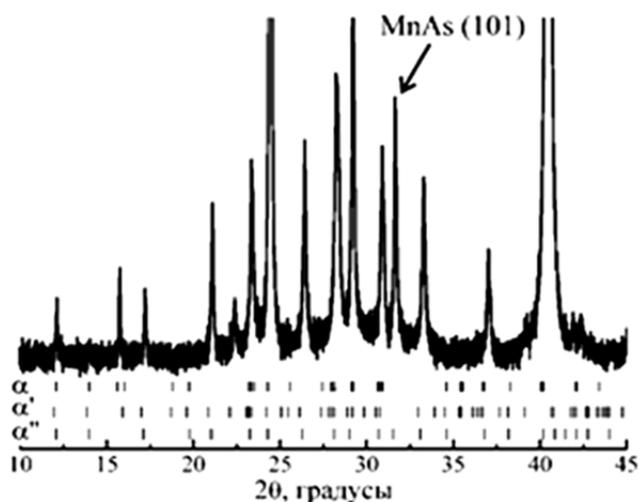


Рис. 1. Рентгенограмма образца $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20 \text{ mass\%}$)

На рис. 2 представлены изображения поверхности исследуемого образца. Здесь хорошо видно, что большая часть объема имеет сложный характер (вставка), содержит субмикронные включения, по составу близкие к диарсениду трикадмия.

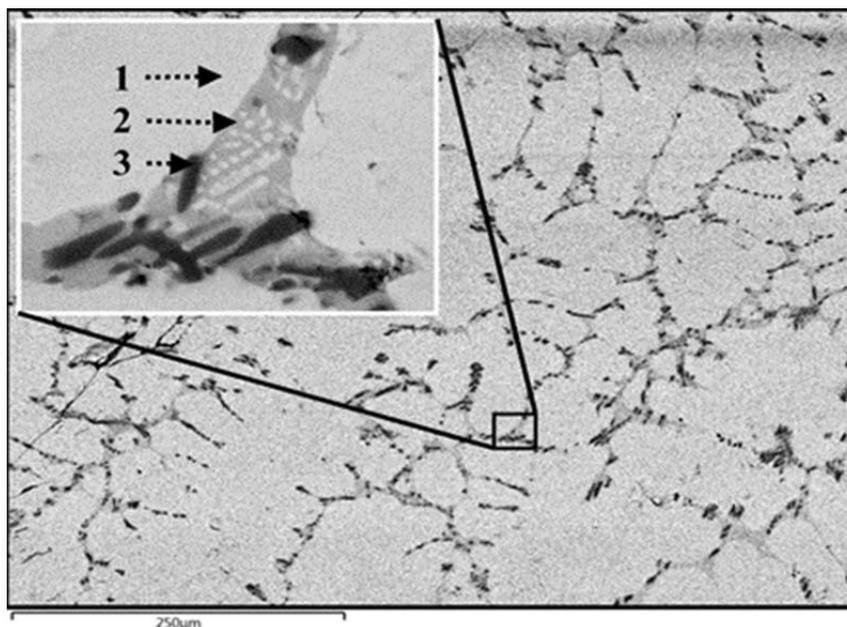


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%)

Исследование эффекта Холла R_x проводилось методом постоянного тока I и постоянного магнитного поля H . Постоянное магнитное поле напряженностью 4 кОе 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_x и двух направлений поля H_z :

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

$$R_H = \frac{V_x \cdot d}{I \cdot H}.$$

Напряжение на исследуемый образец подавалось с прецизионного источника постоянного тока Keithley 6430, холловское напряжение снималось посредством мультиметра Keithley 2000.

Магнетосопротивление $\frac{MR - MR_0}{MR_0} 100\%$ в зависимости от величины магнитного поля при разных давлениях в образце представлено на рис. 6. Здесь MR и MR_0 – удельное сопротивление образца в магнитном поле H и в нулевом магнитном поле, соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Электрическое сопротивление. Электрические свойства исследуемых структур зависят от размеров гранул, от доли пространства, заполненного MnAs . На рис. 3 приведена зависимость удельного сопротивления от температуры $\rho(T)$ образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%) в диапазоне $T \approx (77 \div 450)$ К. С ростом температуры удельное сопротивление растет, т. е. имеем металлическую проводимость.

