

УДК 621.315.592

## МАГНИТОТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Pb},\text{Te}\rangle$

© 2022 г. М. М. Тагиев<sup>1, 2, \*</sup><sup>1</sup>Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, Баку, AZ 1001 Азербайджан<sup>2</sup>Институт физики НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ 1141 Азербайджан

\*e-mail: mail\_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2021 г.

После доработки 31.07.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Синтезированы материалы  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb и исследованы зависимости электропроводности  $\sigma$ , коэффициенты термо-ЭДС  $\alpha$ , Холла  $R_H$  и теплопроводности  $\chi$  от температуры, интенсивности магнитного поля. Показано, что дополнительное легирование донорной примесью теллура до (0.1 ат. %) компенсирует акцепторное действие свинца, приводя к росту концентрации электронов в образцах, в результате чего значения  $\sigma$  и  $\alpha$  приближаются к значениям для  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , не содержащего примесей свинца. При термообработке происходит “залечивание” структурных дефектов, что приводит к росту подвижности носителей тока и решеточной части теплопроводности.

**Ключевые слова:** экструзия, отжиг, легирование, примесь, электропроводность**DOI:** 10.31857/S0002337X21120149

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение термоэлектрических преобразователей энергии лимитируется сравнительно невысокой добротностью используемых материалов. Монокристаллы на основе твердых растворов систем Bi–Sb имеют рекордную термо- и магнитотермоэлектрическую добротность при низких температурах и поэтому являются перспективными материалами. Однако из-за слоистости структуры монокристаллы системы Bi–Sb обладают низкой механической прочностью, что ограничивает их практическое применение [1–4]. Одним из эффективных способов повышения механической прочности термоэлектриков с сохранением высоких термоэлектрических параметров является экструзия [5–10]. Метод имеет большую производительность, а также создает широкие возможности для профилирования ветвей термоэлементов [11–14].

Термоэлектрическая эффективность термоэлектриков определяется параметром  $Z = \alpha^2 \sigma / \chi$ , где  $\sigma$  – удельная электропроводность,  $\alpha$  – коэффициент термо-ЭДС,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности. Возможностей максимизировать величину добротности не так много. Если не рассматривать методы подавления фоновой составляющей теплопроводности, которые хорошо известны [15], большинство термоэлектриков уже реализовано, поэтому в последние годы оптимизация сводится к варьированию concentra-

ции носителей тока в используемых материалах [16]. Для получения термоэлектрического материала с необходимыми параметрами следует легировать его примесями разного типа, что обеспечивает оптимальную концентрацию носителей заряда и их рассеяние.

Легирование донорными и акцепторными примесями сплавов  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  изменяет концентрацию носителей заряда в широких пределах [1, 5]. Небольшие добавки теллура повышают электропроводность и даже при некотором уменьшении абсолютного значения термо-ЭДС должны обеспечить прирост термоэлектрической добротности сплавов  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ . Показано, что прирост происходит при легировании до 0.001 ат. % Te [5]. Дальнейшее повышение количества примеси теллура приводит к падению величины  $Z$ . Это происходит в результате резкого падения подвижности носителей заряда с увеличением количества примеси (концентрации носителей заряда). С недооценкой этого обстоятельства связаны многочисленные теоретические прогнозы роста  $Z$  при расчетах кинетических коэффициентов с постоянной подвижностью носителей заряда [17–19].

Можно предполагать, что оптимизации кинетических коэффициентов можно достичь и совместным легированием экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  акцепторными и донорными примесями (сложное легирование).

В работах [9, 20] показано, что экструдированные и прошедшие отжиг образцы  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  с размерами зерен  $\sim 630$  мкм, легированные акцепторной примесью Pb (0.01 ат. %) при 77 К, имеют достаточно низкую электропроводность ( $\sigma = 1462$  См/см) и меняют тип проводимости в магнитном поле от электронного к дырочному. Поэтому данный материал выбран для исследования влияния совместного легирования акцепторными (Pb) и донорными (Te) примесями на магнитотермоэлектрические свойства образцов.

