

03,05,07

## Магнитотранспортные свойства монокристаллов $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ , подвергнутых гидростатическому давлению

© Л.А. Сайпулаева<sup>1</sup>, В.С. Захвалинский<sup>2</sup>, А.Г. Алибеков<sup>1</sup>, З.Ш. Пирмагомедов<sup>1</sup>,  
А.В. Кочура<sup>3</sup>, С.Ф. Маренкин<sup>4</sup>, А.И. Риль<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,  
Махачкала, Россия

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, Россия

<sup>3</sup> Юго-Западный государственный университет,  
Курск, Россия

<sup>4</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
Москва, Россия

E-mail: l.saypulaeva@gmail.com

Поступила в Редакцию 25 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2023 г.

Принята к публикации 27 ноября 2023 г.

В  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  исследовано влияние высокого гидростатического давления до 9 ГПа на транспорт и полевую зависимость поперечного магнетосопротивления. Эта структура является тетрагональной (п.г.  $I4_1/amd$ ) с параметрами  $a = b = 8.55 \text{ \AA}$  и  $c = 24.13 \text{ \AA}$ . Для создания высокого давления использовалась камера типа „Тороид“. Показано, что увеличение давления приводит к подавлению положительного магнетосопротивления. В области фазового перехода отрицательное магнетосопротивление при давлении  $P \approx 5.4 \text{ GPa}$  в поле 5 кОе принимает минимальное значение, приблизительно равное  $-0.15$ .

**Ключевые слова:** высокое давление, полупроводник, удельное электросопротивление, коэффициент Холла, магнетосопротивление.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56934.264

### 1. Введение

Целью настоящей работы является исследование воздействия внешних факторов — температуры, давления и магнитного поля на магнитотранспортные свойства  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .

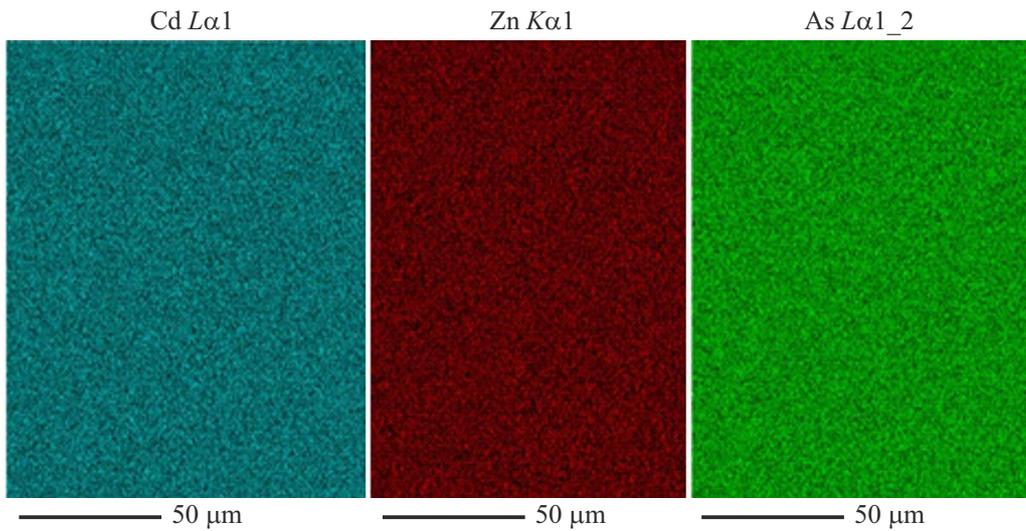
Наиболее ранние данные о твердых растворах  $\text{Cd}_3\text{As}_2-\text{Zn}_3\text{As}_2$  опубликованы в работах [1–5]. Было установлено, что эти сплавы являются полупроводниками:  $n$ -типа ( $0 \leq x \leq 1.35$ ) и  $p$ -типа ( $1.5 \leq x \leq 3$ ). Рассчитаны зонные параметры, эффективные массы электронов и дырок в зависимости от температуры и состава.

