

**ЭКСТРУДИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$
ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**М.М. Тагиев^{1,2}, Г.Д. Абдинова², Б.Ш. Бархалов²¹ Азербайджанский государственный экономический университет, г. Баку, Азербайджанская республика² Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская республика

С целью создания достаточно прочного и с термо- и магнитотермоэлектрическими добротностями, близкими к монокристаллическим образцам материала, на основе систем Bi–Sb получены экструдированные образцы твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ и исследовано влияние состава, режима термической обработки, размеров зерен и примесей теллура на их термоэлектрические свойства в интервале температур $\sim 77\text{--}300\text{ K}$ и напряженностей магнитного поля H примерно до $74 \cdot 10^4\text{ A/m}$. Удалось получить экструдированный материал с термо- и магнитотермоэлектрическими добротностями $6.2 \cdot 10^{-3}$ и $7.2 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ при $\sim 77\text{ K}$ соответственно с прочностью, примерно в 3 раза превышающей прочность монокристаллических образцов данного состава, которые пригодны для применения в низкотемпературных термоэлектрических преобразователях.

Ключевые слова: твердый раствор, отжиг, экструзия, примесь, структура, электропроводность, добротность.

Введение

Материалы на основе твердых растворов систем Bi–Sb применяются для создания низкотемпературных термо- и магнитотермоэлектрических, а также фотоэлектрических преобразователей энергии и являются перспективными материалами в этом направлении. Однако из-за слоистости структуры монокристаллы систем Bi–Sb обладают низкой механической прочностью, что ограничивает их применение [1–8]. Образцы твердых растворов Bi–Sb получают разными методами: вытягиванием из расплава по Чохральскому с подпиткой расплава твердой сурьмой [9, 10], зонной перекристаллизацией [11], прессованием из порошка [12] и экструзией [13]. Прессованные образцы твердого раствора Bi–Sb обладают большой механической прочностью, но по добротности (Z) они намного уступают монокристаллам данных составов [12]. Термоэлектрическая добротность Z образцов висмут – сурьма, полученных методом экструзии, близка к Z монокристаллических образцов, а механическая прочность превышает прочность монокристаллических образцов данного состава [13–18]. Метод имеет большую производительность и открывает широкие возможности для профилирования ветвей термоэлементов [19–22]. При этом для получения материала с необходимыми параметрами требуется установить оптимальный состав материала, легировать его примесями, обеспечивающими необходимую концентрацию носителей заряда и условия рассеяния электронов и фононов, приводящих к достаточно высокому отношению подвижности к решеточной теплопроводности μ/χ_p , разработать технологию экструзии и термообработки для данного состава.

Повышение эксплуатационных характеристик и функциональных возможностей, расширение области применения приборов на основе Bi–Sb являются актуальной задачей и представляют опделенный научно-практический интерес.

Учитывая это, с целью создания достаточно прочного материала на основе твердых растворов систем Bi–Sb с высокими термо- и магнитотермоэлектрическими эффективностями, близкими к таковым их монокристаллических образцов, и выяснения закономерностей переноса заряда и теплоты в них в данной работе получены экструдированные материалы на основе составов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, исследованы их термоэлектрические свойства в зависимости от режима термообработки, размеров зерен и примеси теллура в интервале температур $77\text{--}300\text{ K}$ и напряженностей магнитного поля H примерно до $74 \cdot 10^4\text{ A/m}$.

Выбор состава $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ обусловлен тем, что максимальное значение термоэлектрической добротности для систем Bi–Sb приходится на данный состав [14, 15].

Экспериментальная часть

Для получения экструдированных прутков сплавов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ и $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}+\langle\text{Te}\rangle$ была выбрана следующая технологическая последовательность: синтез состава из исходных компонентов в откаченных до остаточного давления $\sim 10^{-3}\text{ Па}$ кварцевых ампулах, размельчение сплава и изготовление из него методом холодного прессования заготовок, экструзия (выдавливание нагретого

до пластического состояния материала через отверстие определенного размера) мелкодисперсных заготовок. В качестве исходных компонентов были использованы висмут марки «ВИ-000» и сурьма марки «СУ-000». Синтез проводили в вакуумированных кварцевых ампулах при ~ 675 К в течение 2 ч. Прочность на изгиб полученного материала примерно в 3 раза превышает прочность монокристаллических образцов этого состава.

