

PACS: 72.20.-i, 72.10.-d, 07.35.+k, 72.80.-r

Л.А. Сайпулаева<sup>1</sup>, А.В. Тебеньков<sup>2</sup>, М.М. Гаджиалиев<sup>1</sup>,  
Т.Н. Эфендиева<sup>1</sup>, Н.В. Мельникова<sup>2</sup>, А.Н. Бабушкин<sup>2</sup>,  
А.И. Риль<sup>3</sup>, С.Ф. Маренкин<sup>3,4</sup>, В.С. Захвалинский<sup>5</sup>

## БАРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ CdAs<sub>2</sub>

<sup>1</sup>Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, Институт естественных наук и математики, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>5</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2020 года

*Приведены результаты барических исследований электросопротивления в диарсениде кадмия. В диапазоне давлений от 16 до 50 GPa диарсенид кадмия испытывает два структурных изменения, которые полностью обратимы и воспроизводятся при последующих циклах приложения давлений.*

**Ключевые слова:** высокие давления, электросопротивление, фазовые переходы, монокристаллы, полупроводник

### Введение

Между кадмием и мышьяком возможно образование четырех соединений Cd<sub>3</sub>As<sub>2</sub>, CdAs<sub>2</sub>, CdAs и CdAs<sub>4</sub>. Первые два образуются при обычных давлениях. Фаза CdAs существует при высоких давлениях. Наиболее ранние работы по исследованию системы кадмий–мышьяк приведены в [1]. Методом дифференциального термического анализа был установлен фазовый переход для CdAs<sub>2</sub> при  $P \sim 6$  GPa. В работах [2,3] давление перехода определено как центр петли гистерезиса между прямым и обратным переходами и составило 5.5 GPa. Максимальное давление, прикладываемое к образцу, в указанных работах не превышало 9 GPa. Осталась невыясненной структура новой фазы высокого давления, известно лишь, что это переход полупроводник–полупроводник и что он полностью обратим при снятии давления.

В данной статье представлены результаты исследования сопротивления в  $n$ -CdAs<sub>2</sub> в условиях влияния высокого давления до 50 GPa.

### Методика исследования электросопротивления

Монокристаллы диарсенида кадмия были получены методом направленной кристаллизации расплава по методу Бриджмена [4].

Электросопротивление образца измеряли при высоком давлении по следующей схеме. Прикладывали постоянное напряжение на контактах ячейки высокого давления, в которую был помещен образец. После того, как стабилизировалось значение тока, протекающего через ячейку, оценивали величину электрического сопротивления (при атмосферном давлении). Далее повышали давление от  $P \sim 16$  GPa до максимального  $P \sim 50$  GPa. При каждом значении увеличивающейся нагрузки образец выдерживали некоторое время перед тем, как провести измерение, дожидаясь стабилизации тока. Затем при последующем постепенном снижении давления до исходного также проводили оценку электросопротивления. Давления до 50 GPa создавали в камерах высокого давления (КВД) с наковальнями из искусственных алмазов типа «карбонадо», которые являются хорошими проводниками, что позволяет исследовать электрические свойства образцов, помещенных в КВД. Принцип создания давлений до 50 GPa, технические характеристики и градуировка КВД описаны в деталях в работах [5–7].

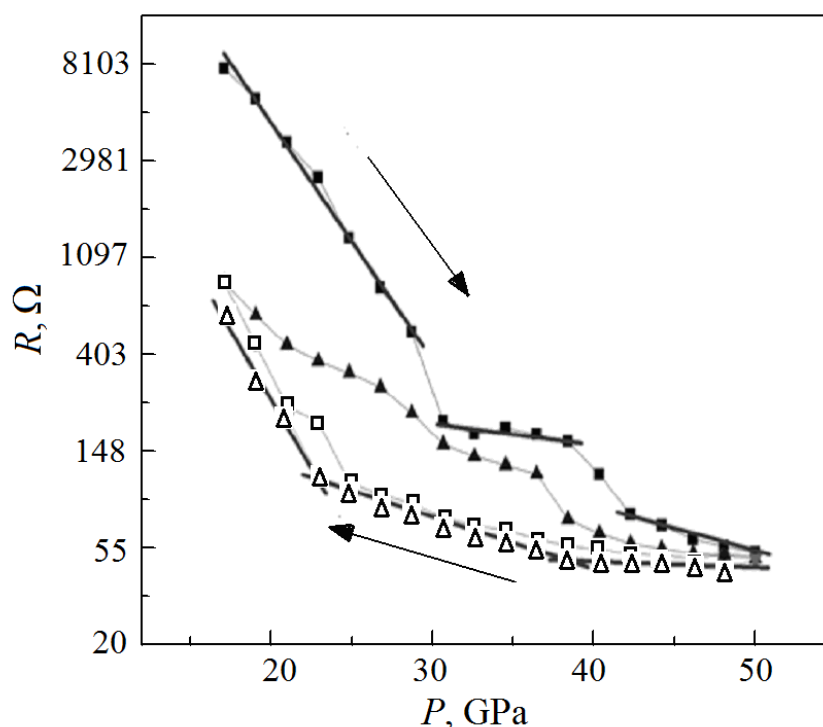
### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Барическая зависимость электросопротивления диарсенида кадмия в полулогарифмических координатах представлена на рисунке. На графике показаны два полных цикла повышения и снижения давления для одного и того же образца. Циклирование давления необходимо для отслеживания обратимости наблюдаемых изменений, так как почти всегда присутствует некоторый гистерезис между значениями электросопротивления при увеличении и уменьшении давления. Гистерезис обусловлен изменением толщины образца во время нагрузки в результате компактизации порошка частичного экструдирования из зоны контакта наковален. Второй и последующие циклы имеют намного меньшую (по сравнению с первым циклом) по ширине петлю гистерезиса и не изменяются с ростом количества циклов.

