

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.344'3/546.86'87

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12446>**Твердофазные равновесия в системе  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К и характеристики тетрадимитоподобных слоистых твердых растворов**Э. Р. Набиев<sup>1</sup>, Э. Н. Оруджлу<sup>2✉</sup>, А. И. Агазаде<sup>3</sup>, А. А. Гасанов<sup>2</sup>, М. Б. Бабанлы<sup>3,4</sup><sup>1</sup>Гянджинский государственный университет,  
429, пр. Г. Алиева, Гянджа AZ-2001, Азербайджан<sup>2</sup>Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
6/21, пр. Азадлыг, Баку AZ-1010, Азербайджан<sup>3</sup>Институт катализа и неорганической химии,  
113, пр. Г. Джавида, Баку AZ-1143, Азербайджан<sup>4</sup>Бакинский государственный университет  
23, ул. З. Халилова, Баку AZ-1048, Азербайджан

## Аннотация

Система  $\text{GeTe-SnTe-Bi}_2\text{Te}_3$  представляет большой интерес в связи с возможностью образования серии катионзамещенных твердых растворов на основе тройных слоистых соединений с тетрадимитоподобной структурой, которые имеют большой потенциал как ценные термоэлектрические материалы и топологические изоляторы. В настоящей работе приведены результаты исследования указанной системы в области составов  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  методом порошковой рентгенографии. Особое внимание уделено получению равновесных сплавов.

Построено изотермическое сечение фазовой диаграммы при 300 К, которое состоит из четырех однофазных областей, разграниченных тремя двухфазными областями. Рентгеновские дифрактограммы равновесных сплавов были уточнены методом Ритвельда. Полученные дифракционные картины однозначно указывают на наличие непрерывных рядов твердых растворов по разрезам  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ ,  $\text{GeBi}_4\text{Te}_7$ - $\text{SnBi}_4\text{Te}_7$  и  $\text{GeBi}_6\text{Te}_{10}$ - $\text{SnBi}_6\text{Te}_{10}$ . Определены параметры решетки всех указанных серий твердых растворов и показано, что они линейно увеличиваются с увеличением концентрации Sn.

**Ключевые слова:** твердые растворы, теллуриды германия-висмута, теллуриды олова-висмута, топологические изоляторы, изотермическое сечение, рентгеновская дифракция

**Источник финансирования:** Работа была частично поддержана Фондом науки Азербайджана - Грант № AEF-MCG-2022-1(42)-12/10/4-M-10.

**Для цитирования:** Набиев Э. Р., Оруджлу Э. Н., Агазаде А. И., Гасанов А. А., Бабанлы М. Б. Твердофазные равновесия в системе  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К и характеристики тетрадимитоподобных слоистых твердых растворов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(4): 725–731. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12446>

**For citation:** Nabiyev E. R., Orujlu E. N., Aghazade A. I., Hasanov A. A., Babanly M. B. The solid-phase equilibria in the  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  system at 300 K and characterization of tetradymite-type layered solid solutions. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(4): 725–731. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12446>

✉ Эльнур Н. Оруджлу, e-mail: [elnur.oruclu@yahoo.com](mailto:elnur.oruclu@yahoo.com)

© Набиев Э. Р., Оруджлу Э. Н., Агазаде А. И., Гасанов А. А., Бабанлы М. Б., 2024



## 1. Введение

Поиск передовых функциональных материалов с улучшенными свойствами привел к обширным исследованиям в области многокомпонентных халькогенидов, в частности, в системах М-Bi-Te (М – Ge, Sn, Pb и Mn) [1-8]. Эти материалы, вызвавшие большой интерес благодаря своим термоэлектрическим свойствам, в последние годы снова активно изучаются как материалы, обладающие свойствами нового квантового состояния материи — топологических изоляторов [9–14]. Топологические изоляторы (TIs) представляют собой класс материалов, который привлек значительное внимание благодаря своей способности проводить электричество на поверхности, оставаясь изоляторами в объеме [15-18].