Цель данной работы — изучение влияния сложного легирования на магнитотермоэлектрические свойства кристаллов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  с размерами зерен  $\sim 630$  мкм, легированных акцепторными (Pb) и донорными (Te) примесями, в интервале  $\sim 77$ –300 К и при напряженностях магнитного поля ( $H$ ) до  $\sim 74 \times 10^4$  А/м.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  проводился прямым сплавлением компонентов в соответствующей стехиометрии в кварцевой ампуле, предварительно протравленной в растворе “хромпик” и промытой дистиллированной водой. Ампула с исходными компонентами откачивалась до остаточного давления  $\sim 10^{-3}$  Па и отпаивалась. В качестве исходных компонентов использовали висмут марки Ви-000 и сурьму марки Су-0000. В качестве легирующих примесей использовали теллур Т-сЧ, дистиллированный (либо дважды возогнанный) и свинец марки Рб-000. Примеси и исходные компоненты взвешивали с точностью  $\pm 0.0001$  г. Легирующие примеси Pb и Te вводились при синтезе. Образцы с малой концентрацией теллура получали путем сплавления соответствующего количества образца  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  0.1 ат. % Te с образцом  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , легированным 0.01 ат. % Рб.

Синтез проводился при температуре  $\sim 673$  К в течение 2 ч. Для хорошей гомогенизации сплава печь с ампулой подвергалась качанию. Затем вещество охлаждалось (опусканием ампулы в воду) до комнатной температуры.

Измельчение синтезированного материала проводилось дроблением в фарфоровой чашке, фракции с размерами зерен  $\leq 0.630$  мм отбирались с помощью специального сита.

Из порошков  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  с размером частиц  $\sim 630$  мкм прессовались брикеты диаметром  $\sim 30$  мм, удобные для экструзии. Прессование велось при комнатной температуре и давлении  $\sim 350$  МПа. Экструзия проводилась на гидравлическом прессе МС-1000 с диаметром 30 мм на диаметр 6 мм с применением специальной оснастки. Технологические параметры процесса экструзии (температура, давление, скорость вытяжки и др.) выбирались такими, чтобы формирование прутков проходило в

условиях сверхпластичности, без макро- и микронарушений.

Из экструдированных прутков на установке А207М методом электроискровой резки вырезались образцы для исследования в виде параллелепипеда с размерами  $3 \times 5 \times 12$  мм. Нарушенный слой, образующийся на поверхности образцов при резке, удаляли электрохимическим травлением в растворе  $\text{KOH} + \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}$  [21]. Отжиг образцов проводился в вакуумированных до давления  $\sim 10^{-3}$  Па кварцевых ампулах при температуре  $\sim 503$  К в течение 2 ч.

