

УДК 621315592

ВЛИЯНИЕ ГАММА-РАДИАЦИИ НА МАГНИТОТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ZrO_2

© 2022 г. М. М. Тагиев^{1, 2, *}, И. А. Абдуллаева^{2, 3}, Г. Д. Абдинова²

¹Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, Баку, AZ1001 Азербайджан

²Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ1143 Азербайджан

³Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, пр. Б. Вагабзаде, 9, Баку, AZ1143 Азербайджан

*e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

После доработки 09.02.2022 г.

Принята к публикации 10.02.2022 г.

Исследованы электрические и тепловые свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, немодифицированных и модифицированных ZrO_2 , в зависимости от дозы гамма-излучения в интервале температур ~ 77 – 300 К и напряженности магнитного поля (H) до $\sim 74 \times 10^4$ А/м. Выяснено, что при малых дозах облучения (1 Мрад) в легированных и немодифицированных образцах твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ возникают радиационные донорные дефекты, рассеивающие носители тока, что приводит к росту электропроводности σ , уменьшению коэффициента термо-ЭДС α и подвижности μ . По мере роста количества дефектов происходит захват носителей тока, что приводит к уменьшению концентрации и росту μ . Рассчитаны электронная и решеточная части теплопроводности и определена их зависимость от дозы облучения.

Ключевые слова: экструзия, модифицирование, подвижность, гамма-облучение, отжиг

DOI: 10.31857/S0002337X22060148

ВВЕДЕНИЕ

Твердые растворы системы Bi–Sb, особенно высокопрочные экструдированные материалы на их основе, наиболее эффективны для создания различных низкотемпературных преобразователей энергии [1–7]. Высокие эксплуатационные характеристики обуславливают широкое использование приборов на основе твердых растворов систем Bi–Sb в различных областях техники в условиях воздействия ионизирующих излучений. Обеспечение работоспособности различных преобразователей энергии в условиях воздействия ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения становится все более актуальной проблемой вследствие расширения области применения этих приборов в промышленных, специальных и космических объектах [8–16]. Термоэлектрическая эффективность определяется параметром $Z = \alpha^2 \sigma / \chi$, где σ – удельная электропроводность, α – коэффициент термо-ЭДС, χ – коэффициент теплопроводности. В последние годы оптимизация добротности термоэлектриков сводится к варьированию концентрации и подвижности носителей тока, а также решеточной части теплопроводности в использу-

емом материале. [17, 18]. В частности, были высказаны предположения о возможности повышения термоэлектрической эффективности в материалах с двумерными и трехмерными дефектами кристаллической структуры, расстояния между которыми соизмеримы с длиной свободного пробега носителей заряда или длиной волны акустических фононов, ответственных за перенос тепла. Эти предположения основываются на возможности создания условий, при которых в материале происходит более сильное рассеяние тепловых колебаний по сравнению с электронами и дырками. Эффекта можно добиться, например, введя в матрицу вещества мелкодисперсную вторую фазу (аналогично введению второй фазы в материал при его дисперсном упрочнении) [19].

Наиболее перспективна разработка технологии повышения эффективности термоэлектрического материала за счет модифицирования. Метод заключается во введении в полупроводниковую матрицу рассеивающей фазы (модификатора) с коэффициентом термического расширения (КТР), отличным от КТР матрицы. В результате такого различия после охлаждения от температуры прессования, в матрице образуют-

ся упругонапряженные зоны. Создание таких напряженных зон в решетке термоэлектрической матрицы приводит к тому, что ее теплопроводность уменьшается больше, чем увеличивается электросопротивление [20]. Поэтому для получения термоэлектрического материала с необходимыми параметрами следует не только установить его оптимальный состав, но и определить оптимальную концентрацию носителей заряда и условия рассеяния носителей заряда и фононов, приводящие к достаточно высокому отношению подвижности к решеточной части теплопроводности μ/χ_p , а также разработать технологию получения и термообработки [21].

Приборы на основе твердых растворов системы Bi-Sb часто применяются и в условиях радиации. Образование радиационных дефектов (РД), влияя на физические свойства полупроводника, изменяет и параметры прибора на его основе. Поэтому важно изучение влияния РД, на физические свойства твердых растворов системы Bi-Sb.