Гомологические ряды слоистых тройных тетрадимитоподобных соединений с общей формулой  $n\text{A}^{\text{IV}}\text{Te}\cdot m\text{Bi}_2\text{Te}_3$  вызывают большой интерес благодаря своим уникальным поверхностным электронным структурам. Систематические исследования тройных соединений в этих халькогенидных системах показывают, что данные фазы являются 3D топологическими изоляторами и обладают потенциалом для революционных приложений в спинтронике, квантовых вычислениях, низкоэнергетической электронике и т. д. [19-24]. Все эти соединения имеют структурное сходство – они состоят из пяти- и семислойных пакетов, в которых слои состоят из следующих чередующихся атомов  $\text{Te-B}^{\text{V}}\text{-Te-B}^{\text{V}}\text{-Te}$  и  $\text{Te-B}^{\text{V}}\text{-Te-A}^{\text{IV}}\text{-Te-B}^{\text{V}}\text{-Te}$ , связанных между собой слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами [1–4; 14].

Исследования существующих слоистых фаз топологических изоляторов показывают, что для решения ограничений их применимости в различных областях требуется точная настройка их объемной зонной структуры. Эффективный подход к усилению электронного транспорта, доминируемого топологически защищенными состояниями, заключается в целенаправленной химической замене, при которой определенные атомные позиции в кристаллической решетке материала замещаются для изменения его электронной структуры и увеличения преобладания этих состояний. Этот тип топологической инженерии ранее был использован в многочисленных работах и продемонстрировал значительный потенциал для настройки свойств материалов и повышения их производительности для перспективных приложений [25–30].

В этом исследовании с использованием методов дифференциального термического анализа (ДТА) и порошковой рентгеновской дифракции (РФА) изучены фазовые равновесия в системе  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4\text{-SnBi}_2\text{Te}_4\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К и охарактеризованы полученные непрерывные ряды твердых растворов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$ ,  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$  и  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$ . Наши результаты дают представление о фазовых равновесиях в псевдотройной системе  $\text{GeTe-SnTe-Bi}_2\text{Te}_3$  и вносят вклад в понимание влияния замещения  $\text{Ge}\leftrightarrow\text{Sn}$  на термодинамические и структурные свойства этих соединений. Данные по фазовым равновесиям в граничных системах  $\text{GeTe-Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{SnTe-Bi}_2\text{Te}_3$  заимствованы из [2, 5].

## 2. Экспериментальная часть

Исходными материалами для приготовления сплавов были высокочистые слитки германия (Alfa Aesar, CAS 7440-56-4), олова (Alfa Aesar, CAS 7440-31-5), теллура (Alfa Aesar, CAS 13494-80-9) и гранулы висмута (Alfa Aesar, CAS 7440-69-9). На первом этапе были синтезированы бинарные соединения  $\text{GeTe}$ ,  $\text{SnTe}$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Фазовую чистоту синтезированных соединений контролировали методами ДТА и РФА. Сплавы исследуемых систем с различным составом были приготовлены из предварительно синтезированных и идентифицированных бинарных соединений. Взвешенные компоненты были перенесены в кварцевые ампулы, которые эвакуировали до остаточного давления  $10^{-2}$  Па. Ампулы нагревали до температуры 1050 К и выдерживали в течение 6 часов, после чего расплавленные образцы закаляли в холодной воде. Затем все ампулы были помещены в муфельную печь при температуре 770 К на 720 часов для достижения состояния, близкого к равновесному. После термообработки сплавы были охлаждены в выключенной печи.

Исследования полученных образцов проводили методами РФА и ДТА. Температуры фазовых превращений были определены методом ДТА с использованием системы LINSEIS HDSC RT1600 (скорость нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ ) и многоканального устройства ДТА на базе регистрирующего термопреобразователя TC-08. РФА проводили на дифрактометре Bruker D2 PHASER с использованием  $\text{CuK}\alpha_1$  излучения в диапазоне углов  $2\theta = 5\div 75^\circ$ . Для интерпретации дифракционных картин использовались базы данных COD и PDF-2. Как качественные, так и количественные оценки дифракционных картин РФА проводились методом Ритвельда с использованием

программных пакетов FullProf и HighScore Plus.

