

Особенности термоэлектрических свойств слабо легированных твердых растворов $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$

© П.П. Константинов, Л.В. Прокофьева, Ю.И. Равич*, М.И. Федоров[¶], В.В. Компаниец⁺

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

⁺ ОАО ИПФ „Криотерм“,

197348 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 9 декабря 2003 г. Принята к печати 17 декабря 2003 г.)

В диапазоне 77–300 К исследованы электрические и термоэлектрические свойства слабо легированного твердого раствора $n\text{-Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$. Результаты сопоставляются с данными для сплава $\text{PbTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ с близкой величиной термоэдс S при 84 К. Помимо более низкой теплопроводности, для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ характерны более высокая электропроводность σ и ее значительно более слабая зависимость от температуры. Как следствие, коэффициент мощности $S^2\sigma$ в образцах с оптимальными свойствами начинает уменьшаться, лишь когда становится заметной концентрация неосновных носителей заряда. Величина $|S|$ при этом значительно превосходит стандартное значение 200 мкВ/К. Понижение концентрации электронов уменьшает термоэлектрическую эффективность (Z) в максимуме и незначительно снижает температуру максимума, поэтому ожидаемое влияние на среднюю величину Z в диапазоне 77–300 К отсутствует. Аналогичные особенности наблюдаются и в $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$, хотя выражены слабее. Экспериментальные результаты обсуждаются с учетом возможных изменений доминирующих механизмов рассеяния, концентрации подвижных носителей и энергетического спектра электронов.

Разработка высокоэффективных термоэлектриков на основе тройных систем твердых растворов $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$ привела к созданию и широкому распространению термоэлектрических холодильников для диапазона комнатных температур. Впоследствии начались исследования, направленные на расширение рабочего диапазона вплоть до температуры жидкого азота [1–3]. Согласно [1,2], среди материалов n -типа проводимости более высокие значения термоэлектрической эффективности Z в области температур (T) ниже комнатной наблюдаются в системе $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ при концентрациях электронов $(3-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует значениям термоэдс при $T \approx 84 \text{ К}$ $|S| = 100-160 \text{ мкВ/К}$.¹ Максимум Z на куполообразной зависимости $Z(T)$ для твердых растворов с $x = 0.21-0.36$ превышает $3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и соответствует температурам 220–270 К; несколько меньшую термоэлектрическую эффективность в максимуме имеет твердый раствор с $x = 0.12$. При исследовании термоэлектрических свойств образцов более низкого уровня легирования с $x = 0.3$ и 0.36 ($|S|$ при 84 К достигает величин $\sim 200 \text{ мкВ/К}$) [3] обнаружена более сложная зависимость термоэлектрической эффективности от температуры: в области температур ниже 150 К термоэлектрическая эффективность с понижением температуры начинает расти и достигает значений $(2.0-2.4) \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при 84 К; максимум на куполообразном участке кривой $Z(T)$ по-прежнему имеет место

при температурах, близких к 250 К, однако величина Z значительно ниже приведенной для образцов с более высокой концентрацией электронов. В настоящей работе продолжены исследования термоэлектрических свойств твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ с электронной проводимостью; представлялось интересным выснить, к каким особенностям в свойствах приводит понижение концентрации электронов и как эти особенности влияют на величину и поведение термоэлектрической эффективности в диапазоне температур 77–300 К.

Для исследования коэффициентов термоэдс, электро- и теплопроводности (S , σ и κ) в интервале температур 85–340 К были изготовлены образцы твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ с содержанием Se 10 ат% в халькогеновой подрешетке ($x = 0.3$). Использовался метод вертикальной зонной плавки, легирование осуществлялось посредством введения хлора.

Чтобы выделить специфические особенности в поведении рассматриваемых материалов при низких температурах, было проведено сопоставление термоэлектрических свойств двух слабо легированных твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ и $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$ с одинаковым содержанием селена (10 ат%). Твердый раствор $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$ выбран в качестве модельного материала, термоэлектрические свойства которого при низких температурах хорошо укладываются в рамки однозонной модели с непараболическим законом дисперсии и рассеянием электронов на фонах и близкодествующем потенциале нейтральных примесных центров [4]. На рис. 1 представлены температурные зависимости электрических и термоэлектрических характеристик для указанных твердых растворов с близкими значениями термоэдс при 84 К.