Исследовано влияние температуры отжига (при ~ 473 и ~ 503 К), размеров зерен и донорной примеси теллура на электропроводность (σ), коэффициенты термоЭДС (α), Холла (R_x) и теплопроводности (χ) экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$.

Электрические параметры и теплопроводность образцов измеряли вдоль оси экструзии методом, приведенным в [23]. Электрические параметры образцов измеряли обычным компенсационным методом при постоянном токе, а теплопроводность – абсолютным стационарным методом. Погрешность при измерении электрических параметров и теплопроводности составляла $\approx 3\text{--}5\%$.

Для изучения влияния размеров зерен на термоэлектрические свойства синтезированный материал перед прессованием заготовок предварительно измельчался и отбирались фракции с размерами зерен 50, 100, 160, 200, 315, 630 и 1000 мкм. Дальнейшее измельчение (примерно до 20 нм) полученного порошка осуществлялось в планетарной шаровой мельнице марки АГО-2У.

Испытания образцов на предел прочности при изгибе проводили в лабораторном устройстве по трехточечной схеме, описанной в [22].

Результаты и их обсуждение

Опыты показали, что отжиг при 503 К в течение 2 ч приводит к росту как термоЭДС, так и электропроводности образцов (табл. 1), что связано с ростом подвижности носителей заряда в образцах. Это подтверждается измерениями коэффициента Холла, который при 77 и 300 К имеет значения соответственно 29.6 и 1.8 $\text{см}^3/\text{Кл}$ для отожженного и 19 и 1.4 $\text{см}^3/\text{Кл}$ для неотожженного образцов. По-видимому, отжиг сопровождается уменьшением концентрации деформационных и других дефектов в образцах.

Таблица 1

Влияние температуры отжига на электропроводность σ ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$), коэффициент термоЭДС α ($\text{мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$), теплопроводность χ ($\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) и добротность Z (К^{-1}) экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$

T, К	До отжига				После отжига							
					при 473 К				при 503 К			
	α	σ	χ	Z	α	σ	χ	Z	α	σ	χ	Z
80	173	2411	2.63	2.82	152	4181	2.70	3.60	182	5250	3.02	5.8
199	123	6031	3.73	2.45	111	5950	3.27	2.20	120	8807	4.09	3.1
265	112	6696	5.01	1.68	104	5730	3.76	1.60	99	8095	4.86	1.63
284	106	6201	5.40	1.29	99	5525	3.90	1.40	97	7853	5.17	1.43
300	102	6318	5.75	1.14	91	5157	4.40	0.97	95	7520	5.96	1.14

Рентгеновскими методами установлено, что при экструзии поликристаллического материала $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ возникает аксиальная текстура, т.е. часть зерен поликристалла ориентируется так, что их тригональная ось становится параллельной оси экструзии [24]. Одновременно в результате пластической деформации возникают различные дефекты кристаллической решетки в отдельных зернах. Выяснено, что максимальная степень текстуры наблюдается в образцах с размерами зерен 160–200 мкм (табл. 2).

Во всех случаях послеэкструзионная термообработка при ~ 503 К заканчивается уменьшением степени текстуры на 10–20%, что объясняется разориентацией зерен за счет тепловой энергии. Наиболее сильное уменьшение степени текстуры при отжиге происходит в образцах с размерами частиц ~ 50 мкм. С ростом размеров частиц влияние отжига на степень текстуры ослабляется, и в случае образцов с размерами частиц ~ 630 и ~ 1000 мкм отжиг на степень текстуры почти не влияет (табл. 2).

