

**ФИЗИКА**  
**PHYSICS**УДК 537.9, 538.93  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-26-34>Поступило в редакцию 18.01.2022  
Received 18.01.2022**Ю. А. Федотова***Научно-исследовательский Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
Минск, Республика Беларусь***ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОГО МЫШЬЯКА***(Представлено членом-корреспондентом Н. А. Поклонским)*

**Аннотация.** Исследована структура, а также зависимости электрического сопротивления  $R(T)$  от температуры поликристалла природного черного мышьяка (b-As). Образцы b-As содержали как фазу черного мышьяка и следы его оксида, так и фазу серого мышьяка и арсенолита ( $As_2O_3$ ). Поведение относительного магнетосопротивления  $MR(B)$  кристалла b-As при постоянной температуре описывалось соотношением  $MR(B) = bB^n + cB^m$ , где коэффициенты  $b$  и  $c$ , а также показатели степени  $n$  и  $m$  определялись механизмами формирования магнетосопротивления и зависели от температуры. При температурах ниже 10 К зависимость  $MR(B)$  показывает наличие конкуренции отрицательного (при  $b < 0$  и  $n \approx 0,5$ ) и положительного (при  $c > 0$  и  $m \approx 1$ ) вкладов. При температуре  $T > 10$  К наблюдался только ПМР эффект, для которого в диапазоне  $10 < T < 100$  К величины  $b > 0$ ,  $n \approx 1$  и  $c \rightarrow 0$ . При  $T > 100$  К величины  $b$ ,  $c > 0$ ,  $n \approx 1$  и  $1,30 \leq m \leq 1,47$ . Наблюдаемое поведение зависимостей  $MR(B)$  в широком диапазоне температур обусловлено сильной неоднородностью и неупорядоченностью структуры исследуемого кристалла черного мышьяка.

**Ключевые слова:** черный мышьяк, электротранспорт, магнетосопротивление

**Для цитирования.** Федотова, Ю. А. Электрические свойства черного мышьяка / Ю. А. Федотова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 26–34. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-26-34>

**Julia A. Fedotova***Research Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***ELECTRIC PROPERTIES OF BLACK ARSENIC***(Communicated by Corresponding Member Nikolay A. Poklonsky)*

**Abstract.** The structure, as well as the temperature and magnetic field dependences of the electrical resistance  $R(T, B)$  of the natural black arsenic (b-As) polycrystal was studied. It was shown that the polycrystalline b-As sample contains the b-As phase and also the traces of its oxide, as well as grey arsenic and arsenolite ( $As_2O_3$ ). The behavior of the relative magnetoresistance of the b-As crystal was described by the relation  $MR(B) = bB^n + cB^m$ , where the coefficients  $b$  and  $c$  and the exponents  $n$  and  $m$  were also affected by the mechanisms of magnetoresistance formation and temperature. At the temperatures below 10 K,  $MR(B)$  shows the presence of a competition between negative (with  $b < 0$  and  $n \approx 0.5$ ) and positive (with  $c > 0$  and  $m \approx 1$ ) contributions. Above 10 K, only the PMR effect was presented. For the PMR effect, at  $10 < T < 100$  K it is observed that the values of  $b > 0$ ,  $n \approx 1$  and  $c \rightarrow 0$ . Above 100 K, it is observed that the values of  $b$ ,  $c > 0$  and  $n \approx 1$  and  $1.30 < m < 1.47$ . The observed behavior of the  $R(T, B)$  dependences is associated with strong inhomogeneity and/or disorder of the investigated black arsenic crystal.

**Keywords:** black arsenic, carrier transport, magnetoresistance

**For citation.** Fedotova J. A. Electric properties of black arsenic. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 1, pp. 26–34 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-26-34>

**Введение.** Мышьяк принадлежит к группе VA таблицы Менделеева и привлекает внимание на протяжении уже десятков лет благодаря своим весьма нетривиальным свойствам и возможному применению для изготовления двумерных однослойных и многослойных структур для электроники.

троники [1]. В отличие от элементов группы IVA, таких как углерод и кремний, каждый из которых имеет много аллотропных модификаций [2], аллотропов As намного меньше. При нормальном атмосферном давлении кристаллический мышьяк характеризуется электронной конфигурацией  $4s^2 4p^3$  и предпочитает кристаллизоваться в виде слоистых структур с низкой симметрией и координационным числом, равным трем [3; 4]. В твердом состоянии он существует в виде четырех аллотропных модификаций: ромбоэдрический серый мышьяк, ромбический черный мышьяк (b-As), различные формы желтого мышьяка и простой кубический мышьяк высокого давления [4–6]. Ромбоэдрический серый мышьяк, принадлежащий к структуре A7, является наиболее стабильной фазой мышьяка в условиях окружающей среды. Под давлением серый мышьяк претерпевает фазовый переход из фазы A7 в простой кубический металлический мышьяк с более высокой симметрией [6; 7]. Желтый мышьяк, состоящий из тетраэдрических молекул  $As_4$ , очень нестабилен и постепенно превращается в серый мышьяк даже при комнатной температуре. Слоистая кристаллическая фаза орторомбического черного мышьяка образует гофрированную сотовую структуру (рис. 1, *a*) и обладает очень высокой анизотропией в плоскости *ac*, как и черный фосфор [8]. Именно поэтому он представляет интерес своей способностью создания одно- или многослойных двумерных структур путем отщепления.

