

УДК 621.315.592

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННОГО ОБРАЗЦА ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, МОДИФИЦИРОВАННОГО ZrO_2

© 2023 г. М. М. Тагиев^{1, 2, *}, И. А. Абдуллаева³, Г. Д. Абдинова², Х. Ф. Алиева²¹Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалят, 6, Баку, AZ 1001 Азербайджан²Институт физики им Г.Б. Абдуллаева Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ 1141 Азербайджан³Институт радиационных проблем Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, пр. Б. Вагабзаде, 9, Баку, AZ 1143 Азербайджан

*e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принята к публикации 10.08.2023 г.

Исследованы электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α), Холла (R_H) и теплопроводности (κ) немодифицированных и модифицированных 0.5 мас. % ZrO_2 экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ в интервале $\sim 77\text{--}300$ К при напряженности магнитного поля до $\sim 74 \times 10^4$ А/м. Выяснено, что при введении в $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ 0.5 мас. % ZrO_2 фононная часть теплопроводности при ~ 77 К уменьшается, что приводит к повышению добротности (Z) до $\sim 6.4 \times 10^{-3}$ K^{-1} материала, применение которого значительно улучшает параметры низкотемпературных термоэлектрических преобразователей на его основе. При ~ 77 К в немодифицированных и модифицированных ZrO_2 образцах твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ тепло переносится в основном колебаниями решетки.

Ключевые слова: экструзия, твердый раствор, термоэлектрический материал, подвижность, модификатор

DOI: 10.31857/S0002337X2308016X, EDN: TYNTUS

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий спрос современной фотоэлектроники на электронные охладители с глубоким охлаждением приводит к необходимости создания термоэлектрических материалов (ТЭМ) с повышенной добротностью (Z) и хорошими механическими свойствами, разработке на их основе преобразователей с улучшенными параметрами [1–4], надежно работающих в различных условиях.

Экструзия позволяет получать высокопрочный ТЭМ с добротностью, близкой к добротности монокристаллов [5–8]. Этот метод имеет большую производительность и открывает широкие возможности для профилирования термоэлементов. Для достижения большей добротности необходимо добиться, чтобы как можно больше кристаллитов в материале ориентировалось в одном направлении (образование в материале кристаллографической текстуры). Этого можно достичь выбором оптимальных режимов как самой экструзии, так и последующих воздействий. Высокопрочные экструдированные материалы на основе твердых растворов системы Bi–Sb являются наиболее эффективными ТЭМ для создания низкотемпературных преобразователей энергии в со-

ставе различных электронных приборов [9–11]. Добротность (эффективность) ТЭМ определяется параметром $Z = \alpha^2 \sigma / \kappa$ [12], где σ – удельная электропроводность, α и κ – коэффициенты термо-ЭДС и теплопроводности соответственно.

Из экспериментальных исследований и теоретического анализа выяснено, что высокая добротность достигается в полупроводниках с высокой подвижностью (μ), большой эффективной массой (m^*) носителей заряда и малой решеточной теплопроводностью (κ_p) [13, 14]

$$Z \sim \left(\frac{\mu}{\kappa_p} \right) \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} T^{3/2},$$

где m_0 – масса свободного электрона.

Для эффективного преобразователя следует установить оптимальную концентрацию и условия рассеяния носителей заряда, приводящие к высокому отношению подвижности (μ) к фононной части теплопроводности (κ_p) [14].

Модифицирование также позволяет повысить эффективность термоэлектрика [15, 16]. Сущность метода заключается во введении в полупроводник модификатора с отличающимся коэффициентом

термического расширения (**КТР**). В результате в полупроводнике образуются упругонапряженные зоны, которые приводят к тому, что теплопроводность матрицы уменьшается больше, чем увеличивается ее электросопротивление [17].

В последние годы теоретически и экспериментально интенсивно исследуется термоэлектрическая добротность путем приготовления ТЭМ в форме многослойных структур с квантовыми ямами. Основной выигрыш в Z достигался за счет увеличения плотности состояний носителей тока вблизи краев зон в двумерных системах по сравнению с трехмерными. При этом предполагалось, что подвижность носителей тока вдоль слоев не изменяется вследствие размерного квантования [18, 19].