Исследование влияния гамма-радиации на электрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\langle\text{Te}\rangle$ показало, что возникающие РД, рассеивая носители тока, значительно влияют на электрические свойства образцов [22].

С целью выяснения особенностей влияния модифицирования и РД на свойства твердых растворов системы Bi-Sb получены экструдированные образцы $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированные ZrO_2 , и исследованы их магнитотермоэлектрические свойства в зависимости от дозы гамма-излучения в интервале температур $\sim 77\text{--}300\text{ K}$ и напряженности магнитного поля до $\sim 74 \times 10^4\text{ A/m}$. Были исследованы необлученные образцы и те же образцы, облученные дозой гамма-квантов 1, 10 и 50 Мрад.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экструдированные образцы $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\langle\text{ZrO}_2\rangle$ получены в следующей технологической последовательности: синтез из исходных компонентов; механическое измельчение сплава в фарфоровой ступке и отбор фракции с размерами частиц $\leq 0.5\text{ мм}$; механическое смешивание порошков сплава и модификатора ZrO_2 (1 мас. % ZrO_2 , получен плазмохимическим методом, средний диаметр частиц $\sim 50\text{ нм}$, температура плавления $\sim 2950\text{ K}$), изготовление методом холодного прессования при комнатной температуре и давлении $\sim 350\text{ МПа}$ брикетов диаметром $\sim 30\text{ мм}$ для следующего этапа процесса экструзии; экструзия мелкодисперсных заготовок (брикетов).

В работе [23] исследованы гальваномагнитные свойства чистых и легированных теллуром и свинцом твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с добавлением модификатора ZrO_2 до $\sim 3\text{ мас. \%}$. Показано, что

введение ZrO_2 свыше 1 мас. % ухудшает термоэлектрические параметры $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$. Поэтому в данной статье мы использовали 1 мас. % ZrO_2 . Частицы модификатора вводили в матрицу в процессе отжига заготовки при температурах, лежащих между температурами ликвидуса и солидуса матрицы (подплавление). Модификатор равномерно распределяется в жидкой части объема, долю которой можно варьировать температурой отжига в соответствии с диаграммой состояния. Экспериментально установлено, что лучшим с этой точки зрения является отжиг при температурах, обеспечивающих 70–80% объема жидкой фазы. Установлено, что сам процесс подплавления оказывает положительное влияние на свойства термоэлектрического материала.

В качестве исходных компонентов были использованы висмут марки ВИ-0000 и сурьма марки СУ-0000. Синтез проводили прямым совместным сплавлением компонентов в вакууммированных до $\sim 10^{-2}\text{ Па}$ кварцевых ампулах при $\sim 673\text{ K}$ в течение 2 ч. Исходные вещества в стехиометрическом соотношении помещались в кварцевую ампулу, предварительно протравленную в растворе хромпика ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$) и промытую дистиллированной водой. В процессе синтеза ампулу с веществом постоянно подвергали качанию, затем закачивали в воду.

Технологические параметры экструзии (температуру, скорость вытяжки и др.) выбирали такими, чтобы формирование брусков проходило в условиях сверхпластичности без макро- и микронарушений. Прочность на изгиб полученных экструдированных образцов в ~ 3 раза превышает прочность монокристаллических образцов аналогичного состава. Экструзия проводилась на гидравлическом прессе МС-1000 с диаметра $\sim 30\text{ мм}$ на диаметр $\sim 6\text{ мм}$ с применением специальной оснастки. Технологические параметры экструзии составляли: $T_{\text{экс}} = 475 \pm 3\text{ K}$, $P_{\text{экс}} = 480\text{ МПа}$, скорость перемещение пресса $v_{\text{пр}} = 0.02\text{ см/мин}$, степень вытяжки 25.

