НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2021, том 57, № 2, с. 119–124

УДК 546.87

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН И ПРИМЕСИ СВИНЦА НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$

© 2021 г. М. М. Тагиев[1, 2, *]

[1]Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, Баку, AZ 1001 Азербайджан

[2]Институт физики им. академика Х.М. Абдуллаева Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ 1143 Азербайджан

*e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.
После доработки 30.09.2020 г.
Принята к публикации 30.09.2020 г.

Исследованы зависимости электрических и тепловых параметров экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ от размеров зерен, режима отжига, концентрации акцепторной примеси свинца, напряженности магнитного поля в интервале температур ~77–300 K. Выяснено, что при экструзии поликристаллического материала $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ возникает аксиальная текстура, т.е. часть зерен поликристалла ориентируется так, что их тригональная ось становится параллельной оси экструзии. Одновременно в результате пластической деформации возникают различные структурные дефекты кристаллической решетки в отдельно взятых зернах. При этом указанные структурные дефекты преимущественно сосредотачиваются между плоскостями спайности (111) кристаллов. Выяснено, что степень текстуры в образцах зависит от размера зерен. Легированием образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ с размерами зерен $d \sim 630$ мкм акцепторными примесями свинца и отжигом при ~503 K в течение 5 ч удается получить материалы *n*-типа с термоэлектрической добротностью ~5×10^{-3} K^{-1} при ~200 K.

Ключевые слова: твердый раствор, экструзия, текстура, электропроводность, примесь

DOI: 10.31857/S0002337X21020135

ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллы твердых растворов системы Bi–Sb обладают высокой термо- и магнитотермоэлектрической (**МТЭ**) эффективностью при низких температурах, что делает их незаменимыми материалами для создания различных низкотемпературных электронных преобразователей энергии. Кроме того, сплавы Bi–Sb, возможно, могут быть использованы и для повышения термоэлектрической добротности материалов. Главным недостатком этих монокристаллов является их низкая механическая прочность, обусловленная слоистостью структуры, что ограничивает их применение [1–7]. Одним из эффективных способов повышения механической прочности с сохранением достаточно высоких термоэлектрических параметров является метод экструзии [5, 8–11]. Метод имеет большую производительность, отличается высокой технологичностью, открывает широкие возможности для профилирования ветвей термоэлементов и позволяет получать ветви термоэлементов с хорошо воспроизводимыми свойствами [12, 13].

В последние годы с целью оптимизации изучают изменение концентрации носителей тока в используемых материалах. Поэтому для получения термоэлектрического материала с необходимыми параметрами следует не только установить его оптимальный состав, но и использовать легирование разными примесями [14], обеспечивающее оптимальную концентрацию носителей заряда и условия рассеяния носителей, приводящие к достаточно высокому отношению подвижности к фононной теплопроводности μ/χ_p, т.е. разработать технологию получения и термообработки.

Особый интерес с точки зрения использования более широкой температурной области (~150–250 K) представляет легирование акцепторными примесями [15–18].

С целью создания достаточно прочного материала на основе твердых растворов системы Bi–Sb с термо- и МТЭ-параметрами, близкими к их монокристаллическим образцам, и повышения рабочих температур в данной работе получены экструдированные образцы на основе $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ с различными размерами зерен и образцы, легиро-

ванные свинцом, и исследовано влияние размеров зерен и режима термообработки на их термоэлектрические свойства в интервале ~77–300 K и при напряженностях магнитного поля (H) до ~74 × 10^4 А/м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экструдированные бруски сплавов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ и $Bi_{0.85}Sb_{0.15}\langle Pb\rangle$ были получены в следующей технологической последовательности: синтез сплава из исходных компонентов; размельчение сплава и изготовление из него методом холодного прессования заготовок; экструзия (выдавливание нагретой до пластического состояния заготовки через отверстие определенного размера). В качестве исходных компонентов были использованы висмут марки ВИ-000 и сурьма марки СУ-000. В качестве легирующей примеси использовали свинец марки Pb-000. Все исходные компоненты взвешивали с точностью ±0.0001 г.