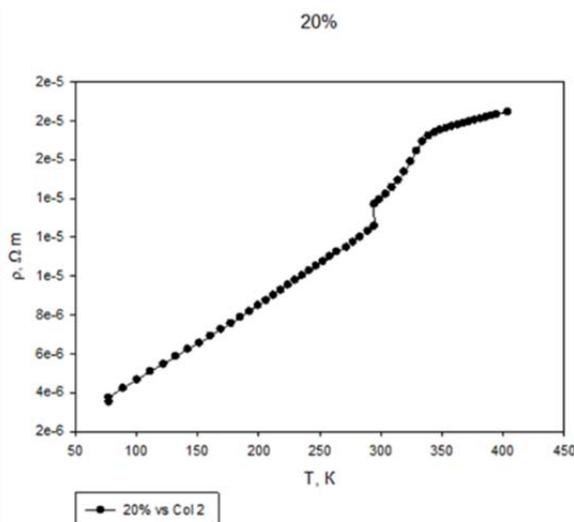


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления от температуры

Барическая зависимость удельного сопротивления при подъеме и сбросе давления представлена на рис. 4. С ростом давления до 2,8 GPa удельное электросопротивление очень медленно монотонно растет, затем наблюдаем резкий его рост, который достигает своего максимума при $P = 4,2$ GPa. При сбросе давления удельное электросопротивление падает с различными барическими коэффициентами, и при $P = 2,75$ GPa наблюдается максимум удельного электросопротивления.

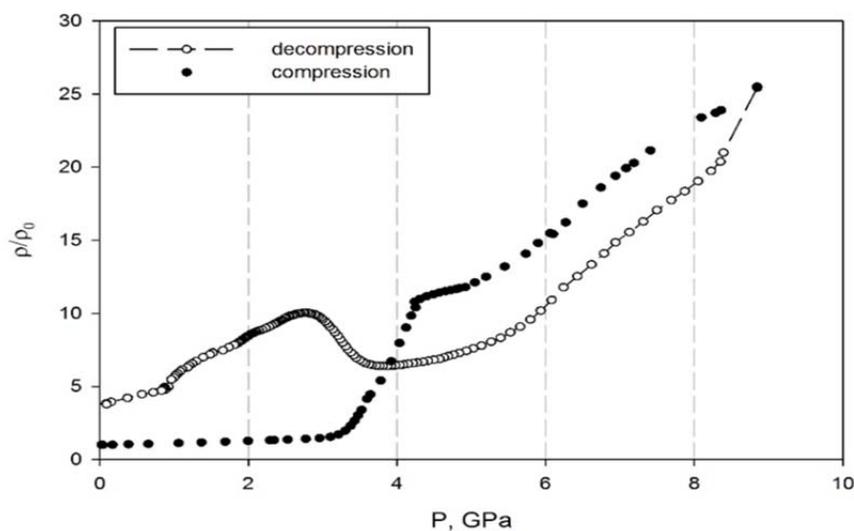


Рис. 4. Барическая зависимость удельного электросопротивления образца $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20$ mass%) при подъеме и сбросе давления

Рост удельного электрического сопротивления с давлением, вероятно, связано с объединением гранул и увеличением полупроводниковой прослойки между ними.

Такое поведение $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20$ mass%) при высоких давлениях и температурах указывает на разные механизмы переноса заряда. Для этих структур характерны различные механизмы проводимости: туннелирование электронов между грану-

лами через полупроводниковый барьер, прыжковая проводимость по локализованным состояниям с переменной длиной прыжка и механизм резонансного неупругого туннелирования между гранулами по локализованным состояниям, находящимся в полупроводниковой матрице. С ростом давления изменяется структурное состояние, связанное с дальнейшим расслоением фаз и изменениями полупроводниковой матрицы Cd_3As_2 . Для установления механизма проводимости в этих структурах нужны дальнейшие исследования электрического сопротивления.