В работах [5–8] проведены исследования влияния гидростатического давления до 12000 бар на электрофизические свойства  $\text{Cd}_{3-x}\text{Zn}_x\text{As}_2$  при комнатной температуре. Показано, что экспериментальные результаты могут быть объяснены на основе модели зонных структур  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  и  $\text{Zn}_3\text{As}_2$  [9]. Особое внимание уделено сплаву  $\text{Cd}_{2.8}\text{Zn}_{0.2}\text{As}_2$ , в котором исследователи [1,10] наблюдали максимум холловской подвижности. Для интерпретации данных использовалась модель зонной структуры, предложенная в [11].

Данная работа является продолжением начатых нами магнитотранспортных исследований  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  при более высоких давлениях. В [12] были измерены удельное сопротивление  $\rho$ , магнетосопротивление  $\Delta\rho_{xx}/\rho_0$  и коэффициент Холла  $R_H$  в образце

$(\text{Cd}_{0.69}\text{Zn}_{0.31})_3\text{As}_2$ . При атмосферном давлении температурная зависимость удельного сопротивления образца  $(\text{Cd}_{0.69}\text{Zn}_{0.31})_3\text{As}_2$  в диапазоне температур 77–400 К характерна для металлического типа проводимости: коэффициент Холла практически постоянен во всем интервале температур и сохраняется отрицательный знак  $R_H$ , что указывает, что основными носителями заряда являются электроны. Такое поведение является типичной характеристикой полуметаллического полупроводника. Другая особенность транспорта под давлением заключается в увеличении удельного сопротивления  $\rho$  [12]. Тип проводимости материала матрицы  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$  сильно зависит от соотношения между Cd и Zn. Так, в случае, когда  $x \geq 0.15$ , для матрицы  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$  вместо  $n$ -типа проводимости следовало ожидать  $p$ -тип.

Соединения  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  представляют частный пример соединения арсенида кадмия  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , в котором бесщелевые электронные состояния вблизи защищенных симметрией точек Дирака имеют линейную дисперсию и жестко связанные направления спина и импульса [13]. Однако электронная плотность в  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  может быть уменьшена легированием атомами Zn, и кристаллы  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ , где  $0 \leq x \leq 1$ , образуют непрерывный ряд твердых растворов. За счет изменения концентрации Zn в системе  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$  реализуется переход от трехмерного Дираковского полуметала к тривиальному прямозонному полупроводнику



**Рис. 1.** Равномерное распределение элементов по поверхности образца  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

при  $x_c = 0.38$ , а в интервале значений  $0.07 \leq x < 0.52$  происходит структурное превращение тетрагональной объемноцентрированной фазы ( $I4_1/acd$ ) в примитивную тетрагональную фазу ( $P4_2/nmc$ ); далее при  $x > 0.52$  тетрагональная объемноцентрированная фаза восстанавливается [14,15].

## 2. Техника эксперимента

Для создания высокого давления использовалась камера типа „Тороид“ [16], создающая гидростатическое давление до 9 ГПа. Параметры исследованного образца  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ :  $\rho = 12 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $n = 3.8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

Электронно-микроскопические исследования сколов и поверхности образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM6610LV (Jeol) с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) X-Max<sup>N</sup> (Oxford Instruments). Результаты ЭДРС  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  показали, что распределение элементов в образце равномерное (рис. 1).

Рентгенофазовый анализ, выполненный с помощью рентгеновского дифрактометра GBC EMMА (излучение  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5401 \text{ \AA}$ ) при комнатной температуре, также подтвердил однофазовый состав образца. Кристаллическая структура соответствует  $\alpha'''$ -полиморфной модификации, которая наблюдалась [14,15] для некоторых составов твердых растворов арсенид кадмия–арсенид цинка. Эта структура является тетрагональной (п.г.  $I4_1/amd$ ) с параметрами  $a = b = 8.55 \text{ \AA}$  и  $c = 24.13 \text{ \AA}$ .

## 3. Результаты и обсуждение

В работе [12] удельное сопротивление  $(\text{Cd}_{0.69}\text{Zn}_{0.31})_3\text{As}_2$  демонстрирует зависимость от температуры, характерную для металлов.

