

**Экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности кристалла системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  в интервале  $11 < C < 19$  ат. % на эффект Пельтье при температуре около 100 К**

**В. И. Бочегов, Л. Н. Никифорова, И. А. Пешкова**✉

Курганский государственный университет, Курган, Россия

✉ rashmy@rambler.ru

**Аннотация.** Изложены результаты исследования влияния градиентной неоднородности состава и температуры, направленной вдоль плоскости спайности варизонных кристаллов системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  на эффект Пельтье в интервале состава, соответствующего полупроводниковой области интервала  $11 < C < 19$  ат. %. Из полученных данных следует, что для градиентно-неоднородного образца в данном интервале концентрации сурьмы при оптимальном токе Пельтье-охлаждение существенно больше при сонаправленных градиентах температуры и ширины запрещенной зоны, чем в случае, когда эти градиенты противоположно направлены. Это означает, что явно проявляется эффект полярности явления Пельтье.

**Ключевые слова:** Пельтье-эффект, градиентная неоднородность, кристалл Bi-Sb, эффект полярности, градиент концентрации

**Для цитирования:** Бочегов В. И., Никифорова Л. Н., Пешкова И. А. Экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности кристалла системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  в интервале  $11 < C < 19$  ат. % на эффект Пельтье при температуре около 100 К // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 2. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-5-12.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Experimental Study of the Effect of Gradient Inhomogeneity of the  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  Crystal in the Range of  $11 < C < 19$  at. % on the Peltier Effect at a Temperature of About 100 K**

**V. I. Bochegov, L. N. Nikiforov, I. A., Peshkova**✉

Kurgan State University, Kurgan, Russia

✉ rashmy@rambler.ru

**Abstract.** Presents the results of a study of the influence of gradient inhomogeneity of composition and temperature directed along the cleavage plane of varizon crystals of the  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  system on the Peltier effect in the composition range corresponding to the semiconductor region of the interval  $11 < C < 19$  at. %. It follows from the data obtained that, for a gradient-inhomogeneous sample in a given antimony concentration range at optimal current, the Peltier cooling value is significantly greater with co-directional gradients of temperature and band gap width than in the case when these gradients are oppositely directed. This means that the polarity effect of the Peltier phenomenon is clearly manifested.

**Keywords:** Peltier effect, gradient inhomogeneity, Bi-Sb crystal, polarity effect, concentration gradient

**For citation:** Bochegov V. I., Nikiforov L. N., Peshkova I. A. Experimental Study of the Effect of Gradient Inhomogeneity of the  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  Crystal in the Range of  $11 < C < 19$  at. % on the Peltier Effect at a Temperature of about 100 K // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-5-12.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В тридцатых годах прошлого столетия советский ученый академик А. Ф. Иоффе создал теоретические основы термоэлектричества (ТЭ), как особого направления физики, экспериментально обнаруженного столетием ранее немецким ученым Т. И. Зеебеком (эффект Зеебека) и французским физиком Ж. Ш. Пельтье (эффект Пельтье). Впервые в мире Иоффе ввел параметр ТЭ эффективности  $Z = \sigma\alpha^2T/\kappa$ , где  $\sigma$  – средняя удельная электропроводность материалов термопар,  $\alpha$  – относительная удельная термоЭДС пары (коэффициент Зеебека),  $T$  – абсолютная температура,  $\kappa$  – средняя удельная теплопроводность. Параметр  $Z$  определяет как КПД ТЭ-генераторов, так и холодопроизводительность Пельтье-холодильников, а также понижения температуры на Пельтье-паре. С тех пор профильными учеными повсеместно ведутся исследовательские работы, направленные на увеличение параметра  $Z$ .

В ведущих научно-исследовательских организациях постоянно идут поиски новых термоэлектрических материалов и новых конструкторских решений для повышения эксплуатационных свойств, как ТЭ-генераторов, так и охлаждающих устройств Пельтье. Для термоэлектрического охлаждения в области низких температур ( $\approx 100$  К) самым эффективным материалом является система Bi-Sb в полупроводниковой области состава. Для средних температур (от  $-50$  до  $+300$  °С) наиболее эффективны материалы на основе теллуридов висмута и сурьмы. При более высоких температурах используется кремний  $n$ - и  $p$ -типов проводимости (в основном для генерации электроэнергии). Как ТЭ-генераторы, так и охлаждающие устройства Пельтье функционируют при наличии градиента температуры в элементах этих устройств.

В ряде исследовательских работ установлено, что повышение термоэлектрической добротности различных термоэлектрических материалов и устройств на их основе можно осуществить за счет определенным образом созданной неоднородности состава вдоль направления перепада температур в термоэлементах этих устройств.

