

Низкотемпературный транспорт в твердых растворах теллуридов висмута–сурьмы с мышьяком, медью и оловом

В.А. Кульбачинский,^{1,*} А.С. Апрелева,^{1,†} В.Г. Кыттин,¹ А.В. Кошелев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт экспериментальной минералогии РАН
Россия, 142432, Черноголовка

(Поступила в редакцию 27.06.2024; подписана в печать 15.07.2024)

В настоящей работе нами исследованы температурные зависимости сопротивления ρ (интервал температур $4.2 < T < 330$ К) монокристаллов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.034$), $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.1$) и $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.0075$), а также термоЭДС и теплопроводность твердых растворов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ в интервале температур $77 < T < 330$ К. В интервале температур 100–320 К зависимость $\rho(T)$ подчиняется степенному закону с показателем степени $m = 2$ ($\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$), $m = 1.2 - 1.1$ ($\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$) и $m = 1.2 - 0.6$ ($\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$). Для $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ установлено, что проводимость уменьшается, а коэффициент Зеебека вначале существенно возрастает, а затем уменьшается при увеличении x . Теплопроводность образцов с As уменьшается по сравнению с исходным теллуридом висмута при $T < 250$ К. В результате максимум термоэлектрической эффективности ZT смещается от 300 К до 250 К при увеличении содержания As.

PACS: 72.20.-i, 72.80.-r УДК: 538.9, 536.2

Ключевые слова: эффект Зеебека, теплопроводность, термоэлектрическая эффективность, теллурид висмута.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2450502](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2450502)

ВВЕДЕНИЕ

Современное общество потребляет много энергии, поэтому поиск новых источников энергии, а также способа более эффективного использования уже известных источников не теряет актуальности. В последнее время важным фактором при разработке новых источников энергии стала их экологичность — при работе источник не должен оказывать вредное влияние на окружающую среду. В этой области очень перспективными являются термоэлектрические материалы (ТЭМ). Термоэлектрики способны преобразовывать тепловую энергию в электрическую и наоборот. Многие устройства в процессе работы выделяют тепловую энергию, и ТЭМ можно использовать для преобразования этой тепловой энергии в электрическую, причем без дополнительных энергетических затрат. ТЭМ можно использовать как для генерации электричества, так и для охлаждения. При этом приборам на их основе не нужны движущиеся части или жидкие компоненты, поэтому такие приборы надежны, стабильны, имеют длительный срок службы и хранения, бесшумны, вибростойки, могут использоваться при больших ускорениях и в невесомости.

Таким образом, ТЭМ обладают очень большим практическим потенциалом, но на данный момент их использование сильно ограничено из-за их низкой эффективности. Эффективность приборов на основе ТЭМ определяется безразмерной величиной $ZT = S^2 T \sigma / \kappa$, где S — коэффициент Зеебека (термоЭДС), σ — проводимость, κ — теплопроводность материала, T — абсолютная температура.

Теоретически было показано, что целый класс полупроводников Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 являются топологическими изоляторами [1]. Оказалось, что именно учёт спин-орбитального взаимодействия в этих кристаллах приводит к инверсии двух ближайших к уровню Ферми зон с разной четностью, результатом чего является их нетривиальная топологическая классификация. Существование топологических поверхностных состояний в кристаллах Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 было установлено в различных экспериментах [2–6]. С другой стороны, Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 — это хорошо известные термоэлектрики для применения при комнатной температуре. Вариация транспортных свойств, а именно σ , S и κ термоэлектрических материалов, важна для достижения лучших термоэлектрических характеристик. Материалы типа Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 тщательно исследованы с целью понимания их термоэлектрических свойств и их связи со структурой, точечными дефектами, концентрацией носителей заряда [7–10]. Этот процесс стимулируется применением этих материалов в термоэлектрических устройствах в качестве твердотельных охладителей или

* E-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

† E-mail: sasha-apreleva@mail.ru

генераторов. В полупроводниках типа Bi_2Te_3 имеются две валентные зоны (легкие и тяжелые дырки) и две зоны проводимости (легкие и тяжелые электроны) [11, 12]. Этот факт важен при моделировании их термоэлектрических свойств. Важное научное и практическое значение имеет выяснение фундаментальных свойств термоэлектрических материалов. Одним из очень информативных является исследование монокристаллов и влияние легирования различными элементами на концентрацию, подвижности носителей заряда и т.д.