¹ При сравнении свойств материалов будем использовать температуры 84 и 250 К; последнее значение выбрано с учетом того, что при комнатной температуре в слабо легированных образцах данных материалов достаточно велик вклад собственных носителей заряда.

[¶] E-mail: m.fedorov@mail.ioffe.ru

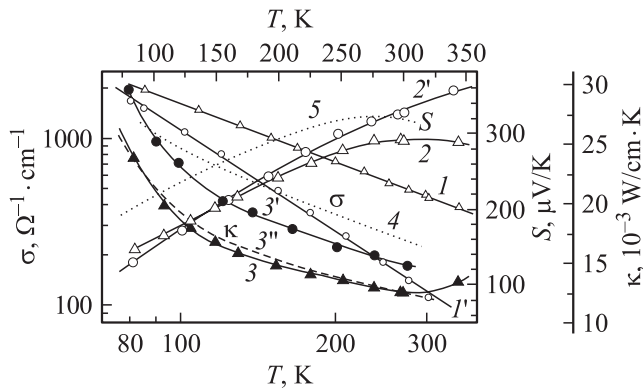


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности σ (1, 1', двойной логарифмический масштаб), термоэдс S (2, 2', линейный масштаб) и теплопроводности κ (3, 3', линейный масштаб) твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ (1, 2, 3) и $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$ (1', 2', 3') с одинаковым содержанием Se (10 ат%) и близкой величиной термоэдс при 84 К. 4, 5 — соответственно σ и S согласно [3] для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ с меньшей концентрацией электронов. 3'' — гипотетическая теплопроводность твердого раствора на основе Bi_2Te_3 , полученная в предположении, что ее температурное поведение такое же, как в материале на основе PbTe .

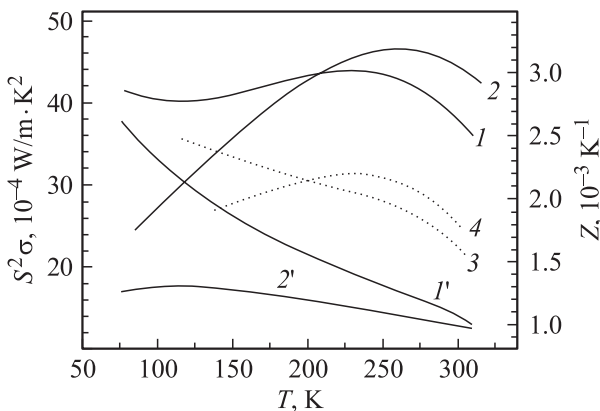


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента мощности $S^2\sigma$ (1, 1') и термоэлектрической эффективности Z (2, 2') для твердых растворов на основе Bi_2Te_3 (1, 2) и PbTe (1', 2') с 10 ат% Se. Пунктирные кривые — $S^2\sigma$ (3) и Z (4) по данным [3] для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ с меньшей концентрацией электронов.

Сравнение кривых теплопроводности κ (кривые 3 и 3') показывает, что закон изменения $\kappa(T)$ в обоих сплавах фактически одинаковый, если не принимать во внимание очень небольшое (в максимуме менее 4%) отступление от него, наблюдаемое в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ при температурах (110–225) К. Это уменьшение в κ не сказывается ни на амплитуде, ни на положении максимума термоэлектрической эффективности Z_{max} , а лишь незначительно увеличивает значения Z в указанном температурном диапазоне. Снижение величины теплопроводности, наблюдаемое в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$, весьма заметно влияет на термоэлектрическую эффек-

тивность. Так, увеличение Z_{max} за счет уменьшения полной теплопроводности составляет величину $\sim 20\%$.