Наибольшего успеха по улучшению эксплуатационных свойств ТЭ-генераторов на основе теллуридов висмута достигла школа Л. И. Анатычука (Институт термоэлектричества АН Украины) [1]–[4]. Авторы этих работ показали, что набранные из отдельных секций со специально рассчитанным различающимся составом обеспечивают существенное увеличение эффективности устройств. Анатычук и его сотрудники такие секционно набранные элементы ТЭ-устройств назвали функционально-неоднородными ТЭ-материалами. Как уже сказано, эти материалы предназначены преимущественно для ТЭ-генерации.

Не ослабевает интерес и к ТЭ-охлаждающим устройствам на эффекте Пельтье. Такой интерес проявляют в том числе и молодые ученые [5].

В начале 1980-х гг. одним из соавторов данной работы в результате поискового исследования под руководством профессора Г. А. Иванова. По предложению профессора А. Р. Регеля (ЛГПИ им. А. И. Герцена) было экспериментально обнаружено существенное влияние непрерывной монотонной неоднородности состава кристаллической системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  на гальвано- и термомагнитный эффекты в зависимости от взаимного направления градиентов величин  $\nabla C$  и  $\nabla T$ , была построена расчетная модель этих явлений. Результаты этого исследования были представлены двумя статьями, депонированными в ВИНТИ (Всесоюзный институт научной и технической информации), и видимо по этой причине не были замечены научной общественностью. Однако автор этих статей спустя годы вернулся к исследованиям в рамках этого нового направления в физике твердого тела (исследованию влияния градиентной неоднородности на физические свойства кристаллических тел), используя в качестве модельного материала систему твердых растворов Bi-Sb. Этим он продолжает заниматься и в настоящее время со своими учениками. В частности, в дальнейшем экспериментально был обнаружен эффект полярности теплопроводности на градиентно-неоднородных кристаллах системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$ . После опубликования этих результатов ([6]–[8]) встал вопрос о том, будет ли влиять

градиентная неоднородность на Пельтье-охлаждение с помощью устройства, содержащего такой неоднородный кристалл системы Bi-Sb? Этот вопрос имеет как теоретический, так и практический характер, так как Bi-Sb – это наиболее эффективный термоэлектрик при низких температурах. Следует отметить, что градиентная неоднородность существенно отличается от предлагаемой школой Анатычука неоднородности функционально-неоднородных ТЭ-материалов, недостаток которых заключается в трудоемкой технологии их изготовления и дополнительном контактном электросопротивлении между сегментами наборных термоэлементов, ухудшающих ТЭ-эффективность.

В текущем году группой соавторов данной статьи на научной конференции молодых ученых был представлен доклад по результатам прямого измерения Пельтье-эффекта с применением в качестве одной из ветвей Пельтье-пары градиентно-неоднородного кристалла системы  $Bi_{100-C}-Sb_C$  с содержанием сурьмы в интервале  $7 < C < 11$  ат. % [9]. Из этого материала следует, что перепад температуры между охлаждаемым контактом Пельтье-пары и термостатом ( $\Delta T$ ) при оптимальном токе существенно больше для случая, когда  $\nabla T \uparrow \nabla C$  (градиенты температуры и концентрации сурьмы сонаправлены), чем для случая, когда  $\nabla T \uparrow \downarrow \nabla C$  (градиенты температуры и концентрации сурьмы противоположны). Было бы интересно узнать, как поведет себя эффект Пельтье при использовании градиентно-неоднородного кристалла системы  $Bi_{100-C}-Sb_C$  с другим интервалом содержания сурьмы –  $11 < C < 19$  ат. %, также находящемся в полупроводниковой области состава.

Из сказанного вытекает, что исследование с поставленной авторами целью – экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности состава и температуры, направленной вдоль плоскости спайности кристаллов системы  $Bi_{100-C}-Sb_C$ , на эффект Пельтье в интервале состава  $7 < C < 19$  ат. %, соответствующем полупроводниковому состоянию этого материала при температурах около 100 К, – в настоящее время актуально, в том числе и потому, что может оказаться значимым для практического использования спрогнозированного ранее ([6]–[8]), но экспериментально не подтвержденного эффекта по-

лярности при Пельтье-охлаждении. Для этого авторы статьи провели прямое измерение значения охлаждения в Пельтье-эффекте с применением в Пельтье-паре варизонного кристалла системы Bi-Sb с монотонно переменным составом вдоль плоскости спайности кристалла в указанном ранее интервале ( $7 < C < 19$  ат. %) при температурах около 100 К, в том числе в поперечном магнитном поле.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Выращен монокристалл с заданными параметрами.
2. Приготовлен образец для проведения исследования.
3. Произведен монтаж Пельтье-пары, состоящей из исследуемого образца (*n*-ветвь) и пассивной *p*-ветви (медь), в модернизированном для достижения поставленной цели, криостате-держателе.