Твердые растворы, т.е. кристаллы типа $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ или $\text{Sb}_2\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$, представляют особый интерес из-за их высоких значений термоэлектрической эффективности ZT . Твердые растворы обладают высокими термоэлектрическими характеристиками вблизи комнатной температуры по сравнению с Bi_2Te_3 [13, 14]. В зависимости от концентрации носителей заряда максимальное значение ZT обычно наблюдается около комнатной температуры.

Теллурид мышьяка относится к этой же группе материалов. As_2Te_3 существует в нескольких аллотропных модификациях: α и β - As_2Te_3 , из которых только последняя кристаллизуется в той же ромбоэдрической структуре, что и Bi_2Te_3 [15]. β - As_2Te_3 принадлежит к семейству полупроводников типа Bi_2Te_3 , хорошо известному классу эффективных термоэлектрических материалов при комнатной температуре. Метастабильный β - As_2Te_3 ($R\bar{3}m$, $a = 4.047 \text{ \AA}$ и $c = 29.492 \text{ \AA}$ при 300 К) изоструктурен Bi_2Te_3 и известен как хороший термоэлектрик около 400 К. Кристаллизация As_2Te_3 приводит к многофазным образцам, тогда как β - As_2Te_3 действительно может быть синтезирован с высокой фазовой чистотой закалкой расплава. β - As_2Te_3 испытывает фазовый переход и превращается в стабильный α - As_2Te_3 ($C2/m$, $a = 14.337 \text{ \AA}$, $b = 4.015 \text{ \AA}$, $c = 9.887 \text{ \AA}$ и $\beta = 95.06^\circ$) при 480 К [16].

Известна возможность замены As на Bi в системе $\text{As}_{2-x}\text{Bi}_x\text{Te}_3$ до $x = 0.035$. Твердые растворы $\text{As}_{2-x}\text{Bi}_x\text{Te}_3$ имеют уменьшенное удельное электрическое сопротивление при сохранении теплопроводности менее 1 Вт/м·К в диапазоне температур $5 < T < 300 \text{ К}$. В этих материалах получено значение ZT около 0.2 при комнатной температуре [15]. Кроме того, исследовалась дефектность твердых растворов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ [17].

В настоящей работе нами исследованы температурные зависимости сопротивления (в интервале температур $4.2 < T < 330 \text{ К}$), термоЭДС и теплопроводность твердых растворов монокристаллов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.034$), $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.1$) и $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.0075$) в интервале температур $4.2 < T < 330 \text{ К}$.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления монокристаллов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ вначале выращивались Bi_2Te_3 и As_2Te_3 . В кони-

ческие кварцевые ампулы были загружены Bi_2Te_3 и As_2Te_3 (предварительно синтезированные из элементов чистотой 5N) в соотношении, соответствующем стехиометрии $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($x = 0.00 - 0.1$). Затем ампулы откачивали до давления 10^{-4} Па и запаивали. Синтез был осуществлен в горизонтальной печи при температуре 1073 К в течение 48 ч. Монокристаллы выращивались в тех же ампулах из полученных поликристаллов по модифицированной методике Бриджмена [18].

Монокристаллы p -типа легированного оловом Sb_2Te_3 также выращивались методом Бриджмена. Перед ростом в ампулу загружались Sn, Sb и Te (чистотой 5N) в соотношении, соответствующем нужному составу $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$. После роста поликристалла необходимого состава выращивался монокристалл.

Монокристаллы $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ выращивались несколько иначе. Сначала мы синтезировали поликристаллические образцы Sb_2Te_3 из элементов с чистотой 99.999% в стехиометрическом соотношении в кварцевой ампуле. Далее в стехиометрический поликристалл добавлялись элементы в таком соотношении, чтобы составы проб впоследствии соответствовали формуле $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$. После роста поликристалла нужного состава мы выращивали монокристаллы. Выращенные монокристаллы освобождались из кварца и раскалывались по плоскостям спайности перпендикулярно оси C_3 , которая в выращенных слитках всегда была перпендикулярна продольной оси образца. Элементный состав образца определялся с помощью метода рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCANVega II XMU с энергодисперсионной системой микроанализа INCA Energy450/XT (20 кВ). Анализ состава образцов проводился на полированных эпоксидных пашках, в которых находились образцы.