Синтез проводили в вакуумированных до ~10^{-3} Па кварцевых ампулах при ~673 K в течение 2 ч. В процессе синтеза ампулу с веществом постоянно подвергали качанию, затем ампулу с синтезированным веществом резко охлаждали, опуская в воду. Технологические параметры экструзии (температуру, скорость вытяжки и др.) выбирали такими, чтобы формирование экструдированных брусков проходило в условиях сверхпластичности без макро-и микронарушений. Прочность на изгиб полученных экструдированных образцов в ~3 раза превышает прочность монокристаллических образцов этого состава.

Технологические параметы экструзии: температура экструзии $T_{экстр}$ = 475 ± 3 K, давление экструзии $p_{экстр}$ = 480 МПа, скорость перемещения пресса $v_{пр}$ = 0.02 см/мин, степень вытяжки – 25.

Из порошков твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ при комнатной температуре и давлении ~350 МПа прессовали брикеты диаметром ~30 мм для следующего этапа процесса экструзии. Экструзия проводилась на гидравлическом прессе марки МС-1000 с диаметра ~30 мм на диаметр ~6 мм с применением специальной оснастки. Для изучения влияния размеров зерен на термоэлектрические свойства синтезированный материал перед прессованием заготовок предварительно измельчали с отбором фракций с размерами зерен 50, 100, 160, 200, 315, 630 и 1000 мкм.

Образцы размерами 0.2 × 0.4 × 1.5 см для измерения вырезали из экструдированных прутков методом электроискровой резки на установке А.207.40. После резки поверхность образцов обрабатывали электрохимическим травлением в растворе $KOH + C_4H_4O_6 + H_2O$.

Электрические параметры и теплопроводность измеряли методом, описанным в [19], вдоль длины образца (прутка). Были исследованы образцы, не прошедшие отжиг после экструзии, и после отжига при ~503 K в течение 2 ч в вакууме. Погрешность при измерении электрических параметров и теплопроводности составляла ≈3–5%.

С помощью рентгеновской установки XR DD8 ADVANCE (Bruker, Germany) была исследована текстура экструдированных образцов в зависимости от размеров зерен и термообработки методом, описанным в [20]. Рентгеновские дифрактограммы регистрировали при комнатной температуре с помощью дифрактометра D2 Phaser (Bruker) с использованием излучения CuK_α, в диапазоне от 5° до 80°. Плоскость образца и счетчик устанавливали в положении рефлекса 0015. Анализировались интенсивность линии 110 (интенсивность этой линии самая высокая и во всех экструдированных образцах ось [110] располагается вдоль направления экструзии [133]). На основе полученных дифрактограмм с использованием программы TOPAS-4.2 было подтверждено, что исследованные образцы представляют собой порошки твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, который кристаллизуется в гексагональной сингонии. В качестве эталонного был принят образец с размерами зерен ~50 мкм, и степень текстуры (т.е. интенсивность линии 101, соответствующей преимущественной ориентации кристаллов вдоль оси экструзии) образцов с другими размерами зерен определяли относительно данного образца. При этом степень текстуры неотожженного образца на основе порошка с размерами зерен ~50 мкм была принята за единицу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеновским методом установлено, что при экструзии поликристаллического материала $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ возникает аксиальная текстура, т.е. часть зерен поликристалла ориентируется так, что их тригональная ось становится параллельной оси экструзии. Одновременно в результате пластической деформации возникают различные дефекты кристаллической решетки в отдельно взятых зернах, которые преимущественно сосредотачиваются между плоскостями спайности (111) кристаллов. Выяснено, что максимальная степень текстуры наблюдается в образцах с размерами зерен 160–200 мкм (табл. 1).

