

Физико-химические взаимодействия в системе $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{—PbSb}_2\text{Te}_4$

© Г.Р. Гурбанов, М.Б. Адыгезалова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Az-1010 Баку, Азербайджан

E-mail: ebikib@mail.ru; mehpareadigozelova@yahoo.com

Поступила в Редакцию 19 мая 2020 г.

В окончательной редакции 27 мая 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

Впервые комплексными методами (дифференциально-термический, микроструктурный, рентгенофазовый анализы измерением микротвердости и определением плотности) физико-химического анализа исследован разрез $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{—PbSb}_2\text{Te}_4$ квазитройной системы $\text{GeTe—Sb}_2\text{Te}_3\text{—PbTe}$ и построена диаграмма состояния. Установлено, что разрез является частично квазибинарным сечением квазитройной системы $\text{GeTe—Sb}_2\text{Te}_3\text{—PbTe}$. Выявлена область твердых растворов на основе GeSb_2Te_4 (15 мол%, PbSb_2Te_4). При соотношении исходных компонентов 1:1 образуется конгруэнтно-плавящееся соединение $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$. Методом химических транспортных реакций получены монокристаллы четвертого соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$. Определены параметры элементарной ячейки $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$, кристаллизующейся в ромбической сингонии: $a = 5.06 \text{ \AA}$, $b = 9.94 \text{ \AA}$, $c = 11.62 \text{ \AA}$. Исследованием температурных зависимостей некоторых электрофизических параметров соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ и твердого раствора $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_x(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}$ установлено, что сплавы имеют p -тип проводимости.

Ключевые слова: квазитройные системы, монокристаллы, физико-химический анализ, твердые растворы, химические транспортные реакции.

DOI: 10.21883/FTP.2020.10.49951.9442

1. Введение

Полупроводниковые материалы по праву занимают одно из ведущих мест в ряду важнейших материалов, определяющих уровень развития мировой цивилизации. Они составляют основу элементной базы современной электронной техники, без которой сегодня немыслим научно-технический прогресс. С развитием твердотельной электроники (и прежде всего микроэлектроники) связано успешное решение проблем крупномасштабной компьютеризации и информатизации, создания современных систем связи и преобразования электроэнергии, разнообразной бытовой, медицинской и специальной электронной аппаратуры. Большую роль играют эти материалы в решении задач развития экологически чистой энергетики и холодильной техники, создания современных систем мониторинга, загрязнений окружающей среды, а также высокочувствительной сенсорной техники широкого функционального назначения [1–3].

Для создания современных полупроводниковых приборов все большее применение находят многокомпонентные твердые растворы. Полупроводниковые многокомпонентные твердые растворы в системах со значительной растворимостью в твердой фазе традиционно являются предметом интенсивных исследований, так как для них характерно монотонное изменение многих свойств (например, ширина запрещенной зоны, параметр элементарной ячейки), что позволяет варьировать функциональные свойства материала, меняя состав [4–6].

Полупроводниковые твердые растворы являются перспективными опико-электронными и термоэлектрическими материалами. Для нужд полупроводниковой тех-

ники представляют интерес квазитройные твердые растворы, так как при их использовании можно независимо задавать два параметра твердого раствора, например, ширину запрещенной зоны и параметр элементарной ячейки [7].

Твердые растворы халькогенидов висмута и сурьмы являются термоэлектрическими материалами, которые могут использоваться в температурном интервале от 77 до 620 К. Эти материалы применяются как в охлаждающих и стабилизирующих температуру устройствах, так и в термоэлектродвигателях. Такой широкий круг применения этих материалов определяется возможностью управления термоэлектрическими свойствами как за счет изменения состава твердого раствора, так и концентрации носителей заряда [8].

В настоящее время активно развивается новое направление поиска эффективных термоэлектрических материалов, заключающееся в получении сложных тройных или четверных узкозонных халькогенидов, обладающих сложными кристаллическими решетками [9–11]. Для этих материалов ожидаются низкие значения теплопроводности. Это связано с тем, что большие элементарные ячейки, которые, как правило, характерны для сложных халькогенидов, способствуют уменьшению скорости распространения фотонов, ответственных за перенос тепла в материале. Относительно слабые связи между слоевыми пакетами и большие атомные массы элементов также способствуют понижению теплопроводности [12–17]. Халькогениды, в частности теллуриды, также представляют интерес для создания топологических изоляторов [18–21]. В этом аспекте разработка на-

Таблица 1. Кристаллографические параметры исходных соединений

Соединение	Сингония	Пр. гр.	Параметры элементарных ячеек, Å		T_{melt} , К
			a	c	
GeSb_2Te_4	Гексагональная	$R\bar{3}m$	4.21	40.6	888
PbSb_2Te_4	Ромбоэдрическая	$R\bar{3}m$	4.350	41.712	850

учно обоснованной технологии синтеза и выращивания монокристаллов четверных теллуридов имеет большое значение.