На рентгеновской установке XR D8 ADVANCE (Bruker, Germany) была исследована текстура экструдированных образцов методом, описанным в [24]. Рентгеновские дифрактограммы регистрировали при $\sim 300\text{ K}$ с помощью дифрактометра D2 Phaser (Bruker) с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$. Полученные дифрактограммы, расшифрованные с использованием программы TOPAS-4.2, подтвердили, что образцы представляют собой порошки твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, который кристаллизуется в гексагональной сингонии. Межплоскостные расстояния висмута, сурьмы и их твердых растворов по основным линиям близки друг к другу, поэтому определение фазового состава проводилось с использованием эталона – висмута марки ВИ-0000.

На дебаеграммах и лауэграммах исследуемых образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ наблюдаются сильно уширенные симметричные пики для всех кристаллографических направлений, что свидетельствует о большой величине микронапряжений.

Данные, полученные с помощью рентгенофазового анализа, подтверждены электронно-микроскопическими исследованиями, проведенными с помощью растрового электронного микроскопа на шлифах, приготовленных по обычной методике с помощью алмазных паст.

При электроискровой резке за счет плавления полупроводникового материала и закалки жидкой фазы, образования импульсного поля термических напряжений и т.д. на поверхности образцов образуется нарушенный поликристаллический слой, сильно загрязненный продуктами электрода и диэлектрической среды. Поэтому после резки поверхность образцов подвергали электрохимическому травлению в растворе $\text{KOH} + \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}$ при ~ 300 К. Время электрохимического травления 20–25 с, плотность тока, проходящего через образец, 0.5 А/см^2 [25]. Изготовленные образцы подвергались отжигу при температуре ~ 503 К в откачанных до $\sim 10^{-2}$ Па кварцевых ампулах.

Образцы были облучены гамма-квантами (гамма-радиация) в изотопном источнике ^{60}Co с различными дозами (1, 10 и 50 Мрад).

Образцы для измерения вырезались из экструдированных прутков методом электроискровой резки и имели форму параллелепипеда с размерами $0.2 \times 0.4 \times 1.5$ см. Нанесение контактов на образцы проводилось сплавом Вуда ($25\text{Bi} + 50\text{Pb} + 12.5\text{Sn} + 12.5\text{Cd}$ мас. %) с температурой плавления ~ 343 К с использованием флюса ($\text{CH}_3\text{ON}_3 + \text{HCl} + \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). Контакты были точечными и имели размеры 0.5 мм.

Исследованы электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α), Холла (R_H) и теплопроводность (χ) образцов, прошедших отжиг после экстракции при ~ 503 К в течение 2 ч, как необлученных гамма-квантами, так и после облучения различными дозами в интервалах ~ 77 – 300 К и напряженности магнитного поля (H) до $\sim 74 \times 10^4$ А/м.

Магнитотермоэлектрические параметры образцов измеряли методом, описанным в [26], вдоль образца (прутка), т.е. в направлении экстракции, с погрешностью $\approx 3\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений представлены на рис. 1, 2 и в табл. 1. Видно, что в образцах, не содержащих модификатора, облучение дозой 1 Мрад приводит к росту концентрации носителей тока при ~ 77 К в ~ 20 раз. Подвижность носителей тока при этом уменьшается в ~ 12 раз. С ростом дозы облуче-

ния до 10 Мрад концентрация носителей тока сильно падает (от 4.96×10^{18} до $\sim 1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), затем медленно уменьшается при дозе 50 Мрад и достигает значения $0.7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. С ростом дозы облучения от 1 до 50 Мрад подвижность носителей тока растет и достигает значения $\sim 3.5 \times 10^5 \text{ см}^2/(\text{В с})$. В модифицированных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ зависимости μ и n от дозы облучения носят несколько иной характер. Добавление модификатора (частиц ZrO_2 с размерами ~ 50 нм) в два раза уменьшает μ , в ~ 1.8 раза увеличивает n . Облучение дозой 1 Мрад приводит к падению n (в ~ 2.1 раза) и росту μ (в ~ 2.3 раза). Дальнейший рост дозы облучения мало влияет как на концентрацию, так и на подвижность носителей тока. Изменения μ и n соответствующим образом влияют на электропроводность, коэффициенты термо-ЭДС и теплопроводность исследованных образцов.