Расчеты показывают, что объемная фаза b-As представляет собой прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны около 0,3 эВ [1; 9; 10]. Однако данных об электрических свойствах кристаллов черного мышьяка в литературе нет. В то же время известно, что в однослойном виде черный мышьяк становится непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны около 1,0 эВ [10; 11]. Кроме того, показано, что однослойный и многослойный b-As с небольшим числом слоев обладает более высокой подвижностью носителей заряда ( $\sim 10^3\text{--}10^4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  [10]), что делает его потенциальным кандидатом для применения в электронных и оптоэлектронных устройствах [1; 10].

В данной работе исследована структура и температурные зависимости электрического сопротивления кристаллов природного b-As в широкой области температур и магнитных полей.

**Материалы и методы исследования.** Фазовый состав и кристаллическая структура исходного кристалла b-As изучались методом рентгеноструктурного анализа (РСА) при комнатной температуре на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М с использованием  $\text{Cu-K}_\alpha$ -излучения. Для отсеечения  $K_\beta$ -компоненты рентгеновского пучка применялся графитовый монохроматор. Шаг угла сканирования пучка составлял 0,03 градуса, время экспозиции – не ме-

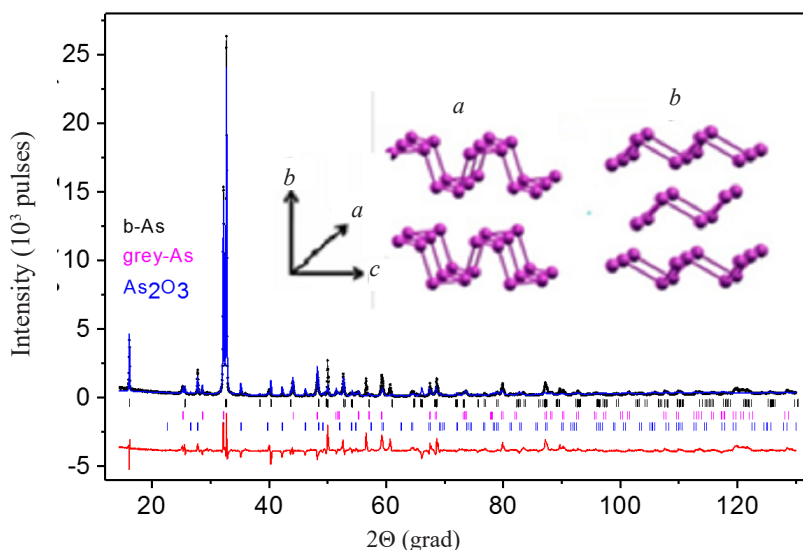


Рис. 1. Экспериментальные дифрактограммы натурального кристалла черного мышьяка. Вставка: схематическое изображение кристаллической структуры черного (*a*) и серого (*b*) мышьяка [10]

Fig. 1. Experimental XRD patterns of natural black arsenic crystals. The inset shows image of crystalline structure of black (*a*) and grey (*b*) arsenic [10]

нее 3 с. Фиксация данных измерений производилась автоматически. Определение угловых положений максимумов дифракционных пиков, определение типа симметрии и расчет параметров элементарной ячейки проводились по методу Ритвельда путем разложения рентгеновского спектра на сумму интегральных интенсивностей с применением программного пакета FullProf Suite [12].

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) проводилась на приборе Nanofinder<sup>®</sup>30 при комнатной температуре. Мощность лазерного пучка с длиной волны 532 нм и диаметром около 0,7–1,0 мкм составляла 200, 600 и 1600 мВт при времени облучения 20–30 с. Лазерный луч фокусировался на поверхности образца с помощью объектива 50× (числовая апертура 0,8). Сканирование поверхности проводилось в 14 областях размерами 20 × 20 мкм, разнесенных друг от друга на расстояние не менее 1 мм. Для получения обратно рассеянного света использовалась дифракционная решетка 600 мм<sup>-1</sup>, что позволяло получить спектральное разрешение не хуже 3 см<sup>-1</sup>. Спектральная калибровка проводилась по линиям газоразрядной лампы, что обеспечивало точность не хуже 3 см<sup>-1</sup>. В качестве фотоприемника использовалась охлаждаемая кремниевая ПЗС-матрица.

На этих же образцах проведены стандартные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и электросопротивления  $R(T, B)$  в области температур  $2 < T < 300$  К и индукции магнитного поля  $0 \leq B < 9$  Тл. Измерения проводились на прямоугольных образцах, сколотых вдоль плоскости  $ac$ . При этом вектор  $B$  всегда был перпендикулярен этой плоскости, т. е. направлен вдоль оси  $b$ . Зависимости  $R(T)$  и  $R(B)$  определялись на бескриогенной измерительной системе компании Cryogenics Ltd (Великобритания) на базе рефрижератора замкнутого цикла. При измерениях ток через образец задавался и измерялся с помощью прибора Keithley 6430, который позволял определять электрическое сопротивление образцов в диапазоне от 100 мкОм до 10 ГОм с точностью не хуже 0,1 %. Температура образцов контролировалась термодиодами LakeShore, откалиброванными с точностью 0,0005 К и имеющими воспроизводимость 0,001 К. Стабилизация и измерение температуры осуществлялись с помощью контроллера LakeShore 331. Точность измерения удельного сопротивления была не хуже 5 %, что определялось в основном неточностью измерения геометрических размеров образцов, ширины потенциальных электрических контактов и расстояний между ними.