Различия в температурном поведении коэффициентов электропроводности σ (рис. 1, кривые 1 и 1') и термоэдс S (рис. 1, кривые 2 и 2') в рассматриваемых сплавах имеют принципиальное значение. Оба параметра в твердом растворе на основе PbTe более резко изменяются с температурой. Особенно резко изменяется электропроводность: в твердом растворе $\text{PbTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ уменьшается более чем на порядок при увеличении температуры от 84 до 300 К, тогда как в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ лишь в 4.2 раза. Поскольку коэффициент термоэдс в твердом растворе $\text{PbTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ в указанном диапазоне увеличивается в 2.5 раза, естественно, что в этом случае коэффициент мощности $S^2\sigma$ круто падает с повышением температуры, а термоэлектрическая эффективность при невысокой скорости уменьшения теплопроводности достигает максимума уже при температуре, близкой к 100 К (рис. 2). Абсолютная величина термоэдс при этом не превосходит стандартного значения ~ 200 мкВ/К, соответствующего механизмам рассеяния с показателем r в энергетической зависимости времени релаксации ($\tau \propto \epsilon^r$), равным -0.5 в случаях рассеяния на акустических фонах и на близкодествующем потенциале примесей [5].

Совсем иная ситуация складывается для твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$. При 84 К коэффициент мощности в этом материале выше благодаря большей σ . С повышением температуры различие становится гораздо более заметным, поскольку $S^2\sigma$, несмотря на более слабый рост термоэдс, не только не падает вплоть до начала собственной проводимости, но даже несколько возрастает, как видно из рис. 2. Лишь заметный вклад дырок в явление переноса кардинально меняет характер зависимости $S^2\sigma = f(T)$, приводя к быстрому уменьшению величины данного параметра. Поскольку при появлении неосновных носителей изменяется также характер зависимости $\kappa(T)$, термоэлектрическая эффективность достигает максимума и затем начинается быстрое уменьшение величины Z . Таким образом, собственная проводимость является фактором, ограничивающим рост $Z(T)$ в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$. Естественно, что в данном материале Z_{max} соответствует более высоким температурам и более высоким значениям термоэдс (в рассматриваемом случае $|S| \approx 290$ мкВ/К).

Таким образом, можно заключить, что достаточно высокая электропроводность и ее слабое уменьшение с ростом температуры в диапазоне 85–300 К наряду с низким уровнем теплопроводности являются особенностями термоэлектрических свойств данных материалов, ответственными за увеличение термоэлектрической эффективности, смещение ее максимума в область более высоких температур, когда начинается качественное изменение транспортных свойств под влиянием собственных носителей тока.

В соответствии с данными [3] уменьшение концентрации электронов в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ еще в

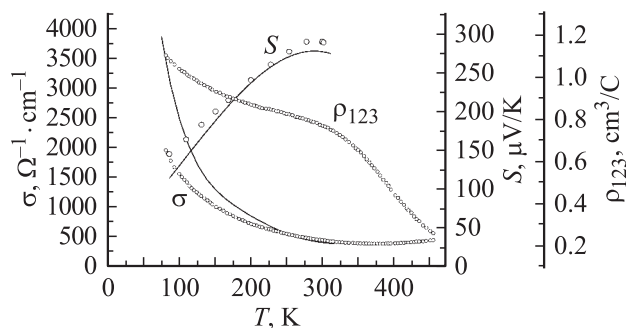


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности σ , термоэдс S и коэффициента Холла ρ_{123} . Сплошные кривые — данные [2] для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$; точки — результаты настоящей работы для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$. Образцы имеют близкие значения термоэдс при 250 К.