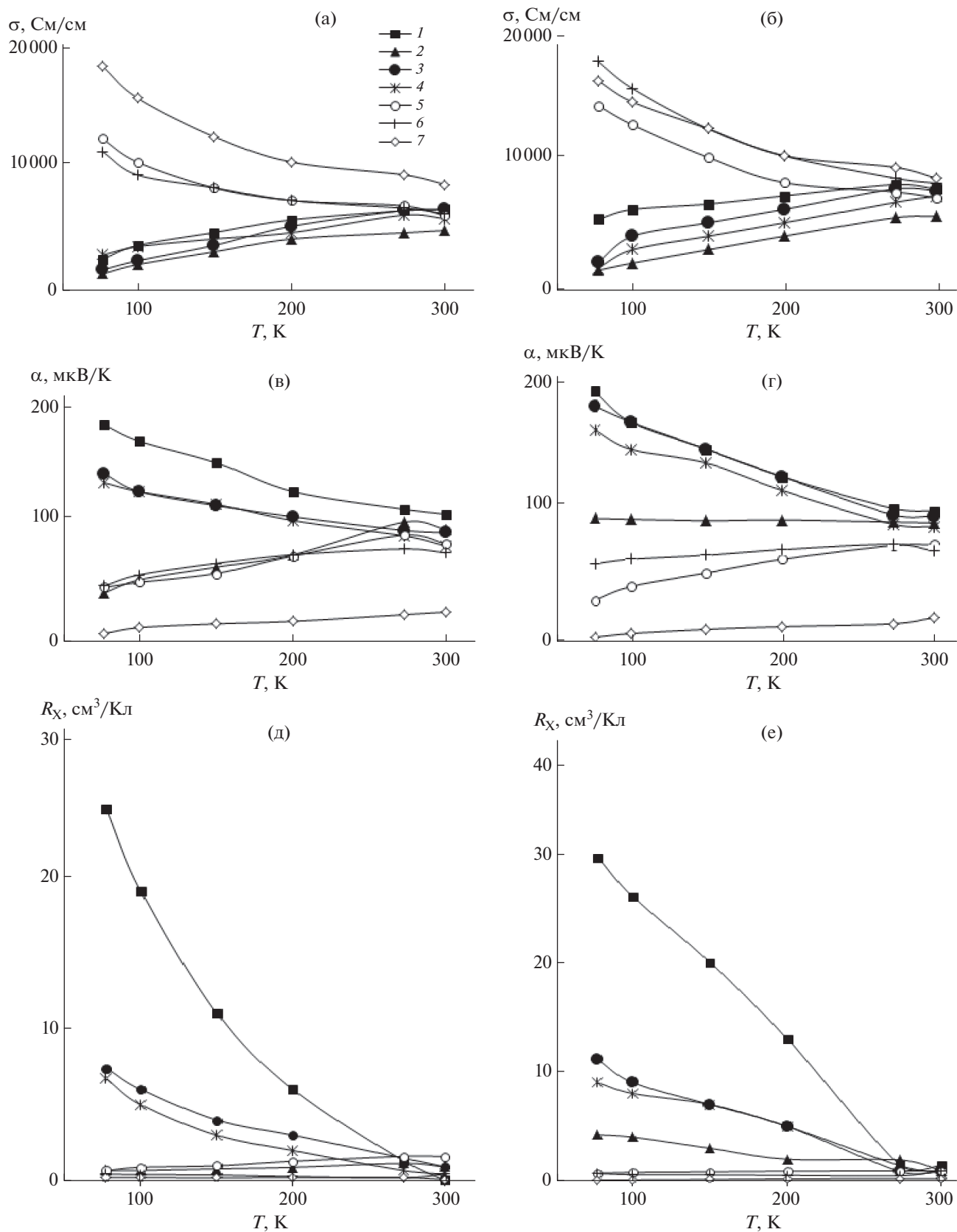
Электрические и тепловые параметры измеряли методом, описанным в [22], вдоль образца, т.е. в направлении экструзии. Исследовались экструдированные образцы до и после отжига. Исследованы электропроводность ( $\sigma$ ), коэффициенты термо-ЭДС ( $\alpha$ ), Холла ( $R_x$ ) и теплопроводности  $\chi$  в интервале  $\sim 77$ –300 К при напряженностях магнитного поля ( $H$ ) до  $\sim 74 \times 10^4$  А/м. Полученные результаты представлены на рис. 1–4 и в табл. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

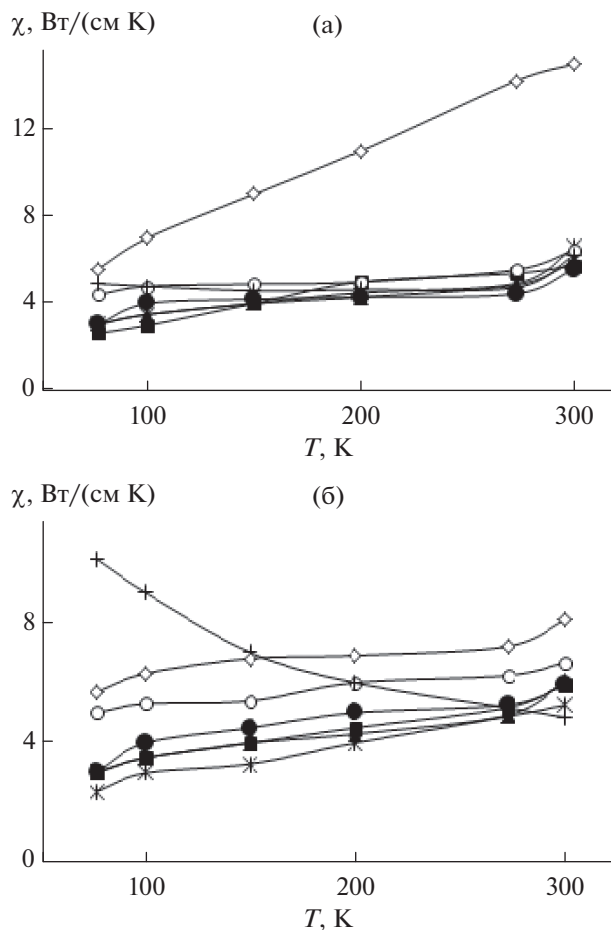
Для нелегированных экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  на зависимости  $\sigma(T)$  участок, характеризующий низкотемпературную область, связан с ростом концентрации носителей заряда ( $n$ ) с температурой. Высокотемпературная область  $\sigma(T)$  в основном определяется подвижностью носителей заряда [6].