При термообработке магнитосопротивление ($\Delta\rho/\rho_0$) образцов при ~ 77 К значительно растет. Опыты показали, что характер зависимости удельного сопротивления ρ (а также коэффициентов термоЭДС и Холла) от напряженности магнитного поля H как для неотожженных, так и отожжен-

ных образцов сохраняется и при 300 К. Однако при высоких температурах влияние термообработки и магнитного поля на кинетические параметры сильно ослаблено.

Таблица 2

Зависимость магнитосопротивления ($\Delta\rho/\rho_0$), коэффициентов термоЭДС (α), теплопроводности (χ) от размеров зерен и напряженности магнитного поля при температуре ~ 77 К, а также степени текстуры от размеров зерен при температуре ~ 300 К

Размер зерен, мкм	Степ. текст., отн. ед.	До отжига					После отжига					
		$H = 16 \cdot 10^4$ А/м		$H = 74 \cdot 10^4$ А/м		$H = 0$	$H = 16 \cdot 10^4$ А/м		$H = 74 \cdot 10^4$ А/м		$H = 0$	
		$\Delta\rho/\rho_0$	α , мкВ/К	$\Delta\rho/\rho_0$	α , мкВ/К	$\chi \cdot 10^2$, Вт/(см·К)	$\Delta\rho/\rho_0$	α , мкВ/К	$\Delta\rho/\rho_0$	α , мкВ/К	$\chi \cdot 10^2$, Вт/(см·К)	
50	1.0	10	94	74	142	3.5	0.38	19	140	102	153	4.8
100	0.50	4	96	68	145	3.3	0.40	5	142	83	155	4.4
160	0.60	7	75	57	110	3.2	0.48	4	132	81	147	4.1
200	0.62	14	78	63	115	2.9	0.46	19	134	99	152	4.0
315	0.48	16	128	103	167	2.35	0.39	18	157	174	168	3.0
630	0.60	18	170	107	221	2.15	0.55	74	174	318	216	2.8
1000	0.50	16	165	101	184	2.25	0.52	16	170	179	190	2.90

Примечание: В таблице $\Delta\rho/\rho_0 = (\rho - \rho_0)/\rho_0$, здесь ρ_0 и ρ – удельные сопротивления образца при $H = 0$ и при данной напряженности магнитного поля соответственно.

Из табл. 2 следует, что α для всех образцов после термообработки несколько растет. Кроме того, α существенно увеличивается с ростом H . При этом зависимость α от H для образцов, прошедших термообработку сильнее, чем для образцов, не прошедших термообработку. Была рассчитана холловская подвижность $\mu = R_x \sigma$ носителей заряда для исследованных образцов. Расчеты показали, что с ростом размеров зерен и при термообработке значение n в зависимости $\mu \sim T^{-n}$ растет. Значение n в образцах, не прошедших термообработку, в зависимости от размеров зерен меняется от 1.4 до 1.57. После термообработки значение n меняется в пределах 1.8–2.6.

В неотожженных образцах при низких температурах носители заряда рассеиваются, в основном, на структурных дефектах и границах зерен. С ростом размеров зерен концентрация дефектов внутри зерен, а также количество границ зерен уменьшаются. Поэтому с увеличением размеров зерен подвижность носителей заряда в образце растет, а их концентрация, обусловленная ионизированными дефектами, снижается. Это приводит к повышению магнитосопротивления с ростом размеров зерен.

Выяснено, что уменьшение размеров зерен примерно до 20 нм существенно снижает теплопроводность образцов $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ [25] (от $\chi = 3.02 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см·К) для образцов с размерами зерен 630 мкм до $\chi = 2.85 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см·К) для образца с размерами зерен 20 нм) при ~ 77 К.

Таким образом, текстура и электрофизические свойства экструдированных образцов твердого раствора $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ определяются как размерами зерен, так и термической обработкой.