Коэффициент Холла. На рис. 5 представлена барическая зависимость коэффициента Холла $R_H(P)$. Коэффициент Холла до давлений $P \approx 3,65$ GPa проходит через максимум, и его поведение удовлетворительно коррелирует с барической зависимостью $\rho(P)$, для которой также характерно наличие четкого пика при $P \approx 4,2$ GPa. Проведя анализ барических зависимостей концентрации и подвижности, можно сделать вывод, что при приложении давления в $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20$ mass%) имеет место структурный фазовый переход полупроводник–полупроводник.

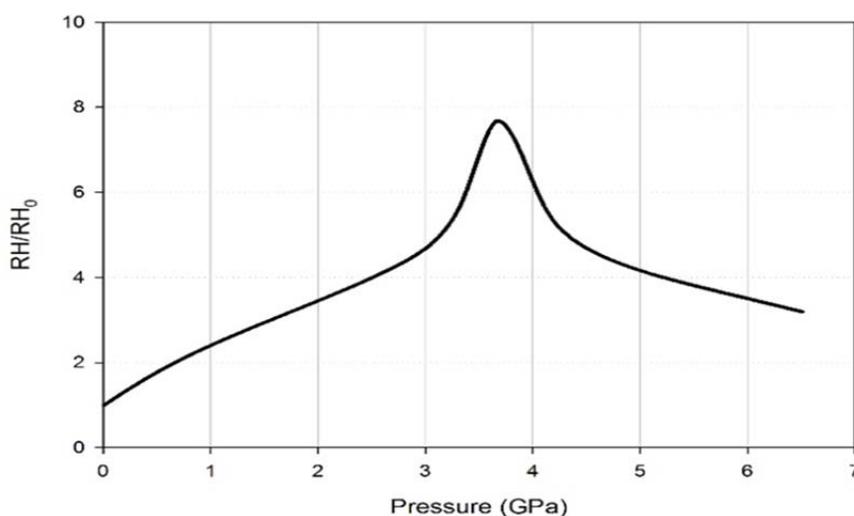


Рис. 5. Зависимость коэффициента Холла от давления для образца $Cd_3As_2 + MnAs$ ($MnAs-20$ mass%)

Магнетосопротивление. Главной особенностью кривых $\frac{MR-MR_0}{MR_0} 100\%$ (H) является наличие участка с отрицательным значением магнетосопротивления (ОМС). С увеличением давления отрицательная составляющая магнетосопротивления (МС) исчезает. МС неферромагнитных материалов, как правило, положительно, связано с действием силы Лоренца и не зависит от ориентации векторов напряженности магнитного поля и плотности тока, проходящего через образец. При давлениях $P \approx 1,0$ GPa и $P \approx 2,6$ GPa наблюдается область отрицательного магнетосопротивления. При дальнейшем увеличении давления магнетосопротивление немонотонно растет до $P \approx 4,3$ GPa – область фазового перехода (рис. 6), которая на шкале высоких давлений удовлетворительно согласуется со значениями давлений, соответствующих фазовому переходу на кривых $(\rho/\rho_0)(P)$ и $(R_H/R_{H0})(P)$. На барических зависимостях магнетосопротивления (рис. 7) при $P \approx 4$ ГПа обнаружен фазовый переход, значение которого также на шкале высоких давлений удовлетворительно согласуется со значениями фазового перехода на кривых $\rho(P)/\rho_0(P)$ и $R_H(P)/R_{H0}(P)$ (рис. 4, 5). Такое поведение магнетополе-