Из табл. 1 следует, что с ростом дозы облучения растет общая теплопроводность образцов, модифицированных ZrO_2 . При ~ 77 К тепловая энергия в твердом растворе $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ в основном переносится колебаниями решетки и электронами проводимости [27–29]. Исходя из этого по выражениям $\chi_p = \chi - \chi_s$ и $\chi_s = L\sigma T$ рассчитаны соответственно электронная (χ_s) и решеточная (χ_p) составляющие теплопроводности. Здесь χ – измеренная теплопроводность, σ – электропроводность при данной температуре T , $L = A(k/e)^2$ – число Лоренца, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона. Значение A оценено из зависимости A от коэффициента термо-ЭДС [30].

Расчеты показали, что значения χ_s при ~ 77 К для модифицированных необлученных и облученных дозами 1, 10 и 50 Мрад образцов равны 0.67, 0.77, 0.65 и 0.64 Вт/(м К) соответственно. В этом случае значения решеточной составляющей χ_p для вышеперечисленных образцов равны 2.26, 1.48, 3.74 и 3.69 Вт/(м К) соответственно. То есть при ~ 77 К в исследованных образцах тепло переносится в основном ($\sim 77\%$ для модифицированных и необлученных образцов; ~ 65 , ~ 86 и $\sim 85\%$ для образцов, модифицированных и облученных 1, 10 и 50 Мрад соответственно) колебаниями решетки. Поэтому с ростом дозы облучения χ растет. Таким образом, при низких температурах с увеличением дозы облучения рост χ в образцах обусловлен ростом χ_p .

Модифицирование образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ увеличивает плотность дислокаций и одновременно повышает однородность их распределения по образцу, т.е. происходит упорядочение структуры, способствующее росту подвижности носителей тока и решеточной части теплопроводности.

Изменение общей теплопроводности образцов с ростом H обусловлено изменением электронной составляющей. При малых дозах (1 Мрад) в образ-