Образцы для измерений в виде параллелепипеда с размерами $1 \times 1 \times 5 \text{ мм}^3$ с длинной осью, направленной вдоль оси C_2 , вырезались на электроэрозионном станке. Токовые и потенциальные контакты из медной проволоки диаметром 30 мкм припаивались к образцу с использованием сплава $\text{Bi}+4\%\text{Sb}$.

Электрическое сопротивление образцов определялось четырехконтактным методом на постоянном токе. Величина тока, пропускаемого через образец и создаваемого стабилизированным источником питания, обычно составляла 10 мА. Направление тока выбиралось вдоль оси C_2 . Ток через образец и напряжение на нем регистрировались, соответственно, цифровыми ампервольтомметрами. Коэффициент Зеебека для всех образцов измерялся в температурном интервале $77 < T < 330 \text{ К}$ при температурном градиенте вдоль плоскостей скола по методике, описанной в [19]. Эффект Холла измерялся при направлении магнитного поля вдоль оси C_3 . В табл. 1 и 2 приведены величины $1/eR_H$ (R_H — коэффициент Холла, e — заряд электрона) и подвижности носителей заряда μ .

В табл. 1 и 2 приведены данные эффекта Холла при двух температурах: 77 и 300 К.

Таблица 1. Концентрации носителей заряда $1/eR_H$ при двух температурах

Образец	300 К, $1/eR_H, \text{см}^{-3}$	77 К, $1/eR_H, \text{см}^{-3}$
Bi_2Te_3	1.1E+19	1.3E+19
$\text{Bi}_{1.99}\text{As}_{0.010}\text{Te}_3$	6.6E+18	1.3E+18
$\text{Bi}_{1.96}\text{As}_{0.012}\text{Te}_3$	2.9E+19	2.5E+18
$\text{Bi}_{1.95}\text{As}_{0.023}\text{Te}_3$	6.7E+18	2.2E+18
$\text{Bi}_{1.93}\text{As}_{0.028}\text{Te}_3$	7.2E+18	6.2E+18
$\text{Bi}_{1.9}\text{As}_{0.034}\text{Te}_3$	2E+19	-8.3E+17

Таблица 2. Подвижности носителей заряда μ при двух температурах

Образец	300 К, $\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	77 К, $\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
Bi_2Te_3	230	2174
$\text{Bi}_{1.99}\text{As}_{0.01}\text{Te}_3$	105	4510
$\text{Bi}_{1.96}\text{As}_{0.012}\text{Te}_3$	64	4605
$\text{Bi}_{1.95}\text{As}_{0.023}\text{Te}_3$	150	3805
$\text{Bi}_{1.93}\text{As}_{0.028}\text{Te}_3$	284	5258
$\text{Bi}_{1.9}\text{As}_{0.034}\text{Te}_3$	51	6845

Как видно из таблиц, Bi_2Te_3 , выращенный в стехиометрических условиях, показывает стандартную высокую концентрацию дырок, так как в нем образуется большое количество антиструктурных заряженных точечных дефектов. В целом замещение висмута на мышьяк приводит к понижению концентрации дырок, хотя и не монотонно. Для образца с максимальным содержанием мышьяка $x = 0.034$ при азотной температуре коэффициент Холла R_H изменяет знак, то есть, кроме дырок, появляются электроны. Поэтому использование простой формулы $1/eR_H$ для определения концентрации носителей заряда в данном случае приводит к завышенному значению.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование сопротивления ρ монокристаллических образцов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($0 \leq x \leq 0.034$) в диапазоне температур $4.2 < T < 330$ К показало, что ρ всех образцов уменьшается при понижении температуры и увеличивается при увеличении содержания мышьяка, как показано на рис. 1. Излом при $T \approx 150$ К связан с обратимым фазовым переходом [16], который наблюдается только в образцах с $x \geq 0.028$. Для образцов с содержанием мышьяка до 0.05 сопротивление R уменьшается с понижением температуры и насыщается при низких

температурах. В интервале температур 100–320 К зависимость $\rho(T)$ подчиняется степенному закону с показателем степени $m = 2$. Показатель степени практически не изменяется при увеличении содержания As.