На основе температурных зависимостей  $\sigma$  и  $\alpha$  показано [23], что образцы  $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ , легированные свинцом, содержат два вида донорных уровней: мелкие (0.01 эВ) и глубокие (0.04 эВ). В нелегированных образцах электрические свойства в основном определяются мелкими донорными уровнями, и примеси свинца компенсируют их. При 0.01 ат. % Рб происходит полная компенсация мелких донорных уровней в образцах, поэтому  $\sigma$  достигает минимума. С ростом температуры растет ионизация глубоких донорных уровней, вследствие чего  $\sigma$  с температурой растет и при 200–300 К приближается к значению  $\sigma$  для нелегированного образца. Увеличение содержания свинца приводит к компенсации глубоких донорных уровней и созданию новых мелких акцепторных уровней, в результате чего образцы с 0.05 ат. % Рб и больше имеют дырочный тип проводимости при температуре  $\sim 77$  К [9, 20].

В экструдированных образцах  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Рб до и после термической обработки зависимость общей теплопроводности  $\chi$  при  $\sim 77$  К от содержания примеси теллура носит немонотонный характер. С ростом концентрации теллура теплопроводность растет.



**Рис. 1.** Температурные зависимости электропроводности (а, б), коэффициентов термо-ЭДС (в, г) и Холла (д, е) экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  от температуры до (а, в, д), после термообработки (б, г, е); кривые 1–7 соответствуют образцам из табл. 1.



**Рис. 2.** Температурные зависимости коэффициента теплопроводности ( $\chi$ ) экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  до (а), после термообработки (б); обозначения те же, что на рис. 1.

Общая теплопроводность образцов при  $\sim 77$  К состоит из решеточной  $\chi_p$  и электронной  $\chi_e$  составляющих, т.е.

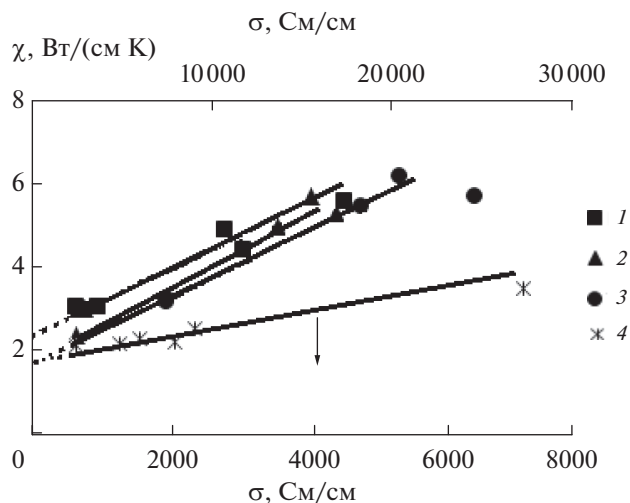
$$\chi = \chi_p + \chi_e = \chi_p + L\sigma T, \quad (1)$$

где  $L = A(k/e)^2$  – число Лоренца,  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона. Значение  $A$  оценено из зависимости  $A$  от коэффициента термоЭДС [24].