### 3. Результаты и обсуждение

Порошковые дифрактограммы отожжённых сплавов системы  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$  представлены на рис. 1. Наблюдаемые пики на дифракционных картинах указывают на тригональную симметрию с пространственной группой  $R\bar{3}m$ . Как видно, дифракционные пики демонстрируют систематическое смещение в сторону меньших углов  $2\theta$  по мере увеличения содержания Sn, что указывает на расширение кристаллической решетки из-за большего атомного радиуса олова по сравнению с германием. Кроме того, отсутствие новых пиков или расщепления существующих свидетельствует о том, что фазовое разделение не происходит и подтверждает образование непрерывных твердых растворов. Уширение пиков с увеличением содержания Sn также

может быть связано с микродеформацией или небольшими изменениями размера кристаллитов по мере изменения состава сплава. В целом, полученные дифрактограммы подтверждают успешное внедрение олова в матрицу Ge-Bi-Te, что приводит к регулируемой модификации кристаллической структуры без нарушения общей фазовой стабильности.

Дифрактограммы сплавов системы  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$  демонстрируют схожую тенденцию (см. рис. 2) с систематическим смещением дифракционных пиков в сторону меньших углов  $2\theta$  по мере увеличения концентрации Sn. Это смещение, как и в системе  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$ , указывает на расширение кристаллической решетки из-за замещения германия оловом. Последовательность этого смещения на всём диапазоне состава подтверждает образование непрерывных твердых растворов по разрезу  $\text{GeBi}_4\text{Te}_7$ - $\text{SnBi}_4\text{Te}_7$ .

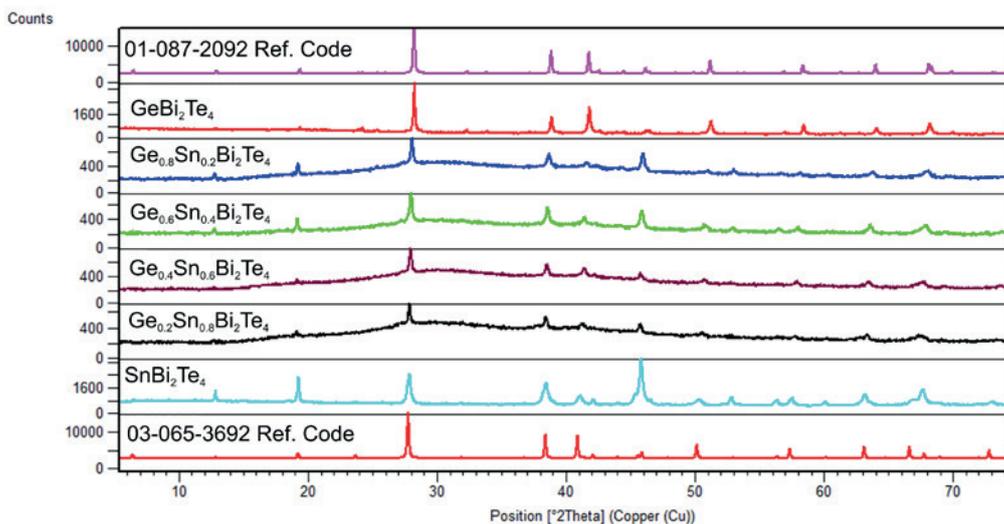


Рис. 1. Порошковые дифрактограммы сплавов системы  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$

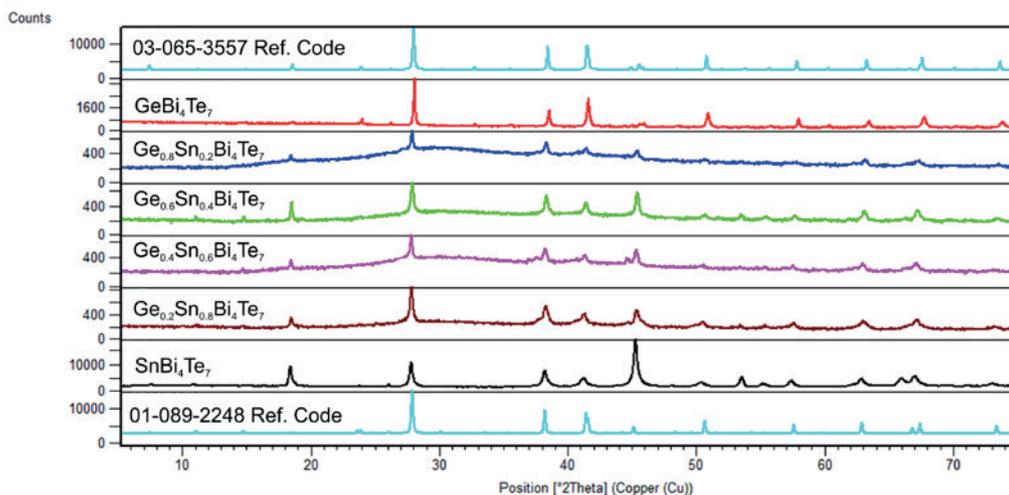


Рис. 2. Порошковые дифрактограммы сплавов системы  $\text{GeBi}_4\text{Te}_7$ - $\text{SnBi}_4\text{Te}_7$