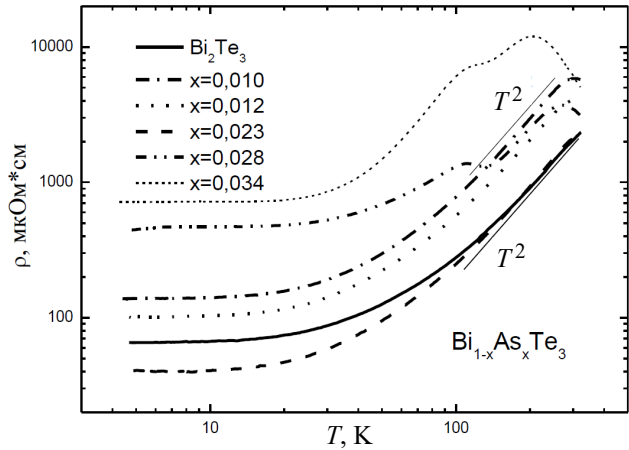


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления для монокристаллов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ в логарифмическом масштабе

Отличие наблюдаемой температурной зависимости от $T^{-1.5}$, характерной для рассеяния на акустических фоновых и классической статистики, можно объяснить влиянием рассеяния на оптических фоновых. При температурах меньше температуры Дебая рассеяние на оптических фоновых может привести к более резкой температурной зависимости подвижности носителей заряда. При этом при увеличении содержания мышьяка характер рассеяния носителей заряда в области температур 100–300 К не изменяется. Магнетосопротивление всех образцов при 300 К и 77 К положительное.

Интересно сравнить температурные зависимости сопротивления ρ в $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ с такими же зависимостями $\rho(T)$ в монокристаллах $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ и $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$, приведенными на рис. 2. Для всех образцов $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ сопротивление ρ уменьшается с понижением температуры и выходит на насыщение при низких температурах. В интервале температур 100–300 К зависимость $\rho(T)$ подчиняется степенному закону с показателем степени $m = 1.2$ для исходного образца Sb_2Te_3 . Отклонение от $m = 1.5$, характерное для рассеяния на фоновых, скорее всего, связано с вкладом рассеяния на ионизированных примесях. Показатель степени практически не меняется при легировании Cu до максимальных изученных концентраций. Отметим, что в случае олова в монокристаллах $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ ситуация иная. С увеличением содержания олова показатель степени сильно уменьшается и при $x = 0.0075$ составляет уже $m = 0.6$ [20], что соответствует увеличению вклада рассеяния на примесях, как показано на рис. 2, б.

Магнетосопротивление во всех образцах в $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ положительное, увеличивается

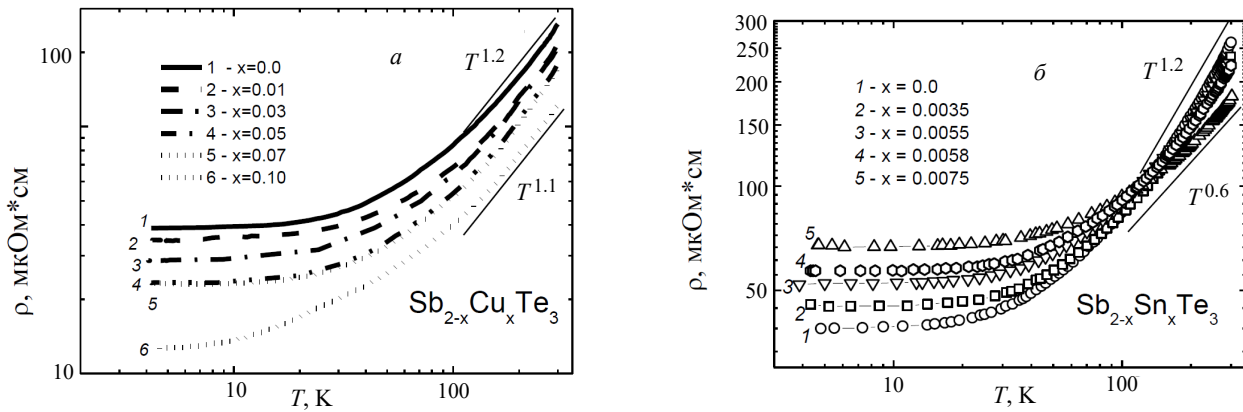


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления для монокристаллов $Sb_{2-x}Cu_xTe_3$ (а) и монокристаллов $Sb_{2-x}Sn_xTe_3$ (б)