Проведено прямое измерение зависимости перепада температур между Пельтье-контактами ( $\Delta T$ ) от значения тока пары ( $I$ ) для случая, когда градиент температуры совпадает по направлению с градиентом концентрации сурьмы в кристалле твердого раствора Bi-Sb ( $\nabla T \uparrow \nabla C$ ) и для случая, когда градиент температуры противоположно направлен по отношению к градиенту концентрации сурьмы в исследуемом твердом растворе ( $\nabla T \uparrow \downarrow \nabla C$ ).

**Экспериментальный комплекс и подготовка образца для исследования.** Измерения Пельтье-эффекта проводились на оригинальной полуавтоматической установке для исследования явлений переноса в твердых телах в широком температурном интервале (от 77 до 350 К), в том числе и в поперечном магнитном поле, содержащей вакуумируемый криостат-держатель для исследуемого образца. Схема измерительной системы представлена на рис. 1 [9], [10].

Используемая конструкция измерительной системы имела автоматическое термостатирование основания Пельтье-пары. Температура основания Пельтье-пары и охлаждаемого контакта Пельтье измерялась с помощью медь-константовых термопар. Электропитание Пельтье-пары осуществлялось прецизионным стабилизатором регулируемого тока, значение которого контролируется с помощью амперметра.

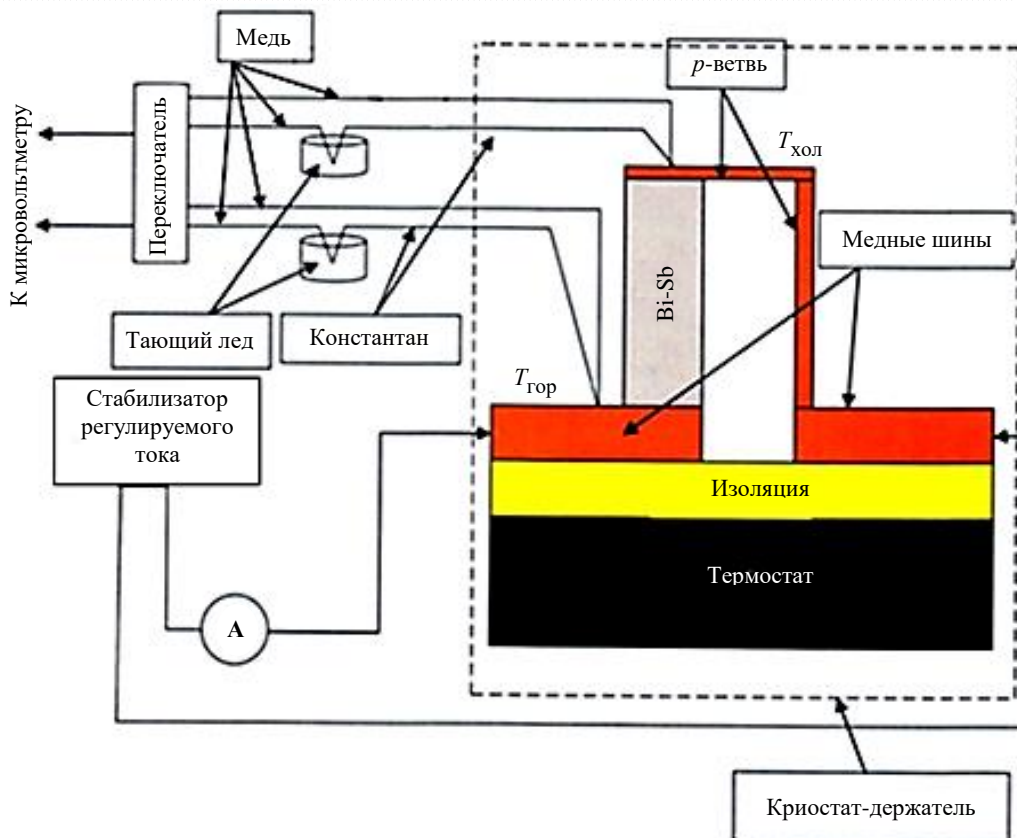


Рис. 1. Схема для измерения перепада температуры на контактах термопары с помощью криостат-держателя  
Fig. 1. Diagram for measuring the temperature drop at the thermocouple contacts using a cryostat holder

На рис. 1  $T_{гор}$  – температура горячего спая (термостата);  $T_{хол}$  – температура холодного спая (Пельтье-контакта).

В Пельтье-паре в качестве  $n$ -ветви использован исследуемый кристалл Bi-Sb, плоскость спайности которого ориентирована по направлению вектора плотности тока. Градиент концентрации сурьмы  $\nabla C$  был также направлен вдоль вектора плотности тока. Кристалл Bi-Sb ( $n$ -ветвь) представляет собой прямоугольный параллелепипед с длиной  $a = 11.65$  мм, шириной  $b = 2.1$  мм и толщиной  $c = 1.3$  мм. В роли пассивной  $p$ -ветви используется тонкая медная фольга с геометрическими размерами, близкими к оптимальным по отношению к  $n$ -ветви. Длина  $p$ -ветви равна длине кристалла Bi-Sb, а толщина равна 0.05 мм.