В образцах с размерами зерен ~50 мкм концентрация структурных дефектов наибольшая. При $d \approx 50$ мкм энергия, требуемая для ориентации зерен, наименьшая. Поэтому в этом случае должна наблюдаться наибольшая степень текстуры. Но так как экструзия проводится при ~470 K, по-видимому, в этих образцах происходит ча-

Таблица 1. Зависимости степени текстуры (при ~300 K), магнитосопротивления ($\Delta\rho/\rho$), коэффициента термо-ЭДС (α), коэффициента теплопроводности (κ) от размеров зерен и напряженности магнитного поля при ~77 K

Размер зерен, мкм	Степень текстуры, отн. ед.	$\Delta\rho/\rho$	α, мкВ/K	$\Delta\rho/\rho$	α, мкВ/K	$\kappa \times 10^2$, Вт/(см K)	Степень текстуры, отн. ед.	$\Delta\rho/\rho$	α, мкВ/K	$\Delta\rho/\rho$	α, мкВ/K	$\kappa \times 10^2$, Вт/(см K)
		$H = 16 \times 10^4$, А/м		$H = 74 \times 10^4$, А/м		$H = 0$		$H = 16 \times 10^4$, А/м		$H = 74 \times 10^4$, А/м		$H = 0$
	без отжига						после отжига					
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

стичное тепловое разрушение текстуры в процессе экструзии. В конечном итоге степень текстуры в них меньше, чем в образцах с размерами зерен больше ~50 мкм.

Отжиг при ~503 K приводит к уменьшению текстуры образцов. Наибольшее уменьшение текстуры при отжиге происходит в образцах с размерами частиц ~50 мкм. С ростом размеров частиц влияние отжига на текстуру ослабляется, и в образцах с размерами частиц ~630 мкм отжиг на текстуру почти не влияет (табл. 1).

В неотожженных образцах при низких температурах носители заряда в основном рассеиваются на структурных дефектах и границах зерен. С ростом размеров зерен концентрация дефектов внутри зерен, а также границы зерен уменьшаются. Поэтому с ростом размеров зерен подвижность носителей заряда (μ) растет и их концентрация, обусловленная ионизированными дефектами, уменьшается. Это приводит к усилению магнитосопротивления с ростом размеров зерен.

В магнитном поле в образцах происходит некоторое перераспределение вкладов различных носителей в общий ток. С уменьшением вклада в ток слаборассеивающихся носителей заряда увеличивается вклад сильнорассеивающихся. При отжиге начинает превалировать рассеяние на акустических фононах, чему быстрые носители заряда подвержены в большей мере, чем медленные. Поэтому в отожженных образцах, помещенных в магнитное поле, ток быстрых носителей возрастает и, следовательно, растет средняя энергия носителей заряда в образце. В результате термо-ЭДС (α) в отожженных образцах в магнитном поле растет сильнее, чем в неотожженных. По данным R_X и σ была рассчитана холловская подвижность $\mu = R_X\sigma$ носителей тока. Расчеты показали, что с ростом размеров зерен и при термообработке значение n в зависимости $\mu \sim T^{-n}$ растет от 1.42–1.57 для образцов, не прошедших отжиг, до 1.81–2.6 для отожженных образцов. Это свидетельствует о том, что при отжиге концентрация структурных дефектов уменьшается.

Таким образом, электрофизические свойства экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ определяются как размерами зерен, так и термической обработкой. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [21]. Эти факты можно использовать для получения материала с заданными свойствами. Вышеприведенные рассуждения согласуются и с данными по измерениям теплопроводности (κ) (табл. 1).

Расчеты показали, что максимальную термоэлектрическую добротность $Z = \frac{\alpha^2\sigma}{\kappa}$ при температурах ниже ~200 K имеют образцы с размерами зерен ~630 мкм (табл. 2). Это обусловлено низкой общей теплопроводностью и относительно высокой μ в этих образцах. При ~77 K Z образца с размерами 630 мкм достигает ~5.8×10^{-3} K^{-1}, что близко к значению Z для монокристаллических образцов [1]. Поэтому такой материал перспективен для применения в низкотемпературных термоэлектрических преобразователях. Исходя из этого влияние акцепторной примеси на термо- и МТЭ-свойства твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ изучали на экструдированных образцах с размерами зерен ~630 мкм.

Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. Электрические параметры экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ и $Bi_{0.85}Sb_{0.15}\langle Pb\rangle$ в зависимости от напряженности магнитного поля при ~77 K приведены в [22].