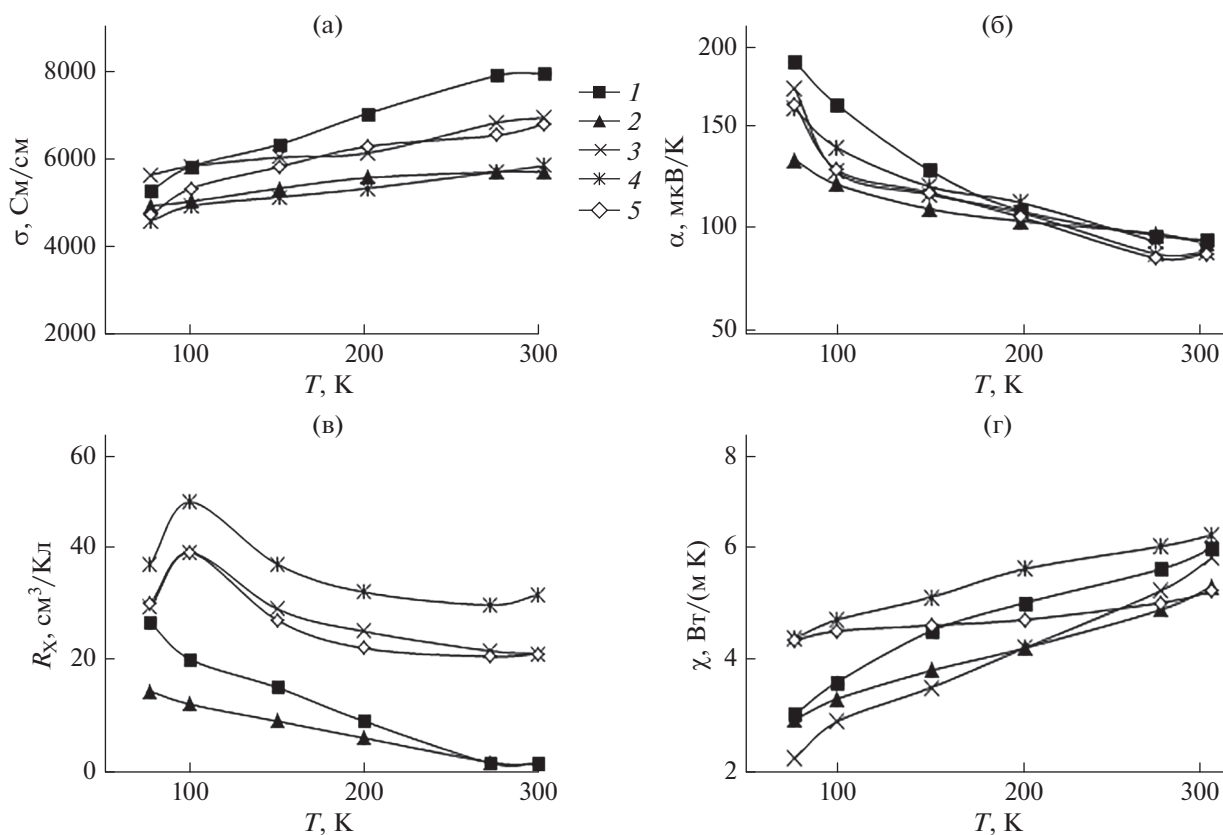


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности σ (а), коэффициентов термо-ЭДС α (б), Холла (R_H) (в) и теплопроводности χ (г) экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, немодифицированных (1) и модифицированных ZrO_2 (2–5), необлученных (1, 2) и облученных дозами 1 (3), 10 (4), 50 Мрад (5).

цах возникают РД, приводящие к росту концентрации и уменьшению подвижности носителей тока. С ростом дозы облучения растет и концентрация РД, происходит как объединение этих дефектов, так и захват существующих свободных носителей на их уровень. В результате этого концентрация носителей и, следовательно, σ образца падают, χ_p несколько растет, уровень Ферми смещается в глубину запрещенной зоны, подвижность и коэффициент термо-ЭДС растут.

При модифицировании за счет различия КТР модификатора и твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ в экструдированных образцах образуются упругонапряженные заряженные зоны. Эти зоны, рассеивая носители тока, а также компенсируя часть этих носителей, приводят к некоторому уменьшению как концентрации, так и подвижности свободных носителей заряда. Дефекты, созданные облучением модифицированных кристаллов, захватывая свободные носители, уменьшают их концентрацию и повышают подвижность. При этом изменения σ и α модифицированных образцов хорошо коррелируют с изменениями μ и n .

Доза облучения модифицированных образцов практически не влияет на температурные зависимости σ , α и χ .

Из рис. 2 видно, что при ~ 77 К зависимости $\sigma(H)$ и $\alpha(H)$ для модифицированных образцов не зависят от облучения. Однако магнитосопротивление в необлученных немодифицированных и модифицированных образцах при слабых магнитных полях (до $\sim 16 \times 10^4$ А/м), намного больше, чем в облученных образцах. В необлученных и облученных образцах рассеяние электронов превалирует над рассеянием на дефектах. При воздействии на образец магнитного поля, перпендикулярного к направлению движения электронов и дырок, носители заряда отклоняются под действием силы Лоренца. При этом носители, которые рассеиваются слабее и поэтому имеют большее время свободного пробега в магнитном поле, больше отклоняются, чем сильнорассеивающиеся носители. В магнитном поле в исследуемых образцах происходит перераспределения вкладов различных носителей заряда в общий ток: вклад сильнорассеивающихся носителей увеличивается, слабонерассеивающихся уменьшается.

