

PACS: 62.50.+p, 72.20.-i

А.Ю. Моллаев

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПИРОВАННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Институт физики Дагестанского научного центра РАН  
ул. Ярагского, 94, г. Махачкала, 367003, Россия  
E-mail: a.mollaev@mail.ru

*На базовых образцах  $CdGeAs_2$ ,  $CdGeP_2$  и высокотемпературных ферромагнитных полупроводниках  $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ,  $Cd_{1-x}Cr_xGeAs_2$  и  $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$  в аппарате высокого давления типа «тороид» измерены барические (до 9 GPa) и температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$ , коэффициента Холла  $R_H$  при 77–400 К.*

### 1. Введение

Новым перспективным направлением твердотельной электроники становится спиновая электроника (спинтроника), где наряду с зарядом спин электрона представляет собой активный элемент для хранения и передачи информации, формирования интегральных и функциональных микросхем, конструирования новых магнитооптоэлектронных приборов. Использование в устройствах спинтроники как ферромагнитных, так и полупроводниковых свойств материала, т.е. спина и заряда его электронов, выдвигает на первый план задачу поиска, синтеза и исследования новых высокотемпературных ферромагнитных полупроводников с высокоподвижными поляризованными носителями тока. В данный момент указанным требованиям отвечают алмазоподобные полупроводниковые соединения группы  $A^{II}B^{IV}C^V_2$ . Характерными свойствами для этой группы тройных полупроводников являются высокие подвижности носителей заряда, малые эффективные массы электронов и большие отношения подвижности электронов к подвижности дырок. Контролируемое введение атомов переходных элементов (Mn, Fe, Cr и др.) в кристаллическую решетку позволяет обеспечить переход этих полупроводников в ферромагнитное состояние с достаточно высокой точкой Кюри  $T_C$ . Впервые высокотемпературный ферромагнитный полупроводник с температурой  $T_C = 320$  К в виде тонкой пленки был изготовлен из  $CdGeP_2$ , легиро-

ванного Mn [1]. На тонкопленочных образцах трудно провести анализ состава по глубине слоя, получить надежные электромагнитные характеристики, что вызвало сомнения в достоверности обнаруженных результатов. Поэтому представляло интерес изготовить объемные образцы CdGeP<sub>2</sub> с различным содержанием Mn и провести исследование их электрофизических свойств. В ИОНХ РАН были получены поликристаллы диарсенида и фосфида кадмия, легированные марганцем, основные характеристики которых представлены в таблице.

Таблица

Электрофизические параметры исследованных образцов *p*-типа при комнатной температуре и атмосферном давлении

| № п/п | Образцы   | <i>x</i>           | $\rho$ , $\Omega \cdot \text{cm}$ | $R_H$ , $\text{cm}^3/\text{C}$ |
|-------|---|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1     | CdGeAs <sub>2</sub>                                 | 0.00               | 2.16                              | 964.5                          |
| 2     | Cd <sub>1-x</sub> Mn <sub>x</sub> GeAs <sub>2</sub> | 0.003              | 3.0                               | 504                            |
| 3     |   | 0.053              | 1.68                              | 142                            |
| 4     |   | 0.06               | 10                                | 2250                           |
| 5     |   | 0.18               | 0.23                              | 10                             |
| 6     |   | 0.30               | 0.62                              | 5                              |
| 7     |   | 0.36               | 0.12                              | 0.5                            |
| 8     |   | CdGeP <sub>2</sub> | 0.00                              | 27.5                           |
| 9     | Cd <sub>1-x</sub> Mn <sub>x</sub> GeP <sub>2</sub>  | 0.09               | 3.02                              | 20                             |
| 10    |   | 0.19               | 0.72                              | 3                              |

*Примечание.* *x* – содержание марганца,  $\rho$  – удельное электросопротивление,  $R_H$  – сопротивление Холла.

## 2. Методика и техника эксперимента

Измерения проводили на моно- и поликристаллических образцах *p*-Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>GeAs<sub>2</sub> и Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>GeP<sub>2</sub> в аппаратах высокого давления типа «тороид» при гидростатических давлениях до  $P \leq 9$  GPa в области комнатных температур при подъеме и сбросе давления. Аппарат «тороид» помещался в соленоид с напряженностью  $H \leq 5$  кОе. В качестве рабочей ячейки использовали фторопластовую капсулу полезным объемом  $\sim 80$  мм<sup>3</sup>, которая имела 8 электровыводов, что позволяло одновременно измерить два кинетических эффекта и давление. Давление контролировали по манганиновому манометру, отградуированному по нескольким реперным точкам во всем диапазоне давлений. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами  $3 \times 1 \times 1$  мм, однородность образцов контролировали по значениям удельного электросопротивления и коэффициента Холла четырехзондовым методом. Более подробно методика и техника эксперимента описаны в работах [2,3]. Основные электрофизические характеристики изученных образцов представлены в таблице.