вых зависимостей магнетосопротивления при фиксированных давлениях в $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%) объясняется наличием двух конкурирующих механизмов рассеяния: лоренцевского и спин-зависимого рассеяния. В работе [11] объясняется механизм возникновения ОМС для ферромагнитных наноструктур: «В отсутствие магнитного поля угол между магнитными моментами ферромагнитных кластеров случаен, а при приложении магнитного поля их магнитные моменты выстраиваются вдоль поля, что приводит к заметному изменению сопротивления (уменьшению). Величина магнетосопротивления пропорциональна величине магнитного поля, косинусу углов между магнитными моментами и количеству ферромагнитных кластеров». В нашем случае уменьшение магнетосопротивления, вероятно, вызвано уменьшением расстояния между магнитными моментами гранул арсенида марганца под давлением. Приложение давления усиливает влияние магнитного поля, что приводит к возникновению ОМС, индуцированного давлением.

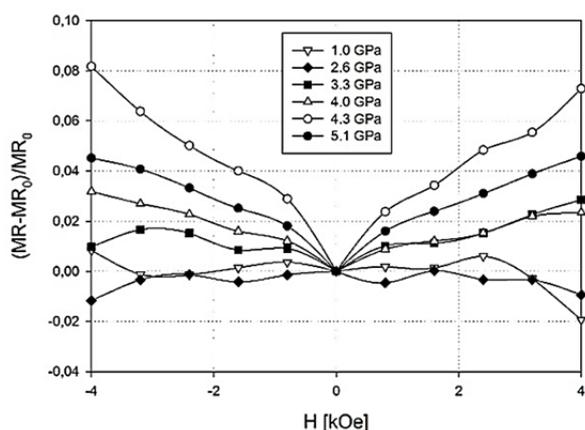


Рис. 6. Магнетополевые зависимости магнетосопротивления образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%) при фиксированных давлениях

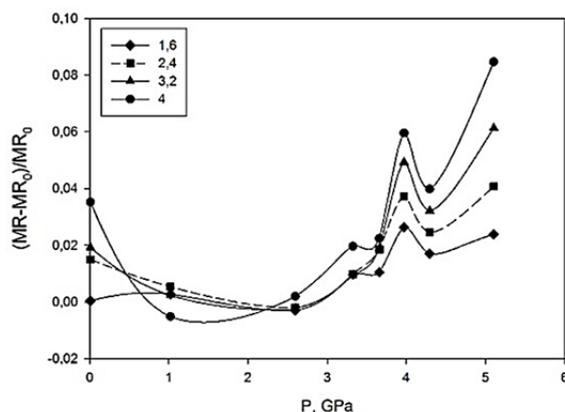


Рис. 7. Барические зависимости магнетосопротивления при фиксированных значениях магнитного поля для образца $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (MnAs –20 mass%)

Заключение

На барических зависимостях удельного электросопротивления, коэффициента Холла и магнетосопротивления обнаружены фазовые переходы, положение которых на шкале высоких давлений удовлетворительно согласуется со значениями фазового перехода на кривых $\rho/\rho_0(P)$ и $R_H/R_0(P)$. Поведение удельного электросопротивления при высоком давлении указывает на разные механизмы переноса заряда: туннелирование электронов между гранулами через полупроводниковый барьер; прыжковая проводимость по локализованным состояниям с переменной длиной прыжка. Для установления точного механизма проводимости нужны дальнейшие комплексные исследования композитов разного состава.

Главной особенностью наблюдаемой барической зависимости $\Delta\rho/\rho_0$ является наличие участка с отрицательным магнетосопротивлением.

Можно предположить, что поведение магнетопольевых зависимостей магнетосопротивления при фиксированных давлениях объясняется наличием двух конкурирующих механизмов рассеяния: лоренцевского и спин-зависимого рассеяния.

В отсутствие давления поле $H \leq 5$ кОе недостаточно для полного выравнивания магнитных моментов кластеров арсенида марганца в матрице диарсенида трикадмия. С последовательным увеличением давления влияние магнитного поля на ориентацию магнитных моментов арсенида марганца усиливается, о чем свидетельствует смена знака МС и появление ОМС.