Сплавы по разрезу  $\text{GeBi}_6\text{Te}_{10}$ - $\text{SnBi}_6\text{Te}_{10}$  также имеют качественно аналогичные дифракционные картины, что указывает на образование стабильных непрерывных твердых растворов (рис. 3).

Таким образом, на основании полученных результатов можно утверждать, что разрезы  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ ,  $\text{GeBi}_4\text{Te}_7$ - $\text{SnBi}_4\text{Te}_7$  и  $\text{GeBi}_6\text{Te}_{10}$ - $\text{SnBi}_6\text{Te}_{10}$  системы  $\text{GeTe}$ - $\text{SnTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  характеризуются образованием непрерывных рядов твердых растворов ниже температуры субсолидуса.

Уточнение структурных параметров соединений и твердых растворов на основе данных

РФА методом Ритвельда позволили получить значения параметров решетки, демонстрирующие хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными профилями для всех составов. Рассчитанные параметры решетки для твердых растворов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$ ,  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$  и  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$  приведены в табл. 1. Как видно, уточненные значения параметров всех исходных тройных соединений хорошо согласуются с литературными данными [2, 5]. Концентрационные зависимости параметров кристаллической решетки твердых растворов всех трех серий практически линейны, т. е. подчиняются закону

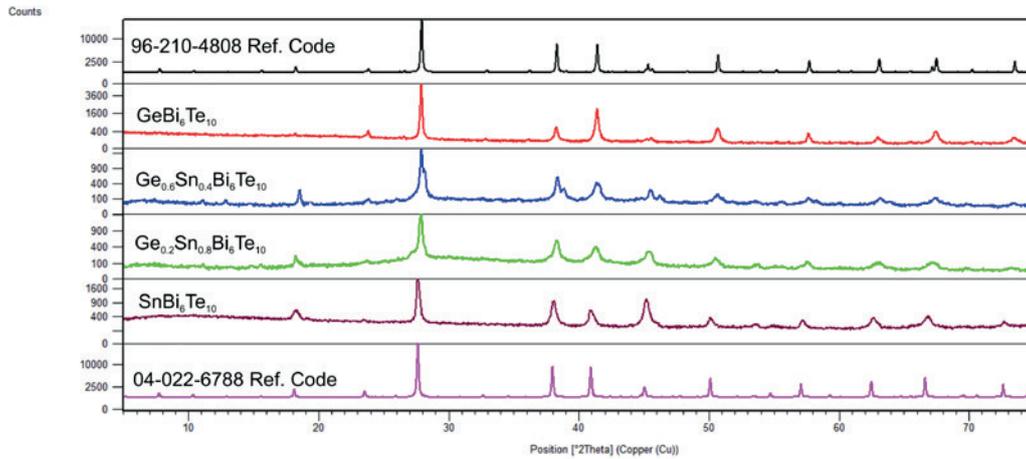


Рис. 3. Порошковые дифрактограммы сплавов системы  $\text{GeBi}_6\text{Te}_{10}$ - $\text{SnBi}_6\text{Te}_{10}$