### 3. Результаты измерений и обсуждения

Барические зависимости удельного электросопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла  $R_H$  для всех исследованных образцов  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$  представлены на рис. 1. Во всех образцах № 1, 4, 7 при давлениях  $P = 5.9; 5.7; 5.5; 5.4; 5.2; 4.9; 4.8$  ГПа на зависимостях  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  обнаружены структурные фазовые переходы при подъеме давления. При давлениях  $P = 2.9; 2.8; 2.7; 2.6; 2.5; 2.4; 2.3$  ГПа эти переходы обнаружены и при сбросе давления. Из рис. 2 видно, что точка фазового перехода при подъеме давления

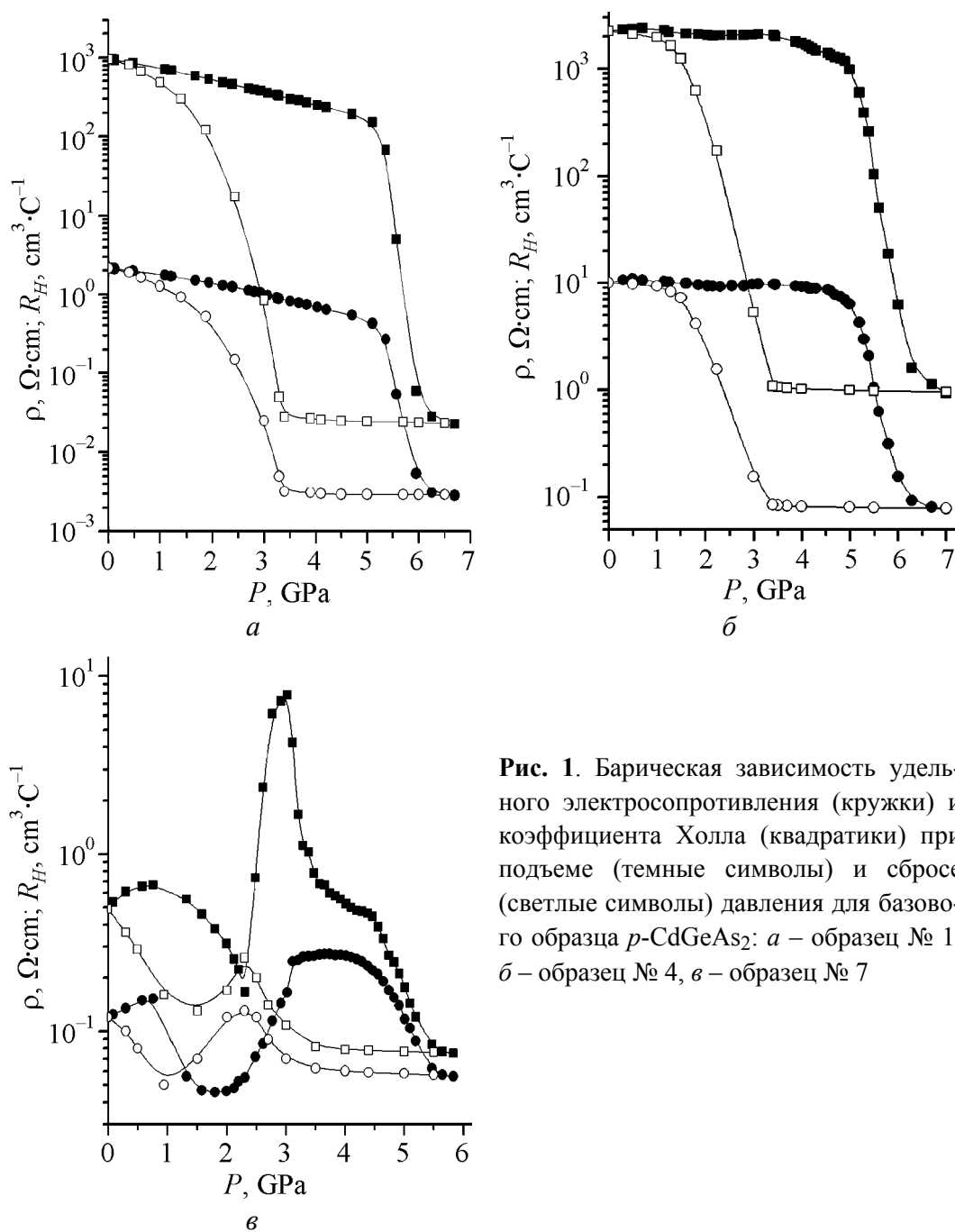
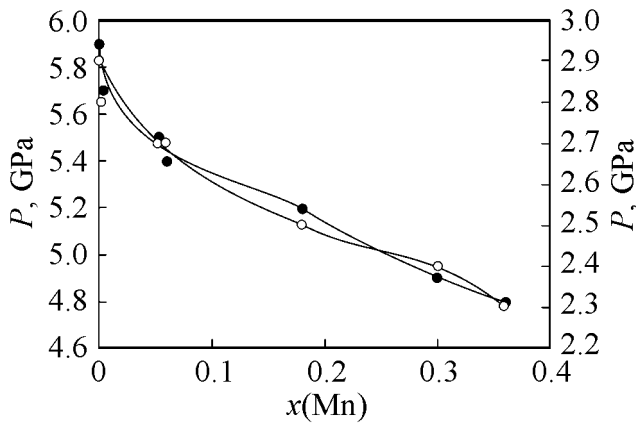