Исследования поперечного магнетосопротивления  $\Delta\rho_{xx}(P)/\rho_0$   $(\text{Cd}_{0.69}\text{Zn}_{0.31})_3\text{As}_2$  в области давлений до 9 ГПа при фиксированных значениях магнитного поля позволили обнаружить интервалы давлений, в которых проявляется отрицательное магнетосопротивление (ОМС). В области фазового перехода ОМС при давлении  $P \approx 2.7 \text{ ГПа}$  в поле 5 кОе имеет минимальное значение приблизительно  $-0.17$ .

Кроме наличия ОМС в исследуемом материале проявляются особенности поведения положительного магнетосопротивления, максимальное значение которого наблюдается в окрестности 4 ГПа.

Дальнейшие исследования магнитотранспортных свойств  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  были проведены в диапазоне температур 77–400 К и в интервале давлений 0–9 ГПа. График зависимости удельного электросопротивления образца  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  от температуры  $\rho(T)$  представлен на рис. 2. Данная зависимость демонстрирует изменение полупроводникового характера: с уменьшением температуры удельное сопротивление растет. Эта температурная зависимость радикально отличается от той, что наблюдалась в [12] для образца  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$  ( $x = 0.31$ ).

На температурной зависимости коэффициента Холла  $R_H$  заметно изменение знака. Следовательно, основными носителями заряда от 77 К и до достижения 200 К являются дырки и полупроводник имеет  $p$ -тип проводимости. Затем происходит смена знака основных носителей заряда на противоположный, и основными носителями являются электроны, а полупроводник демонстрирует  $n$ -тип проводимости.

Падение удельного сопротивления с ростом температуры образца сопровождается ростом подвижности носителей заряда (рис. 4). Рост подвижности в нашем случае означает увеличение вклада в электропровод-

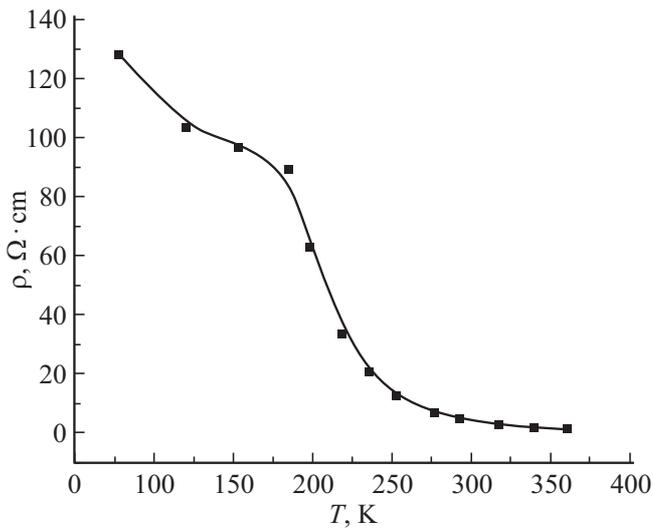


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho(T)$  образца  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .

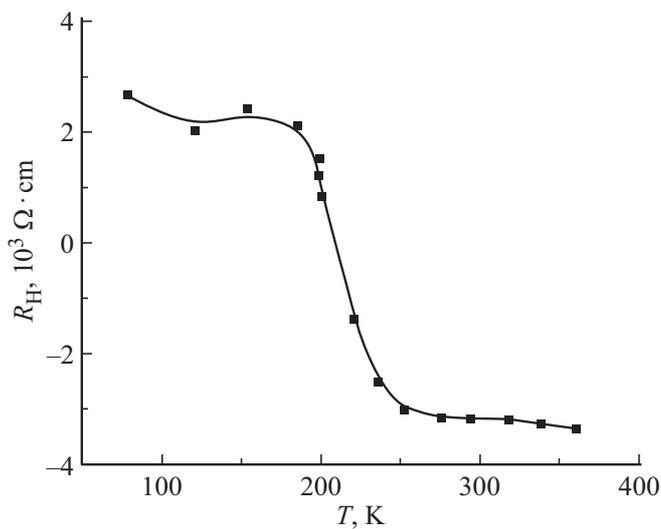


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента Холла  $R_H(T)$   $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .

ность другой группы носителей заряда с меньшей эффективной массой. В области температур  $T < 200$  К холловская подвижность носителей заряда  $\mu_H$  не зависит от температуры (рис. 4), и при  $T > 200$  К происходит резкий рост  $\mu_H$ .

Слабо зависящий от температуры коэффициент Холла указывает на то, что при  $T < 200$  К основными носителями тока являются дырки.

Барические зависимости удельного сопротивления  $\rho(P)$ , коэффициента Холла  $R_H(P)$  и магнетосопротивления  $\Delta\rho_{xx}(P)/\rho_0(P)$   $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  при фиксированных величинах магнитной индукции до 5 кОе при комнатной температуре представлены на рис. 5–7, соответственно. Величина поперечного магнетосопротивления

рассчитывалась по формуле

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)}, \quad (1)$$

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

Анализ данных, полученных в режимах подъема и сброса давления, позволил качественно установить связь между поведением МС и наблюдаемым гистерезисом на зависимости  $\rho(P)$ . С ростом давления удельное сопротивление  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  немонотонно растет, и в диапазоне давлений  $P \approx (2.8-3.5)$  ГПа наблюдается максимум удельного сопротивления  $\rho(P)$  (рис. 5).

Коэффициент Холла  $R_H(P)$  (рис. 6) достигает максимума в области давлений (2.5–3.5) ГПа. С увеличением магнитного поля амплитуда максимума  $R_H(P)$  уменьшается (рис. 6). После снятия давления образец не восста-

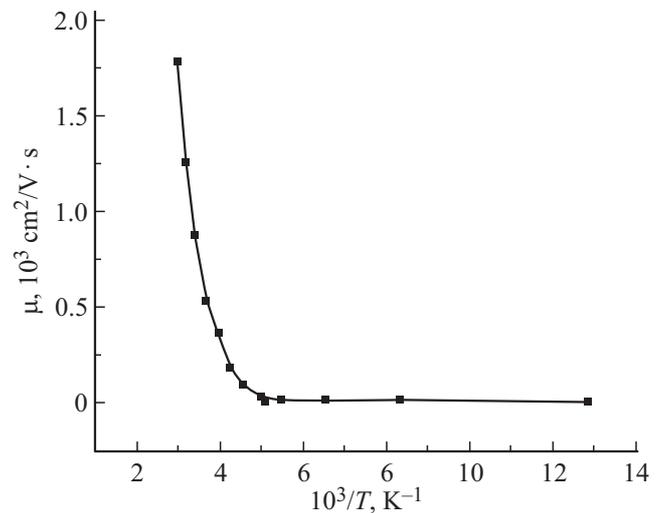


Рис. 4. Температурная зависимость подвижности  $(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .

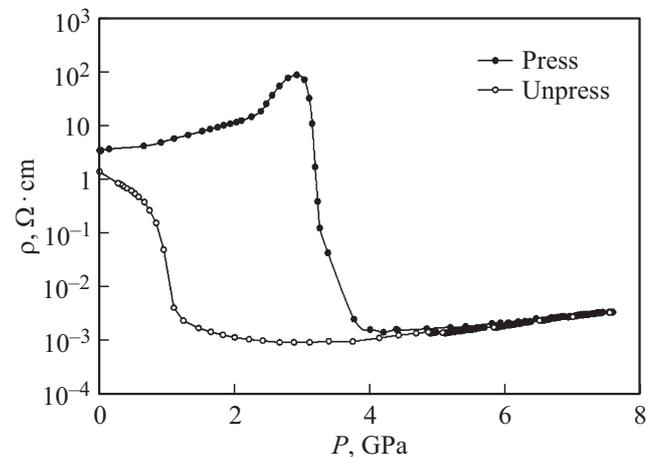
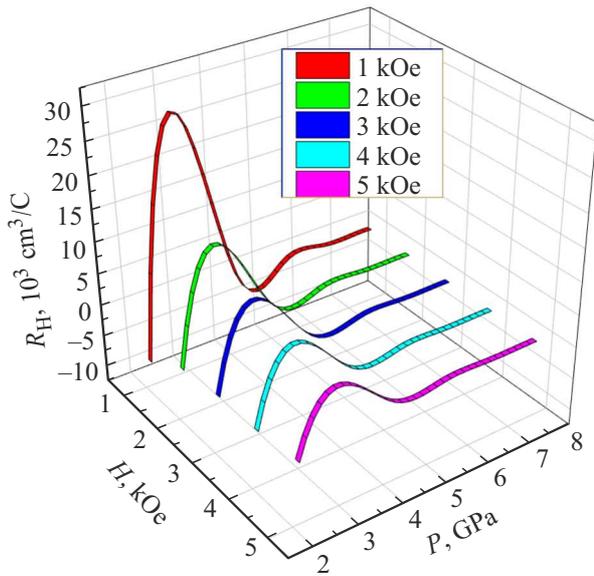
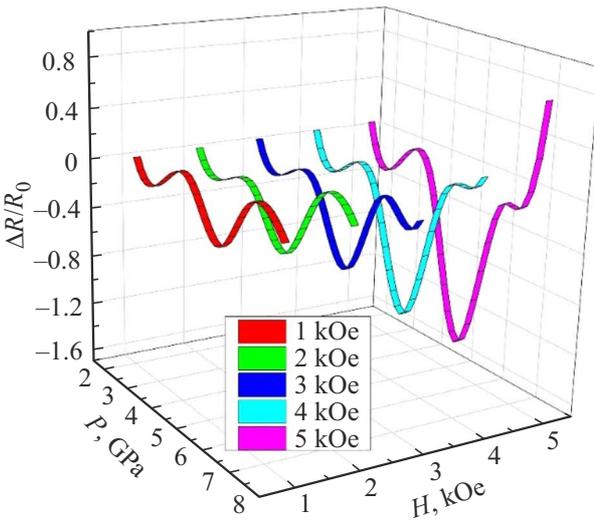


Рис. 5. Барическая зависимость удельного сопротивления  $\rho(P)$   $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .



**Рис. 6.** Барические зависимости коэффициента Холла  $R_H(P)$   $(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ .



**Рис. 7.** Зависимости магнетосопротивления композита  $(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$  от давления при различных значениях напряженности поперечного магнитного поля при увеличении давления.

навливается. Максимум на  $\rho(P)$ , возможно, обусловлен фазовым переходом, но может быть связан с участием в проводимости электронов второй подзоны, которое выявляется при исследовании влияния всестороннего давления на электрические свойства  $\text{Cd}_{3-x}\text{Zn}_x\text{As}_2$ .

На температурной зависимости коэффициента Холла  $R_H(T)$  заметно изменение знака коэффициента Холла (рис. 3) с положительного при низких температурах на отрицательный по мере роста температуры. С ростом давления точка инверсии знака  $R_H$  смещается в сторону слабых магнитных полей. В области максимальных дав-

лений зависимость коэффициента Холла от магнитного поля практически отсутствует.

Экспериментальные зависимости поперечного магнетосопротивления  $(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$   $\Delta\rho_{xx}(P)/\rho_0$  при фиксированных значениях магнитного поля приведены на рис. 7. Значения магнетосопротивления отрицательны при давлениях  $P \geq 1.5$  и увеличиваются по абсолютной величине с возрастанием магнитного поля. В полях  $H = 1-5$  kOe при давлении 4.0–4.7 GPa наблюдается скачок значений магнетосопротивления, их абсолютные величины достигают максимума, после чего уменьшаются. В поле 5 kOe при давлении 4.0–4.7 GPa отрицательное магнетосопротивление имеет минимальное значение  $-1.5$  (рис. 7).