Выяснено, что добавление ультрадисперсных добавок (1 и 3 мас. % ZrO_2) ухудшает термо- и магнитоэлектрические добротности твердых растворов системы $Bi-Sb$ относительно немодифицированного образца [20]. Влияние различных ультрадисперсных добавок, в т.ч. и ZrO_2 , менее 1 мас. % на термо- и магнитоэлектрические свойства твердых растворов $Bi-Sb$ не изучены.

В данной работе с целью выяснения особенностей влияния модифицирования (в малых количествах) и термообработки на термо- и магнитоэлектрические свойства твердых растворов системы $Bi-Sb$ получены экструдированные образцы $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ модифицированные 0.5 мас. % ZrO_2 , и исследованы их электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α), Холла (R_H) и теплопроводности (κ) в интервале $\sim 77-300$ К при напряженности магнитного поля до $\sim 74 \times 10^4$ А/м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы твердых растворов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ с 0.5 мас. % ZrO_2 получены в технологической последовательности, описанной в [21]. Используемые компоненты: висмут марки ВИ-0000, сурьма СУ-0000. Синтез проводился прямым сплавлением компонентов в кварцевой ампуле, предварительно протравленной в растворе $K_2Cr_2O_7$ и откачанной до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па, постоянно подвергающейся качанию в процессе синтеза для улучшения гомогенности сплава. После синтеза ампулу с веществом резко охлаждали до комнатной температуры.

Смешивание полупроводника и модификатора проводили следующим образом: взвешенные модификатор и полупроводник в нужном количестве засыпали в фторопластовый стакан, который в течение ~ 10 мин подвергался тряске и вращению в различных направлениях, что способствовало равномерному распределению частиц ZrO_2 (модификатора). ZrO_2 получен плазмохимическим методом; использованный порошок представлял собой смесь моноклинной и тетрагональной мо-

дификаций и состоял из частиц со средним диаметром ~ 50 нм.

Модификатор вводили в процессе отжига при температурах, обеспечивающих $\sim 70-80\%$ объема жидкой фазы, долю которой можно варьировать температурой отжига в соответствии с диаграммой состояния.

Экструзия проводилась на гидравлическом прессе марки МС-1000. Технологические параметры экструзии: $P_{\text{экс}} = 400$ МПа, $T_{\text{экс}} = 475 \pm 3$ К, скорость прессы $v = 0.2$ см/мин, степень вытяжки – 25.

Послеэкструзионный отжиг проводили в ампулах, откачанных до $\sim 10^{-3}$ Па, при ~ 503 К в течение 5 ч.

Рассматриваемая технология позволяет получить композиционные материалы с однородно распределенными в объеме полупроводника частицами модификатора. Чтобы при малом количестве диэлектрической фазы в полупроводнике расстояние между частицами было достаточно малым, частицы должны быть мелкими.

Результаты исследование текстуры с помощью рентгенофазового анализа в установке XR D8 ADVANCE (Bruker, Germany) и методика изготовления экструдированных образцов твердых растворов системы $Bi-Sb$ приведены в [22, 23].

Электрические и тепловые параметры образцов измеряли методом, описанным в [24], вдоль длины образца (прутка), т.е. в направлении экструзии. Исследованы электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α), Холла (R_H) и теплопроводности (κ) немодифицированных и модифицированных 0.5 мас. % ZrO_2 экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, не прошедших термообработку и после термообработки в интервале $\sim 77-300$ К при напряженности магнитного поля до $\sim 74 \times 10^4$ А/м. Погрешности измерения электрических и тепловых параметров не превышали ~ 3 и $\sim 5\%$ соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты представлены на рис. 1–3 и в табл. 1. Исследованные образцы имеют n -тип проводимости, в табл. 1 и на рис. 1–3 даны абсолютные значения α и R_H . Видно, что модифицирование и термообработка не изменяют ход температурных зависимостей электрических и тепловых параметров исследованных образцов. В экструдированных образцах $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ модифицирование 0.5 мас. % ZrO_2 , уменьшая σ и κ , увеличивает α (рис. 1).