Расчеты показали, что максимальную Z при ~ 77 К имеют экструдированные образцы твердого раствора $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ с размерами зерен 630 мкм (табл. 3). Это обусловлено низкой общей теплопроводностью и относительно высокой подвижностью носителей заряда в этих образцах.

Термоэлектрическая добротность экструдированных образцов $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ с размерами зерен ~ 630 мкм, прошедших отжиг при ~ 503 К, достигает значения $\sim 5.8 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ при ~ 77 К.

Были получены и исследованы также образцы твердого раствора $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ с размерами зерен 630 мкм с 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 и 0.1 ат.% Те (рис. 1 и 2).

Из рис. 1, а видно, что электропроводность нелегированного образца растет с температурой примерно до 200 К, а затем монотонно падает, т.е. полупроводниковый ход температурной зависимости меняется на металлический.

Легирование твердого раствора $Vi_{0.85}Sb_{0.15}$ теллуром до $5 \cdot 10^{-4}$ ат.% почти не изменяет ход температурной зависимости σ , однако значительно увеличивает электропроводность относительно электропроводности нелегированного образца при всех температурах (рис. 1, кривые 1–3). Для образцов, легированных более $5 \cdot 10^{-4}$ ат.% Те, σ сильно увеличивается, особенно при низких температурах, также изменяется и характер зависимости (рис. 1, кривые 4–7). Для образцов, леги-

рованных теллуrom ~ 0.001 ат.% Те и более, характерны типичные области примесной проводимости в температурных зависимостях σ .

Таблица 3

Термоэлектрические параметры экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с различными размерами зерен (d) при температуре ~ 77 К

Размер зерен, мкм	До отжига				После отжига при ~ 503 К			
	σ , $\text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\alpha\cdot 10^6$, В/К	$\chi\cdot 10^2$, Вт/(см·К)	$Z\cdot 10^3$, K^{-1}	σ , $\text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\alpha\cdot 10^6$, В/К	$\chi\cdot 10^2$, Вт/(см·К)	$Z\cdot 10^3$, K^{-1}
50	8124	66	3.35	1.06	13436	140	4.82	5.46
100	8012	84	3.51	1.60	12788	136	4.45	5.32
160	5822	34	2.98	0.23	8478	134	4.21	3.62
200	8972	52	3.48	0.70	12656	132	4.18	5.28
315	5189	127	2.35	3.56	6518	160	3.12	5.45
630	2411	173	2.63	2.74	5250	182	3.02	5.80
1000	2114	175	2.85	2.27	4850	180	3.12	5.04

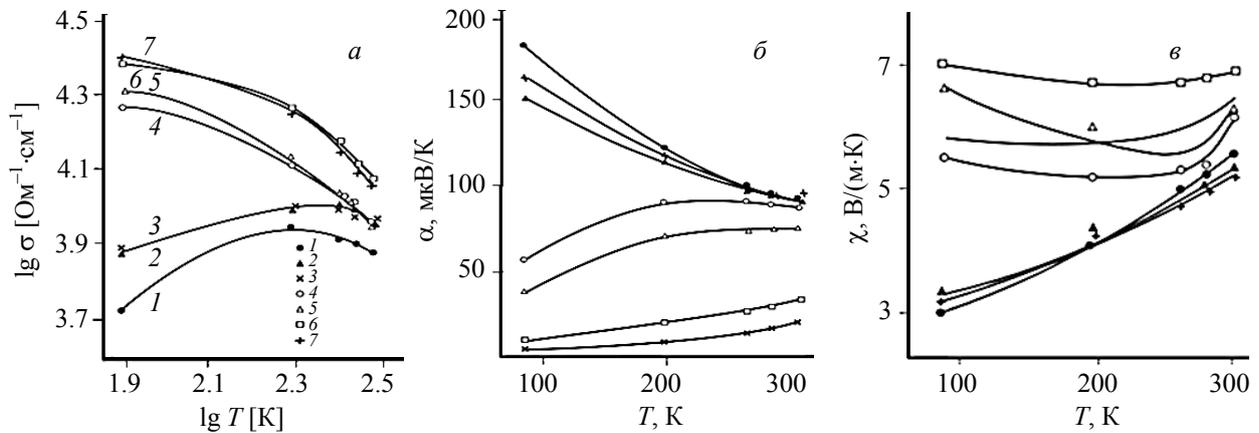


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности (а), коэффициентов термоЭДС (б) и теплопроводности (в) образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированного атомами теллура: кр. 1 – нелегированный, кр. 2–7 – легированный теллуrom с 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.01, 0.05 и 0.1 ат.% соответственно