Рис. 1. Барическая зависимость удельного электросопротивления (кружки) и коэффициента Холла (квадратики) при подъеме (темные символы) и сбросе (светлые символы) давления для базового образца  $p\text{-CdGeAs}_2$ : а – образец № 1, б – образец № 4, в – образец № 7



**Рис. 2.** Зависимость положения точки фазового перехода для образца  $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$  от процентного содержания легирующего элемента (Mn) при подъеме давления (левая шкала, темные символы) и при его сбросе (правая шкала, светлые символы)

сдвигается в сторону низких давлений с увеличением процентного содержания марганца. Аналогичная картина наблюдается для точек фазового перехода при сбросе давления. Отношение давлений точки фазового перехода при подъеме давления к точке фазового перехода при сбросе давления составляет  $P_{ФП}/P'_{ФП} = 2-2.1$ , т.е. разница сравнима с ошибкой эксперимента.

На рис. 1,а представлены барические зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла для базового образца  $CdGeAs_2$ . Из рисунка видно, что удельное сопротивление до давлений  $P = 5.3$  GPa при подъеме давления медленно уменьшается и при давлении  $P \geq 5.3$  GPa резко падает почти на три порядка, начинается фазовый переход, а при давлении  $P > 6.5$  GPa выходит на насыщение. Отношение удельного электросопротивления при атмосферном давлении к удельному сопротивлению в области насыщения  $\rho_0/\rho_{sat} = 763$ . В области насыщения удельная электропроводность  $\sigma = 353 \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ , что превышает теоретически рассчитанные значения минимальной проводимости, которая составляет  $\sigma = 200 \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$  [4]. Это позволяет утверждать, что имеет место металлическая проводимость. При сбросе давления наблюдается гистерезис, и при давлении  $P = 2.9$  GPa происходит фазовый переход. Значение удельного электросопротивления при атмосферном давлении и при сбросе давления до  $P = 0$  идентичны, т.е.  $\rho_0 = \rho'_0$ .

Коэффициент Холла при подъеме давления до давлений  $P = 5.1$  GPa также медленно уменьшается, затем при давлении  $P = 5.1$  GPa падает скачком почти на 5 порядков и при  $P > 6.5$  GPa выходит на насыщение. В области насыщения концентрация носителей заряда  $p \approx 2.8 \cdot 10^{20} cm^{-3}$ , что еще раз указывает на металлический характер проводимости в области насыщения. При сбросе давления наблюдается значительный гистерезис, и при  $P = 2.9$  GPa происходит фазовый переход, причем  $R_{H_0} = R'_{H_0}$ . Из вышеизложенного следует, что на базовом образце  $p$ - $CdGeAs_2$  наблюдается обратимый структурный фазовый переход полупроводник–металл.

Рассмотрим барическую зависимость удельного электросопротивления на образце  $Cd_{0.94}Mn_{0.06}GeAs_2$  (рис. 1,б). При подъеме давления удельное сопротивление до давлений  $P = 4.7$  GPa меняется очень слабо, затем при  $P =$

= 4.7 GPa резко падает на 2 порядка и при  $P = 6.1$  GPa фазовый переход заканчивается:  $\rho_0/\rho_{\text{sat}} = 12$ ,  $\sigma_{\text{sat}} = 12.3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $\rho_0 = \rho'_0$ . При сбросе давления на кривой  $\rho(P)$ , как и при  $P_{\text{ФП}} = 2.7$  GPa, также наблюдается фазовый переход.