большой степени ослабляет температурный рост термоэдс, однако температурное поведение электропроводности не изменяет, и оно по-прежнему описывается степенным законом $\sigma \propto T^\beta$ с величиной $\beta \approx -1.2$. На рис. 1, 2 это иллюстрируют взятые из [3] данные для образца с $S = -200$ мкВ/К при 84 К. Более крутой ход $\sigma(T)$ при $T < 125$ К [3], ответственный за аномальное поведение Z при этих температурах, будет обсуждаться далее. Что касается непосредственно показателей эффективности в диапазоне 125–300 К, необходимо отметить следующее: коэффициент мощности в этом случае падает с повышением температуры, но не так резко, как в твердом растворе $\text{PbTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$, поэтому появление максимума на зависимости $Z(T)$ по-прежнему связано с началом собственной проводимости. Значение коэффициента термоэдс $|S|$ при этом уже превышает 300 мкВ/К.

На основании приведенных данных можно заключить, что понижение уровня легирования в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$, обычно предпринимаемое для увеличения среднего значения Z за счет понижения температуры максимума на зависимости $Z(T)$, в данном материале имеет предел. После его достижения термоэлектрическая эффективность фактически во всем температурном интервале начинает уменьшаться, при этом понижения температуры Z_{max} не наблюдается. Очевидно, температурный рост термоэдс становится слишком слабым, чтобы в заметной степени компенсировать температурное падение электропроводности, да и абсолютная величина электропроводности дополнительно снижается за счет уменьшения подвижности, особо чувствительной к степени совершенства материала в слабо легированных образцах. Оптимальными для температур ниже комнатной являются образцы с коэффициентом термоэдс при 300 К порядка 285–295 мкВ/К, Z_{max} не ниже $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при $T = 250$ К.

Отмеченные выше особенности непосредственно связаны с введением в Bi_2Te_3 селена. Когда добавка Se мала, малы и производимые ею изменения в свойствах, хотя они присутствуют и имеют тот же характер. Чтобы это подтвердить, воспользуемся результатами [2] для твер-

дого раствора $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ и отметим их сходство с приведенными выше: расположение максимумов кривых $Z(T)$ в том же интервале температур и та же их взаимосвязь с собственной проводимостью; отсутствие выигрыша в Z при всех $T < 300$ К в образце с концентрацией электронов ниже определенного уровня; оптимальная величина $|S|$, заметно превышающая 200 мкВ/К. Теперь количественно сопоставим экспериментальные данные для твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ с одинаковой величиной термоэдс при 250 К. Из рис. 3 видно, что в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ не так сильно, как в твердом растворе с $x = 0.3$, ослаблена температурная зависимость термоэдс, поэтому образцы этих составов, имеющие при 250 К одинаковые величины не только термоэдс, но и электропроводности, при 84 К заметно отличаются по этим параметрам друг от друга. Линейная экстраполяция термоэдс при стремлении температуры к 0 К не приводит к нулевым значениям S в обоих сплавах. Если полагать, что концентрация электронов при 250 К в сплавах разного состава с одинаковой термоэдс одинакова (при комнатной температуре этот результат для диапазона легирования $(1 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$ получен в [1]) и не меняется с температурой, то электронная подвижность при низкой температуре оказывается существенно зависящей от состава материала, ее величина заметно уменьшается с ростом содержания Se. Поскольку при этом значительно изменяется (возрастает) и коэффициент термоэдс, привлечения для объяснения наблюдаемых фактов только лишь рассеяния на близкойдействующем потенциале примесей явно недостаточно ($r = -0.5$, как и при рассеянии на акустических фононах [5]). Оценки рассеяния на кулоновском потенциале ионизированных дефектов, эффективного для низкоэнергетических носителей и потому приводящего к более высоким значениям S , показали, что вклад этого механизма в рассматриваемых материалах мал [6]. В такой ситуации естественно предположить, что наблюдаемые особенности явлений переноса в слабо легированных твердых растворах $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ связаны с изменением энергетического спектра электронов. Поэтому представлялось полезным оценить температурное изменение эффективной массы в зависимости от состава сплава, как это делалось в [6] для более легированных образцов твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ с $x = 0.12$ и 0.45.