После отжига при ~ 503 К в течение 5 ч термоэлектрические параметры исследованных образцов существенно не изменяются.

Все параметры, определяющие термоэлектрическую эффективность Z полупроводникового мате-

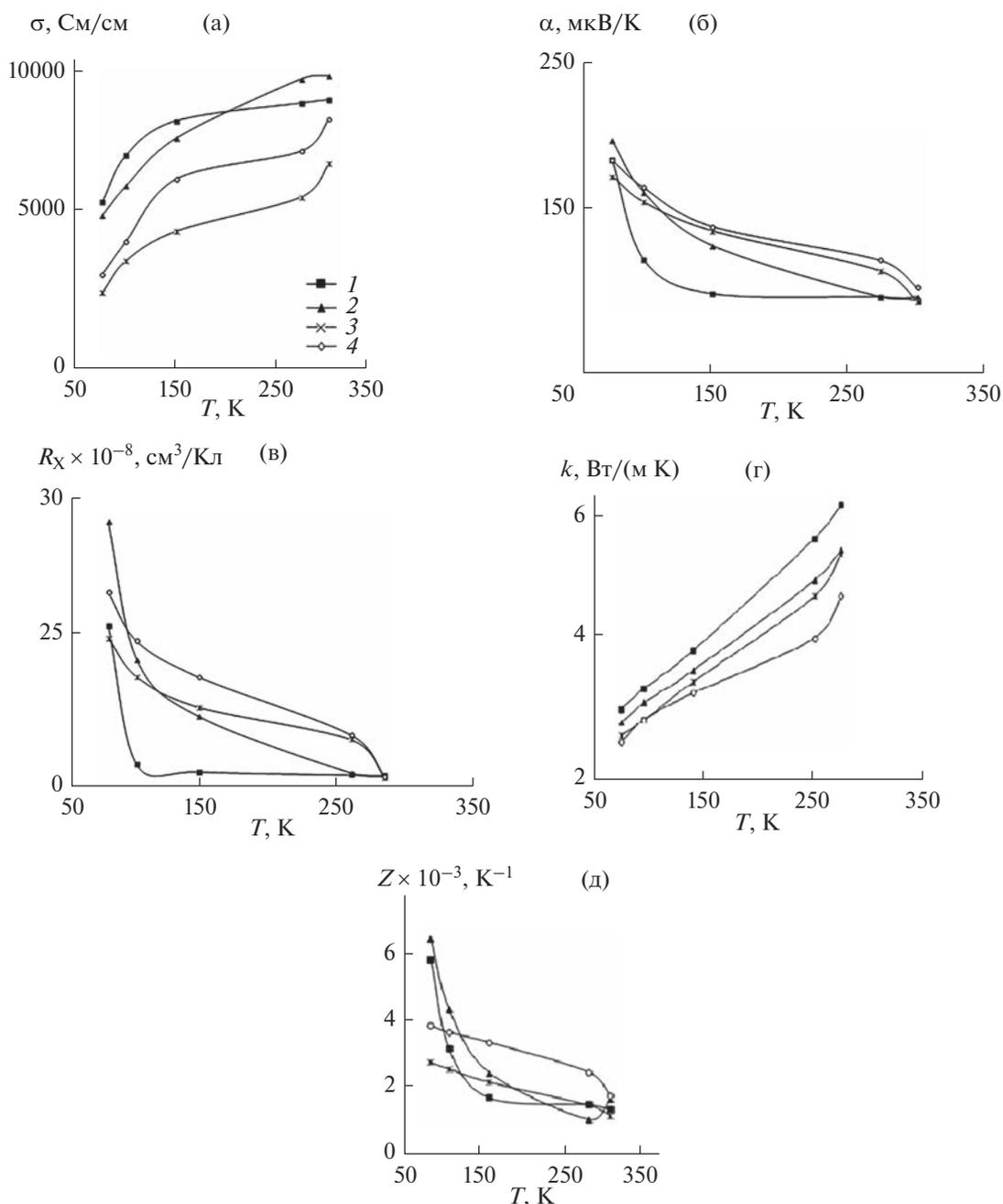


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности σ (а), коэффициентов термо-ЭДС α (б), Холла R_H (в), теплопроводности κ (г) и термоэлектрической добротности Z (д) экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$; немодифицированных (1, 3), модифицированных 0.5 мас. % ZrO_2 (2, 4); после отжига (1, 2), без отжига (3, 4).