Зависимость коэффициента Холла от давления аналогична. В области фазового перехода величина  $R_H$  падает на 3 порядка. Концентрация носителей в области насыщения  $p \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $R_{H_0} = R'_{H_0}$ . Таким образом, по значениям удельной электропроводности и коэффициента Холла до и после фазового перехода можно заключить, что в образце  $p\text{-Cd}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{GeAs}_2$  имеет место обратимый структурный переход полупроводник–полупроводник.

Теперь рассмотрим образец  $p\text{-Cd}_{0.64}\text{Mn}_{0.36}\text{GeAs}_2$  (рис. 1,б). Удельное электросопротивление до давлений  $P \approx 0.8$  GPa слабо растет, затем падает и при  $P \approx 2$  GPa достигает минимума, затем при  $P \approx 3$  GPa выходит на насыщение и при  $P \approx 4.1$  GPa падает, начинается фазовый переход. При  $P \approx 5.6$  GPa фазовый переход заканчивается. Удельное электросопротивление выходит на насыщение. В области насыщения удельная электропроводность  $\sigma \approx 17.8 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $\rho_0 = \rho'_0$ . Зависимость коэффициента Холла от давления также носит сложный характер. До  $P \approx 0.8$  GPa его величина почти не меняется, затем растет до  $P = 1.6$  GPa и достигает максимума, затем падает при  $P \approx 2.3$  GPa, затем вновь растет, при  $P \approx 3$  GPa достигает максимума и при  $P = 5.6$  GPa выходит на насыщение. В области насыщения концентрация носителей заряда  $p \approx 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , т.е. достигается металлическая проводимость. Таким образом, можно считать, что в

$p\text{-Cd}_{0.64}\text{Mn}_{0.36}\text{GeAs}_2$  наблюдается переход полупроводник–металл. Наблюдаемые аномалии на кривых  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  можно, по всей вероятности, объяснить магнитными свойствами образцов или наличием примесных центров.

На рис. 3 представлены температурные зависимости  $\rho$  и  $R_H$  в диапазоне температур 77–400 К для образца № 6.

На зависимостях  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$  при  $T_C^{\rho} \approx 272 \pm 1$  К и  $T_C^{R_H} \approx 262 \pm 1$  К соответственно обнаружены аномалии в виде изломов, которые могут быть интерпретированы как магнитный фазовый переход из ферро- в парамагнитное состояние. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными работы [5]. Температурная зависимость удельного электросопротивления в парамагнитном состоянии с хорошей точностью описывается акти-

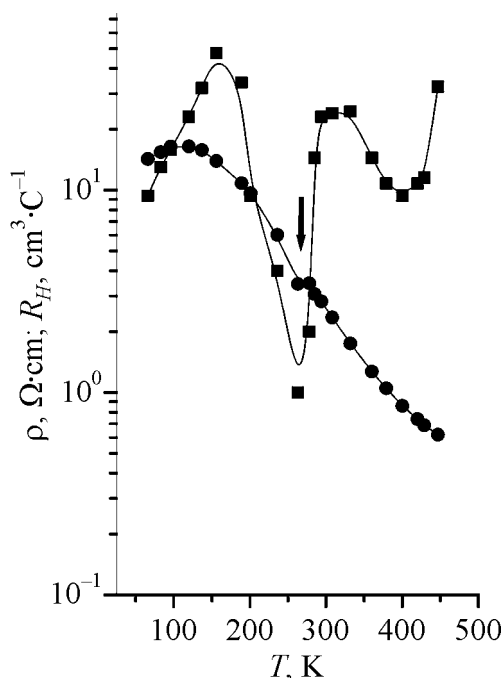


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления  $\rho$  (—●—) и коэффициента Холла  $R_H$  (—■—), измеренные для  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{GeAs}_2$

вационным законом  $\rho(T) \sim \exp(E_g/k_B T)$  с энергией активации  $E_a = 155$  meV. При этом рост удельного электросопротивления, наблюдаемый в низкотемпературной многоупорядоченной фазе ( $T < T_C$ ) (рис. 3), указывает на полупроводниковый характер основного состояния образца  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$ .

На рис. 4 представлены результаты измерения удельного электросопротивления и коэффициента Холла для базового образца № 8  $\text{CdGeP}_2$  (а), для образцов № 9  $\text{Cd}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}\text{GeP}_2$  (б) и № 10  $\text{Cd}_{0.81}\text{Mn}_{0.19}\text{GeP}_2$  (в).