Как и в [6], при определении температурной зависимости эффективной массы $m^* \propto T^s$ мы полагали, что концентрация электронов N не изменяется в диапазоне 84–250 К, а в рассеянии преобладают механизмы с параметром $r = -0.5$. На рис. 4 построены зависимости $\lg m^* \propto \lg(T^{-1}F_{3/2}^{-2/3})$ как функции $\lg T$ (F — интегралы Ферми [5]) для твердых растворов с 4 и 10 ат% Se, свойства которых представлены на рис. 3. Для слабо легированного твердого раствора с 4 ат% Se ($x = 0.12$) все точки в области примесной проводимости удовлетворительно ложатся на прямую l с наклоном $s = 0.36$, т.е. эффективная масса плотности состояний растет

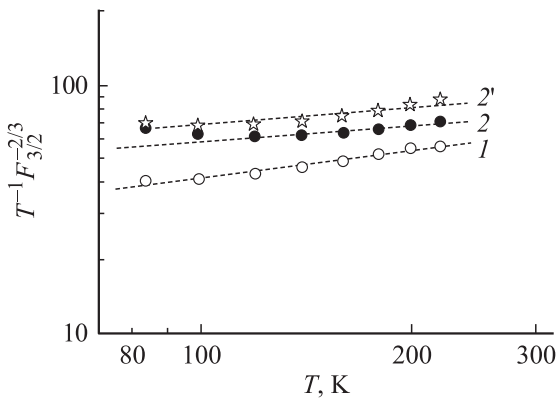


Рис. 4. Температурные зависимости эффективной массы для слабо легированных твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ (1) и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ (2 и 2'). 2 — $N = \text{const}(T)$, 2' — $N = f(T)$.

с температурой по закону $m^* \propto T^{0.36}$, что указывает на непараболичность электронного спектра. Меньшая величина $s = 0.04$ для более легированного образца [6] согласуется с полученным результатом, так как непараболичность в сильно вырожденных образцах не приводит к значительному температурному росту усредненной эффективной массы. Температурное поведение эффективной массы в твердом растворе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ в диапазоне от 240 до 120 К качественно такое же, ослабевает лишь скорость роста, $m^* \propto T^{0.21}$ (кривая 2). Однако при $T < 120$ К характер зависимости меняется на обратный: эффективная масса начинает расти с понижением температуры. Это может означать, что либо описание рассеяния выражением $\tau \propto \varepsilon^{-0.5}$ при низких температурах становится некорректным, либо допущение о постоянстве концентрации в зоне проводимости не имеет достаточных оснований. В первом случае очевидно, что для продолжения линейного спада эффективной массы с уменьшением T ниже 120 К отрицательный показатель степени в вышеприведенной зависимости времени релаксации от энергии должен становиться меньше по абсолютной величине, что будет свидетельствовать об усилении рассеяния низкоэнергетических электронов. Последнее может возникнуть, например, в твердых растворах с неоднородным распределением компонентов по образцу, приводящим к появлению случайного рельефа дна зоны проводимости. В этом случае возможна и локализация при низких температурах. В слабо легированных образцах этот механизм рассеяния носителей тока при низких температурах может оказаться доминирующим.

Имеется и вторая возможная причина появления аномалии в полученной зависимости $m^*(T)$: рост концентрации электронов с температурой. В этом случае встает вопрос о структуре электронного спектра в данных материалах. Полезная информация может быть получена из температурных данных по эффекту Холла. К сожалению, определение температурного поведения концентрации электронов наталкивается на трудности,

связанные с отсутствием данных по изменению не только коэффициента анизотропии, но и фактора Холла, когда в рассеяние включается указанный выше механизм. Тем не менее общие тенденции можно выявить, сопоставляя холловские данные для образцов, разных по составу и уровню легирования. В настоящей работе имеется только первый результат планируемых систематических исследований такого рода и относится он к рассматриваемому образцу $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ (рис. 3). При измерении коэффициента Холла направления электрического тока и холловского поля лежали в плоскости скола, а магнитное поле было перпендикулярно ей. Полагая, что наблюдаемое падение ρ_{123} с ростом температуры отражает рост концентрации электронов, мы учли этот эффект в расчете и для зависимости $m^*(T)$ получили кривую 2' на рис. 4. В этом случае все расчетные точки удовлетворительно ложатся на прямую $m^* \propto T^{0.22}$. Принимая во внимание, что еще большее уменьшение ρ_{123} с температурой на образце такого же состава и близкого по свойствам наблюдалось в [3], можно заключить, что рост концентрации электронов с температурой в данных материалах вполне вероятен. Наблюдаемые особенности получают качественное объяснение.