Температурные зависимости ВАХ и сопротивления  $R(T)$ , а также магнетосопротивление  $R(B)$  измерялись с помощью четырех электрических зондов с линейным расположением на расстоянии около 0,5 мм. Контакты были изготовлены с помощью серебряной пасты на основе эпоксидной смолы и отожжены в колбе с газообразным водородом низкого давления при 353 К в течение 15 мин. Для проверки качества контактов на всех образцах проводилось предварительное измерение ВАХ.

**Результаты и их обсуждение.** Пример дифрактограммы кристалла b-As, представленный на рис. 1, указывает на его поликристалличность. Как следует из обработки спектра с помощью программы FullProf на основе метода Ритвельда, в спектре фиксируются не только линии черного мышьяка, но также и линии серого мышьяка и арсенолита ( $As_2O_3$ ). Из процедуры подгонки также были получены оценочные значения вкладов черного и серого мышьяка, а также арсенолита ( $As_2O_3$ ): b-As – 51,16 %; серый As – 34,9 %;  $As_2O_3$  – 15,8 %.

Характерные спектры КРС разных участков исходного образца природного кристалла b-As подтверждают результаты РСА (рис. 2). Как видно, спектры содержат линии, характерные не только для чистого черного мышьяка (рис. 2, *a*), но и для оксида черного фосфора (рис. 2, *b*), серого мышьяка (рис. 2, *c*) и  $As_2O_3$  (вставка к рис. 2, *a*). В целом, эксперименты показали, что основная часть площади поверхности образца (более 80 % сканированных точек) соответствует чистому черному мышьяку.

Как показано на вставках к рис. 3, *a* и 3, *b*, при температурах 3–300 К экспериментальные ВАХ были линейными в диапазоне токов 0–20 мА, что указывает на омический характер электрических контактов к образцу. Температурные зависимости электросопротивления  $R(T)$  на рис. 3 построены по данным измерений ВАХ (кривые 1) и магнетосопротивления  $R(B)$  в нулевом магнитном поле (кривые 2). Как видно из рисунка, форма обеих кривых  $R(T)$  практически

совпадает. При этом температурный ход кривых оказался близким к экспоненциальному, т. е. характеризуется отрицательным температурным коэффициентом сопротивления ( $dR / dT < 0$ ). Последнее означает, что исследуемый кристалл скорее всего является полупроводником, на что также указывает близкий к линейному характер аррениусовой зависимости в области комнатных температур на рис. 3, *b*. Однако наклон этого линейного участка кривой  $Lg(R) - (1 / T)$  дает слишком низкие ( $\ll kT$ ) значения энергии активации проводимости  $\Delta E \approx 0,83-1,21$  мэВ. Это, скорее всего, обусловлено сильной дефектностью исследуемого кристалла, которая приводит к появлению большого количества локализованных состояний в полупроводнике [13] либо к возникновению в нем крупномасштабного потенциального рельефа (КМПП) краев энергетических зон [14]. Наличие КМПП может следовать из неоднородности изучаемого кристалла, что описано в предыдущем разделе. Согласно [14], наличие КМПП приводит к сильному несопадению энергии активации проводимости  $\Delta E$  с шириной запрещенной зоны и (или) энергии активации примесей в полупроводнике. Это и подтверждается наблюдением на рис. 3, *b* так называемой скользящей (т. е. понижающейся при уменьшении температуры) энергии активации проводимости  $\Delta E(T)$ . Отметим, что аналогичное поведение наблюдалось нами ранее при исследовании электрических свойств кристаллов черного фосфора [15]. С другой стороны, выполнение условия сильной локализации, как следствия высокой концентрации дефектов, может приводить