Сведения о кристаллической структуре исходных компонентов представлены в табл. 1.

Цель настоящей работы — получение новых сложных полупроводниковых соединений.

2. Методика эксперимента

Поликристаллические образцы сплавов $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ синтезировали в вакуумированных кварцевых ампулах из элементов, взятых в соответствующих соотношениях при температуре 1050–1200 К в зависимости от состава сплавов, с последующим их охлаждением со скоростью 6 К/мин до 650 К. С этой температурой сплавы охлаждали на воздухе. В качестве исходных материалов использовали Pb, Ge, Sb, Te высокой чистоты с содержанием основного вещества не менее 99.999%, а также Ge с удельным электросопротивлением 40 Ом·см. Полученные поликристаллические образцы отжигали в течение 240 ч при 650 К, после чего закачивали в воде со льдом.

Для идентификации четверных теллуридов в работе использовали различные методы физико-химического анализа, в частности, дифференциально-термический (ДТ), микроструктурный (МС), рентгенофазовый (РФ) анализы, измерение микротвердости, определение плотности и методы электрофизических измерений.

Рентгеновский анализ проводили с помощью автоматического дифрактометра ДРОН-УМ (графитовый монофроматор, CuK_α -излучения $2\theta\text{--}\theta$ -сканирования с записью интенсивности по точкам с шагом 0.05°), а также с помощью автоматического монокристалльного дифрактометра Syntex PI (MoK_α -излучение), ω — методом сканирования (переменная скорость сканирования составляла 2–8 град/мин). Монокристаллические пластинки для рентгеновского анализа выкальывали из слитков вдоль базисных плоскостей (ool).

Для регистрации ДТА на пирометре НТР-73 применяли Pt–Pt/Rh-термопары. Запись кривых нагревания и охлаждения проводили в откачанных до 0.1 Па кварцевых сосудах Степанова. Эталонем служил прокаленный Al_2O_3 . Скорость нагревания составляла 10 град/мин. МСА полированных протравленных шлифов проводили с использованием микроскопа МИМ-8. Микротвердость

измеряли на микротвердомере HV(100). Плотность сплавов определяли пикнометрическим взвешиванием, наполнителем служил толуол (C_7H_8).

Слоистые образцы в системе $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ выращивали вертикальным методом Бриджмена в кварцевых ампулах с коническим дном. Скорость кристаллизации составляла 0.25 мм/мин, а градиент на фронте кристаллизации ~ 60 К/см. Были получены слитки длиной ~ 6 см и диаметром 0.7–0.8 см.

Измерения электропроводности, теплопроводности и коэффициента термоэдс осуществлялись вдоль плоскостей спайности, по которым были направлены электрический ток и тепловой поток. Все измерения указанных параметров проводились на постоянном токе [22].

3. Результаты и их обсуждение

Сплавы в системе $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ для исследования получали ампульным методом из элементов. Шихту, состоящую из трех граммов исходных компонентов, после откачки до $1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. помещали в систему термического отжига и нагревали до 900 К. При такой температуре реакция между компонентами протекает в течение 40–50 мин. После завершения реакции температуру в системе термического отжига поднимали до 1200 К и выдерживали 40 мин, затем температуру снижали до 650 К со скоростью 30–32°/ч. При этой температуре образцы обжигались в течение 240 ч. По указанному режиму были синтезированы 14 сплавов различного состава (табл. 2). В результате были получены однородные по внешнему виду образцы серого цвета с металлическим блеском. Все сплавы разрезов $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ при комнатной температуре устойчивы по отношению к воде, кислороду, воздуху, не растворяются в KOH, NaOH, H_2SO_4 , а растворяются в концентрированных растворах HCl, HNO_3 .

Характер химического взаимодействия в разрезе $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ изучали методами рентгенофазового, дифференциально-термического и микроструктурного анализов. Была также измерена микротвердость сосуществующих фаз. В качестве травителя использовали разбавленную азотную кислоту и хромовую смесь ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{конц. H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$).