Кристалл  $Bi_{100-C}Sb_C$  был вырезан из монокристаллического длинномерного слитка. Монокристаллический слиток получен методом кристаллизации расплава от заправки в вакуумированной стеклянной ампуле с направлением плоскости спайности кристалла вдоль слитка. Продольная зависимость концентрации сурьмы в монокристаллическом слитке показана на рис. 2. Концентрация сурьмы в этом слитке измерялась

методом рентгенофлуоресцентного анализа и дублировалась по методу гидростатического взвешивания с погрешностью, не превышающей 3%. С помощью электроискровой резки был вырезан образец в виде прямоугольного параллелепипеда с вышеуказанными геометрическими параметрами. Область, из которой вырезан образец для  $n$ -ветви Пельтье-пары, отмечена на рис. 2 прямоугольником с заливкой. Подробная технология получения варизонных монокристаллов системы Bi-Sb описана в [11]–[13].

На рис. 3 представлен зонный спектр кристаллов системы  $Bi_{100-C}Sb_C$  при различных температурах в зависимости от процентного содержания сурьмы в висмуте, полученный на основе [10], [14], [15]. Область с заливкой на рис. 3 соответствует запрещенной зоне, т. е. полупроводниковому состоянию (отсутствует перекрытие валентной зоны и зоны проводимости): 1 соответствует линии движения экстремума  $L$  зоны проводимости; 2 –  $T$ -экстремуму валентной зоны; 3 –  $H$ -экстремуму валентной зоны. Существующий в системе  $L$ -экстремум валентной зоны здесь не показан, так как он находится значительно ниже интервала запрещенных энергий и не актуален.

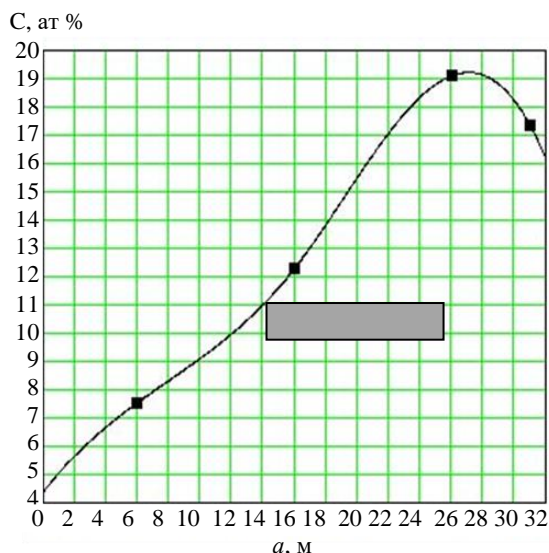


Рис. 2. Зависимость концентрации сурьмы  $C$  в монокристаллическом слитке твердого раствора бинарной системы Bi-Sb от координаты вдоль длины слитка  $a$

Fig. 2. Dependence of antimony  $C$  concentration in a single-crystal ingot of a solid solution of the Bi-Sb binary system on the coordinate along the length of the ingot  $a$

Из изложенного ранее следует, что ширина запрещенной зоны полупроводниковой области зависит как от состава, так и от температуры.

**Результаты эксперимента.** Экспериментально были получены зависимости перепада температуры  $\Delta T$  между охлаждаемым Пельтье-контактом и термостатом от значения тока через термоэлемент Пельтье. Перепад температур в зависимости от значений тока, проходящего через Пельтье-пару, измерялся дважды. Первое измерение соответствует первой позиции монтажа. При этой позиции торец кристалла с концентрацией

11 ат. % помещен на термостат, а второй торец с концентрацией 19 ат. % расположен на охлаждаемом контакте Пельтье. При данной позиции градиент состава кристалла сонаправлен с градиентом температуры. Для второй позиции монтажа торцы меняют местами. Соответственно, во второй позиции градиент состава противоположно направлен градиенту температуры. Оба измерения проводятся при одной и той же температуре термостата. Измерения перепада температуры в зависимости от значений тока делались с шагом в 0.3 А, от 0 до 3 А. Полученные экспериментальные графики аппроксимировались по точкам в среде MathCad. Погрешность измерения перепада температуры между спаями Пельтье-пары не превышает 0.1 К.

На всех графиках экспериментальные точки, отмеченные квадратиками, соответствуют сонаправленным векторам градиентов ширины запрещенной зоны и температуры, а отмеченные кружками – противоположно направленным векторам градиентов ширины запрещенной зоны и температуры.