В работе [25] показано, что в экструдированных образцах  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  с малым количеством электроактивных примесей с концентрацией  $N$  электропроводность меняется в несколько раз, а решеточная часть теплопроводности остается почти постоянной. Тогда

$$\chi(N) = \chi_p + \chi_e(N) = \chi_p + L\sigma(N)T. \quad (2)$$

Путем экстраполяции зависимостей  $\chi$  от  $\sigma$  к  $\sigma = 0$  можно определить решеточную часть теплопроводности образцов (рис. 3).



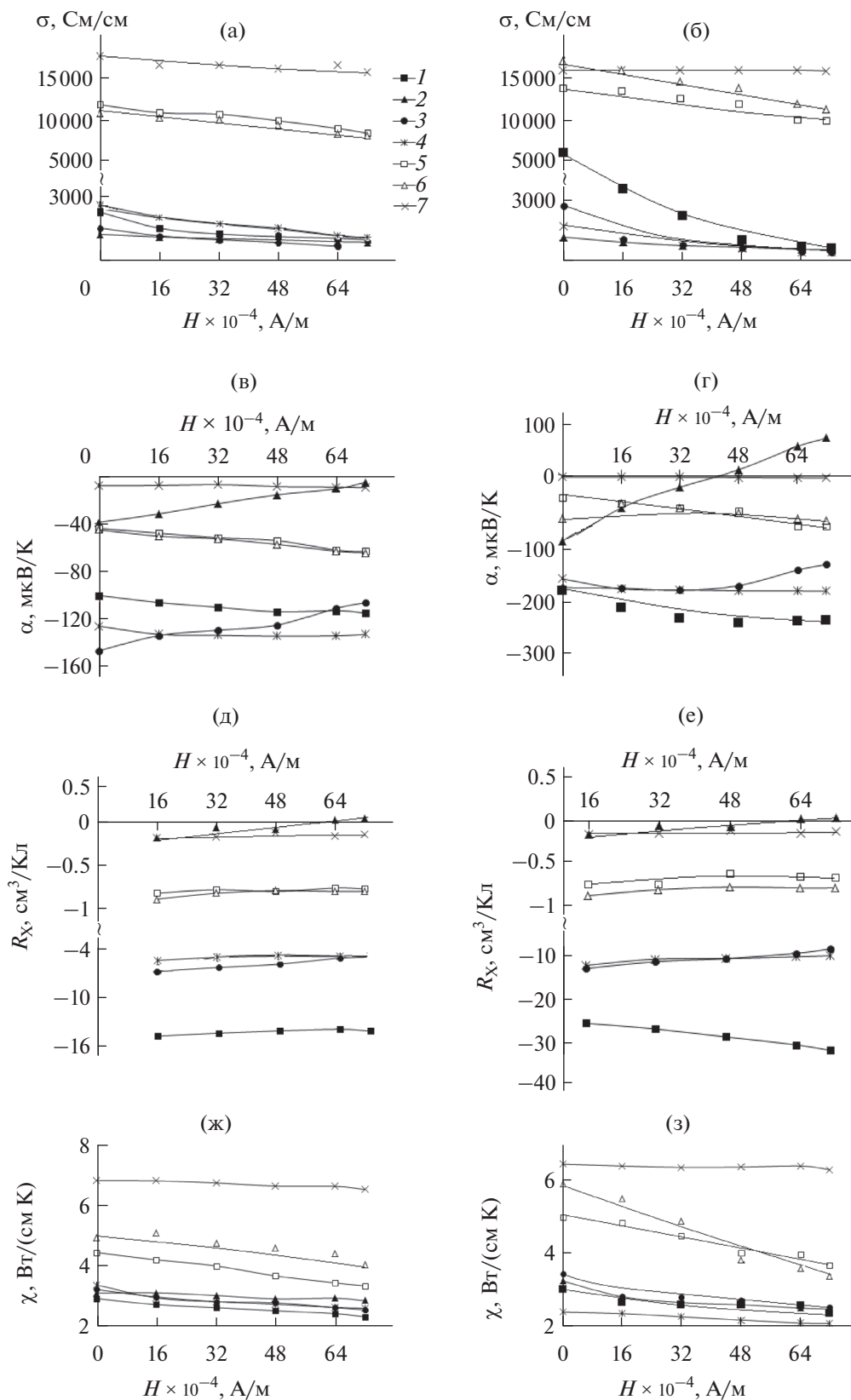
**Рис. 3.** Зависимости коэффициента теплопроводности ( $\chi$ ) экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  от электропроводности ( $\sigma$ ) при  $\sim 77$  К: 1, 2 – сложнелегированные образцы до и после отжига соответственно; 3 – образцы, легированные 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.01, 0.1 ат. % Te, после отжига; 4 – образцы, легированные 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.075, 0.1 ат. % Pb, после отжига.