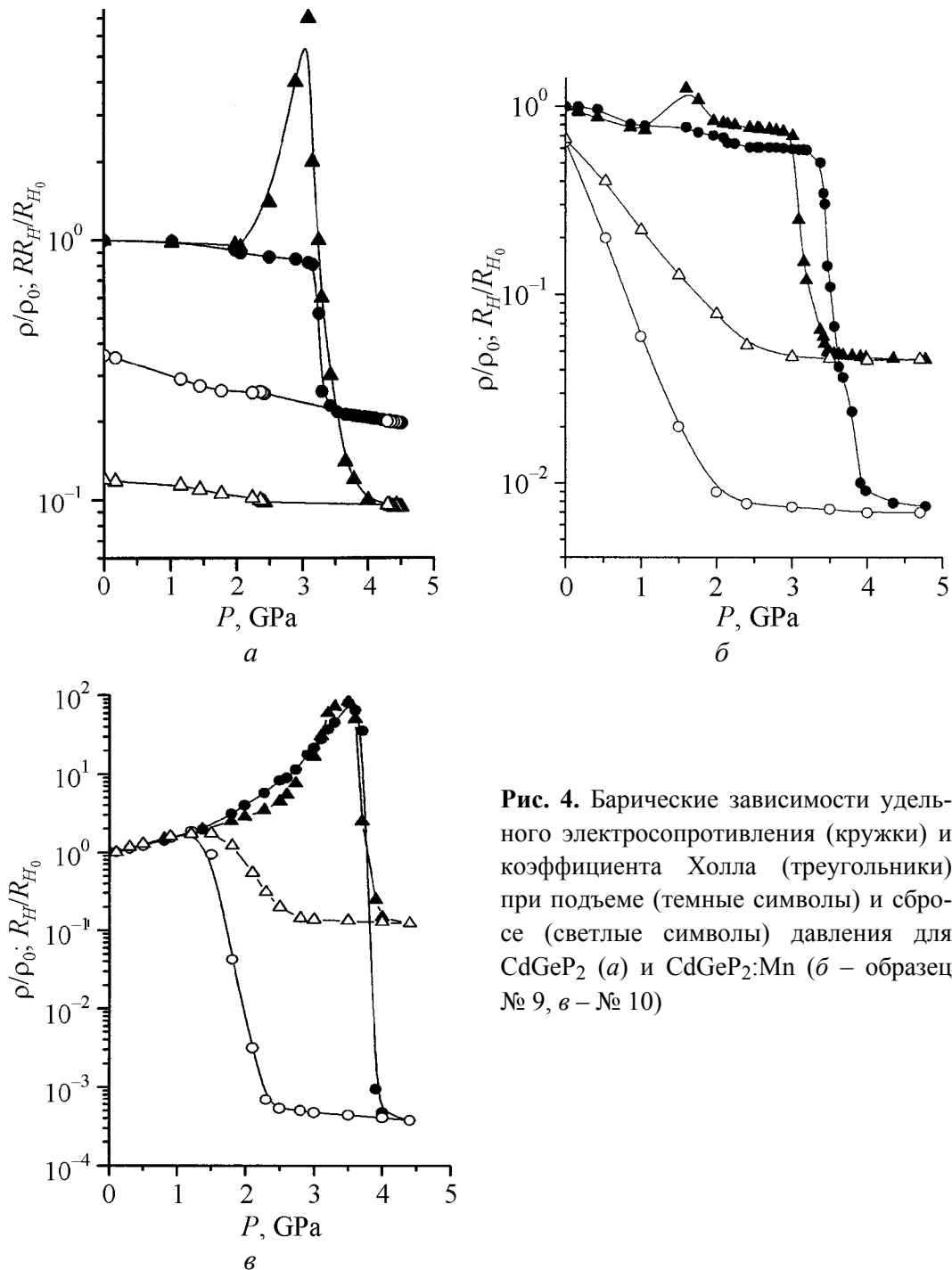


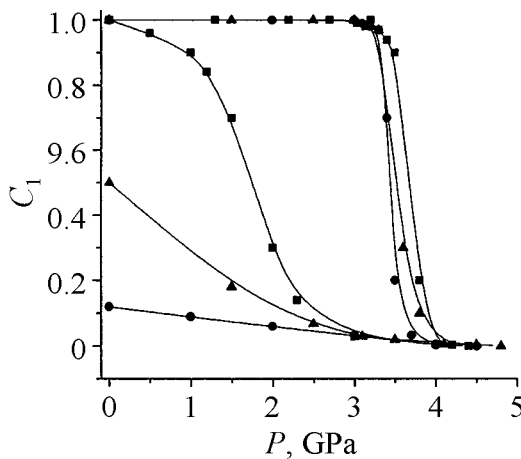
Рис. 4. Барические зависимости удельного электросопротивления (кружки) и коэффициента Холла (треугольники) при подъеме (темные символы) и сбросе (светлые символы) давления для  $\text{CdGeP}_2$  (а) и  $\text{CdGeP}_2:\text{Mn}$  (б – образец № 9, в – № 10)