На основе полученных результатов построена диаграмма состояния разреза $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ квазитройной системы $\text{GeTe--Sb}_2\text{Te}_3\text{--PbTe}$ (рис. 1). Как видно

Таблица 2. Результаты ДТА, плотность и микротвердость сплавов системы $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$

№	Состав сплавов, моль%		Термические эффекты, нагревание, К	H_μ , МПа	Плотность, г/см ³
	GeSb_2Te_4	PbSb_2Te_4			
1	100	0.0	900	675	6.467
2	95	5.0	875, 910	685	6.51
3	90	10	805, 890	699	6.54
4	85	15	775, 875	719	6.57
5	80	20	755, 860	740	6.62
6	70	30	750, 780	724	6.69
7	65	35	750 (евт)	не.изм	не.изм
8	60	40	750–980	757	6.77
9	50	50	1000	725	6.85
10	40	60	650, 975	735	6.93
11	30	70	650, 875	746	7.01
12	20	80	650, 775, 995	757	7.10
13	10	90	650, 825, 1060	768	7.19
14	0.0	100	850, 1155	770	7.28

Таблица 3. Режим выращивания монокристаллов $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$

Соединение	T_{melt}	Температурный режим		Носитель, ~ 5 мг/см ³	Время, ч	Размер монокристаллов, мм ³
		T_1 , К	T_2 , К			
$\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$	1000	700	800	J_2	72	$2 \times 6 \times 7$

из рис. 1, разрез $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ является частично квазибинарным. При соотношении исходных компонентов $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4 = 1 : 1$ установлено образование конгруэнтно появляющегося соединения состава $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$, которое плавится при 1000 ± 5 К. Область гомогенности у соединения практически отсутствует.

Систему $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ условно можно разделить на две подсистемы: $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--GePbSb}_4\text{Te}_8$ и

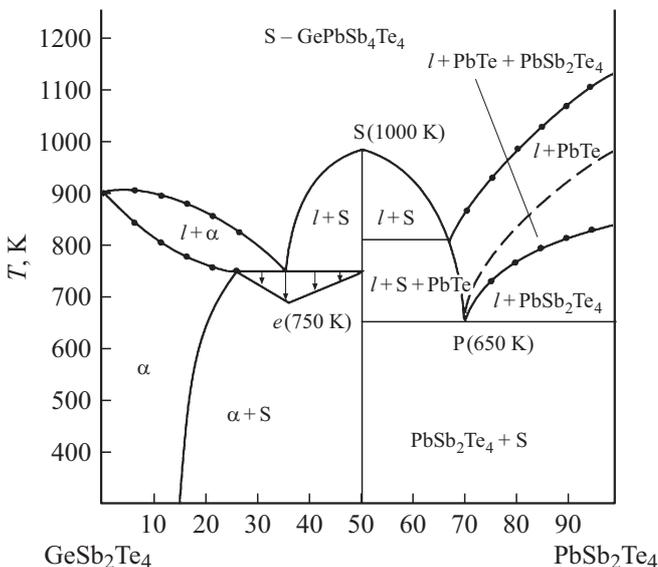


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$.

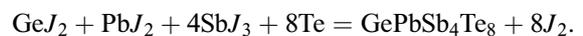
$\text{GePbSb}_4\text{Te}_8\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$. Первая подсистема относится к эвтектическому типу с ограниченной растворимостью на основе GeSb_2Te_4 . Координаты эвтектической точки: 750 К и 35 мол% GeSb_2Te_4 . Вторая подсистема из-за инконгруэнтного плавления PbSb_2Te_4 сложная и относится к неквазибинарным сечениям. Квазибинарность нарушается выше температуры инконгруэнтного плавления PbSb_2Te_4 . При понижении температуры от 850 до 650 К жидкость исчезает по перитектической реакции:



Монокристаллы четверного соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ получали из газовой фазы методом химических транспортных реакций (ХТР) [19] в кварцевых ампулах, вакуумированных до 0.133 Па. Запаянные ампулы помещали в горизонтальную двухсекционную систему термического отжига печь. Температуру измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Оптимальные параметры для выращивания монокристаллов четверного соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ методом ХТР приведены в табл. 3.

Механизм получения монокристаллов $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ по методу ХТР можно представить следующим уравнением:



Микроструктурный анализ выявил однофазность сплава $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ (рис. 2).