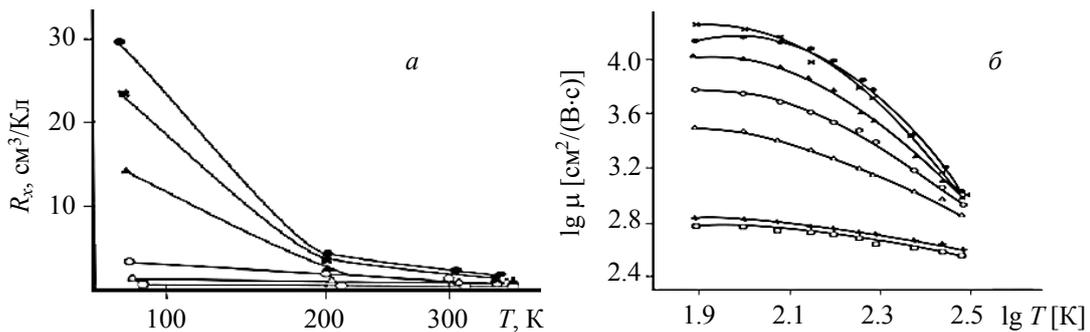


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и холловской подвижности (б) твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированного атомами теллура. Обозначения те же, что и на рис. 1

Для всех образцов подвижность носителей тока μ во всем интервале исследованных температур с повышением температуры падает. Легирование теллуrom приводит к уменьшению абсолютного значения подвижности относительно нелегированного образца, лишь некоторый рост подвижности наблюдается у образца, легированного 0.0005 ат.% Те. Увеличение концентрации легирующей примеси изменяет и степень n в зависимости $\mu \sim T^{-n}$. С ростом степени легирования температурная зависимость подвижности в области температур $T > 200$ К ослабляется.

Для нелегированного образца и образцов, легированных 0.0001 и 0.0005 ат.% Те, температурная зависимость электропроводности при низких температурах (полупроводниковый ход) опреде-

ляется ростом концентрации носителей заряда с температурой, а при высоких температурах (металлический ход), в основном, изменением подвижности носителей заряда. В образцах, легированных более 0.001 ат.% Te, с ростом температуры электропроводность изменяется по степенному закону $\sigma \sim T^{-n}$ (рис. 1, кривые 4–7), где в зависимости от образцов и температуры n меняется в пределах $0.2 < n < 1$. Коэффициент Холла для данных образцов с температурой меняется незначительно (рис. 2, кривые 4–7). Это свидетельствует о том, что в этих образцах в рассмотренном диапазоне температур концентрация носителей тока почти не зависит от температуры. Полученные данные хорошо согласуются с результатами работ [26–28].

В образцах с концентрацией теллура более ~ 0.001 ат.% температурная зависимость электропроводности определяется температурной зависимостью подвижности, поскольку концентрация носителей заряда в образцах с концентрацией примеси 0.01 и 0.05 ат.% Te с температурой не меняется (рис. 2, кривые 5–7).

Из рис. 1 также следует, что как для нелегированного образца, так и для образцов, легированных 0.0001 и 0.0005 ат.% Te, коэффициент теплопроводности χ растет с температурой. Для образцов, легированных 0.001 ат.% Te и больше, теплопроводность с температурой медленно падает, а в области температур $T \geq 250$ К растет. На основании значений α , σ и χ рассчитано значение термоэлектрической добротности

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$$

исследованных образцов в области температур 77–300 К (рис. 3).