Изменение полевой зависимости магнетосопротивления несимметрично относительно направления поля.  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  известен, как один из материалов в котором четность магнетосопротивления может быть нарушена при определенных специфических условиях. Это может приводить как к легкой асимметрии, так и к киральности магнетосопротивления [13–17].

#### 4. Заключение

Исследованы и изучены температурные, барические зависимости  $\alpha'''-(\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5})_3\text{As}_2$ . Обнаружено, что зависящее от температуры удельное сопротивление демонстрирует изменение полупроводникового характера. Обнаружено, что температурная зависимость удельного сопротивления имеет форму, характерную для полупроводников. На температурной зависимости коэффициента Холла  $R_H(T)$  в интервале температур 320–350 K происходит смена типа носителей — переход от материала  $p$ -типа к материалу  $n$ -типа. Показано, что увеличение давления приводит к подавлению положительного магнетосопротивления. В поле 5 kOe при давлении 4.0–4.7 GPa отрицательное магнетосопротивление имеет максимальное по абсолютной величине значение. Изменение полевой зависимости магнетосопротивления несимметрично относительно направления поля.

Сложное поведение удельного сопротивления и коэффициента Холла при изменении температуры, давления и магнитного поля можно приписать особенностям зонной структуры, изменению положения уровня Ферми относительно краёв энергетических зон и примесных уровней и изменению концентрации носителей заряда.

Электрическое поле, как и температура влияет на число свободных носителей заряда, а магнитное поле и давление изменяют величины энергетических щелей между зонами, что в свою очередь также приводит к изменению числа носителей. В отличие от электрического поля, непосредственно изменяющего число свободных носителей заряда, магнитное поле вызывает перестройку энергетического спектра, а именно приводит к смещению краев энергетических зон.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] L. Zdanowicz, W. Zdanowicz. *Phys. Status Solidi* **6**, 227 (1964).
- [2] W. Zdanowicz, B. Trumowski. *Acta Phys. Pol.* **24**, 1, 205 (1964).
- [3] A.K. Sreedhar. *J. Inst. Telecommun. Eng.* **9**, 268 (1963).
- [4] Я.А. Угай, Т.А. Зюбина, Е.А. Малыгин. *Изв. АН СССР. Неорган. материалы* **17**, 876 (1966).
- [5] Н.Н. Сирота, Е.М. Столяренко. *Изв. АН БССР. Сер. физ-мат. наук* **1**, 107 (1966).
- [6] J. Cisowski, W. Zdanowicz. *Phys. Status Solidi A* **19**, 2, 741 (1973).
- [7] J. Cisowski, W. Zdanowicz. *Phys. Status Solidi A* **41**, K59 (1977).
- [8] А.В. Лашкул, Ян Цисовски, Э.К. Арушанов, А.Ф. Князев. *ФТП* **23**, 8, 1406 (1989).
- [9] P.J. Lin-Chung. *Phys. Rev.* **188**, 1272 (1969).
- [10] M.J. Aubin, A.T. Truong. *Phys. Status Solidi A* **1**, 8, 217 (1972).
- [11] L.M. Rogers, R.M. Jenkins, A.J. Crocker. *J. Phys. D* **4**, 793 (1971).
- [12] Л.А. Сайпулаева, В.С. Захвалинский, А.Г. Алибеков. *Поверхность* **10**, 76 (2023).
- [13] O. Ivanov, V. Zakhvalinskii, T. Nikulicheva, M. Yaprntsev, S. Ivanichikhin. *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.* **12**, 10, 1800386 (2018).
- [14] D.T. Son, B.Z. Spivak. *Phys. Rev. B* **88**, 125110 (2013).
- [15] S.A. Parameswaran, T. Grover, D.A. Abanin, D.A. Pesin, A. Vishwanath. *Phys. Rev. X* **4**, 031035 (2014).
- [16] Y.-Y. Zhang, X.-R. Wang, X.C. Xie. *J. Phys. Condens. Matter* **24**, 015004 (2012).
- [17] D.E. Kharzeev, H.-U. Yee. *Phys. Rev. B* **88**, 115119 (2013).

Редактор Е.Ю. Флегонтова