при понижении температуры и увеличении содержания As.

В монокристаллах $Bi_{2-x}As_xTe_3$ измерялись также термоэлектрические свойства. Установлено, что коэффициент Зеебека S положителен в $Bi_{2-x}As_xTe_3$ ($x = 0.00 - 0.034$), что соответствует p -типу проводимости, и S существенно возрастает при замещении Bi на As до величины $x = 0.028$ (рис. 3). А вот при $x = 0.034$ при понижении температуры до 77 К S изменяет знак с положительного на отрицательный. Отметим, что при этой температуре и знак эффекта Холла изменяется (см. табл. 1).

Теплопроводность κ при увеличении количества мышьяка при комнатной температуре возрастает, оставаясь, тем не менее, меньше 2.5 Вт/м·К. Однако при $T < 250$ К теплопроводность уменьшается при добавлении мышьяка (рис. 4).

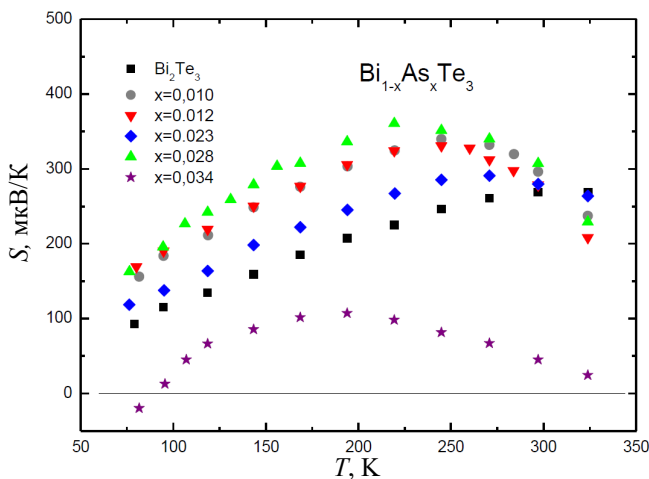


Рис. 3. Зависимости коэффициента Зеебека от температуры для образцов $Bi_{2-x}As_xTe_3$

Замещение висмута на мышьяк в монокристаллах $Bi_{2-x}As_xTe_3$ в целом понижает электрическую проводимость, то есть мышьяк действует как донор. Такое поведение объясняется уменьшением

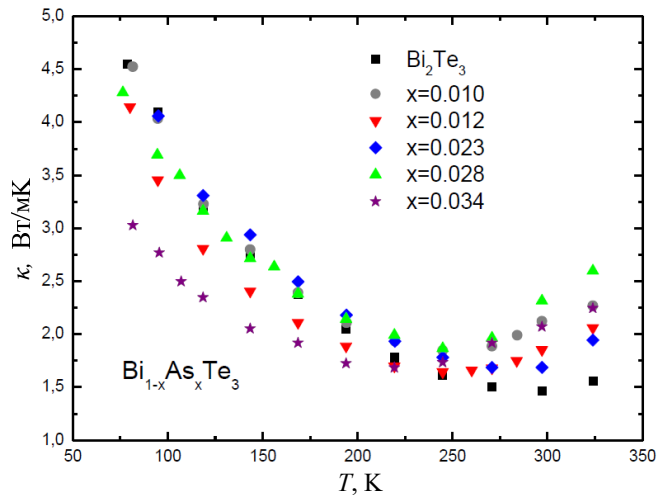


Рис. 4. Зависимости теплопроводности κ монокристаллических образцов $Bi_{2-x}As_xTe_3$ от температуры

числа точечных заряженных дефектов в теллуриде висмута при увеличении концентрации мышьяка. При стехиометрической загрузке компонентов теллурида висмута получаются кристаллы с небольшим избытком висмута. Избыточные атомы Bi занимают положения теллура, образуя дефекты замещения. Поскольку они отрицательно заряжены, кристаллы Bi_2Te_3 , выросшие при стехиометрической загрузке компонентов, всегда обладают проводимостью p -типа и имеют значительную концентрацию дырок.