Видно, что для образцов, нелегированных и легированных 0.0001 и 0.0005 ат.% Te, термоэлектрическая добротность Z с ростом температуры уменьшается во всем исследованном интервале температур. Легирование образца теллуrom с концентрацией ~ 0.0001 ат.% почти не влияет на значение термоэлектрической добротности. Однако для образца $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированного теллуrom в количестве 0.0005 ат.%, величина Z увеличивается по сравнению с нелегированным образцом. Аналогичные изменения Z наблюдались и для монокристаллических образцов твердых растворов систем Bi–Sb в [1, 2, 8].

Для состава $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированного 0.0005 ат.% Te, магнитотермоэлектрическая добротность

$$Z = \frac{\alpha^2(H)\sigma(H)}{\chi(H)}$$

имеет наибольшее значение, равное $\sim 7.2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при температуре 77 К и напряженности магнитного поля $\sim 11 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ (рис. 4). Предел прочности на изгиб этого состава, определенный по методу [22], составлял $\sim 45 \text{ МПа}$, что примерно в 3 раза превышает предел прочности для монокристаллических образцов.

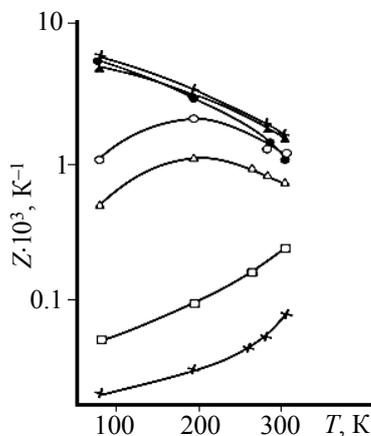


Рис. 3. Температурные зависимости термоэлектрической добротности образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированных атомами теллура. Обозначения те же, что и на рис. 1

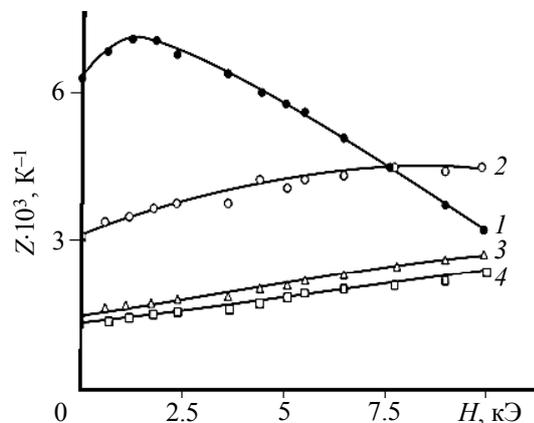


Рис. 4. Зависимость термоэлектрической добротности от напряженности магнитного поля для экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированных 0.0005 ат.% Te при 77 К (кр. 1); 200 К (кр. 2); 250 К (кр. 3); 300 К (кр. 4)

Заклучение

На основе комплексного исследования влияния состава, размеров зерен, режима термической обработки, примесей Те на термо- и магнитотермоэлектрические свойства экструдированных образцов твердых растворов систем Bi–Sb получен материал с достаточно высокой механической прочностью и термоэлектрической эффективностью, пригодный для применения.