В результате рентгенографических исследований выращенных монокристаллов установлено, что

$\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ кристаллизуется в ромбические решетки, $a = 5.06 \text{ \AA}$, $b = 9.94 \text{ \AA}$, $c = 11.62 \text{ \AA}$, пр. гр. $Pnmm$, $Z = 2$, $V^0 = 584.45 \text{ \AA}^3$. Кристаллографические характеристики соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ приведены в табл. 4.

Полученные игольчатые кристаллы подвергали химическому анализу [23] (табл. 5).

Плотность четверного соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ составляет 6.85 г/см^3 , микротвердость 725 МПа .

Монокристаллы из области твердых растворов на основе GeSb_2Te_4 для физических измерений получали направленной кристаллизацией по методу Бриджмена [24]. При этом получали блестящие монокристаллы метал-

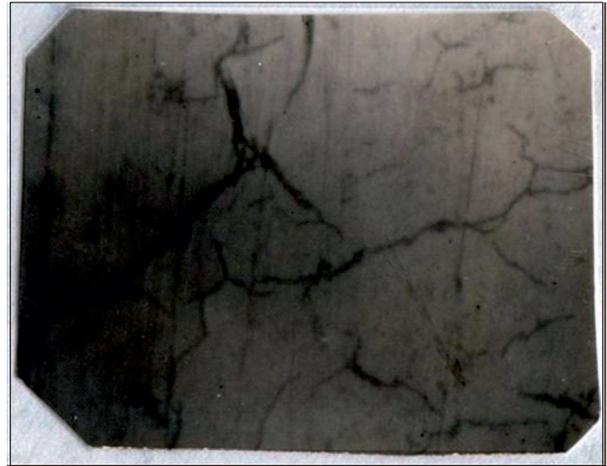


Рис. 2. Микроструктуры сплавов соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$.

Таблица 4. Результаты рентгеновского анализа порошков соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$

$d_a, \text{ \AA}$	J/J_{max}	hkl	$1/d_{\text{exp}}^2$	$1/d_{\text{calc}}^2$
7.551	10	011	0.0175	0.0175
4.640	8	101	0.0464	0.0464
4.510	5	110	0.0492	0.0492
3.875	60	003	0.0665	0.0666
3.819	15	102	0.0685	0.0686
3.610	20	013	0.0767	0.0767
3.314	100	030	0.0912	0.0910
3.186	70	031	0.0984	0.0985
3.078	15	103	0.1056	0.1056
2.906	15	004	0.1182	0.1184
2.530	10	200	0.1562	0.1562
2.325	50	005	0.1850	0.1850
1.902	80	016	0.2765	0.2764
1.851	15	150	0.2917	0.2919
1.810	20	106	0.3052	0.3052
1.773	8	240	0.3180	0.3181
1.638	5	017	0.3722	0.3721

Таблица 5. Результаты химического анализа монокристаллов $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$

Химический состав, мол%							
Расчет				Эксперимент			
Ge	Pb	Sb	Te	Ge	Pb	Sb	Te
4.06	11.59	27.24	57.11	3.66	11.33	26.79	58.22

Таблица 6. Оптимальный режим выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_x$

$x, \text{ мол\%}$	$T, \text{ К}$	Скорость движения в ампулах, мм/ч	Вес монокристаллов, г	Размер монокристаллов, мм
2.5	700–800	3.0	6.5	7×16
5	700–800	3.0	6.7	7×16
7.5	700–800	3.0	6.7	7×16
10	700–800	3.5	6.4	7×20
12.5	700–800	3.5	6.3	7×20
15	700–800	4.0	6.3	7×20

лического цвета размером $7 \times 18\text{--}7 \times 20 \text{ мм}$ (табл. 6). В таблице дается режим получения монокристаллов, установленный на основании многочисленных опытов.

Монокристаллические твердые растворы, полученные на основе GeSb_2Te_4 , кристаллизуются в гексагональные сингонии (табл. 7). Как видно из данных табл. 7, с увеличением концентрации PbSb_2Te_4 параметры элементарной ячейки увеличиваются и это связано с замещением мелких по радиусам катионами Ge^{2+} (0.065 нм) большими по радиусам катионами Pb^{2+} (0.126 нм).

Сохранение молекул, относящихся к элементарной ячейке, и изменение параметров решетки подтверждают образование в разрезе $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ твердого раствора типа замещения.