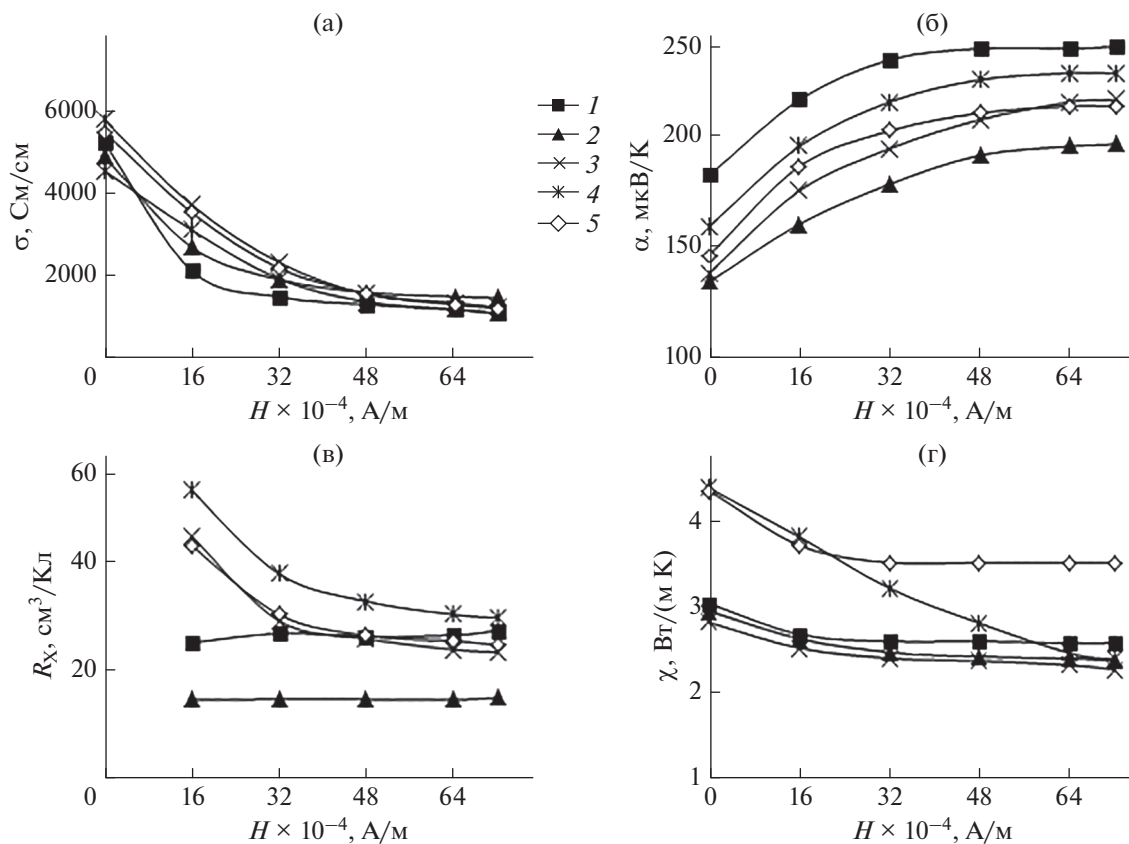


Рис. 2. Зависимости электропроводности σ (а), коэффициентов термо-эдс α (б), Холла (R_X) (в) и теплопроводности χ (г) от напряженности магнитного поля (H) экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ при 77 К (кривые 1–5 те же, что на рис. 1).

Таблица 1. Электрические и тепловые параметры экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, немодифицированных и модифицированных ZrO_2 , до и после облучения

Доза радиации, Мрад	Состав	σ , См/см	α , мкВ/К	χ , Вт/(м К)	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	μ , см ² /(В с)	n , см ⁻³	σ , См/см	α , мкВ/К	χ , Вт/(м К)	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	μ , см ² /(В с)	n , см ⁻³
		77 К						300 К					
0	$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	5250	-182	3.02	-26.5	139125	0.24×10^{18}	7520	-95	5.96	-1.43	10754	4.4×10^{18}
	$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 1\%ZrO_2$	4899	-134	2.93	-14.33	70203	0.44×10^{18}	5667	-93	5.29	-1.34	7594	4.7×10^{18}
1	$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	8481	-121	3.07	-1.26	10686	4.96×10^{18}	6524	-89	5.08	-1.26	8220	5×10^{18}
	$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 1\%ZrO_2$	5604	-169	2.25	29.2	163637	0.21×10^{18}	6610	-60	7.56	-21	13173	0.3×10^{18}
10	$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	4240	-161	3.06	-60	254400	0.1×10^{18}	6890	-101	6.32	-17.4	119886	0.36×10^{18}
	$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 1\%ZrO_2$	4563	-159	4.37	-37	168831	0.16×10^{18}	5503	-102	5.99	-31.5	173345	0.2×10^{18}
50	$Bi_{0.85}Sb_{0.15}$	4552	-188	4	-85	386920	0.07×10^{18}	6448	-90	4.76	-34.3	221166	0.18×10^{18}
	$Bi_{0.85}Sb_{0.15} + 1\%ZrO_2$	4703	-161	4.34	-30	141090	0.2×10^{18}	5789	-47	5.41	-21	141876	0.3×10^{18}