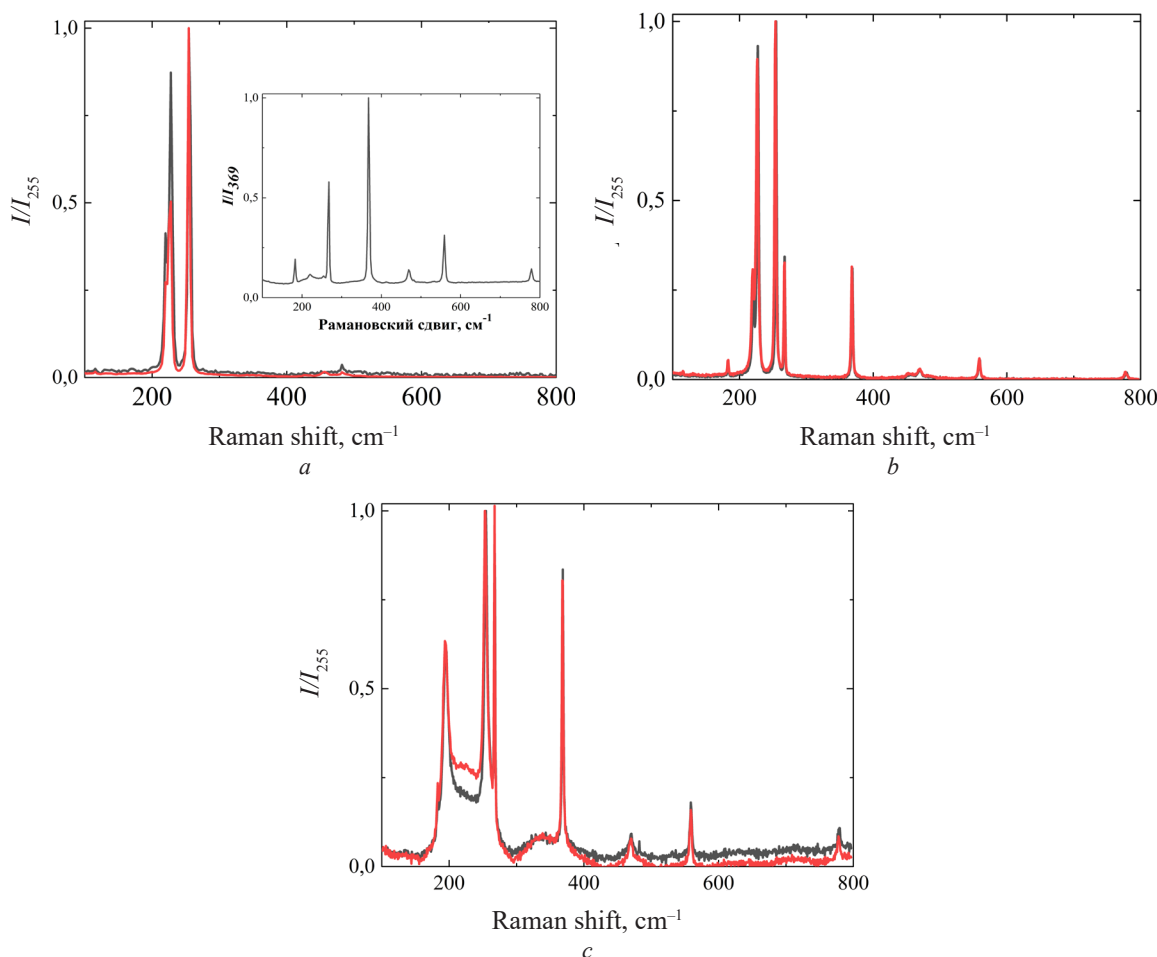


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния для разных участков кристалла натурального черного мышьяка при мощности лазера 200 мВт (черные линии) и 600 мВт (красные линии): (а) чистый b-As, (b) b-As с вкраплением оксида, (с) b-As с вкраплением серого мышьяка. На вставке изображен спектр арсенолита  $As_2O_3$

Fig. 2. Raman spectroscopy for various areas of natural black arsenic crystals at laser power of 200 mW (black lines) and 600 mW (red lines): (a) pure b-As, (b) b-As with oxide precipitations, (c) b-As with grey arsenic precipitations. The inset shows spectrum of arsenolite  $As_2O_3$