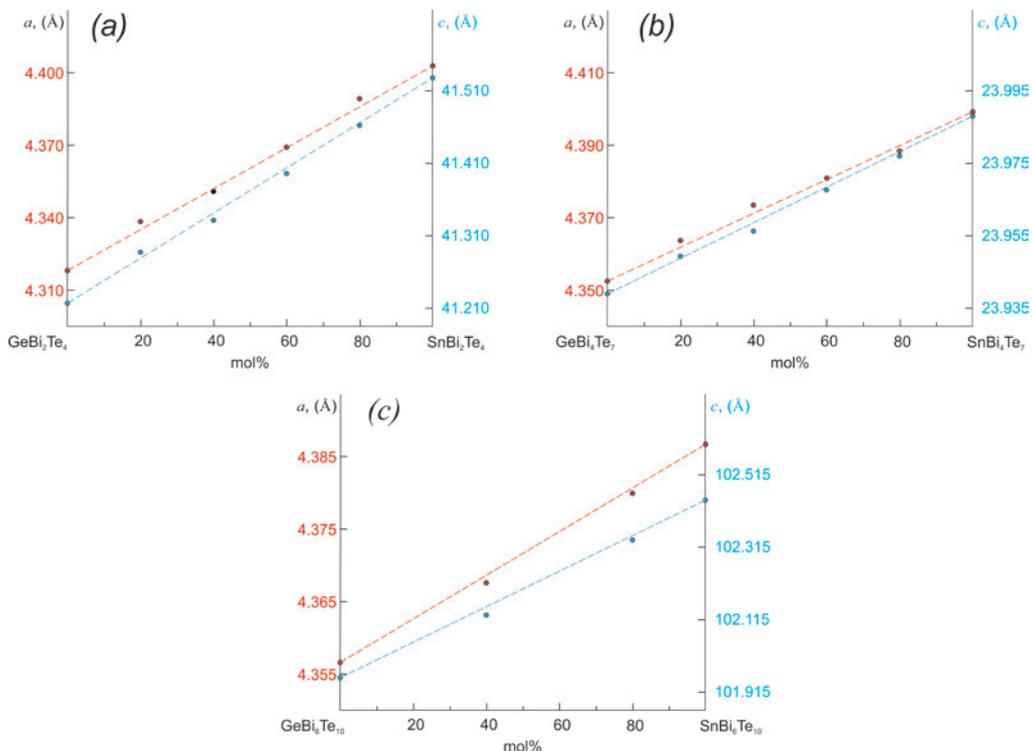


Рис. 4. Зависимости параметров решетки для сплавов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$  (a),  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$  (b) и  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$  (c) от содержания Sn

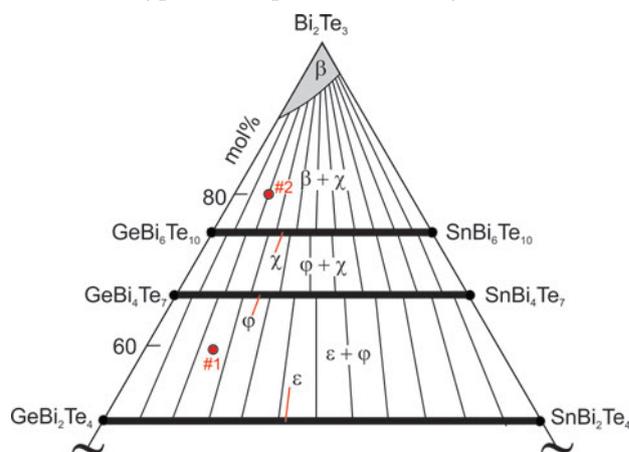
**Таблица 1.** Параметры кристаллической структуры некоторых фаз

Состав, мол. %	Параметры решетки, Å		Ссылка
	<i>a</i>	<i>c</i>	
$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$			
$x = 0.0$	4.3176(3)	41.259(5)	[5]
	4.3181(4)	41.217(5)	Эта работа
$x = 0.2$	4.3384(2)	41.288(3)	Эта работа
$x = 0.4$	4.3508(7)	41.332(5)	Эта работа
$x = 0.6$	4.3691(4)	41.396(4)	Эта работа
$x = 0.8$	4.3892(3)	41.462(5)	Эта работа
$x = 1.0$	4.4035(3)	41.511(2)	[25]
	4.4029(3)	41.528(5)	Эта работа
$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$			
$x = 0.0$	4.3556(2)	23.928(4)	[5]
	4.3525(4)	23.939(2)	Эта работа
$x = 0.2$	4.3637(2)	23.949(4)	Эта работа
$x = 0.4$	4.3735(5)	23.956(3)	Эта работа
$x = 0.6$	4.3809(7)	23.967(7)	Эта работа
$x = 0.8$	4.3884(1)	23.977(1)	Эта работа
$x = 1.0$	4.3998(2)	23.981(3)	[31]
	4.3992(5)	23.988(6)	Эта работа
$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$			
$x = 0.0$	4.3572(3)	101.911(2)	[5]
	4.3566(1)	101.918(4)	Эта работа
$x = 0.4$	4.3676(8)	102.128(3)	Эта работа
$x = 0.8$	4.3799(5)	102.335(1)	Эта работа
$x = 1.0$	4.3873(8)	102.431(1)	[32]
	4.3867(2)	102.438(4)	Эта работа