На рис. 4 представлены зависимости экспериментальных данных перепада температуры между охлаждающимся контактом Пельтье-пары и термостатом от тока, проходящего через термоэлемент.

На рисунке часть  $a$  соответствует отсутствию магнитной индукции  $B = 0$  Тл;  $b$  – наличию слабой индукции поперечного магнитного поля  $B = 20$  мТл, направленного вдоль плоскости спайности;  $c$  – наличию индукции поперечного магнитного поля  $B = 50$  мТл;  $d$  – наличию индукции поперечного магнитного поля  $B = 100$  мТл. Кривые

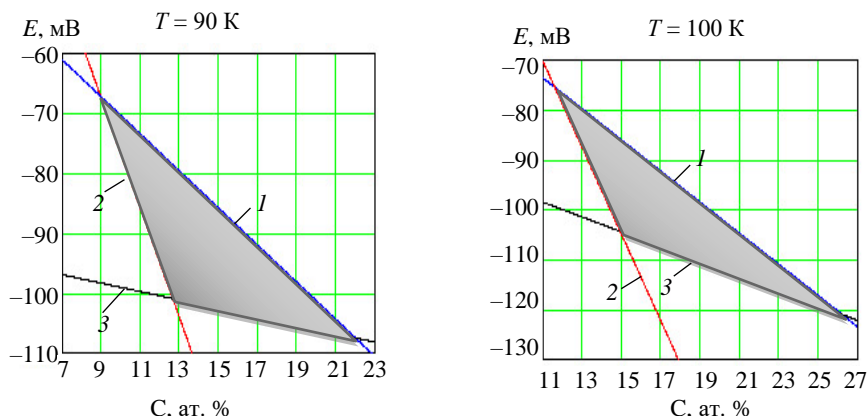


Рис. 3. Изменение зонного спектра в системе  $Bi_{100-C}-Sb_C$  относительно уровня химического потенциала чистого висмута с изменением параметра  $C$  при разных температурах (запрещенная зона обозначена заливкой)

Fig. 3. Change in the band spectrum in the  $Bi_{100-C}-Sb_C$  system relative to the level of the chemical potential of pure bismuth with a change in the  $S_{pri}$  parameter at different temperatures (the band gap is indicated by an fill)

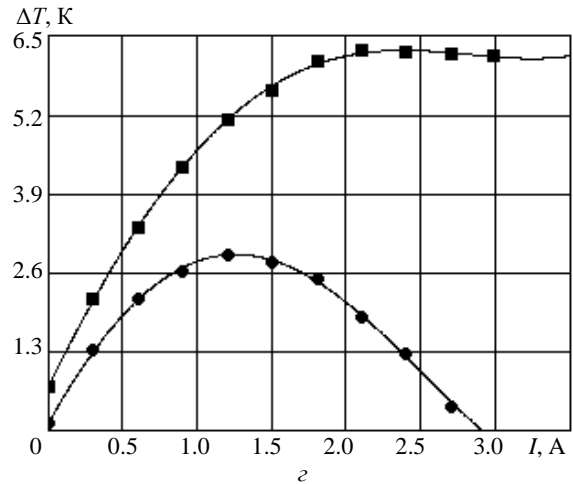
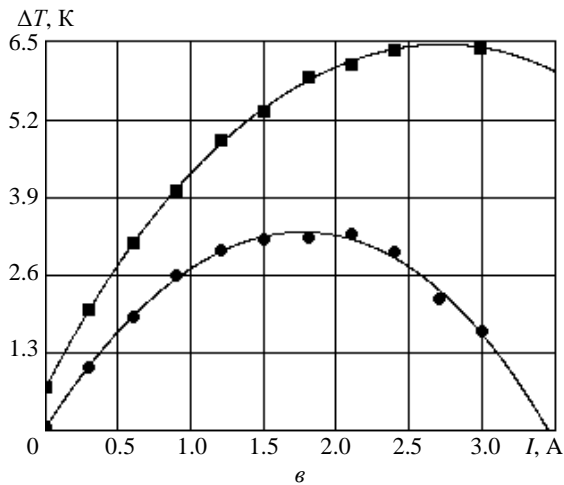
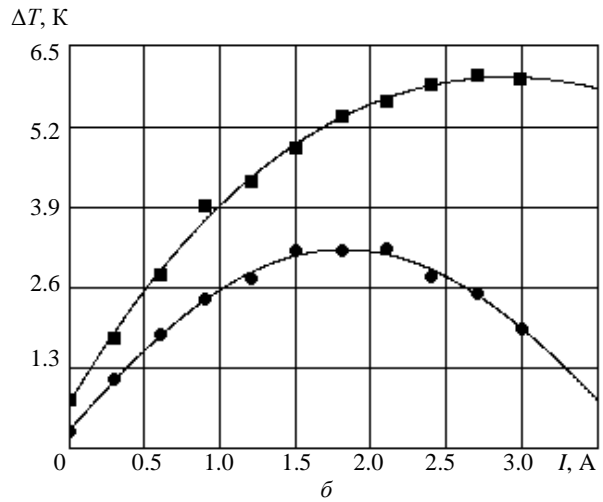
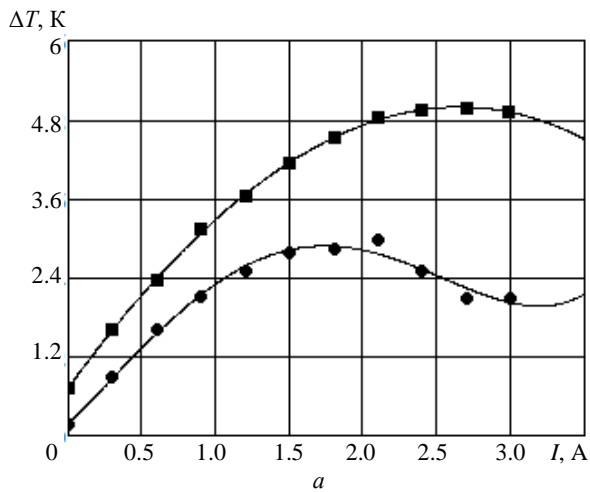