Значения $Z = 6.2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $Z_{\text{МТЭ}} = 7.2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ для экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированных 0.0005 ат. % Те, а также значение $Z = 5.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ для экструдированных образцов нелегированного твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, полученные по разработанной нами технологии, близки к значениям параметров для монокристаллических образцов этих составов и позволяют рекомендовать эти материалы для создания низкотемпературных термо- и магнитотермоэлектрических преобразователей энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земсков В.С., Белая А.Д., Бородин П.Г. // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1982. – Т. 18. – № 7. – С. 1154–1157.
2. Земсков В.С., Бородин П.Г., Белая А.Д., Рослов С.А. // Деп. в ВИНТИ. – 1978. – № 983. – 25 с.
3. Mikiyo Kouyano and Masanori Yamanouchi // J. Phys.: Conf. Ser. – 2009. – V. 150. – Part 5.
4. Марков О.И. // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 5. – С. 447–452.
5. Степанов Н.П., Грабов В.М. // ФТП. – 2002. – Т. 36. – Вып. 9. – С. 1045–1048.
6. Прокошин В., Гусакова С. // ФНТ. – 2018. – Т. 44. – Вып. 8. – С. 996–1004.
7. Грабов В.М., Комаров В.А., Каблукова Н.С. // ФТТ. – 2016. – Т. 58. – Вып. 3. – С. 605–611.
8. Степанов Н.П. // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т. 47. – № 3. – С. 33–42.
9. Джонс Д.У. Рост кристаллов. – М.: Мир, 1977. 362 с.
10. Абрикосов Н.Х., Земсков В.С., Новикова С.И. и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1960. – № 5. – С. 47–51.
11. Налетов В.Л., Николаев В.И. // Низкотемпературные термоэлектрические материалы: сб. – Кишинев: РИО АН МССР, 1970. – С. 15.
12. Cochare C. and Yodelis W.V. // Metallurg. Trans. – 1972. – V. 3. – No. 11. – P. 2843–2850.
13. Банага М.Г., Соколов О.Б., Дудкин Л.Д. // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1986. – Т. 22. – № 4. – С. 619–622.
14. Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш. // Неорган. материалы. – 1994. – Т. 30. – № 3. – С. 375–378.
15. Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Агаев З.Ф. // Прикладная физика. – 1999. – № 2. – С. 123–125.
16. Тагиев М.М. // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 60. – № 10. – С. 131–134.
17. Тагиев М.М., Абдинова Г.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 170–173.
18. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия, 1988. – 574 с.
19. Zemskov V.S., Belaya A.D., Beluy U.S., and Kozhemyakin G.N. // J. Cryst Growth. – 2000. – V. 212 (1). – P. 161–166.
20. Ivanova L.D., Petrova L.D., Granatkina V.Yu., et al. // Inorgan. Mater. – 2008. – V.44 (7). – P. 687–691.
21. Ivanova L.D., Petrova L.D., Granatkina V.Yu., et al. // Inorgan. Mater. – 2009. – V.45 (2). – P. 123–128.
22. Сидоренко Н.А., Дашевский З.М. // ФТП. – 2019. – Т. 53. – Вып. 5. – С. 693–697.
23. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровиков Р.П., Симонов В.А. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. – М.: Наука, 1974. 168 с.
24. Тагиев М.М., Алиева Т.Д., Абдинова Г.Д. и др. // Trans. Azerbaijan National Academy of Sci., Phys. and Astron. – 2014. – V. XXXIV. – No. 2. – P. 80–84.
25. Tagiyev M.M. and Abdinova G.D. // Proceedings of MTP (BSU). – Baku, 2019. – P. 121–124.
26. Yamashita O., Satou K., and Tomiyoshi S. // J. Mater. Sci. – 2007. – V. 42. – No. 1. – P. 74–78.
27. Панарин А.Ф. // Докл. VII Межгосударственного семинара ФТИ им А.Ф. Иоффе. – СПб., 2000. – С. 102–104.
28. Брандт Н.Б., Чудинов С.М., Караваев В.Г. // ЖЭТФ. – 1976. – Вып. 70. – С. 2296–2317.

Поступила в редакцию 31.05.2019,
после доработки – 12.11.2020.

Тагиев Маил Масим оглы, д.ф.-м.н., профессор АГЭУ, e-mail: mail_tagiyev@mail.ru;

Абдинова Гюлли Джавад кызы, к.ф.-м.н., доцент Института физики НАНА, e-mail: abdinova72@bk.ru;

Бархалов Бархал Шабан оглу, д.ф.-м.н., профессор Института физики НАНА, e-mail: bbarhal@mail.ru.