Из рис. 4,а видно, что в образце № 8 удельное электросопротивление очень медленно снижается с ростом давления и при  $P = 3.2$  GPa значение  $\rho$  резко падает почти на порядок, наступает фазовый переход. При давлении  $P \geq 4$  GPa кривая  $\rho(P)$  выходит на насыщение, фазовый переход заканчивается. То, что  $\rho(P)$  до фазового перехода растет слабо, вероятно, можно объяснить тем, что с ростом давления происходит взаимокompенсация изменения концентрации и подвижности носителей заряда. Прямая линия при декомпрессии указывает на то, что происходит разложение  $\text{CdGeP}_2$  на  $\text{Cd}_3\text{P}_2 + \text{GeP} + \text{P}$ , как в работе [6]. В области насыщения электропроводность  $\sigma = 43 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , что характерно для вырожденных полупроводников. Коэффициент Холла до давлений  $P \approx 2$  GPa не меняется и при  $P > 2$  GPa резко (в 7 раз) возрастает, при  $P \approx 3$  GPa наступает фазовый переход, затем  $R_H$  падает приблизительно в 70 раз, и при  $P > 4$  GPa кривая  $\rho(P)$  выходит на насыщение, концентрация носителей составляет  $\sim 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Такие значения электропроводности  $\sigma = 43 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  и концентрации носителей  $p = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  позволяют утверждать, что в  $\text{CdGeP}_2$  имеет место фазовый переход полупроводник–полупроводник.

В образце № 9 (рис. 4,б) удельная электропроводность слабо понижается до давлений  $P \approx 3.3$  GPa, при давлении  $P \approx 3.3$  GPa резко (почти на 2 порядка) падает, начинается фазовый переход, и при  $P > 3.5$  GPa кривая выходит на насыщение. Электропроводность в области насыщения  $\sigma = 290 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Коэффициент Холла при давлениях до  $P < 3.5$  GPa также резко (больше чем на порядок) падает, начинается фазовый переход. При  $P \approx 4$  GPa кривая  $R_H(P)$  выходит на насыщение, в области насыщения  $p = 6.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Значения концентрации носителей  $p = 6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  и электропроводности  $\sigma \approx 290 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  позволяют утверждать, что происходит фазовый переход полупроводник–металл.

В образце № 10 (рис. 4,в) удельная электропроводность и коэффициент Холла до давлений  $P = 3.5$  GPa и  $P = 3.4$  GPa возрастают с различными барическими коэффициентами, достигают максимума при  $P = 3.5$  GPa и затем резко падают (удельное электросопротивление – почти на 6 порядков, а коэффициент Холла – на 2 порядка), наступает фазовый переход. При давлениях  $P > 4$  GPa фазовый переход заканчивается, в области насыщения концентрация и подвижность носителей заряда составляют  $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  и  $\sim 500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  соответственно, что характерно для вырожденного полупроводника. Таким образом, в образце № 10 происходит фазовый переход полупроводник–полупроводник.

Теперь рассмотрим обратный ход кривых  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  для образцов № 8–10. В образце № 8 он имеет вид прямой. По аналогии с результатами, полученными в [6], можно сделать вывод о том, что при приложении давления в  $\text{CdGeP}_2$  происходит необратимый фазовый переход с разложением вещества на составляющие.



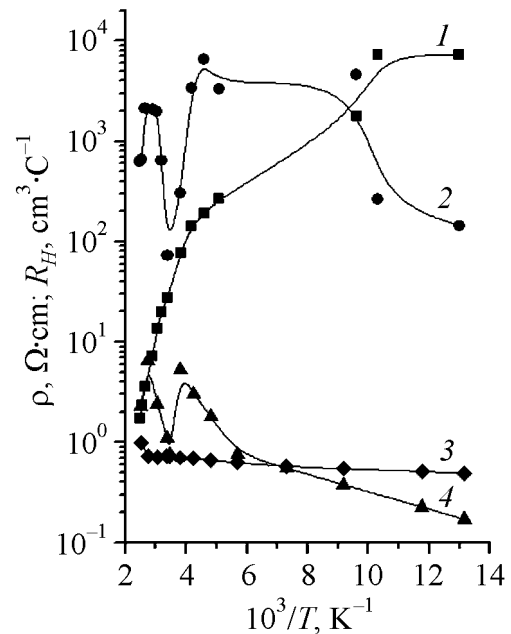
**Рис. 5.** Зависимость объемной доли исходной фазы  $C_1$  от давления для  $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$  при подъеме и сбросе давления: ● – образец № 8, ▲ – образец № 9, ■ – образец № 10