риала, зависят от концентрации носителей заряда, которая определяется структурным состоянием электрически активных собственных и примесных атомов. Модифицирование 0.5 мас. % ZrO_2 приводит к уменьшению концентрации (n) и значительному росту подвижности (μ) носителей тока относительно немодифицированного образца.

Для оптимизации технологии изготовления материала необходима оценка влияния техно-

логических воздействий и на подвижность носителей заряда. В модифицированных образцах термообработка (подплавление до экструзии) материалов (брикетов) при температурах между ликвидусом и солидусом и последующая горячая экструзия ($T_{экс} = 475 \pm 3$ К) приводят к такому перераспределению компонентов сплава, что концентрация электронов в зоне проводимости существенно повышается. Эффект является термически устой-

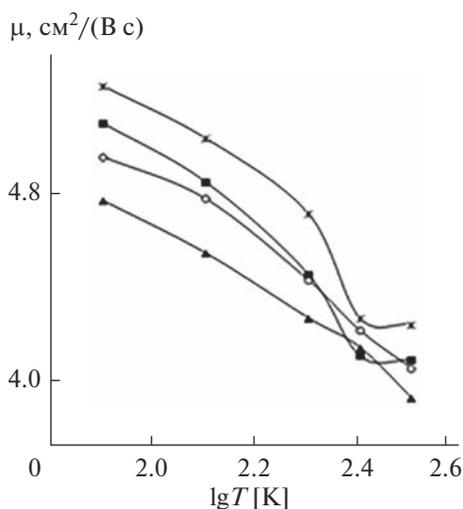


Рис. 2. Температурные зависимости холловской подвижности экструдированных образцов $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$; обозначения те же, что на рис. 1.

чивым и сохраняется после длительных высокотемпературных отжигов материала. По-видимому, термическая обработка заготовок — кристаллизация значительной части материала в условиях, близких к равновесным, и пластическая деформация при экструзии, особенно в случае композиционных (модифицированных) материалов, — приводят к изменению структурного состояния собственных и примесных дефектов, причем эти изменения термически устойчивы.

В модифицированных образцах изменение свойств после отжига меньше, чем в немодифицированных (табл. 1). Это свидетельствует об активном влиянии дисперсных, непрозрачных для дислокаций частиц модификатора на процессы структурообразования, массопереноса в ходе экструзии и последеформационного отжига.

В исследуемых образцах экструзия, при которой деформация подобна одноосному растяжению, приводит к образованию осесимметричной ориентации. В этом случае распределение полюсной плотности характеризуется телом вращения с осью, параллельной направлению внешнего воздействия, т.е. в направлении оси экструзии.

При экструзии образцов $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ с 0.5 мас. % ZrO_2 в результате пластической деформации происходят структурные изменения, приводящие к изменению электрических и тепловых свойств. Модифицирование электронейтральными частицами активирует пирамидальные системы скольжения, создает микроскопическое однородное распределение стопоров для движущихся дислокаций, повышает степень однородности распределения деформации [25].

По значениям R_x и σ рассчитана подвижность (μ) носителей заряда образцов, не прошедших термическую обработку, и тех же образцов, подвергнутых послеэкструзионной термической обработке. Выяснено, что для всех образцов, прошедших термообработку, начиная с ~ 77 К с ростом температуры подвижность носителей заряда уменьшается по закону $\mu \sim T^{-n}$. Значения n (~ 1.65 – 1.35) свидетельствуют о том, что в исследованном интервале температур носители заряда рассеиваются в основном на тепловых колебаниях решетки. Температурная зависимость электропроводности в исследованных образцах определяется температурной зависимостью подвижности, которая с ростом температуры уменьшается из-за увеличивающегося рассеяния носителей на тепловых колебаниях решетки (рис. 2). Аналогичные результаты для механизма рассеяния носителей заряда получены и из магниторезистивного эффекта.