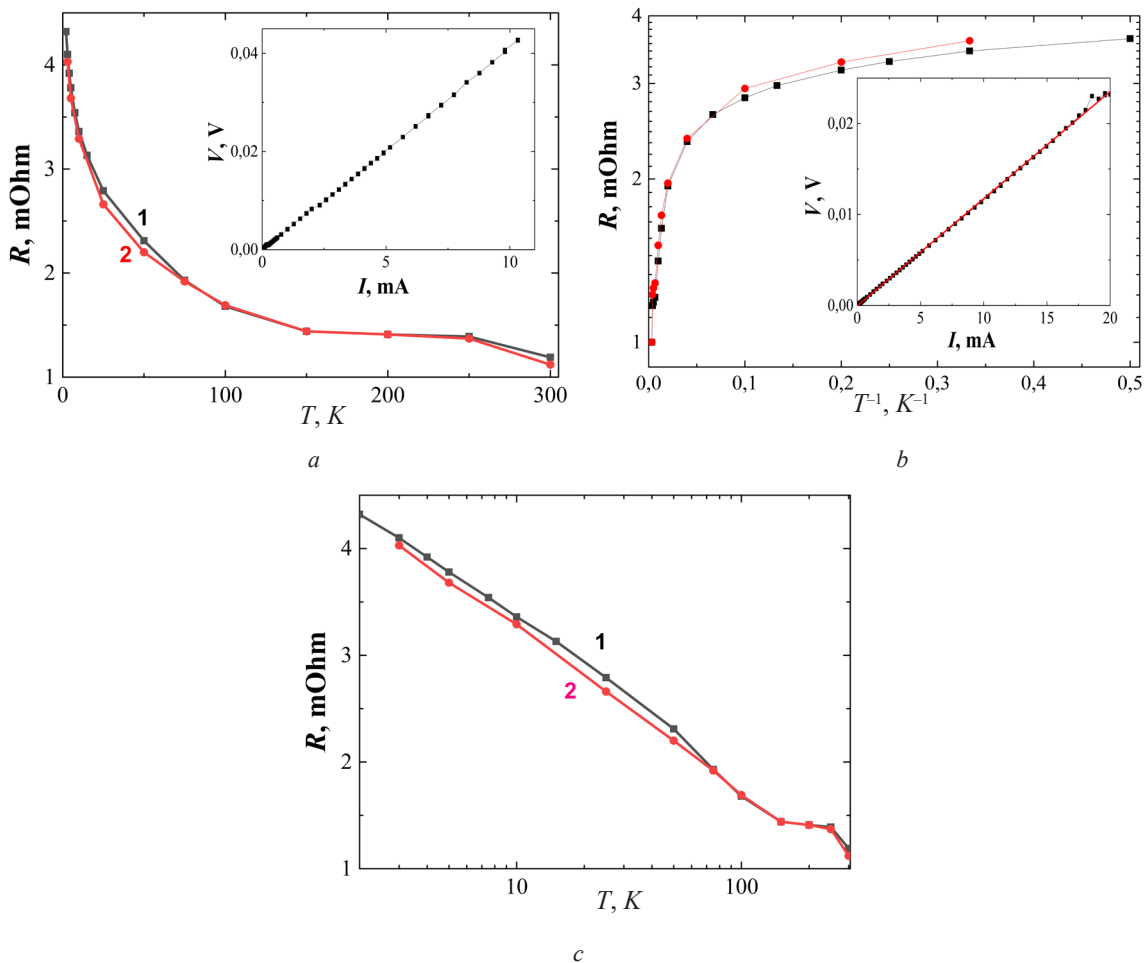


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления  $R(T)$  образца b-As, построенные по ВАХ ( $I$ ) и зависимостям  $R(B)$  в нулевом магнитном поле (2) в линейном (а), аррениусовом (b) и полулогарифмическом (с) масштабах. На вставках изображены ВАХ, измеренные при температурах  $T = 3$  К (а) и  $T = 300$  К (b)

Fig. 3. Temperature dependencies of  $R(T)$  for b-As samples, plotted from  $V$ - $I$  data ( $I$ ) and  $R(B)$  curves at zero magnetic field (2) in linear (a), Arrhenius (b) and semilogarithmic (c) scales. The insets show  $V$ - $I$  curves measured at temperatures  $T = 3$  K (a) and  $T = 300$  K (b)

к реализации прыжкового механизма проводимости с переменной длиной прыжков [13], который также может приводить к наблюдаемой нами скользящей энергии активации проводимости.

Учитывая слоистый характер структуры кристаллов b-As, можно ожидать также наличие у них вкладов в зависимость  $R(T)$  так называемых квантовых поправок к проводимости Друде, обусловленных сбоем фазы волновых функций электронов при их рассеянии, когда они движутся по самопересекающимся траекториям в условиях слабой локализации [16–18]. На возможность такого вклада при движении электронов внутри слоев, в частности, указывает близкий к линейному закону температурный ход электросопротивления в полулогарифмических координатах  $R - \lg(T)$  на рис. 3, с в области температур ниже 75 К [18], что характерно для двумерного или квази-двумерного электронного газа в кристаллах.

Для подтверждения или опровержения высказанных выше предположений о роли эффектов слабой и сильной локализации, а также влияния КМПП нами проведено дополнительно исследование магнеторезистивного эффекта в кристаллах b-As. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости относительного магнетосопротивления  $MR(B) = [R(B) - R(0)] / R(0)$  в кристалле b-As при различных температурах. Как следует из рис. 4, а и 4, b, при температурах 3 и 5 К магнеторезистивный эффект характеризуется двумя вкладами – отрицательным (ОМП) и положительным (ПМП). При данных температурах значение модуля  $MR(B)$  в области ОМП достигает максимума (почти 6 % при 3 К и около 3 % при 5 К) в магнитном поле  $B \approx 3$  Тл. При более высоких