Динамика исходной фазы  $C_1$  с изменением давления рассчитана на основе модели гетерофазная система–эффективная среда [7,8]. Из рис. 5 видно, что исходная фаза  $C_1$  в образце № 8 восстанавливается на 10%, в образце № 9 – на 50% и в образце № 10 – полностью, т.е. процесс является обратимым. Полученные результаты подтверждаются данными рентгенофазового анализа, проведенного на образцах после снятия давления. На дифрактограмме образца  $CdGeP_2$  наблюдаются пики, соответствующие  $CdP_2$  и Ge – барическое разложение полное. На дифрактограмме образца  $Cd_{0.91}Mn_{0.09}GeP_2$  кроме пиков, относящихся к фазам  $CdP_2$  и Ge, наблюдаются пики  $CdGeP_2$  – разложение частичное. На дифрактограмме образца  $Cd_{0.81}Mn_{0.19}GeP_2$  наблюдаются только пики, соответствующие  $CdGeP_2$ , – барическое разложение отсутствует. Таким образом, увеличение содержания марганца усиливает барическую устойчивость образца  $CdGeP_2$ .

Результаты измерений температурных зависимостей  $\rho$  и  $R_H$  для образцов  $CdGeP_2$  и  $Cd_{0.91}Mn_{0.09}GeP_2$  *p*-типа

Из хода кривых  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  для образца № 9 видно, что при сбросе давления имеет место фазовый переход при  $P = 2.3$  GPa. Однако, поскольку значения  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  до приложения и после снятия давления несколько разнятся, мы делаем вывод, что имеет место необратимый фазовый переход с частичным разложением вещества.

В образце № 10 значения  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  до и после приложения давления совпадают, т.е. имеет место обратимый структурный фазовый переход. При декомпрессии при  $P = 2.3$  GPa наблюдается четкий структурный фазовый переход.



**Рис. 6.** Температурные зависимости удельного сопротивления  $\rho$  (кривая 1 – образец № 8, кривая 3 – образец № 9) и коэффициента Холла  $R_H$  (кривая 2 – образец № 8, кривая 4 – образец № 9)



представлены на рис. 6. Как видим, для образца  $\text{CdGeP}_2$  значение удельного сопротивления  $\rho$  резко увеличивается с понижением температуры, причем  $\lg \rho$  пропорционален  $1/T$ , что типично для случая достаточно сильной компенсации. В образце  $\text{Cd}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}\text{GeP}_2$  с более высоким значением концентрации дырок при комнатной температуре удельное сопротивление уменьшается по абсолютной величине и при этом достаточно слабо зависит от температуры. Коэффициент Холла в области низких ( $T \geq 160$  К) температур начинает уменьшаться, что свидетельствует об участии в проводимости акцепторных уровней с энергией ионизации  $E_a \leq 0.02$  eV. Из температурных зависимостей  $\rho$  и  $R_H$  следует, что образцы  $\text{CdGeP}_2$  и  $\text{Cd}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}\text{GeP}_2$  в исследованном интервале температур обнаруживают примесную проводимость. Ход кривой  $R_H(T)$  может быть интерпретирован с помощью простой модели с одним сортом носителей заряда.

#### 4. Заключение

В заключение следует отметить, что исследованные образцы  $\text{CdGeAs}_2:\text{Mn}$  условно можно разбить на 3 группы: 1) базовый образец № 1  $\text{CdGeAs}_2$  и слаболегированный образец № 2  $p\text{-Cd}_{0.897}\text{Mn}_{0.003}\text{GeAs}_2$ ; 2) образцы № 3  $\text{Cd}_{0.947}\text{Mn}_{0.053}\text{GeAs}_2$  и № 4  $\text{Cd}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{GeAs}_2$ , на которых не обнаружены аномалии на барических зависимостях коэффициента Холла; 3) образцы, на которых наблюдаются аномалии на кривой зависимости  $R_H(P)$ , —  $\text{Cd}_{0.82}\text{Mn}_{0.18}\text{GeAs}_2$  и  $\text{Cd}_{0.64}\text{Mn}_{0.36}\text{GeAs}_2$ . Особняком стоит образец  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{GeAs}_2$ , в котором, несмотря на достаточно высокую степень легирования, никаких аномалий на барической зависимости коэффициента Холла мы не обнаружили. На всех образцах наблюдаются структурные обратимые фазовые переходы, положение которых сдвигается в сторону низких давлений с увеличением процентного содержания легирующего элемента марганца. В какую модификацию переходит халькопирит при фазовом переходе, без рентгеноструктурных исследований под давлением мы сказать не можем.