Изучены некоторые электрофизические свойства выращенных монокристаллов $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ и твердых растворов на основе GeSb_2Te_4 в температурном интервале $300\text{--}900 \text{ К}$. Установлено, что все они являются полупроводниками p -типа.

В монокристаллических образцах твердых растворов $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_x$ были измерены термоэлектрические параметры при комнатной температуре: коэффициент термоэдс (α), электропроводность (σ), теплопроводность (общая (K) и решеточная (K_l)), коэффициент термоэлектрической эффективности (Z).

Таблица 7. Кристаллографические данные твердых растворов на основе GeSb_2Te_4

Состав, мол% PbSb_2Te_4	Параметры решетки, Å		$V, \text{Å}^3$	Плотность, г/см^3		Микротвердость, МПа
	a	c		Эксперимент	Расчет	
0.0	4.21	40.6	659.4	6.467	6.527	675
2.5	4.23	40.7	674.6	6.517	6.567	725
5.0	4.25	4.08	689.2	6.567	6.627	755
7.5	4.29	4.10	718.5	6.627	6.667	785
10.0	4.32	4.12	744.7	6.707	6.767	795
15.0	4.35	4.14	777.0	6.787	6.817	865

Таблица 8. Термоэлектрические свойства твердых растворов $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_x$ при 300 К

Состав твердых растворов, x	α , мкВ/К	σ , См/см	$K \times 10^3$, Вт/(см · К)	$K_I \times 10^3$, Вт/(см · К)	$Z \times 10^3$, К ⁻¹
0.02	-240	323	10.7	9.2	1.7
0.04	-245	325	10.3	8.8	1.9
0.06	-295	225	11.1	9.9	2.0
0.08	-273	440	13.3	11.4	2.5
0.10	-215	1030	15.4	10.1	3.0

В табл. 8 приведены термоэлектрические свойства сплавов твердых растворов $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_x$.

Как видно из табл. 8, при увеличении содержания PbSb_2Te_4 в твердых растворах увеличивается термоэлектрическая эффективность. Термоэлектрическая эффективность образца твердых растворов $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_x$ ($x = 0.15$) имеет максимальное значение $Z = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при 300 К.

4. Заключение

1. Методом физико-химического анализа изучен квазибинарный разрез $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{--PbSb}_2\text{Te}_4$ — квазитройной системы $\text{GeTe--Sb}_2\text{Te}_3\text{--PbTe}$. При соотношении $\text{GeSb}_2\text{Te}_4 : \text{PbSb}_2\text{Te}_4 = 1 : 1$ образуется конгруэнтно плавающее соединение состава $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$.

2. Методом химических транспортных реакций получены игольчатые монокристаллы соединения $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$. Определены параметры элементарной ячейки монокристалла $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$, кристаллизующегося в ромбической сингонии: $a = 5.06 \text{ Å}$, $b = 9.94 \text{ Å}$, $c = 11.62 \text{ Å}$.