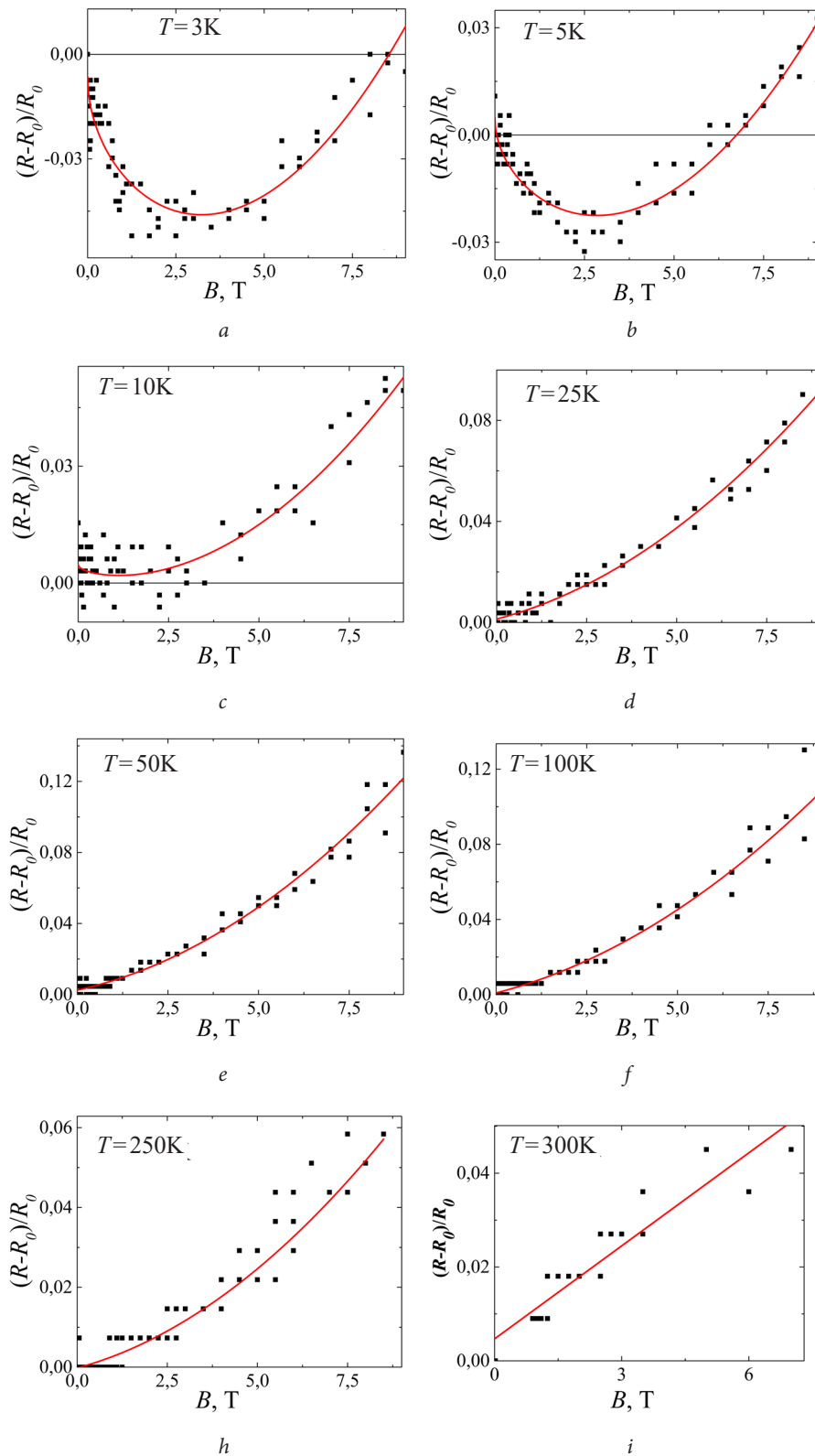


Рис. 4. Экспериментальные зависимости относительного магнетосопротивления  $MR$  от магнитного поля  $B$ , аппроксимированные соотношением (1) при  $b < 0$  для температур  $T = 3$  К (а), 5 К (б) и 10 К (с) и при  $b > 0$  для температур  $T = 25$  К (д), 50 К (е), 100 К (ф), 200 К (г), 250 К (з), 300 К (и) (сплошные линии)

Fig. 4. Experimental dependencies of relative magnetoresistance  $MR$  against magnetic field  $B$ , approximated with the expression (1) for  $b < 0$  for temperatures  $T = 3$  K (a), 5 K (b) and 10 K (c) and with  $b > 0$  for temperatures  $T = 25$  K (d), 50 K (e), 100 K (f), 200 K (g), 250 K (h), 300 K (i) (continuous lines)

полях начинает проявляться вклад ПМП – при  $B \approx 9$  Тл для  $T = 3$  К и при  $B \approx 8$  Тл для  $T = 5$  К. Как видно, полный переход от ОМП к ПМП происходит при температуре 10 К (рис. 4, *c*). Отметим также, что при температурах ниже комнатной зависимость  $MR(B)$  в области ПМП никогда не насыщается и становится линейной (рис. 4, *i*).

Величина  $MR$  в области ПМП растет с увеличением температуры выше 10 К, достигая при 100–150 К значения порядка 13 % для  $B = 9$  Тл. Выше 100 К наблюдается ослабление вклада ПМП, так что  $MR$  ( $B = 9$  Тл) уменьшается до 4 % при 300 К.

Для зависимостей  $MR(B)$  была проведена процедура фитирования на основе соотношения

$$MR(B) = bB^n + cB^m, \quad (1)$$

где  $b$  и  $c$  – коэффициенты, а показатели степени  $n$  и  $m$  определяются механизмами формирования магнеторезистивного эффекта. Фитирование зависимостей  $MR(B)$  с помощью соотношения (1) в области температур 3–5 К и полей  $B < 2$  Тл дало наилучшее согласование с экспериментом при значениях показателя степени  $n = 0,47–0,48$  при  $b < 0$  и  $c \rightarrow 0$  при любом значении показателя  $m$ . Близость показателя  $n$  к 0,5 формально соответствует вкладу квантовых поправок в проводимость Друде для 3-мерного случая [18], что однако физически невозможно, поскольку подавление этих поправок должно происходить в очень слабых магнитных полях ( $B \leq 100$  мТл). Таким образом, результаты фитирования свидетельствуют о том, что наблюдаемый характер низкотемпературной проводимости исследованного кристалла в области ОМП не может быть обусловлен влиянием квантовых поправок.

Фитирование экспериментальных зависимостей  $MR(B)$  на основе соотношения (1) при  $T \geq 10$  К, где ОМП вклад полностью отсутствует, также демонстрирует неплохое согласие с экспериментом. Однако в области ПМП при температурах ниже 100 К второй вклад в этом соотношении дает показатель  $n \approx 1$  при очень малых значениях коэффициента  $c$ . При более высоких температурах в ПМП эффект дают вклад оба члена в соотношении (1), так что величины  $b, c > 0$ , а  $n \approx 1$  и  $1,30 \leq m \leq 1,47$ . Наличие описываемого вторым членом в соотношении (1) линейного вклада в магнетосопротивление  $MR(B)$  с  $n$  примерно равным 1 при  $T < 100$  К, а также то, что при  $T > 100$  К показатель  $m$  всегда много меньше двух, подтверждает роль КМПР в переносе электронов в исследованном кристалле черного мышьяка вследствие его неоднородности. Однако для выявления причины наблюдения ОМП в достаточно высоких магнитных полях (вплоть до 3 Тл) при низких температурах требуются дополнительные эксперименты.