Безразмерная термоэлектрическая эффективность $ZT = S^2T/\kappa\rho$ достигает величины 0.7, причем максимум ее смещается от комнатной T к температуре $T \approx 250$ К при увеличении содержания мышьяка в твердых растворах $Bi_{2-x}As_xTe_3$ (рис. 5).

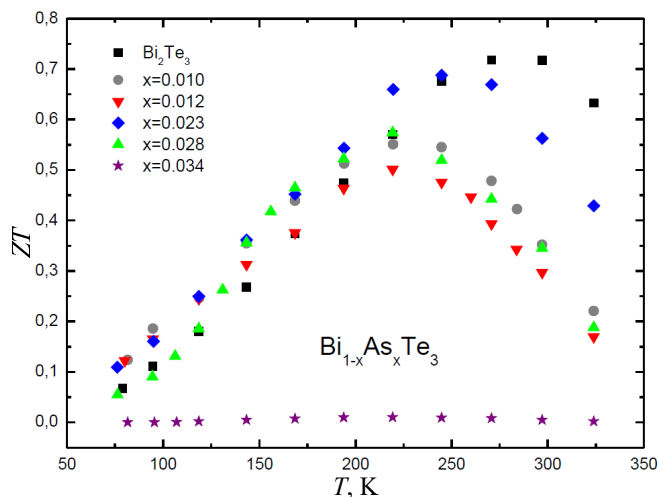


Рис. 5. Зависимости безразмерной термоэлектрической эффективности ZT монокристаллических образцов $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ от температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в интервале температур 100–320 К зависимость $\rho(T)$ подчиняется степенному закону с показателем степени $m = 2$ в случае $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$. Отличие наблюдаемой

температурной зависимости от $T^{-1.5}$, характерной для рассеяния на акустических фононах и классической статистики, можно объяснить влиянием рассеяния на оптических фононах.

Для $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ $m \approx 1.2$ и не изменяется при увеличении x . В случае $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ m уменьшается от 1.2 до 0.6 при увеличении x от 0 до 0.0075.

Коэффициент Зеебека S положителен в $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($x = 0 - 0.034$), что соответствует p -типу проводимости, и S существенно возрастает при замещении Bi на As до $x = 0.028$. Теплопроводность при увеличении количества мышьяка при комнатной температуре незначительно возрастает, оставаясь, тем не менее, меньше 2.5 Вт/м·К. Замещение висмута на мышьяк в монокристаллах $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ в целом понижает электрическую проводимость, то есть мышьяк действует как донор. Такое поведение объясняется уменьшением числа точечных заряженных дефектов в теллуриде висмута при увеличении концентрации мышьяка. Безразмерная термоэлектрическая эффективность ZT достигает величины 0.7, причем максимум ее смещается от комнатной T к температуре $T = 250$ К при увеличении содержания мышьяка в твердых растворах $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$.

Авторы благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-1353.