Видно, что у нелегированного отожженного образца абсолютное значение α с ростом темпе-

Таблица 2. Термоэлектрические параметры экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ с различными размерами зерен при ~77 K

Размер зерен, мкм	σ, См/см	α × 10^6, В/K	κ × 10^2, Вт/(см K)	$Z \times 10^3$, K^{-1}	σ, См/см	α × 10^6, В/K	κ × 10^2, Вт/(см K)	$Z \times 10^3$, K^{-1}
	без отжига				после отжига			
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

ратуры уменьшается и имеет отрицательный знак во всем исследованном интервале температур. Легирование свинцом до 0.005 ат. % приводит к росту абсолютной величины α. С ростом степени легирования абсолютная величина α уменьшается, и при концентрациях 0.05 и более ат. % Pb при температурах ниже ~128 K наблюдается смена знака α. С ростом степени легирования температура перехода с *n*- на *p*-тип проводимости смещается в область более высоких температур.

В образце $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ с 0.1 ат. % Pb, прошедшем отжиг при ~503 K, α при отсутствии магнитного

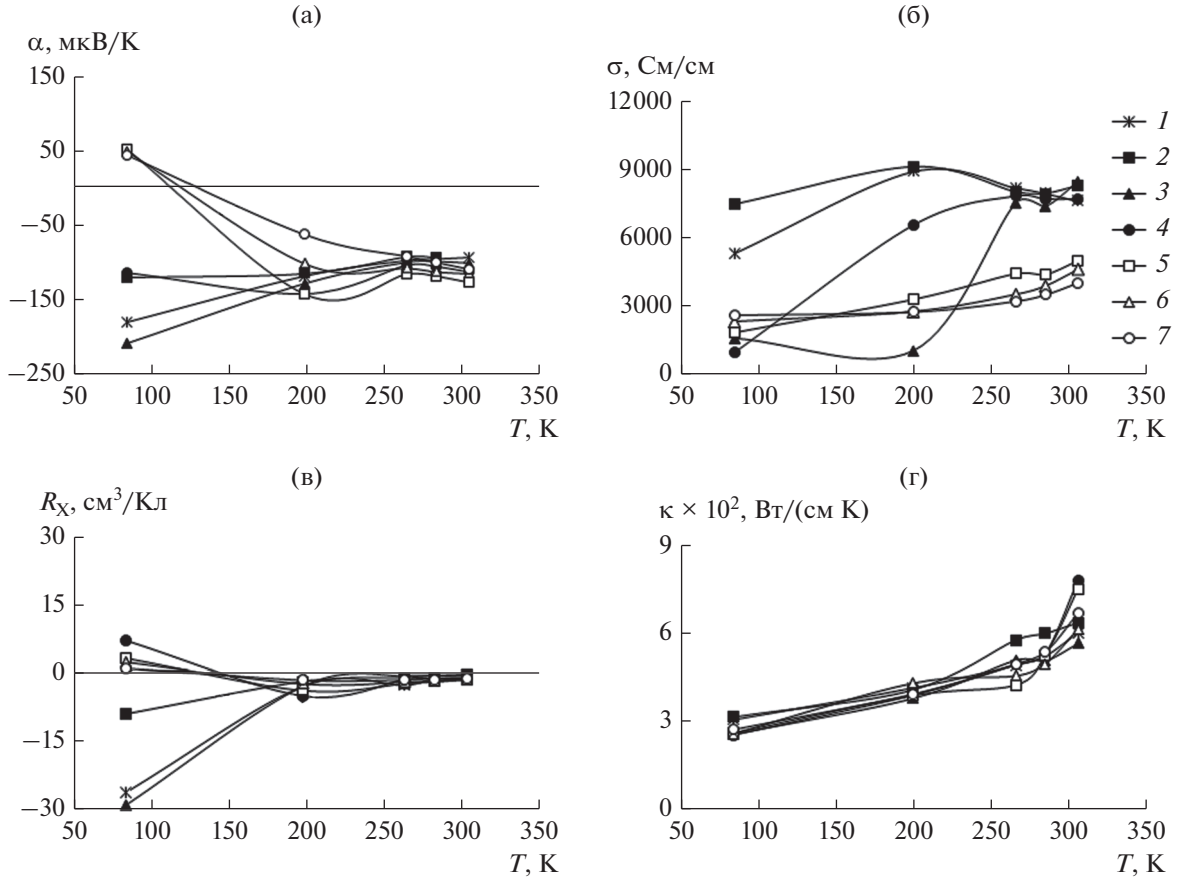

Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента термо-ЭДС (а), электропроводности (б), коэффициента Холла (в) и теплопроводности (г) экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$: *1* – нелегированного, *2–7* – легированных 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.075 и 0.1 ат. % Pb соответственно.