**Заключение.** Проведено комплексное исследование фазового состава, структуры и электрических свойств поликристалла природного черного мышьяка. Изучение фазового состава и кристаллической структуры природного кристалла b-As методами РСА и КРС показало, что образцы являются поликристаллическими, и в них присутствует не только основная фаза черного мышьяка, но также и следы его окисла, а также серого мышьяка и арсенолита ( $As_2O_3$ ). Исследование температурных зависимостей электрического сопротивления в диапазоне температур  $3 < T < 300$  К показало, что поведение зависимостей  $R(T)$  у кристалла b-As аналогично таковому для ранее изученных кристаллов черного фосфора. На основе измерений сопротивления  $R(B)$  в интервале значений магнитной индукции  $0 < B < 9$  Тл получены зависимости относительного магнетосопротивления  $MR(B)$  при температурах  $3 < T < 300$  К. При температурах  $T < 10$  К на зависимостях  $MR(B)$  проявляется конкуренция отрицательного и положительного вкладов в магнеторезистивный эффект. Преобладание ПМП эффекта с линейной зависимостью  $MR(B) \sim B$  обнаружено в диапазоне  $10 < T < 100$  К. Выше 100 К, кроме линейного, наблюдается дополнительный (степенной) вклад  $MR(B) \sim B^m$ , который не соответствует лоренцеву механизму магнетосопротивления, поскольку  $m$  существенно меньше 2 ( $1,30 \leq m \leq 1,47$ ). Наблюдаемое поведение зависимостей  $MR(B)$  указывает на сильную фазовую неоднородность и неупорядоченность исследуемого кристалла черного мышьяка, что коррелирует с результатами РСА и КРС.

**Благодарности.** Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (договор № Ф20ПТИ-014). Автор выражает благодарность профессору Я. Чену, Пекинский технологический институт (Китай), за предоставление для исследований кристалла b-As.

**Acknowledgements.** The work is supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. Ф20ПТИ-014). Author is also grateful to Prof. Y. Chen from Beijing Institute of Technology (China) for the supplying of b-As crystals for research.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Thickness-Dependent Carrier Transport Characteristics of a New 2D Elemental Semiconductor: Black Arsenic / M. Z. Zhong [et al.] // *Adv. Funct. Mater.* – 2018. – Vol. 28, N 43. – Art. 1802581. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802581>
2. Arsenic K4 crystal: A new stable direct-gap semiconductor allotrope / C. Wang [et al.] // *Solid State Communications.* – 2021. – Vol. 323. – Art. 114128. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2020.114128>
3. Atomically thin binary V–V compound semiconductor: a first-principles study / W. Y. Yu [et al.] // *J. Mater. Chem. C.* – 2016. – Vol. 4, N 27. – P. 6581–6587. <https://doi.org/10.1039/c6tc01505k>
4. Stöhr, H. Beiträge zur Kenntnis der Allotropie des Arsens / H. Stöhr // *Z. Anorg. Allg. Chem.* – 1939. – Vol. 242, N 2. – P. 138–144. <https://doi.org/10.1002/zaac.19392420204>
5. Seidl, M. The Chemistry of Yellow Arsenic / M. Seidl, G. Balazs, M. Scheer // *Chem. Rev.* – 2019. – Vol. 119, N 14. – P. 8406–8434. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00713>
6. Lattice dynamics and anomalous bonding in rhombohedral As: First-principles supercell method / S. Shang [et al.] // *Physical Review B.* – 2007. – Vol. 76, N 5. – Art. 052301. <https://doi.org/10.1103/physrevb.76.052301>
7. Silas, P. Density-functional investigation of the rhombohedral to simple-cubic phase transition of arsenic / P. Silas, J. R. Yates, P. D. Haynes // *Physical Review B.* – 2008. – Vol. 78, N 17. – Art. 174101. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.174101>
8. Quantum effect enhanced magnetism of C-doped phosphorene nanoribbons: first-principles calculations / X. L. Cai [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2017. – Vol. 19, N 41. – P. 28354–28359. <https://doi.org/10.1039/c7cp05277d>
9. Structural and Electronic Properties of Layered Arsenic and Antimony Arsenide / L. Kou [et al.] // *J. Phys. Chem. C.* – 2015. – Vol. 119, N 12. – P. 6918–6922. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b02096>
10. Manifestation of unexpected semiconducting properties in few-layer orthorhombic arsenene / Z. Zhang [et al.] // *Applied Physics Express.* – 2015. – Vol. 8, N 5. – Art. 055201. <https://doi.org/10.7567/apex.8.055201>
11. Kamal, C. Arsenene: Two-dimensional buckled and puckered honeycomb arsenic systems / C. Kamal, M. Ezawa // *Physical Review B.* – 2015. – Vol. 91, N 8. – Art. 085423. <https://doi.org/10.1103/physrevb.91.085423>
12. Roisnel, T. WinPLOTR: a Windows tool for powder diffraction pattern analysis / T. Roisnel, J. Rodríguez-Carvajal // *Mater. Sci. Forum.* – 2001. – Vol. 378–381. – P. 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.378-381.118>
13. Shklovskii, B. I. Electronic properties of doped semiconductors / B. I. Shklovskii, A. L. Efros. – Springer Series in Solid-State Sciences, 1984. – 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02403-4>
14. Shik, A. Y. Electronic Properties of Inhomogeneous Semiconductors / A. Y. Shik. – Electrocomponent Science Monographs, 1995. – 152 p.
15. Electric Properties of Black Phosphorus Single Crystals / A. K. Fedotov [et al.] // IX Intern. Scient. Conf. Actual Problems of Solid State Physics: Book of abstracts. – 2021. – Vol. 2. – P. 47–51.
16. Altshuler, B. L. Effects of electron-electron collisions with small energy transfers on quantum localization / B. L. Altshuler, A. G. Aronov, D. E. Khmel'nitsky // *Journal of Physics C: Solid State Physics.* – 1982. – Vol. 15. – Art. 7367. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/15/36/018>
17. Pudalov, V. M. Metallic conduction, apparent metal-insulator transition and related phenomena in two-dimensional electron liquid / V. M. Pudalov // *Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”.* – 2004. – Vol. 157. – P. 335–356. <https://doi.org/10.3254/978-1-61499-013-0-335>
18. Полянская, Т. А. Квантовые поправки к проводимости в полупроводниках с двумерным и трехмерным электронным газом / Т. А. Полянская, Ю. В. Шмарцев // *Физика и техника полупроводников.* – 1989. – Т. 23, № 1. – С. 3–32.