- [1] Zhang H., Liu C.-X., Qi X.-L. et al. // *Nature Physics*. **5**. 438 (2009).
- [2] Hsieh D., Xia Y., Qian D. et al. // *Nature*. **460**. 1101 (2009).
- [3] Hsieh D., Xia Y., Qian D. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **103**. 146401 (2009).
- [4] Kulbachinskii V.A., Buga S.G. et al. // *J. Physics: Conf. Series*. **969**. 012152 (2018).
- [5] Buga S.G., Kulbachinskii V.A., Kytin V.G. et al. // *Chem. Phys. Lett.* **631**, 97 (2015).
- [6] Kim H.-J., Kim K.-S., Wang J.-F. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **110**. 136601 (2013).
- [7] Scherrer H., Scherrer S. Thermoelectric Properties of Bismuth Antimony Telluride Solid Solutions, Macro to Nano Handbook ed. D. M. Rowe, 2006.
- [8] Stordeur M. // *Phys. Stat. Sol. (b)*. **161**. 831 (1990).
- [9] Kulbachinskii V.A., Kytin V.G. et al. // *Materials Today: Proceedings* **8**. 573 (2019).
- [10] Кульбачинский В.А., Зиновьев Д.А., Маслов Н.В. и др. // *ЖЭТФ* **155**. 1091 (2019).
- [11] Kulbachinskii V.A., Brandt N.B., Cheremnykh P.A. et al. // *Phys. Stat. Sol. (b)* **150**. 237 (1988).
- [12] Jaworski C.M., Kulbachinskii V.A., Heremans J.P. // *Phys. Rev. B* **80**. 233201 (2009).
- [13] Thermoelectric Materials — New Directions and Approaches. Edited by T.M. Tritt, M.G. Kanatzidis, H.B. Lyon, G.D. Mahan. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **478**. (1997).
- [14] Thermoelectric Materials 1998 — The Next Generation Materials for Small-Scale Refrigeration and Power Generation Applications, edited by T.M. Tritt, M.G. Kanatzidis, G.D. Mahan, H.B. Lyon. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **545**. 233 (1999).
- [15] Vaney J.-B., Carreaud J., Delaizir G. et al. // *J. Electr. Mater.* **45**. 1786 (2016).
- [16] Morin C., Corallini S., Carreaud J. et al. // *Inorg. Chem.* **54**. 9936 (2015).
- [17] Bachan D., Hovorkova A., C. Drasar et al. // *J. Phys. Chem. Sol.* **68**. 1079 (2007).
- [18] Kulbachinskii V.A., Inoue M., Sasaki M. et al. // *Phys. Rev. B* **50**. 16921 (1994).
- [19] Kulbachinskii V.A., Kytin V.G. et al. // *J. Sol. St. Chem.* **193**. 154 (2012).
- [20] Кульбачинский В.А., Кытин В.Г., Константинова Е.А. // *Российские нанотехнологии*. **16**, 364 (2021).

Low Temperature Transport in Solid Solutions of Bismuth-Antimony Tellurides with Arsenic, Copper, and Tin

V.A. Kulbachinskii^{1,a}, A.S. Apreleva^{1,b}, V.G. Kytin¹, A.V. Koshelev²

¹Department of Low Temperature Physics and Superconductivity, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²*Institute of Experimental Mineralogy RAS
Chernogolovka 142432, Russia,
E-mail: ^akulb@mig.phys.msu.ru, ^bsasha-apreleva@mail.ru*

In this work, we have investigated the temperature dependences of the resistance ρ (in the temperature range $4.2 < T < 330$ K) of single crystals of $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.034$), $\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.1$), and $\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ ($0 < x < 0.0075$), as well as the thermopower and thermal conductivity of solid solutions of $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$ in the temperature range $77 < T < 330$ K. In the temperature range of 100–320 K, the dependence $\rho(T)$ follows a power law with an exponent $m = 2$ ($\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$), $m = 1.2 - 1.1$ ($\text{Sb}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Te}_3$), and $m = 1.2 - 0.6$ ($\text{Sb}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$). For $\text{Bi}_{2-x}\text{As}_x\text{Te}_3$, it has been established that the conductivity decreases, while the Seebeck coefficient initially increases significantly and then decreases with increasing x . The thermal conductivity of samples with As decreases compared to the original bismuth telluride at $T < 250$ K. As a result, the maximum thermoelectric figure of merit ZT shifts from 300 K to 250 K with increasing As content.

PACS: 72.20.-i, 72.80.-r

Keywords: Seebeck effect, thermal conductivity, thermoelectric efficiency, bismuth telluride.

Received 27 June 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

1. Кульбачинский Владимир Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru.
2. Апрелева Александра Сергеевна — аспирант кафедры физики низких температур; e-mail: sasha-apreleva@mail.ru.
3. Кытин Владимир Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: kytin@mig.phys.msu.ru.
4. Кошелев Анатолий Владимирович — науч. сотрудник; e-mail: anatolkosh@mail.ru.