Рис. 4. Графики зависимости Пельтье-охлаждения  $\Delta T$  от значений тока  $I$ , проходящего через термоэлемент  
Fig. 4. Graphs of the dependence of the Peltier cooling value of the  $\Delta T$  on the value of the current  $I$  through the thermocouple

на всех графиках, экспериментальные точки которых отмечены кружками, соответствуют антипараллельным направлениям векторов градиентов температуры и ширины запрещенной зоны  $\nabla T \uparrow \downarrow \nabla E_g$  (и сопараллельным  $\nabla T \uparrow \uparrow \nabla C$ ). А кривые, точки которых отмечены квадратиками, соответствуют сопараллельным направлениям векторов градиентов температуры и ширины запрещенной зоны  $\nabla T \uparrow \uparrow \nabla E_g$  (и антипараллельным  $\nabla T \uparrow \downarrow \nabla C$ ).

На всех графиках наблюдается экстремальное значение перепада температур от тока. Положение данных экстремумов соответствует оптимальным значениям тока охлаждающего устройства.

Как видно из графиков, для разных значений индукций магнитного поля для позиций 1 и 2 оптимальные токи заметно отличаются. Отличие оптимальных перепадов температур для всех графиков лежит в пределах от 1.65 до 1.77 раз.

**Закключение.** Из проведенного прямого измерения Пельтье-эффекта следует, что для градиентно-неоднородного образца в данном интервале концентрации сурьмы при оптимальном токе, значение Пельтье-охлаждения существенно больше при сонаправленных градиентах  $\nabla T \uparrow \uparrow \nabla E_g$ , чем в случае, когда они противоположно направлены. Это означает, что явно проявляется эффект полярности явления Пельтье.

Сравнивая результаты данного эксперимента и результаты, изложенные в [9], можно сделать вывод, что улучшение эффекта Пельтье-охлаждения происходит именно тогда, когда градиенты  $\nabla T \uparrow \uparrow \nabla E_g$  в  $n$ -ветви Пельтье-пары, выполненной из кристалла системы  $\text{Vb}_{100}\text{-C-SbC}$ , и в интервале концентраций сурьмы  $7 < C < 11$  ат. % и в интервале концентраций сурьмы  $11 < C < 19$  ат. % (см. рис. 3).

Данные, изложенные в настоящей статье и в докладе [9], – это некий исследовательский итог, имеющий значение практического использования эффекта полярности при Пельтье-охлаждении.