Вегарда (рис. 4). Как и ожидалось, оба параметра решетки увеличиваются с увеличением концентрации Sn из-за большего ионного радиуса  $\text{Sn}^{2+}$  по сравнению с  $\text{Ge}^{2+}$ .

На рис. 5 представлено изотермическое сечение фазовой диаграммы системы  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К, построенное на основе вышеуказанных экспериментальных результатов и литературных данных. Оно состоит из четырех одно- и трех двухфазных областей. Три из четырех однофазных областей относятся к непрерывной серии твердых растворов  $\epsilon$ -,  $\phi$ - и  $\chi$ -фазы.  $\beta$ -фаза соответствует области гомогенности  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , которая разграничена нами с учетом данных работ [2, 5]. Образование двухфазных областей подтверждено методом РФА. Рис. 6а четко демонстрирует, что в сплаве #1  $\epsilon$ -фаза находится в равновесии с  $\phi$ -фазой. Аналогично, сплав #2 (рис. 6b) состоит из линий отражения равновесных  $\phi$ - и  $\chi$ -фаз. Поскольку оба состава сплавов находятся на богатой германием сто-

роне фазовой диаграммы (рис. 5), для их сравнения выбраны дифрактограммы соответствующих теллуридов германия-висмута.



**Рис. 5.** Изотермическое сечение фазовой диаграммы системы  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К. Красные кружки – составы сплавов, дифрактограммы которых представлены на рис. 6.

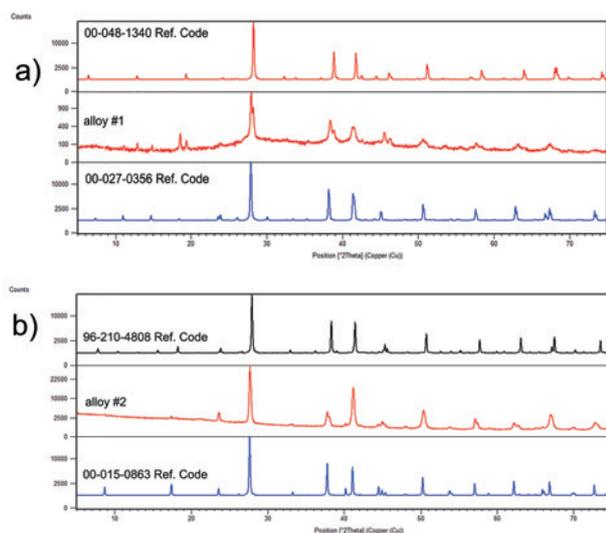


Рис. 6. Порошковые дифрактограммы сплавов #1 и #2, указанных на рис. 5

#### 4. Заключение

В работе на основании результатов РФА равновесных сплавов построено изотермическое сечение фазовой диаграммы системы  $\text{GeTe}$ - $\text{SnTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в области составов  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при 300 К. Установлено, что данная подсистема характеризуется образованием непрерывных серий твердых растворов замещения с общей формулой  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$ ,  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_4\text{Te}_7$  и  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$  со слоистой тетрадимитоподобной структурой и широкой области гомогенности на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Параметры решетки вышеуказанных серий твердых растворов уточнены на основании порошковых дифрактограмм с использованием метода Ритвельда. Показано, что их концентрационные зависимости хорошо согласуются с законом Vegarda. Полученные твердые растворы в данной работе представляют практический интерес с точки зрения разработки новых топологических изоляторов и термоэлектрических материалов с регулируемыми свойствами.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