При введении электроактивных примесей Pb и Te в экструдированные образцы  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  может меняться и  $L$ . Однако расчеты показали, что по сравнению с изменением  $\sigma$  (в  $\sim 3.7$  раза) это изменение незначительно ( $\sim 10\%$ ). Это дает основание считать, что при сложном легировании твердых растворов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  в изменении его общей теплопроводности основную роль играет электронная составляющая теплопроводности  $\chi_e$ .

Также измерены зависимости электропроводности и теплопроводности образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  от напряженности магнитного поля и из данных  $\sigma(H)$  и  $\chi(H)$  определена  $\chi_p$ . Значения  $\chi_p$ , полученные из измерений в магнитном поле и вычисленные из зависимости  $\chi$  от  $\sigma$ , хорошо согласуются между собой.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $R_x$  в образцах  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , легированных 0.01 ат. % Pb и прошедших отжиг при отсутствии магнитного поля, не изменяют своего знака с температурой. При  $\sim 77$  К с ростом напряженности магнитного поля  $\alpha$  и  $R_x$  меняют знак с отрицательного на положительный (рис. 4г и 4е, кривые 2 соответственно). Смена типа проводимости в образцах  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , легированных 0.01 ат. % Pb, в магнитном поле объясняется разной подвижностью электронов и дырок ( $\mu_e > \mu_d$ ).

После отжига коэффициент Холла всех образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}(\text{Pb,Te})$  (кроме  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.1 ат. % Te) и  $\alpha$  образцов, содержащих до 0.0005 ат. % Te, при  $\sim 77$  К растут. При концентрациях больше 0.0005 ат. % Te коэффициент термоЭДС уменьшается.



**Рис. 4.** Зависимости электропроводности (а, б), коэффициентов термо-ЭДС (в, г), Холла (д, е) и теплопроводности (ж, з) экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  до (а, в, д, ж) и после отжига (б, г, е, з) от напряженности магнитного поля при  $\sim 77$  К; кривые 1–7 соответствуют образцам из табл. 1.

**Таблица 1.** Зависимости электропроводности ( $\sigma$ ), коэффициентов термо-ЭДС ( $\alpha$ ), Холла ( $R_X$ ), теплопроводности ( $\chi$ ), подвижности носителей заряда ( $\mu$ ) и концентрации носителей заряда ( $n$ ) экструдированных образцов  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb при  $\sim 77$  К от концентрации введенной примеси теллура

Образец	$\sigma$ , См/см	$\alpha$ , мкВ/К	$R_X \times 10^{-8}$ , см <sup>3</sup> /Кл	$\chi \times 10^2$ , Вт/(см К)	$\mu$ , см <sup>2</sup> /(В с)	$n \times 10^{-18}$ , см <sup>-3</sup>	до термообработки					
							$\sigma$ , См/см	$\alpha$ , мкВ/К	$R_X \times 10^{-8}$ , см <sup>3</sup> /Кл	$\chi \times 10^2$ , Вт/(см К)	$\mu$ , см <sup>2</sup> /(В с)	$n \times 10^{-18}$ , см <sup>-3</sup>
1	2393	-173	-14.83	2.9	35488	0.4	5387	-178	-25.3	3.02	136291	0.25
2	1273	-40	-0.69	3.08	878	9.1	1462	-89.6	-4.33	3.04	6331	1.4
3	1591	-148	-7.4	3.05	11773	0.8	2020	-171	-11.1	3.03	22422	0.56
4	2750	-127	-6.71	3.05	18453	0.9	1604	-154	-10.6	2.39	17002	0.58
5	11823	44.1	-0.69	4.42	8158	9.1	13752	-30.3	-0.72	5	9901	0.7
6	10823	-45.3	-0.45	4.92	4870	13.9	17026	-56.7	-0.69	5.3	11748	9.1
7	17506	-7.9	-0.23	5.6	4026	27.2	15600	-3.3	-0.1	5.7	1560	62.5