Литература

1. Wang Z., Weng H., Wu Q., Dai X., Fang Z. Three-dimensional Diracsemimetal and quantum transport in Cd_3As_2 // Phys. Rev. – 2013. – № 88. – P. 125427.
2. 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. – № 113. – P. 027603.
3. Arushanov E.K. II_3V_2 Compounds and Alloys // Prog. Crystal Growth and Charact. – 1992. – Vol. 25. – P. 131–201.
4. Hong Lu, Zhang Xiao, Shuang Jia. Topological Phase Transition in Single Crystals of $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$, arXiv:1507.07169v1 [cond-mat.mtrl-sci] 26 Jul. – 2015. – P. 1–14.
5. Cisowski J. Semimagnetic Semiconductors Based on II-V Compounds // Phys. Stat. Sol. – 1997. – V. 200. – P. 311.
6. Aubin M.J., Caron L.G., Jay-Gerin J.-P. Band structure of cadmium arsenide at room temperature // Phys. Rev. 1977. – V. 15. – P. 3872–3878.
7. Wagner R.J., Palik E.D., Swiggard E.M. Physics of Semimetals and Narrow-Gap Semiconductors // D.L. Carter and R.T. Bate (eds.), Pergamon. – New York, 1971. – P. 471.
8. Алибеков А.Г., Моллаев А.Ю., Сайпуллаева Л.А., Маренкин С.Ф., Федорченко И.В., Риль А.И. Эффект Холла и магнетосопротивление в композите $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (30 %) при высоком давлении // Журнал неорганической химии. – 2017. – Т. 62, № 1. – С. 1–5.
9. Алибеков А.Г., Моллаев А.Ю., Сайпуллаева Л.А., Маренкин С.Ф., Федорченко И.В. Магнитотранспортные явления в гранулированных структурах $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ при высоком давлении // Неорганические материалы. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 1–4.
10. Моллаев А.Ю., Сайпулаева Л.А., Арсланов Р.К., Маренкин С.Ф. Влияние гидростатического сжатия на транспортные свойства монокристаллического диарсенида кадмия // Неорганические материалы. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 405–408.
11. Изотов А.Д., Маренкин С.Ф., Новоторцев В.М., Федоченко И.В. Синтез магнитогранулированных структур в системе полупроводник-ферромагнетик // Журнал неорганической химии. – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 343–348.

Поступила в редакцию 23 октября 2018 г.

UDC 53.092

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-51-58

Transport phenomena in the Dirac semimetal based on tricadmium diarsenide at high pressure

*L.A. Saipulaeva¹, A.G. Alibekov¹, S.F. Marenkin^{4,5}, N.V. Melnikova²,
V.S. Zakhvalinsky³, M.M. Gadjaliev¹, Z.Sh. Pirmagomedov¹, T.N. Efendieva¹*

¹ *Institute of Physics, Dagestan Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; Russia, 367003, Makhachkala, M. Yaragsky st., 94; maggadji@rambler.ru;*

² *Institute of Natural Science, Ural Federal University; Russia, 620000, Yekaterinburg, Lenin Ave., 51;*

³ *Belgorod State National Research University; Russia, 308015, Belgorod, ul. Victory, 85;*

⁴ *Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; Russia, 119991, Moscow, Lenin Avenue, 31;*

⁵ *National Research Technological University "MISiS"; Russia, 101000, Moscow, Lenin Avenue, 31*

Electrical and magnetic-field properties of the Dirac semimetal based on tricadmium diarsenide are tested under high hydrostatic pressure. The pressure and temperature dependences of the resistivity, the Hall Effect, and the magnetoresistance in transversal magnetic field are studied. Some features associated with phase transitions are found on baric dependences of the resistivity and the Hall coefficient. Field dependences indicate appearance of the pressure-induced negative magnetoresistance.

Keywords: *high pressure, Hall effect, specific resistivity, negative magnetic resistance, electric transport.*

Received 23 October, 2018