#### Список литературы

1. Aliev Z. S., Amiraslanov I. R., Nasonova D. I., ... Chulkov E. V. Novel ternary layered manganese bismuth tellurides of the  $\text{MnTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  system: synthesis and crystal structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;789: 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.030>
2. Orujlu E. N., Seidzade A. E., Babanly D. M., Amiraslanov I. R., Babanly M. B. New insights into phase equilibria of the  $\text{SnTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pseudo-binary system: synthesis and crystal structure of new tetradymite-type compound  $\text{Sn}_3\text{Bi}_2\text{Te}_6$ . *Journal of Solid State Chemistry*. 2024;330: 124494. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.124494>
3. Seidzade A. E., Orujlu E. N., Doert T., Amiraslanov I. R., Aliev Z. S., Babanly M. B. An updated phase diagram of the  $\text{SnTe}$ - $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  system and the crystal structure of the new compound  $\text{SnSb}_4\text{Te}_7$ . *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2021;42: 373–8. <https://doi.org/10.1007/s11669-021-00888-8>
4. Alakbarova T. M., Meyer H.-J., Orujlu E. N., Amiraslanov I. R., Babanly M. B. Phase equilibria of the  $\text{GeTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  quasi-binary system in the range 0–50 mol%  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . *Phase Transitions*. 2021;94: 366–75. <https://doi.org/10.1080/01411594.2021.1937625>
5. Алекперова Т. М., Мейер Х.-Ю., Оруджлу Э. Н., Бабанлы М. Б. Уточнение фазовой диаграммы системы  $\text{GeTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24: 11–18. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9050>
6. Huang D., Xia D., Ye T., Fujita T. New experimental studies on the phase relationship of the  $\text{Bi}$ - $\text{Pb}$ - $\text{Te}$  system. *Materials & Design*. 2022;224: 111384. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111384>
7. Omoto T., Kanaya H., Ishibashi H., Kubota Y., Kifune K., Kosuga A. Formation phases and electrical properties of  $\text{Ge}$ - $\text{Bi}$ - $\text{Te}$  compounds with homologous structures. *Journal of Electronic Materials*. 2015;45: 1478–83. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-4083-z>
8. Gojayeve I. M., Babanly V. I., Aghazade A. I., Orujlu E. N. Experimental reinvestigation of the  $\text{PbTe}$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pseudo-binary system. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2022;0: 47–53. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2022-2-47-53>
9. Heremans J. P., Cava R. J., Samarth N. Tetradymites as thermoelectrics and topological insulators. *Nature Review Materials*. 2017;2: 17049. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.49>
10. Banik A., Roychowdhury S., Biswas K. The journey of tin chalcogenides towards high-performance thermoelectrics and topological materials. *Chemical Communications*. 2018;54: 6573–6590. <https://doi.org/10.1039/c8cc02230e>
11. Lukyanova L. N., Usov O. A., Volkov M. P., Makarenko I. V. Topological thermoelectric materials based on bismuth telluride. *Nanotechnology Reports*. 2021;16: 282–293. <https://doi.org/10.1134/s2635167621030125>
12. Xu N., Xu Y., Zhu J. Topological insulators for thermoelectrics. *Npj Quantum Materials*. 2017;2(1). <https://doi.org/10.1038/s41535-017-0054-3>
13. Yang T., Yang Y., Wang X., Zhang G., Cheng Z. Topological thermoelectrics: new opportunities and challenges. *Materials Today Chemistry*. 2023;30: 101488. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101488>

14. Babanly M. B., Chulkov E. V., Aliev Z. S., Shevelkov A. V., Amiraslanov I. R. Phase diagrams in materials science of topological insulators based on metal chalcogenides. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2017;62: 1703–1729. <https://doi.org/10.1134/S0036023617130034>

15. Hasan M. Z., Kane C. L. Colloquium: topological insulators. *Review of Modern Physics*. 2010;82: 3045–3067. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.82.3045>

16. Qi X.-L., Zhang S.-C. Topological insulators and superconductors. *Review of Modern Physics*. 2011;83: 1057–1110. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.83.1057>

17. Zhang H., Liu C.-X., Qi X.-L., Dai X., Fang Z., Zhang S.-C. Topological insulators in  $\text{BiSe}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  with a single Dirac cone on the surface. *Nature Physics*. 2009;5: 438–442. <https://doi.org/10.1038/nphys1270>

18. Rachel S. Interacting topological insulators: a review. *Reports on Progress in Physics*. 2018;81: 116501. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa66a6>