## References

1. Zhong M. Z., Xia Q. L., Pan L. F., Liu Y. Q., Chen Y. B., Deng H. X., Li J. B., Wei Z. M. Thickness-Dependent Carrier Transport Characteristics of a New 2D Elemental Semiconductor: Black Arsenic. *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, no. 43, art. 1802581. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802581>
2. Wang C., Bai S., Zhao C., Yu W., Yang Y., Chen Y., Niu C.-Y. Arsenic K4 crystal: A new stable direct-gap semiconductor allotrope. *Solid State Communications*, 2021, vol. 323, art. 114128. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2020.114128>
3. Yu W. Y., Niu C. Y., Zhu Z. L., Wang X. F., Zhang W. B. Atomically thin binary V–V compound semiconductor: a first-principles study. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, vol. 4, no. 27, p. 6581–6587. <https://doi.org/10.1039/c6tc01505k>
4. Stöhr H. Beiträge zur Kenntnis der Allotropie des Arsens. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 1939, vol. 242, no. 2, pp. 138–144 (in German). <https://doi.org/10.1002/zaac.19392420204>
5. Seidl M., Balazs G., Scheer M. The Chemistry of Yellow Arsenic. *Chemical Reviews*, 2019, vol. 119, no. 14, pp. 8406–8434. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00713>
6. Shang S., Wang Y., Zhang H., Liu Z.-K. Lattice dynamics and anomalous bonding in rhombohedral As: First-principles supercell method. *Physical Review B*, 2007, vol. 76, no. 5, art. 052301. <https://doi.org/10.1103/physrevb.76.052301>
7. Silas P., Yates J. R., Haynes P. D. Density-functional investigation of the rhombohedral to simple-cubic phase transition of arsenic. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 17, art. 174101. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.174101>
8. Cai X. L., Niu C. Y., He Y. Y., Wang J. J., Zhu Z. L., Zhang L. W., Jia Y. Quantum effect enhanced magnetism of C-doped phosphorene nanoribbons: first-principles calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, vol. 19, no. 41, pp. 28354–28359. <https://doi.org/10.1039/c7cp05277d>



11. Kamal C., Ezawa M., Arsenene: Two-dimensional buckled and puckered honeycomb arsenic systems. *Physical Review B*, 2015, vol. 91, no. 8, art. 085423. <https://doi.org/10.1103/physrevb.91.085423>
9. Kou L., Ma Y., Tan X., Frauenheim T., Du A., Smith S. Structural and Electronic Properties of Layered Arsenic and Antimony Arsenide. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, vol. 119, no. 12, pp. 6918–6922. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b02096>
10. Zhang Z., Xie J., Yang D., Wang Y., Si M., Xue D. Manifestation of unexpected semiconducting properties in few-layer orthorhombic arsenene. *Applied Physics Express*, 2015, vol. 8, no. 5, art. 055201. <https://doi.org/10.7567/apex.8.055201>
12. Roisnel T., Rodríguez-Carvajal J. WinPLOTR: a Windows tool for powder diffraction pattern analysis. *Materials Science Forum*, 2001, vol. 378–381, pp. 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.378-381.118>
13. Shklovskii B. I., Efros A. L. *Electronic properties of doped semiconductors*. Springer Series in Solid-State Sciences, 1984. 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02403-4>
14. Shik A. Y. *Electronic Properties of Inhomogeneous Semiconductors*. Electrocomponent Science Monographs, 1995. 152 p.
15. Fedotov A. K., Kharchanka A., Fedotova J., Slabuhov V., Bushinski M., Svito I. Electric Properties of Black Phosphorus Single Crystals. *IX International Scientific Conference of Actual Problems of Solid State Physics: Book of abstracts*, 2021, vol. 2, pp. 47–51.
16. Altshuler B. L., Aronov A. G., Khmel'nitsky D. E. Effects of electron-electron collisions with small energy transfers on quantum localization. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1982, vol. 15, art. 7367. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/15/36/018>
17. Pudalov V. M. Metallic conduction, apparent metal-insulator transition and related phenomena in two-dimensional electron liquid. *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, 2004, vol. 157, pp. 335–356. <https://doi.org/10.3254/978-1-61499-013-0-335>
18. Polyanskaya T. A., Shmartsev Yu. V. Quantum corrections to the conductivity in semiconductors with 2D and 3D electron gas. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 1989, vol. 23, no. 1, pp. 3–32 (in Russian).

### Информация об авторе

Федотова Юлия Александровна – д-р физ.-мат. наук, заместитель директора. Институт ядерных проблем БГУ (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Julia@hep.by.

### Information about author

Fedotova Julia A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Deputy director. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Julia@hep.by.