В модифицированных образцах за счет различия КТР частиц ZrO_2 и твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ образуются упругонапряженные заряженные зоны, которые, компенсируя часть носителей заряда, приводят к уменьшению их концентрации, к росту подвижности (табл. 1) носителей заряда.

Последеформационный (послеэкструзионный) отжиг заметно увеличивает долю аксиальной текстуры в немодифицированных образцах [26].

Модифицирование ZrO_2 в неотожженных образцах увеличивает электропроводность деформированного материала при ~ 77 К. При изотермическом отжиге ~ 503 К электропроводность немодифицированного образца растет в ~ 2.2 раза, а в модифицированных образцах — в ~ 1.6 раза, одновременно наблюдается незначительный рост коэффициента термо-ЭДС во всех образцах. Существенное изменение наблюдается и в подвижности носителей заряда при ~ 77 К. Рост подвижности при термообработке немодифицированных и модифицированных образцов составляет соответственно ~ 2.4 и ~ 2.2 раза.

При изотермическом отжиге происходит рекристаллизация, которая приводит к уменьшению концентрации структурных дефектов, созданных при пластической деформации, и одновременно к росту μ .

Модифицированные образцы, прошедшие оптимальную послеэкструзионную термическую обработку, демонстрируют меньшую теплопроводность относительно немодифицированного образца.

При низких температурах (~ 77 К) тепловая энергия в полупроводниковых материалах в основном переносится колебаниями решетки и электронами проводимости [27–29].

В исследованных образцах двумя способами определены электронная и решеточная составляющие теплопроводности. Решеточная и элек-

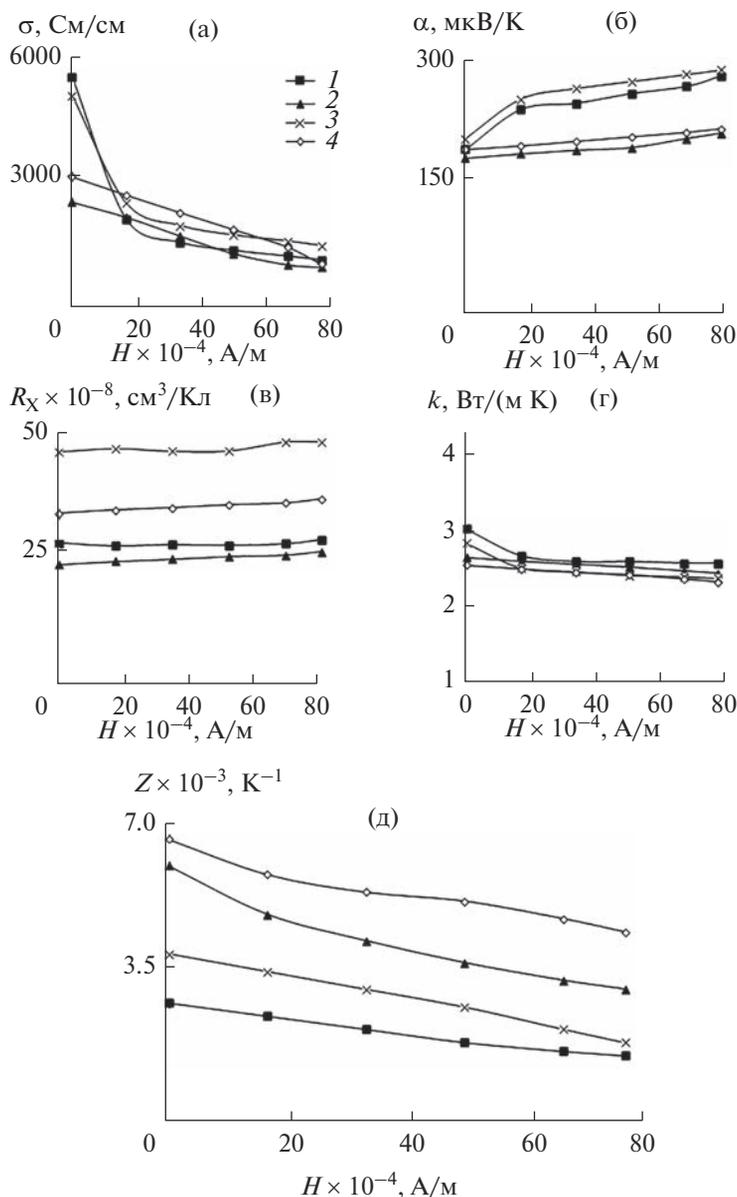


Рис. 3. Зависимости электропроводности σ (а), коэффициентов термо-ЭДС α (б), Холла R_H (в), теплопроводности k (г) и добротности Z (д) от напряженности магнитного поля при ~ 77 К экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$; 1–4 – см. рис. 1.