Примечание. 1 – нелегированный образец, 2 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb, 3 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.0001 ат. % Te, 4 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.0005 ат. % Te, 5 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.005 ат. % Te, 6 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.01 ат. % Te, 7 –  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15} + 0.01$  ат. % Pb + 0.1 ат. % Te.

В связи с уменьшением подвижности носителей тока, при высоких температурах ( $\sim 300$  К) влияние магнитного поля на электрические параметры отожженных и неотожженных образцов ослабляется.

При экструзии за счет пластической деформации в образцах одновременно с образованием текстуры происходит образование структурных дефектов [26]. Эти дефекты являются центрами рассеяния для носителей заряда уменьшают их подвижность. Одновременно происходит увеличение концентрации носителей заряда, вызванное образованием электрически активных центров на дефектах. При термообработке происходит как бы “залечивание” структурных дефектов. В нелегированных образцах незначительное влияние отжига на  $\alpha$  при существенном изменении  $\sigma$  показывает, что при термообработке главным образом меняется подвижность носителей заряда, т.е. уменьшается концентрация центров, рассеивающих носители тока (рис. 1 и табл. 1). Особенно наглядно эти изменения происходят при низких температурах ( $\sim 77$  К), где роль примесной проводимости и рассеяния электронов на дефектах превалирующая. В отожженных образцах концентрация структурных дефектов мала и при низких температурах преобладает рассеяние на акустических фонах. Поэтому в нелегированных образцах при низких температурах  $\alpha$  сильно растет в магнитном поле и в отожженных образцах влияние магнитного поля на электрические параметры намного сильнее, чем в образцах, не прошедших отжиг.

Рост  $R_X$  при  $\sim 77$  К после термообработки, по видимому, связан главным образом с изменением параметра  $A$ , характеризующего механизм рассеяния в выражении  $R_X = A/en$ , где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация носителей заряда.

Из-за различия подвижностей электронов и дырок в  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  влияние магнитного поля на электропроводность образцов, имеющих  $n$ - и  $p$ -тип проводимости, различно. Магнитосопротивление в образцах  $n$ -типа после термообработки всегда больше, чем в образцах, не прошедших термообработку.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экструдированные образцы  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , содержащие 0.01 ат. % акцепторной примеси свинца, дополнительно легированные до 0.1 ат. % донорной примесью теллура, и исследованы их электропроводность  $\sigma$ , коэффициенты термо-ЭДС  $\alpha$ , Холла  $R_X$  и теплопроводности  $\chi$  в интервале  $\sim 77$ – $300$  К и магнитном поле ( $H$ ) до  $\sim 74 \times 10^4$  А/м. Рассчитаны концентрация  $n$  и подвижность  $\mu$  носителей тока, электронная  $\chi_e$  и решеточная  $\chi_p$  составляющие теплопроводности.

Выяснено, что примесь теллура, компенсируя акцепторное действие свинца, приводит к росту концентрации электронов в образцах, в результате чего значения  $\sigma$  и  $\alpha$  приближаются к значениям для  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , не содержащего примесь Pb.