3. Изучены некоторые электрофизические свойства выращенных монокристаллов $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ и твердых растворов на основе GeSb_2Te_4 (15 мол% PbSb_2Te_4) в температурном интервале 300–900 К. Установлено, что все они являются полупроводниками p -типа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Вольхов, Л.В. Яшина, В.И. Штанов. Неорг. матер., **72** (6), 662 (2006).
- [2] Г.Р. Гурбанов, Ш.Г. Мамедов, М.Б. Адыгезалова. ЖНХ, **62** (11), 1530 (2017). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044457X17110174>
- [3] Т.Е. Свечникова, И.Ю. Нихезина, Н.В. Поликарпова. Неорг. матер., **36** (8), 924 (2000).
- [4] Г.Р. Гурбанов. Журн. неорганич. матер., **53** (7), 691 (2017). <https://doi.org/10.7868/S0002337X1707003X>
- [5] М.Г. Мильвидский, В.Б. Уфимцев. Неорг. матер., **36** (3), 360 (2000).
- [6] Г.Р. Гурбанов, Ш.Г. Мамедов, И.Б. Бахтиярлы. ЖНХ, **61** (9), 1240 (2016). <https://doi.org/10.7868/S0044457X16090142>
- [7] Т.П. Сушкова, Г.В. Семенова, Е.В. Стрычина. Вестн. ВГУ, **1**, 94 (2004).
- [8] Г.Р. Гурбанов, М.Б. Адыгезалова, А.Н. Мамедов, С.А. Гуляева. Moscow University Chemistry Bulletin, **74** (3), 134 (2019). DOI: 10.3103/S0027131419030064
- [9] A.R. West. *Solid State Chemistry and its Applications*, 2nd edn (Wiley, Chichester, West Sussex, UK, 2014).
- [10] A. Charoenphakdee, K. Kurosaki, H. Muta, M. Uni, S. Yamana. Phys. Status Solidi (RPL), **2**, 65 (2008).
- [11] L.D. Ivanova, L.I. Petrova, Yu.V. Granatkina, D.S. Nikulin, O.A. Raikina. Inorg. Mater., **52**, (3), 248 (2016). DOI: 10.7868/S0002337X16030040
- [12] Л.И. Анатыхчук. *Физика термоэлектричества* (Киев, ИТЭ, 2000) т. 1.
- [13] А.А. Вольхов, Л.В. Яшина, В.И. Штанов. Неорг. матер., **42** (6), 662 (2006). DOI: 10.1134/S0020168506060045
- [14] Л.Е. Шелимова, О.Г. Карпинский, В.С. Земсков, П.П. Константинов, Е.С. Авилов, М.А. Кретова. Перспективные матер., № 5, 23 (2000).
- [15] M.G. Kanatzidis. In: *Semiconductors and Semimetals*, (ed.) Terry M. Tritt. (San Diego, San Francisco, N.Y., Boston, London, Sydney, Tokyo: Academ. Press, 2001) v. 69, p. 51.
- [16] Л.И. Анатыхчук. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства* (Киев, Наук. думка, 1979).
- [17] Л.Д. Иванова, М.А. Коржув, Л.И. Петрова и др. Сб. докл. Межгос. семинара (Санкт-Петербург, 2004) с. 422.
- [18] T.V. Menshchikova, S.V. Eremeeva, E.V. Chulkov. Appl. Surf. Sci., **267**, 1, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.048>
- [19] Marco Caputo, Mirko Panighel, Simone Lisi, Lama Khalil et al. Nano Lett., **16**, 3409 (2016). DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b02635.

- [20] Marco Papagno, S.V. Ereemeev, Jun Fujii, Ziya S. Aliev. ACS Nano, 10, 3518 (2016).
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07750>
- [21] L.E. Shelimova, P.P. Konstantinov, O.G. Karpinsky, E.S. Avilova, M.A. Kretova, V.S. Zemskov. J. Alloys Compd., 329 (1–2), 50 (2001).
- [22] Г.Р. Гурбанов, Ш.Г. Мамедов. ЖНХ, Т. 64 (3), 308 (2019).
DOI: 10.1134/S0044457X19030103
- [23] Г.Р. Гурбанов. ЖНХ, 55 (3), 495 (2010).
DOI: 10.1134/S0036023610030265
- [24] Г.Р. Гурбанов, М.Б. Адыгезалова. ЖНХ, 63 (1), 106 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044457X18010154>

Редактор А.Н. Смирнов

Physicochemical interactions in the $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{—PbSb}_2\text{Te}_4$ system

G.R. Gurbanov, M.B. Adygezalova

Azerbaijan State Oil and Industry University,
Az-1010 Baku, Azerbaijan

Abstract For the first time, the $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{—PbSb}_2\text{Te}_4$ section of the $\text{GeTe—Sb}_2\text{Te}_3\text{—PbTe}$ quasitrack system was studied by the complex methods (dta, xrd, msa, microhardness measurement and density determination) of a physicochemical analysis and a state diagram was constructed. It has been established that the section is partly a quasibinary section of the quasi-three $\text{GeTe—Sb}_2\text{Te}_3\text{—PbTe}$ system. The region of solid solutions based on GeSb_2Te_4 (15 mol%, PbSb_2Te_4) was revealed. When the ratio of the starting components is 1 : 1, a congruently melting $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ compound is formed. Single crystals of the qup compound $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ were obtained by chemical transport reactions. The parameters of the $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ unit cell crystallizing in rhombic syngony were determined: $a = 5.06 \text{ \AA}$, $b = 9.94 \text{ \AA}$, and $c = 11.62 \text{ \AA}$. Investigation of the temperature dependences of some electrophysical parameters of the $\text{GePbSb}_4\text{Te}_8$ compound and $(\text{GeSb}_2\text{Te}_4)_x(\text{PbSb}_2\text{Te}_4)_{1-x}$ solid solution showed that the alloys are of the p -type conductivity.