тронная составляющие теплопроводности вычислены из выражения $\kappa = \kappa_p + \kappa_{эл} = \kappa_p + L\sigma T$, где $L = A(k/e)^2$ – число Лоренца, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона. Значение A было определено из теоретической зависимости $A = f(\alpha)$ с использованием экспериментальных значений коэффициента термо-ЭДС [30, 31].

В сильном поперечном магнитном поле вследствие искривления движения носителей заряда электронная часть теплопроводности уменьшается по закону $\kappa_{эл} \sim 1/H^2$ (H – напряженность магнитного поля). В достаточно сильном магнитном

поле $\kappa_{эл}$ очень мала и поэтому измеренный коэффициент общей теплопроводности κ можно принять равным κ_p .

В промежуточных магнитных полях в исследованных образцах σ уменьшается с увеличением напряженности магнитного поля H . Вследствие того, что κ_p не изменяется в магнитном поле, имеем

$$\kappa(H) = \kappa_p + \kappa_{эл}(H) = \kappa_p + L\sigma(H)T.$$

Поэтому, если при данной температуре измерить σ при различных напряженностях магнитного поля (H), экстраполируя график зависимости $\kappa(H)$

Таблица 1. Электрические и тепловые параметры экструдированных образцов

Образец	77 К										300 К									
	σ , См/см	α , мкВ/К	К, Вт/(м К)	$\kappa_{эл}$, Вт/(м К)	κ_p , Вт/(м К)	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	μ , см ² /(В с)	$n \times 10^{18}$, см ⁻³	$Z \times 10^{-3}$, К ⁻¹	σ , См/см	α , мкВ/К	К, Вт/(м К)	$\kappa_{эл}$, Вт/(м К)	κ_p , Вт/(м К)	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	$n \times 10^{18}$, см ⁻³	$Z \times 10^{-3}$, К ⁻¹			
$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	2414	172	2.64	0.33	2.31	24.4	58902	0.025	2.7	6456	94	5.26	0.34	4.92	1.06	5.9	1.08			
	2985	182	2.54	0.4	2.14	32.1	95819	0.019	3.8	7858	103	4.95	0.41	4.54	1.21	5.1	1.68			
$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 0.5\% ZrO_2$																				
$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	5250	182	3.02	0.7	2.32	26.5	139125	0.023	5.8	8456	95	5.96	0.45	5.48	1.43	4.3	1.28			
	4825	194	2.83	0.6	2.23	43.85	211576	0.014	6.42	9205	97	5.31	0.49	4.82	1.67	3.7	1.6			
$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 0.5\% ZrO_2$																				

Без отжига

С отжигом

от $\sigma(H)$ к $\sigma(H) = 0$, можно определить κ_p . При этом принимается, что число Лоренца L не зависит от магнитного поля.

Полученные обоими способами значения κ_p были близки друг другу. Их средние значения, а также $\kappa_p = \kappa - \kappa_{эл}$ представлены в табл. 1.

Эти данные показывают, что в немодифицированных и модифицированных образцах в интервале температур ~ 77 – 300 К тепловая энергия переносится в основном фононами.

Модифицирование образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ 1 и 3 мас. % ZrO_2 увеличивает плотность дислокации и повышает однородность их распределения по образцу, т.е. происходит упорядочение структуры, которое приводит к росту μ и κ_p , но не вызывает существенного увеличения Z экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ [20]. А образцы $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированные 0.5 мас. % ZrO_2 , имеют термоэлектрические свойства более высокие, чем немодифицированные и модифицированные ZrO_2 в большей концентрации, за счет снижения решеточной составляющей теплопроводности и повышения подвижности носителей заряда.