На подвижность носителей тока (следовательно, и на электрические параметры, электронную

часть теплопроводности) и решеточную составляющую теплопроводности существенно влияют структурные дефекты в образцах, “залечивающиеся” с термообработкой. С ростом температуры рассеяние фононов на структурных дефектах и на примесных центрах ослабляется.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Земсков В.С., Белая А.Д., Рослов С.А. и др.* Термоэлектрические свойства твердых растворов Bi–Sb // Изв. АН СССР. Металлы. 1978. № 1. С. 73–76.
2. *Лукьянова Л.Н., Кутасов В.А.* Гальваномагнитные и термоэлектрические свойства многокомпонентных твердых растворов на основе халькогенидов Bi и Sb // ФТТ. 2006. Т. 48. № 4. С. 607–613.
3. *Грабов В.М., Комаров В.А., Каблукова Н.С.* Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут-сурьма на подложках с различным температурным расширением // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 605–611.
4. *Yim W.H., Amith A.* Bi–Sb Alloys for Manetothermoelectric and Thermo-Magnetic Colling // Solid State Electron. 1972. V. 10. № 10. P. 1141–1165.
5. *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.
6. *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.
7. *Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Агаев З.Ф.* Высокотемпературный экструдированный материал на основе  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$  для низкотемпературных электронных охладителей // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 123–125.
8. *Tagiyev M. M.* Electrical Anisotropy in Extruded Specimens of  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$  Solid Solution // Russ. Phys. J. 2018. V. 60. № 10. P. 1795–1796. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1283-z>
9. *Тагиев М.М.* Влияние размеров зерен и примеси свинца на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$  // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 119–124.
10. *Тагиев М.М., Джафарова С.З., Ахмедова А.М., Абдинова Г.Д.* Термоэлектрические свойства твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$  с различными размерами зерен // Изв. вузов. Физика. 2019. № 3. С. 104–109.
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. *Zemskov V.S., Belaya A.D., Beluy U.S., Kozhemyakin G.N.* Investigation of Thermoelectric Properties of Bi–Sb Alloy Single Crystals // J. Cryst. Growth. 2000. V. 212(1). P. 161–166.
13. *Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Земсков В.С., Соколов О.Б., Скипидаров С.Я., Дуванков В.И.* Экструдированные материалы для термоэлектрических охладителей // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 7. С. 789–793.
14. *Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Земсков В.С. и др.* Экструдированные термоэлектрические материалы на основе твердых растворов системы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{–Bi}_2\text{Se}_3$  // Неорганические материалы. 2009. Т. 45. № 2. С. 159–164.
15. *Иоффе А.Ф.* Полупроводниковые термоэлементы, М.–Л.: Наука, 1960. 186 с.
16. *Иванова Л.Д.* Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.
17. *Stepanov N.P.* Electron-Plasmon Interaction in Bismuth with an Acceptor Dopant // Russ. Phys. J. 2004. V. 47. № 3. P. 262–271. <https://doi.org/10.1023/B:RUPJ.0000038743.50158.a7>
18. *Марков О.И.* Градиентно-варизонные сплавы висмут-сурьма // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 447–452.
19. *Tagiyev M.M., Abdinova G.D.* Electrical and Galvanomagnetic Properties of Extruded Samples of  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  Solid Solutions with Pb and Te Impurities // Russ. Phys. J. 2019. V. 61. № 11. P. 2135–2138.
20. *Тагиев М.М., Абдинов Д.Ш.* Магнитотермоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ , легированного свинцом // Неорганические материалы. 1995. Т. 31. № 11. С. 1405–1407.
21. *Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш.* Физико-химические и электрические явления на границе раздела кристаллов твердых растворов систем с контактными материалами // Неорганические материалы. 1997. Т. 33. № 4. С. 27–38.
22. *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Смирнов В.А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974. 168 с.
23. *Самедов Ф.С., Тагиев М.М., Абдинов Д.Ш.* Влияние термической обработки на свойства экструдированных образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ , легированного свинцом // Неорганические материалы. 1998. Т. 34. № 7. С. 847–850.
24. *Оскотский В.С., Смирнов И.А.* Дефекты в кристаллах и теплопроводность. Л. 1972. 160 с.
25. *Агаев З.Ф., Абдинова Г.Д., Багиева Г.З., Тагиев М.М., Абдинов Д.Ш.* Теплопроводность экструдированных образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$  с примесями Gd и Pb // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 2. С. 137–139.
26. *Горелик С.С., Дашевский М.Я.* Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М.: Металлургия. 1988. 576 с.