## Список литературы

1. Анатычук Л. И. О современном состоянии и актуальных проблемах развития термоэлектричества // Термоэлектричество. 2012. № 3. С. 5–20.
2. Design and technology of generator modules of segmented thermoelements based on Bi-Te / L. I. Anatyuchuk, L. N. Vikhor, I. Yu. Ludchak, I. S. Termena // J. of Thermoelectricity. 2010. № 1. P. 58–69.
3. Segmented generator modules using  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based materials / L. I. Anatyuchuk, L. N. Vikhor, L. T. Strutynska, I. S. Termena // J. of Electric Materials. 2011. Vol. 40, № 6. P. 957–961.
4. Anatyuchuk L. I., Kuz R. V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive // Renningen: Thermoelektrik II expert Verlag, IAV. 2011. Berlin: Expert Verlag. 2011. P. 191–208.
5. Чернова А. А., Богданова Е. Г. Термоэлектрические охлаждающие устройства // Молодой ученый. 2020. № 4 (294). С. 68–71. URL: <https://moluch/294/66821/> (дата обращения 10.11.2022).
6. Бочегов В. И., Грабов В. М. Теплопроводность градиентно-неоднородных ветвей термоэлементов при рабочем перепаде температур // ФТП. 2017. Т. 51, вып. 7. С. 912–913.
7. Бочегов В. И., Мельников Н. А. Нелинейность (поляризованность) теплопроводности варизонных градиентно-неоднородных по составу кристаллов системы  $\text{Bi}_x\text{-Sb}_{1-x}$  в полупроводниковой области состава при температуре около 100 К // Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов. Тр. XIV Рос. семинара. Курган, 2018. С. 42–46.
8. Bochegov V. I., Melnikov N. A. The thermal conductivity of the variband crystals of the  $\text{Bi}_x\text{-Sb}_{1-x}$  system in the semiconductor region of the composition at the temperature of about 100 K // IOP Conf. Ser.: 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Mechanical Engineering and Appl. Composite Materials. Harbin: Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 544. С. 012033.
9. Мельников Н. А., Никифорова Л. Н., Пешкова И. А. Экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности кристалла системы  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  в интервале  $7 < C < 11$  ат. % на эффект Пельтье при температуре около 100 К // Сб. ст. X региональной конф. магистрантов, аспирантов и молодых ученых по физике, математике и химии. Омск: изд-во Омского гос. ун-та им. Ф. М. Достоевского, 2022. С. 77–82.
10. Бочегов В. И. Влияние градиентной неоднородности на физические свойства и явления переноса в кристаллической бинарной системе Bi-Sb: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07; защищена 13.04.2018; утв. 22.05.2018. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. 237 с.
11. Сегрегация при направленной кристаллизации бинарных систем типа Bi-Sb, расчет и экспериментальная проверка / В. И. Бочегов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, А. С. Парахин // Расплавы. 2014. Вып. 3. С. 85–92.
12. Пат. 2554190 RU. Радиатор для отвода тепла от затравки при выращивании монокристаллов в вакуумированной стеклянной ампуле / Бочегов В. И. Заяв. 21.05.2014. изобретений РФ 27.05.2015; опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18 (0,941 п.л.).
13. Расчет и экспериментальная проверка распределения компонентов при направленной кристаллизации в бинарных системах типа Bi-Sb с учетом зависимости коэффициента распределения от скорости кристаллизации и состава жидкой фазы / В. И. Бочегов, В. М. Грабов, Т. В. Дензанова, В. А. Комаров, А. С. Парахин // Термоэлектрики и их применения: Докл. XIII Межгос. семинара. СПб.: изд-во ФГБУ «ПИЯФ», 2013. С. 192–197.
14. Куликов В. А. Исследование зоны проводимости сплавов висмут-сурьма с концентрацией сурьмы 0–22 ат. %, легированных теллуром и селеном, по явлениям переноса в интервале температур 77–300 К: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГПИ, 1970. 132 с.
15. Яковлева Т. А. Исследование электрических и гальваномагнитных свойств сплавов висмут-сурьма с концентрацией сурьмы до 22 ат. % в интервале температур 77–300 К: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГПИ, 1971. 130 с.

## Информация об авторах

**Бочегов Василий Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор. Курганский государственный университет, ул. Советская, д. 63/4, Курган, 640000, Россия.  
E-mail: max\_vib@mail.ru

**Никифорова Лидия Николаевна** – аспирантка 3-го года обучения, Курганский государственный университет, ул. Советская, д. 63/4, Курган, 640000, Россия.  
E-mail: nik\_lidia@mail.ru

**Пешкова Ирина Александровна** – соискатель, Курганский государственный университет. Курган, ул. Советская, д. 63/4, 640000, Россия.  
E-mail: rashmy@rambler.ru