Остается вопрос, что является резервуаром, из которого электроны переходят в зону проводимости при повышении температуры. Здесь могут быть разные варианты. Один, связанный с неоднородностью материала, был уже указан выше. В другом случае можно допустить образование уровня структурных или примесных дефектов вблизи дна зоны проводимости. В рамках этой модели находит объяснение более крутой ход электропроводности при $T < 125$ К в твердых растворах $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ с $x = 0.3$ и 0.36 и $S \approx 200$ мкВ/К при 84 К [3], о чем упоминалось выше. Наконец, резервуаром электронов может быть тяжелая зона проводимости, существование которой в данных материалах рассматривается в ряде работ [7–9]. Малый зазор, отделяющий ее от легкой зоны, при 0 К и его положительный температурный коэффициент могут способствовать перетеканию носителей в легкую зону при повышении температуры; в этом случае величина эффективной концентрации будет возрастать. Для получения достоверной информации о структуре электронного спектра в данных материалах необходим более широкий и последовательный эксперимент; исключительно полезным было бы расширение температурного интервала до 4.2 К.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-17605).

Список литературы

- [1] В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов. ФТТ, **41**, 187 (1999).
- [2] В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов. ФТТ, **42**, 1985 (2000).
- [3] В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов, Г.Т. Алексеева. ФТТ, **39**, 483 (1997).

- [4] Е.А. Гуриева, П.П. Константинов, Л.В. Прокофьева, Ю.И. Равич, М.И. Федоров. ФТП, **37**, 292 (2003).
- [5] Б.М. Аскеров. *Кинетические эффекты в полупроводниках* (Л., Наука, 1970).
- [6] Б.М. Гольцман, Г.Н. Иконникова, В.А. Кутасов, Ю.И. Равич. ФТП, **27**, 542 (1985).
- [7] Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов. *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3* (М., Наука, 1972).
- [8] H. Köhler. Phys. St. Sol. (b), **73**, 95 (1976).
- [9] H. Köhler, W. Haigis, von Middendorff. Phys. St. Sol. (b), **78**, 637 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Particular features of thermoelectrical properties of $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$ weakly doped solid solutions

P.P. Konstantinov, L.V. Prokof'eva, Yu.I. Ravich, M.I. Fedorov, V.V. Kompaniets⁺*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Saint-Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

⁺ OAO (Open Joint-Stock Company),
Institute for Applied Physics „KrioTherm“,
197348 St. Petersburg, Russia

Abstract Thermoelectrical properties and thermoelectrical figure of merit Z of a weakly doped $n\text{-Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ solid solution have been studied in the temperature range of (84–300) K. The results have been compared to those of $\text{PbTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ solid solution with a close magnitude of thermopower S at 84 K. Aside from the lower thermal conductivity, the greater electrical conductivity and its considerably weaker temperature dependence are inherent in the $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ alloy. As a consequence, the power coefficient for the samples of the optimum properties begins to decrease only when the minor charge carrier concentration becomes appreciable. Here the $|S|$ value exceeds much the standard magnitude of $200 \mu\text{V}/\text{K}$. An electron concentration lowering decreases the Z_{max} value and reduces its temperature insignificantly; therefore, an expected influence on the average value of Z in the range of (77–300) K is not observed. Similar features are peculiar to $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ too, being not so pronounced. For both of alloys the linear extrapolation of thermopower at $T \rightarrow 0$ K does not lead to zero values of S ; the higher Se concentration, the more this discrepancy.

The experimental results are discussed taking into account possible changes in dominating scattering mechanisms as well as in the mobile carrier concentration and the electron energy spectrum.