Незначительное изменение α во всех облученных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ показывает, что при облучении главным образом меняется подвижность носителей заряда. При помещении образца в магнитное поле вклад в общий ток быстрых носителей увеличивается, т.е. растут средняя энергия дефектов в необлученных образцах мала, поэтому при ~ 77 К преобладает рассеяние на акустических фононах и в магнитном поле коэффициент термо-ЭДС сильно возрастает.

Облучение приводит к уменьшению концентрации структурных дефектов в экструдированных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, возникающих в результате пластической деформации кристаллической решетки в отдельно взятых зернах, увеличению подвижности электронов и усилению рассеяния носителей тока на колебаниях решетки.

Поперечное магнитосопротивление в слабых полях пропорционально квадрату магнитной индукции B и квадрату подвижности носителей заряда μ [31]:

$$\Delta\rho/\rho_0 = A\mu^2 B^2, \quad (1)$$

где коэффициент A зависит от механизма рассеяния носителей тока. Экспериментальные результаты по зависимости $\Delta\rho/\rho_0$ от B^2 хорошо согласуются со значением $A = 1.18$ для рассеяния электронов на фононах в модифицированных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$. Об этом свидетельствуют и зависимости коэффициента Холла от напряженности магнитного поля.

Аналогичные зависимости наблюдаются и при высоких (до ~ 300 К) температурах. Однако вследствие уменьшения подвижности носителей тока с ростом температуры эти зависимости несколько ослабляются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных данных предполагается, что при малых дозах облучения (1 Мрад) в нелегированных и немодифицированных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ возникают РД, играющие роль донорных центров, в результате чего концентрация свободных электронов и, следовательно, электропроводность растут, а коэффициент термо-ЭДС падает. Эти дефекты, рассеивая носители тока, уменьшают их подвижность. С ростом дозы облучения растет и концентрация дефектов, происходит захват свободных носителей на уровень РД.

Изменение дефектов в экструдированных модифицированных образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ под воздействием гамма-излучения вызывает изменение спектра локализованных состояний и процесса рассеяния электронов, что приводит к соответствующим изменениям электрических и тепловых параметров.

Показано, что рост общей теплопроводности с увеличением дозы облучения обусловлен ростом решеточной части теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земсков В.С., Белая А.Д., Рослов С.А. и др. Термoeлектрические свойства твердых растворов Bi–Sb // Изв. АН СССР. Металлы. 1978. № 1. С. 73–76.
2. Белозерова Л.А. Исследования сплавов Bi–Sb для термоэлектрических охлаждающих устройств // Холодильная техника и технология. 1976. № 23. С. 52–54.
3. Грабько Д.З., Боярская Ю.С., Дынту М.П. Механические свойства полуметаллов типа висмута. Кишинев: Штиинца, 1982. 136 с.
4. 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.
5. Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш. Термоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 3. С. 375–378.
6. 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. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21020135>
7. 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. Т. 62. № 3. С. 104–109.
8. Paulescu M., Vizman D., Lascu M., Negrila R., Stef M. Experimental Study of Proton Irradiation Effect on Silicon Solar Cells // Physics Conf TIM 15–16. Timisoara, 2017. V. 1796 (1). <https://doi.org/10.1063/1.4972388>
9. Park S., Bourgoin J.C., Sim H., Baur C., Khorenko V., Cavani O., Bouerois J., Picard S., Boizot B. Space Degradation of 3J Solar Cells: I—Proton Irradiation // Prog. Photovoltaics. 2018. V. 26. № 10. P. 778–788. <https://doi.org/10.1002/ppv.3016>
10. Козюхин С.А. Химическое модифицирование материалов фазовой памяти на основе сложных халькогенидов // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 2. С. 291–297.
11. Титов Д.Д., Щербакова Г.И., Гуменникова Е.А., Похоренко А.С., Лысенков А.С., Фролова М.Г., Каргин Ю.Ф. Влияние добавки Sm_2O_3 на процесс спекания MgAl_2O_4 из предкерамического Al, Mg-олигомера // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 8. С. 1032–1039.
12. Грищенко Д.Н., Голуб А.В., Курявый В.Г., Шлык Д.Х., Медков М.А. Биоактивная керамика на основе ZrO_2 , легированная Ta_2O_5 : получение и свойства // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 10. С. 1497–1504.
13. Oraby O.A., El-Kordy M.F., El-Madany H.T., Fahmy F.H. UA Sat Solar Array Design and Performance Charac-