19. McGuire M. A., Zhang H., May A. F., ... Yan J. Superconductivity by alloying the topological insulator  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ . *Physical Review Materials*. 2023;7. <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.7.034802>

20. Saxena A., Karn N. K., Sharma M. M., Awana V. P. S. Detailed structural and topological analysis of  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$  single crystal. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2023;174: 111169. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2022.111169>

21. Wang L.-L. Highly tunable band inversion in  $\text{AB}_2\text{X}_4$  ( $A=\text{Ge}, \text{Sn}, \text{Pb}$ ;  $B=\text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$ ;  $X=\text{Se}, \text{Te}$ ) compounds. *Physical Review Materials*. 2022;6. <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.6.094201>

22. Marcinkova A., Wang J. K., Slavonic C., ... Morosan E. Topological metal behavior in  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$  single crystals. *Physical Review B*. 2013;88. <https://doi.org/10.1103/physrevb.88.165128>

23. Klimovskikh I. I., Otrokov M. M., Estyunin D., ... Chulkov E. V. Tunable 3D/2D magnetism in the  $(\text{MnBi}_2\text{Te}_4)$  ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) $_m$  topological insulators family. *Npj Quantum Materials*. 2020;5. <https://doi.org/10.1038/s41535-020-00255-9>

24. Kuroda K., Miyahara H., Ye M., ... Kimura A. Experimental verification as a 3D topological insulator. *Physical Review Letters*. 2012;108. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.108.206803>

25. Orujlu E. Phase equilibria in the  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  system and characterization of the  $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Bi}_2\text{Te}_4$  solid solutions. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020;21: 113–116. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.113-116>

26. Pan L., Li J., Berardan D., Dragoe N. Transport properties of the  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$  solid solution. *Journal of Solid State Chemistry*. 2015;225: 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2014.12.016>

27. Frolov A. S., Usachov D. Yu., Tarasov A. V., ... Yashina L. V. Magnetic Dirac semimetal state of  $(\text{Mn}, \text{Ge})\text{Bi}_2\text{Te}_4$ . *Communications Physics*. 2024;7. <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01675-w>

28. Wang S., Xing T., Hu P., ... Chen, L. Optimized carrier concentration and enhanced thermoelectric properties in  $\text{GeSb}_{4-x}\text{Bi}_x\text{Te}_7$  materials. *Applied Physics Letters*. 2022;121. <https://doi.org/10.1063/5.0123298>

29. Qian T., Yao Y.-T., Hu C., ... Ni N. Magnetic dilution effect and topological phase transitions in  $(\text{Mn}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Bi}_2\text{Te}_4$ . *Physical Review B*. 2022;106. <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.045121>

30. Tokumoto Y., Sugimoto K., Hattori Y., Edagawa K. Electronic transport properties of  $\text{Pb}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_4$  topological insulator. *Journal of Applied Physics*. 2022;131. <https://doi.org/10.1063/5.0077002>

31. Aghazade A. I. Phase relations and characterization of solid solutions in the  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$  and  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{PbBi}_2\text{Te}_7$  systems. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2022;0(3): 75–80. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2022-3-75-80>

32. Aghazade A. I., Orujlu E. N., Salimov Z. E., Mammadov A. N., Babanly M. B. Experimental investigation of the solid phase equilibria at 300 K in the  $\text{SnBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  system. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023;24: 453–459. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.453-459>

## Информация об авторах

Набиев Эльнур Р., аспирант, Гянджинский государственный университет (Гянджа, Азербайджан).

<https://orcid.org/0009-0006-1907-3957>  
azechemist@gmail.com

Оруджлу Эльнур Н., к. х. н., заведующий научно-исследовательской лабораторией «Наноматериалы и нанотехнологии», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0001-8955-7910>  
elnur.oruclu@yahoo.com

Агазаде Айтан И., аспирант, исследователь Института катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-6072-1075>  
aytenagazade94@gmail.com

Гасанов Алекбер А., д. т. н., профессор, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0001-7505-4925>  
alakbar48-48@mail.ru

Бабанлы Магомед Б., д. х. н., профессор, член-корреспондент НАН Азербайджана, заместитель директора по научной работе Института катализа и неорганической химии НАН Азербайджана, (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0001-5962-3710>  
babanlymb@gmail.com

Поступила в редакцию 19.08.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 16.09.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.