---

## References

1. Anatyshuk L. I. O sovremenom sostojanii i aktual'nyh problemah razvitija termojelektrichestva // Termojelektrichestvo. 2012. № 3. S. 5–20. (In Russ.).
2. Design and technology of generator modules of segmented thermoelements based on Bi-Te / L. I. Anatyshuk, L. N. Vikhor, I. Yu. Ludchak, I. S. Termena // J. of Thermoelectricity. 2010. № 1. P. 58–69.
3. Segmented generator modules using Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based materials / L. I. Anatyshuk, L. N. Vikhor, L. T. Strutynska, I. S. Termena // J. of Electric Materials. 2011. Vol. 40, № 6. P. 957–961.
4. Anatyshuk L. I., Kuz R. V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive // Renningen: Thermoelektrik II expert Verlag, IAV. 2011. Berlin: Expert Verlag. 2011. R. 191–208.
5. Chernova A. A., Bogdanova E. G. Termojelektricheskie ohlazhdajushhie ustrojstva // Molodoj uchenyj. 2020. № 4 (294). S. 68–71. URL: <https://moluch/294/66821/> (data obrashheniya 10.11.2022). (In Russ.).
6. Bochegov V. I., Grabov V. M. Teploprovodnost' gradientno-neodnorodnyh vetvej termojelementov pri rabochem perepade temperatur // FTP. 2017. T. 51, vyp. 7. S. 912–913. (In Russ.).
7. Bochegov V. I., Mel'nikov N. A. Nelinejnost' (poljarnost') teploprovodnosti varizonyh gradientno-neodnorodnyh po sostavu kristallov sistemy Bi<sub>x</sub>-Sb<sub>1-x</sub> v poluprovodnikovoj oblasti sostava pri temperature okolo 100 K // Komp'yuternoe modelirovanie fiziko-himicheskikh svojstv stekol i rasplavov. Tr. XIV Ros. seminar. Kurgan, 2018. S. 42–46. (In Russ.).
8. Bochegov V. I., Melnikov N. A. The thermal conductivity of the variband crystals of the Bi<sub>x</sub>-Sb<sub>1-x</sub> system in the semiconductor region of the composition at the temperature of about 100 K // IOP Conf. Ser.: 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Mechanical Engineering and Appl. Composite Materials. Harbin: Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 544. C. 012033.
9. Mel'nikov N. A., Nikiforova L. N., Peshkova I. A. Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija gradientnoj neodnorodnosti kristalla sistemy Bi<sub>100-C</sub>-Sb<sub>C</sub> v intervale 7 < C < 11 at. % na jeffekt Pel't'e pri temperature okolo 100 K // Sb. statej H regional'noj konferencii magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh po fizike, matematike i himii. Omsk: izd-vo Omskogo gos. un-ta im. F. M. Dostoevskogo, 2022. S. 77–82. (In Russ.).
10. Bochegov V. I. Vlijanie gradientnoj neodnorodnosti na fizicheskie svojstva i javlenija perenosa v kristallicheskoj binarnoj sisteme Bi-Sb: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.07; zashhishhena 13.04.2018: utv. 22.05. 2018. SPb.: RGPU im. A. I. Gercena, 2018. 237 s. (In Russ.).
11. Bochegov V. I., Grabov V. M., Komarov V. A., Parahin A. S. Segregacija pri napravlennoj kristallizacii binarnyh sistem tipa Bi-Sb, raschet i jeksperimental'naja proverka // Rasplavy. 2014. Vyp. 3. S. 85–92. (In Russ.).
12. Pat. 2554190 RU. Radiator dlja otvoda tepla ot zatravki pri vyrashhivanii monokristallov v vakuummirovannoj stekljannoj ampule / Bochegov V. I. Zajav. 21.05.2014. izobretenij RF 27.05.2015; opubl. 27.06.2015, Bjul. № 18. (0,941 p.l.). (In Russ.).
13. Raschet i jeksperimental'naja proverka raspredelenija komponentov pri napravlennoj kristallizacii v binarnyh sistemah tipa Bi-Sb s uchetom zavisimosti koeficienta raspredelenija ot skorosti kristallizacii i sostava zhidkoj fazy / V. I. Bochegov, V. M. Grabov, T. V. Denzanova, V. A. Komarov, A. S. Parahin // Termojelektriki i ih primenenija: Dokl. XIII Mezhgos. seminar. SPb.: izd-vo FGBU «PIJaF», 2013. S. 192–197. (In Russ.).
14. Kulikov V. A. Issledovanie zony provodimosti splavov vismut-sur'ma s koncentraciej sur'my 0–22 at. %, legirovannyh tellurom i selenom, po javlenijam perenosa v intervale temperatur 77–300 K: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. L.: LGPI, 1970. 132 s. (In Russ.).
15. Jakovleva T. A. Issledovanie jelektricheskikh i gal'vanomagnitnyh svojstv splavov vismut-sur'ma s koncentraciej sur'my do 22 at. % v intervale temperatur 77–300 K: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. L.: LGPI, 1971. 130 s. (In Russ.).

## Information about the authors

**Vasily I. Bochegov** – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor. Kurgan State University, 63/4 Sovetskaya str., Kurgan, 640000, Russia.  
E-mail: [max\\_vib@mail.ru](mailto:max_vib@mail.ru)

**Lidiya N. Nikiforova** – postgraduate student of 3 years of study, Kurgan State University, 63/4 Sovetskaya str., Kurgan, 640000, Russia.  
E-mail: [nik\\_lidia@mail.ru](mailto:nik_lidia@mail.ru)

**Irina A. Peshkova** – applicant, Kurgan State University. Kurgan, Sovetskaya str., 63/4, 640000, Russia.  
E-mail: [rashmy@rambler.ru](mailto:rashmy@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 20.11.2022; принята к публикации после рецензирования 24.12.2022; опубликована онлайн 28.02.2023.

Submitted 20.11.2022; accepted 24.12.2022; published online 28.02.2023.

---