При низких температурах характер зависимостей $\sigma(H)$ и $\alpha(H)$ для немодифицированных и модифицированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ одинаковый (рис. 3а, 3б). В магнитном поле за счет различия длины свободного пробега изменяется вклад различных носителей в общий ток. В результате, с увеличением вклада быстрых носителей в общий ток растет их средняя энергия и увеличивается коэффициент термо-ЭДС.

Изменение магнитосопротивления при малом значении магнитного поля определяется по формуле [27, 31, 32]: $\Delta\rho/\rho_0 = A\mu^2H^2$, где коэффициент A зависит от механизма рассеяния носителей заряда. Полученные результаты хорошо согласуются со значением A для рассеяния носителей заряда в твердых растворах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$. Данная закономерность подтверждается в зависимости R_x от H во всех исследованных образцах.

На основании зависимостей $\sigma(T)$, $\alpha(T)$ и $\kappa(T)$ рассчитаны значения термоэлектрической добротности $Z(T)$ ($Z = \alpha^2\sigma/\kappa$) немодифицированных и модифицированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ при ~ 77 – 300 К (табл. 1 и рис. 1д). Видно, что модифицирование не изменяет ход температурных зависимостей $Z(T)$, т.е. термоэлектрическая добротность для немодифицированных и модифицированных образцов с ростом температуры падает. Наибольшее значение термоэлектрической добротности при ~ 77 К, равное $\sim 6.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, имеют образцы, модифицированные 0.5 мас. % ZrO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при изотермическом отжиге происходит рекристаллизация, которая приводит к уменьшению концентрации структурных дефектов, созданных при пластической деформации, что приводит к росту подвижности носителей тока. При введении в $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ 0.5 мас. % ZrO_2 фононная часть теплопроводности при ~ 77 К уменьшается, что приводит к уменьшению общей теплопроводности. При ~ 77 К в изученных образцах тепло переносится в основном колебаниями решетки. Модифицирование 0.5 мас. % ZrO_2 ведет к повышению термоэлектрической добротности материала, применение которого улучшает параметры низкотемпературных термоэлектрических охладителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немов С.А., Улашкевич Ю.В., Рулимов А.А., Демченко А.Е., Аллахаха А.А., Свеишиков И.В., Джафаров М. О зонной структуре Bi_2Te_3 // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 608–611.
2. Булат Л.П., Дабкин И.А., Каратаев В.В., Освенский В.Б., Пшенай-Северин Д.А. Влияние рассеяния на границах на теплопроводность полупроводникового материала на основе твердого раствора $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 9. С. 1712–1716.
3. Грабов В.М., Комаров В.А., Каблукова Н.С. Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут-сурьма на подложках с различными температурными расширениями // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 605–611.
4. Mikio Koyano, Masanori Yamanouchi. Electronic Properties of Inhomogeneous Bi-Sb-Ni composite alloys // J. Phys.: Conf. Ser. 2009. V. 150. Part 5. P. 052128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/150/5/052128>
5. Zhi-Lei Wang, Takehiro Araki, Tetsuhiko Onda. Effect of Annealing on Microstructure and Thermoelectric Properties of Hot-Extruded Bi-Sb-Te Bulk Materials // J. Mater. Sci. 2018. V. 53. № 12. P. 9117–9130. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2211-x>
6. Банага М.П., Соколов О.Б., Бендерская Т.Э., Дудкин Л.Д., Иванова А.Б., Фридман И.И. Особенности структуры и термоэлектрических свойств экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1986. Т. 22. № 4. С. 619–622.
7. Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Земсков В.С., Соколов О.Б., Скипидаров С.Я., Дуванков Н.И. Экструдированные материалы для термоэлектрических охладителей // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 7. С. 789–793.
8. Иванова Л.Д. Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.
9. Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш. Термоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 3. С. 375–378.
10. Тагиев М.М. Влияние размеров зерен и примеси свинца на термоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 608–611.