В образцах  $\text{CdGeP}_2$  и  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeP}_2$  имеет место структурный фазовый переход, который также сдвигается в сторону высоких давлений с увеличением процентного содержания марганца. Определена энергия ионизации мелкого акцепторного уровня  $E_a \sim 0.02$  eV при атмосферном давлении, которая хорошо согласуется с литературными данными.

Исследованные образцы  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$  и  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeP}_2$  могут быть использованы в качестве датчиков давления в диапазоне  $P = 3.2\text{--}5.9$  GPa.

Работа выполнена при финансовой поддержке подпрограммы № 3 «Физика и механика сильно сжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет» Программы Президиума РАН П-09 «Исследование вещества в экстремальных условиях».

1. Г.А. Медведкин, Т. Ишибаши, Т. Ниши, К. Сато, ФТП **35**, 305 (2001).
2. А.Ю. Моллаев, Л.А. Сайпулаева, Р.К. Арсланов, С.Ф. Маренкин, Неорган. материалы **37**, 403 (2001).
3. А.Ю. Моллаев, Р.К. Арсланов, М.И. Даунов, Л.А. Сайпулаева, ФТВД **13**, № 1, 29 (2003).
4. Н. Мотт, Э. Дэвис, Электронные процессы в некристаллических веществах, Т.1, Мир, Москва (1982).
5. Р.В. Демин, Л.И. Королева, С.Ф. Маренкин, В.М. Новоторцев, В.Т. Калинин, Т.Г. Аминов, Письма ЖТФ **30**, в. 21, 81 (2004).
6. А.Ю. Mollaev, I.K. Kamilov, M.I. Daunov, R.K. Arslanov, A.B. Magomedov, L.A. Saipulaeva, S.F. Gabibov, High Pressure Research **26**, 445 (2006).
7. М.И. Даунов, М.С. Буттаев, А.Б. Магомедов, Сверхпроводимость: физика, химия, техника **5**, 73 (1992).
8. М.И. Даунов, А.Б. Магомедов, А.Ю. Моллаев, С.М. Салихов, Л.А. Сайпулаева, Сверхтвердые материалы № 3, 3 (1992).

*А.Ю. Моллаев*

## КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОПІЙОВАНИХ ФЕРОМАГНІТНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ ПРИ ВИСОКОМУ ТИСКУ

На базових зразках  $\text{CdGeAs}_2$ ,  $\text{CdGeP}_2$  і високотемпературних ферромагнітних напівпровідниках  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$ ,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Cr}_x\text{GeAs}_2$  і  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeP}_2$  в апараті високого тиску типу «тороїд» зміряно баричні (до 9 GPa) і температурні залежності питомого електроопору  $\rho$ , коефіцієнта Хола  $R_H$  при 77–400 К.

*А.Ю. Mollaev*

## COMPLEX STUDY OF DOPED FERROMAGNETIC SEMICONDUCTORS UNDER HIGH PRESSURE

Baric (up to 9 GPa) and temperature dependences of resistivity  $\rho$ , Hall coefficient  $R_H$  in the 77–400 K temperature range have been measured on base samples  $\text{CdGeAs}_2$ ,  $\text{CdGeP}_2$  and high-temperature ferromagnetic semiconductors  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$ ,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Cr}_x\text{GeAs}_2$  and  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeP}_2$  in a high-pressure device of «thoroid» type.

**Fig. 1.** Baric dependence of resistivity (circles) and Hall coefficient (squares) at rise (dark symbols) and fall (light symbols) of pressure for the base sample  $p\text{-CdGeAs}_2$ : *a* – sample № 1, *b* – sample № 4, *c* – sample № 7)

**Fig. 2.** The dependence of phase transition point location on concentration of doping element (Mn) for  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$  sample at pressure rise (left scale, dark symbols) and fall (right scale, light symbols)

**Fig. 3.** Temperature dependences of resistivity  $\rho$  (—●—) and Hall coefficient  $R_H$  (—■—) measured for  $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{GeAs}_2$

**Fig. 4.** Baric dependences of resistivity (circles) and Hall coefficient (triangles) at pressure rise (dark symbols) and fall (light symbols) for CdGeP<sub>2</sub> (*a*) and for CdGeP<sub>2</sub>:Mn (*b* – sample № 9, *c* – № 10)

**Fig. 5.** Dependence of a volume share of initial phase  $C_1$  on pressure for Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>GeP<sub>2</sub> at rise and fall of pressure: ● – sample № 8, ▲ – sample № 9, ■ – sample № 10

**Fig. 6.** Temperature dependences of resistivity  $\rho$  (curve 1 – sample № 8, curve 3 – sample № 9) and Hall coefficient  $R_H$  (curve 2 – sample № 8, curve 4 – sample № 9)