- teristics // *Int. J. Sci., Eng. Technol. Res.* 2014. V. 3. № 2. P. 167–172.
14. *Volkov A.G., Dyugaeva N.A., Kuvyrkin G.N. et al.* Studying the Change in Characteristics of Optical Surfaces of a Spacecraft // *Cosmic Res.* 2017. V. 55. P. 124–127. <https://doi.org/10.1134/S0010952517020071>
15. *Lehman J.H., Lee B., Grossman E.N.* Far Infrared Thermal Detectors for Laser Radiometry Using a Carbon Nanotube Array // *Appl. Opt.* 2011. V. 50. № 21. P. 4099–4104. <https://doi.org/10.1364/AO.50.004099>
16. *Гайдар Г.П.* Кинетика электронных процессов в γ -облученных (^{60}Co) монокристаллах n-Ge // *ФТП.* 2014. Т. 48. Вып. 9. С. 1171–1175.
17. *Сидоренко Н.А., Дашевский З.М.* Эффективные кристаллы Bi-Sb для термоэлектрического охлаждения при температурах $T \leq 180 \text{ K}$ // *ФТП.* 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 693–697.
18. *Иванова Л.Д.* Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // *ФТП.* 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.
19. *Портной К.И., Бабич Б.Н.* Дисперсноупрочненные материалы. М.: Металлургия, 1974. 199 с.
20. *Задворный Л.И., Горячев Ю.М.* Порошковая металлургия термоэлектрических материалов // Тез. докл. всесоюз. семинара “Полупроводниковые материалы для термоэлектрических преобразователей”. Л.: ЛФТИ, 1985. С. 108–109.
21. *Иоффе А.Ф.* Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л.: Наука, 1960. 186 с.
22. *Абдуллаева И.А., Абдинова Г.Д., Тагиев М.М., Бархалов Б.Ш.* Влияние гамма-излучения на электрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ // *Неорган. материалы.* 2021. Т. 57. № 9. С. 933–939.
23. *Тагиев М.М.* Гальваномагнитные свойства легированных твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированных ZrO_2 // *Неорган. материалы.* 1999. Т. 35. № 9. С. 1042–1044.
24. *Хейкер Д.М., Зевин Л.С.* Рентгеновская дифрактометрия. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
25. *Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш., Салаев Э.Ю.* Влияние обработки поверхностей термоэлектрических материалов на свойства термоэлементов, изготовленных из твердых растворов систем $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{--Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{--Sb}_2\text{Te}_3$ // *Изв. АН. СССР. Неорган. материалы.* 1981. Т. 17. № 10. С. 1773–1776.
26. *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Смирнов В.А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974. 168 с.
27. *Земсков В.С., Бородин П.Г., Белая А.Д., Рослов С.А.* Явления переноса в висмуте и твердых растворах висмут-сурьма. М.: Институт металлургии им А.А. Байкова АН СССР, 1978. 52 с.
28. *Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш.* Теплопроводность $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированного теллуром // *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. *Канилов В.Н., Метов-Деглин Л.П.* Критерии оценки химической чистоты и качества кристаллов висмута // *ФММ.* 1974. Т. 37. № 5. С. 1108–1111.