- рованных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 119–124. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21020135>
11. Сидоренко Н.А., Дашевский З.М. Эффективные кристаллы Bi-Sb для термоэлектрического охлаждения при температурах $T \leq 180$ К // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 693–697.
 12. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л.: Наука, 1960. 186 с.
 13. Schwantz R.T. Thermoelectric and Galvanomagnetic Measurements on $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_5 (\text{Bi}_2\text{Se}_3)_1 (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{18}$ // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. № 7. P. 2865–2870.
 14. Rittner E.S. Comment on Theoretical Bound on the Thermoelectric Figure of Merit from Irreversible Thermodynamics // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. P. 2654–2655.
 15. Дик М.Г., Абдинов Д.Ш. Влияние модифицирования на подвижность дырок и теплопроводность экструдированных образцов твердых растворов системы Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 // Изв.АН СССР. Неорган. материалы. 1988. Т. 24. № 8. С. 1290–1293.
 16. Дубровина А.Н., Леонтьева Л.А., Дроздова Г.А. и др. Влияние второй фазы на деформации и рекристаллизацию сплавов на основе Bi_2Te_3 // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1981. Т. 17. № 4. С. 613–617.
 17. Дубровина А.И., Казаков А.И. Высокотемпературная термообработка заготовок для экструзии // ИБ ППРВ ЭЭ. 1983. № 3 (113). С. 99–103.
 18. Hicks L.D., Dresselhaus M.S. Effect of Quantum-Well Structures on Thermoelectric Figure of Merit // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. № 19. P. 12727. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.12727>
 19. Равич Ю.И., Пшенай-Северин Д.А. Влияния подвижности на термоэлектрическую эффективность многослойных структур с квантовыми ямами // Термоэлектрики и их применения. С.-Пб. 1999. С. 11–14.
 20. Тагиев М.М. Гальваномагнитные свойства твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированных ZrO_2 // Неорган. материалы. 1999. Т. 35. № 9. С. 1042–1044.
 21. Тагиев М.М., Абдуллаева И.А., Абдинова Г.Д. Влияние гамма-радиации на магнитотермоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированных ZrO_2 // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 6. С. 589–595. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22060148>
 22. Tagiyev M.M., Abdinova G.D. Electrical and Galvanomagnetic Properties of Extruded Samples of $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ Solid Solutions with Pb and Te Impurities // Russ. Phys. J. 2019. V. 61. № 11. P. 2135–2138. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01647-6>
 23. Абдуллаева И.А., Абдинова Г.Д., Тагиев М.М., Бархалов Б.Ш. Влияние гамма-излучения на электрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ (Te) // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 9. С. 933–939. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21090013>
 24. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Смирнов В.А. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователь. М.: Наука, 1974. 168 с.
 25. Tagiyev M.M., Abdullayeva I.A. Influence of Gamma Radiation on Magnetolectric Properties of Extruded Samples of Solid Solution $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$?Te?Modified ZrO_2 // Int. J. Modern Phys. 2022. V. 36. № 18. 2250103 <https://doi.org/10.1142/S021797922250103X>
 26. Самедов Ф.С., Тагиев М.М., Абдинов Д.Ш. Влияние отжига на электрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // Неорган. материалы. 1997. Т. 33. № 12. С. 1460–1462.
 27. Земсков В.С., Бородин П.Г., Белая А.Д., Рослов С.А. Явления переноса в висмуте и твердых растворах висмут-сурьма. Винити. М.: ИМЕТ. 1978. 52 с.
 28. Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш. Теплопроводность $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированного теллуrom // Неорган. материалы. 1994. Т. 30. № 6. С. 776–778.
 29. Агаев З.Ф., Тагиев М.М., Абдинова Г.Д., Багиева Г.З., Абдинов Д.Ш. Теплопроводность экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ с примесями Gd и Pb // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 2. С. 137–139.
 30. Оскотский В.С., Смирнов И.А. Дефекты в кристаллах и теплопроводность. Л.: Наука, 1972. 160 с.
 31. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. школа, 1975. 584 с.
 32. Yamashita O., Odahara H. Effect of the Thickness of Bi-Te Compound and Cu Electrode on the Resultant Seebeck Coefficient in Touching Cu/Bi-Te/Cu Composites // J. Mater. Sci. 2007. V. 42. № 13. P. 5057–5067.