поля не изменяет своего знака с температурой. Видимо, в этом образце концентрация дырок недостаточна для нарушения электронно-дырочного равновесия. Так как $\mu_э > \mu_д$ в магнитном поле электроны отклоняются сильнее, чем дырки, и в результате у этого образца также происходит смена знака термо-ЭДС с температурой. Этим объясняется и рост значений α при низких температурах под действием магнитного поля. Смена типа проводимости наблюдается также на температурной зависимости коэффициента Холла (R_X) (рис. 1). В образцах с 0.05, 0.075 и 0.1 ат. % Pb при низких температурах R_X имеет положительное значение. При температурах выше ~200 K добавки свинца до ~0.005 ат. % незначительно изменяют величину σ. В образцах с большей концентрацией свинца значение σ даже при комнатной температуре меньше, чем у нелегированного образца. При температурах ниже ~200 K для образцов с 0.01 ат. % Pb также наблюдается полупроводниковая зависимость σ.

Температурные зависимости σ и α образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированных свинцом, дают основания предполагать, что они содержат два вида донорных уровней: мелкие (0.01 эВ) и глубокие (0.04 эВ). В нелегированном образце электрические свойства в основном определяются мелкими донорными уровнями и примеси свинца компенсируют их. В образце с 0.01 ат. % Pb происходит полная компенсация мелких уровней, поэтому σ достигает минимума. С ростом температуры в этом образце растет ионизация глубоких донорных уровней, вследствие чего σ с температурой сильно растет и при 200–300 K приближается к значению σ для нелегированного образца. Рост степени легирования приводит к компенсации глубоких донорных уровней и созданию новых мелких акцепторных уровней. Образцы с 0.05, 0.075 и 0.1 ат. % Pb имеют дырочный тип проводимости при температуре ~77 K, и у них σ больше, чем у образцов с 0.01 и 0.005 ат. % Pb. С ростом температуры в образцах, содержащих более 0.05 ат. % Pb начинает превалировать собственная проводимость, σ растет и проводимость становится электронной.

Для нелегированного образца κ с температурой растет. Легирование свинцом не влияет на характер температурной зависимости κ образцов, однако во всем интервале температур κ у образцов, легированных свинцом, меньше чем у нелегированных.

Рассчитанная Z для образца с размерами зерен 630 мкм, содержащего 0.005 ат. % Pb, при ~200 K равна ~5×10^{-3} K^{-1}, и это значение намного превышает Z образцов Bi–Te–Se n-типа, применяемых в качестве n-ветви термоэлементов при ~200 K [23, 24].

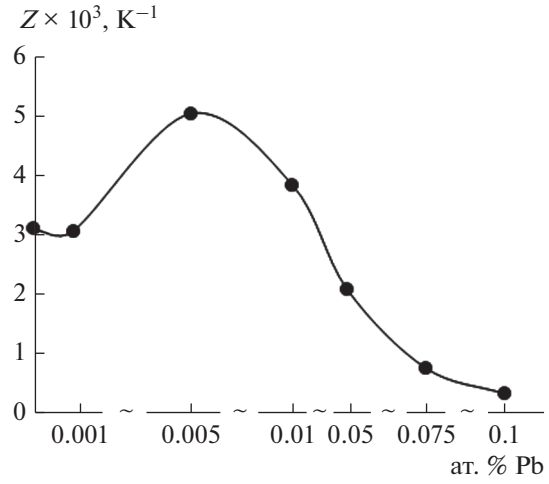

Рис. 2. Зависимость термоэлектрической добротности экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}\langle Pb\rangle$ от концентрации свинца при ~200 K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного исследования зависимостей электрических и тепловых параметров экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, нелегированных и легированных свинцом, от размера зерен, режима отжига, концентрации акцепторной примеси свинца, температуры и напряженности магнитного поля выяснено, что из нелегированных образцов с размером зерен ~630 мкм при ~77 K и содержащих 0.005 ат. % Pb при ~200 K удается получить материалы n-типа с термоэлектрической добротностью ~5.8×10^{-3} K^{-1} и ~5×10^{-3} K^{-1} соответственно, позволяющие создать на их основе термоэлементы с повышенной добротностью.