Для большинства полупроводников, если не происходят фазовые переходы, должна наблюдаться почти линейная зависимость логарифма сопротивления от прикладываемой нагрузки [8]. Подобное можно наблюдать и в случае CdAs<sub>2</sub> (см. рисунок).

На графике для первого цикла повышения давления с некоторым приближением можно выделить три участка, где наблюдаются монотонные за-

висимости, близкие к линейной, с границами  $P$ , GPa: 16–28, 30–38 и 42–50. Кривая, соответствующая снижению давления, также разбивается на три линейных участка, но уже с другими границами  $P$ , GPa: 16–22, 22–38 и 38–50. Подобный гистерезис по давлению наблюдается во многих соединениях и связан, вероятно, с существованием метастабильных состояний при декомпрессии. Ветвь повторного нагружения качественно повторяет график первого цикла нагружения, за исключением небольшого смещения давлений разделения на линейные участки.



**Рис.** Барическая зависимость электросопротивления  $\text{CdAs}_2$  и ее линейная аппроксимация: ■, □ и ▲, △ – соответственно 1-й и 2-й циклы повышения (зачерненные значки) и понижения (незачерненные) давления

В диапазоне  $P = 16\text{--}50$  GPa диарсенид кадмия испытывает два структурных изменения, которые полностью обратимы и воспроизводятся при последующих циклах приложения давлений. О природе и характере данных изменений пока говорить сложно, поскольку нет возможности отличить структурные изменения от, например, перестройки электронных конфигураций атомов. С ростом давления электросопротивление  $\text{CdAs}_2$  уменьшается на три порядка, и соединение переходит в состояние с высокой проводимостью, вызванное или малой шириной запрещенной зоны, или появлением большого числа донорных уровней в запрещенной зоне и увеличением количества носителей заряда. Значения ширины запрещенной зоны и энергии

активации донорного уровня в  $\text{CdAs}_2$  составили соответственно 1 и 0.02 eV. Изучение нелегированных образцов  $n\text{-CdAs}_2$  показало, что в запрещенной зоне имеются один мелкий донорный уровень с энергией  $\varepsilon_{1c} \leq 0.02$  eV и два глубоких с  $\varepsilon_{2c} = 0.26$  eV,  $\varepsilon_{3c} = 0.42$  eV (индекс  $c$  означает, что энергия отсчитывается от дна зоны проводимости).

Предварительные данные еще не позволяют говорить о металлизации, так как сопротивление образца при  $P = 50$  GPa остается выше сопротивления короткозамкнутых наковален.

### Выводы

Представленные зависимости свидетельствуют о том, что в диапазоне давлений от 16 до 50 GPa в диарсениде кадмия происходят два структурных изменения, которые полностью обратимы и воспроизводятся при последующих циклах приложения давлений. Природу и характер этих изменений пока рано обсуждать. Электросопротивление  $\text{CdAs}_2$  с ростом давления уменьшается на три порядка, и соединение переходит в состояние с высокой проводимостью.

1. *J.B. Clark, K.-J. Range, Zeitschrift für Naturforschung* **B30**, 688 (1975).
2. *А.Ю. Моллаев, Л.А. Сайпулаева, А.Г. Алибеков, С.Ф. Маренкин, А.Н. Бабушкин, Физика и техника полупроводников* **43**, 730 (2009).
3. *А.Ю. Моллаев, С.Ф. Маренкин, С.А. Варнавский, Инженерная физика* № 2, 6 (2005).
4. *С.Ф. Маренкин, А.М. Раухман, А.Б. Маймасов, В.А. Попов, Неорган. материалы* **33**, 1439 (1997).
5. *L.F. Vereshchagin, E.N. Yakovlev, B.V. Vinogradov, G.N. Stepanov, K.Kh. Bibaev, T.I. Alaeva, V.P. Sakun, High Temp. High Press.* **6**, 499 (1974).
6. *A.N. Babushkin, G.I. Pilipenko, F.F. Gavrilov, J. Phys.: Condens. Matter* **5**, 8659 (1993).
7. *A.N. Babushkin, High Press. Res.* **6**, 349 (1992).
8. *К. Зеегер, Физика полупроводников, Мир, Москва* (1977).

*L.A. Saypulaeva, A.V. Teben'kov, M.M. Gadjaliev,  
T.N. Efendieva, N.V. Melnikova, A.N. Babushkin,  
A.I. Ril, S.F. Marenkin, V.S. Zakhvalinskii*

### BARIC DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF $\text{CdAs}_2$

The results of the baric studies for electrical resistance in cadmium diarsenide are presented. In the pressure range from 16 to 50 GPa, cadmium diarsenide undergoes by two completely reversible structural changes, which are reproduced during the subsequent cycles of the pressure treatment.

**Keywords:** high pressures, electrical resistance, phase transitions, single crystals, semiconductor

**Fig.** Baric dependence of the electrical resistance of CdAs<sub>2</sub> and its linear approximation:  
■, □ and ▲, △ are the 1st and 2nd cycles of increasing (blackened) and lowering (open) pressure, respectively