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. *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
3. *Марков О.И.* Градиентно-варизонные сплавы висмут–сурьма // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 447–452.
4. *Грабов В.М., Комаров В.А., Каблукова Н.С.* Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут-сурьма на подложках с различным температурным расширением // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 605–611.
5. *Сидоренко Н.А., Дашевский З.М.* Эффективные кристаллы Bi–Sb для термоэлектрического охлаждения при температурах $T \leq 180$ K // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 693–697.

6. *Иванова Л.Д.* Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.

7. *Куликов В.А., Парахин А.С.* Гальваномагнитные эффекты в кристаллах Bi–Sb, легированных теллуром // Термоэлектрики и их применения. СПб. 2000. С. 111–115.

8. *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 $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1986. Т. 22. № 4. С. 619–622.

9. *Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш.* Термоэлектрические свойства экструдированных образцов $Bi_{85}Sb_{15}$ // Неорган. материалы. 1994. Т. 30. № 3. С. 375–378.

10. *Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Агаев З.Ф.* Высокотемпературный экструдированный материал на основе $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ для низкотемпературных электронных охладителей // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 123–125.

11. *Tagiyev M.M.* Electrical Anisotropy in Extruded Specimens of $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$Solid Solution // Russ. Phys. J. 2018. V. 60. № 10. P. 1795–1796. https://doi.org/10.1007/s11182-018-1283-z

12. *Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В. и др.* Экструдированные материалы твердых растворов висмут-сурьмы // Термоэлектрики и их применения. СПб.: РАН, 2008. С. 246–251.

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 // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 7. С. 789–793.

14. *Tagiyev M.M., Abdinova G.D.* Russ Physics Pb + Te Electrical and Galvanomagnetic Properties of Extruded Samples of $Bi_{85}Sb_{15}$ 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

15. *Иванов Г.А., Панарин А.Ф.* Термоэлектрическая эффективность сплавов Bi–Sb, легированных оловом // Полуметаллы и сегнетоэлектрики. Л.: Уч. записки ЛГПИ, 1977. С. 88–90.

16. *Свечникова Т.Е., Земсков В.С., Житинская М.К., Немов С.А. и др.* Свойства монокристаллов твердых растворов $Bi_2Te_{3-x}Se_x$, легированных Sn // Неорган. материалы. 2006. Т. 42. № 2. С. 135–142.

17. *Shelimova L.E., Konstantinov P.P., Kretova M.A. et al.* Thermoelectric Properties of Cation-Substituted Solid Solutions Based on Layered Tetradymite-Like Compounds // Inorg. Mater. 2004. V. 40. № 5. P. 461–467.

18. *Desai C.F., Maunik Jani, Soni P.H. et al.* Vickhersmicrohardness of $Bi_{1-x}Sb_x$ (x = 0.05–0.30) Crystals // J. Mater. Sci. 2009. V. 44. № 13. P. 3504–3507.

19. *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровиков Р.П., Симонов В.А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974. 168 с.

20. *Хейкер Д.М., Зевин Л.С.* Рентгеновская дифрактометрия. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.

21. *Комаров В.А., Суслов А.В., Суслов М.В.* Гальваномагнитные свойства тонких пленок $Bi_{85}Sb_{15}$ на различных подложках // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 6. С. 736–739.

22. *Тагиев М.М.* Электрические свойства нелегированных и легированных примесями свинца экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ // Проблемы современной науки и образования. 2016. V. 55. № 13. С. 7–11. https://doi.org/10.20861/2304-2338-2016-55

23. *Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А.* Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3. М.: Наука, 1972. 320 с.

24. *Джафаров Э.Г., Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш.* Текстура и термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердых растворов $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ // Неорган. материалы. 2001. Т. 37. № 2. С. 182–185.