

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 546. 863/23+682/24

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ  
Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–InSe И СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ ФАЗ

© 2020 г. И. И. Алиев<sup>а</sup>, \*, Н. А. Мамедова<sup>а</sup>, Ф. М. Садыгов<sup>б</sup>, Н. М. Садыгов<sup>с</sup>, И. Г. Меликова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт катализа и неорганической химии им. акад. М.Ф. Нагиева НАН Азербайджана, пр-т Г. Джавида, 113, Баку, Аз1143 Азербайджан

<sup>б</sup>Бакинский государственный университет, ул. З. Халилова, 30, Баку, Аз1173 Азербайджан

<sup>с</sup>Институт геологии НАН Азербайджана, пр-т Г. Джавида, 115, Баку, Аз1143 Азербайджан

\*e-mail: iradam@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 29.05.2020 г.

Принята к публикации 30.05.2020 г.

Комплексными методами физико-химического анализа (дифференциальный термический, рентгенофазовый, микроструктурный), а также измерением микротвердости и плотности изучен характер взаимодействия в системе Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>–GaSe и построена *T*–*x*-фазовая диаграмма. Установлено, что система Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–InSe является квазибинарным сечением тройной взаимной системы Sb, In||Se, Te. В системе Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–InSe образуются соединения InSb<sub>2</sub>SeTe<sub>3</sub> и In<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>Te<sub>3</sub>, инконгруэнтно плавящиеся при 525 и 600°C соответственно. Выявлено, что область твердых растворов на основе Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> доходит до 3 мол. %, а на основе InSe – до 2 мол. %. Соединения Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и InSe образуют эвтектику с координатами 20 мол. % InSe и 510°C. Изучены температурные зависимости удельной электропроводности и коэффициента термо-э.д.с. твердых растворов (Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>(InSe)<sub>x</sub> (*x* = 0.01, 0.02, 0.03).

**Ключевые слова:** фазообразование, эвтектика, квазибинарный, твердый раствор, электропроводность

DOI: 10.31857/S0044457X20100013

## ВВЕДЕНИЕ

Получение полифункциональных материалов с заданными свойствами основано на изучении диаграмм состав–свойство многокомпонентных систем. Известно, что халькогениды индия, сурьмы и сплавы на их основе обладают оптическими [1–6], фотоэлектрическими [7–10], термоэлектрическими и люминесцентными свойствами [11–17] и широко используются в электронной промышленности, а также вызывают интерес как полупроводники. Исследованы фазовые диаграммы многих систем с участием индия и сурьмы [18–24] и некоторые физико-химические свойства их сплавов [25–27]. Поэтому получение материалов на основе халькогенидов сурьмы и индия является актуальной задачей и требует фундаментальных поисков.

Цель настоящей работы – исследование химического взаимодействия в системе Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–InSe, а также поиск новых фаз и твердых растворов.

По результатам работы [28], соединение Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> имеет кристаллическую структуру типа Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и кристаллизуется в ромбоэдрической сингонии с параметрами решетки: *a* = 4.264, *c* = 30.42 Å, пр. гр. *R3m*.

Кристаллическая структура Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> исследована также в работе [29]. В ней указывается, что соединение Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> кристаллизуется в ромбоэдрической сингонии с параметрами решетки: *a* = 4.262, *c* = 30.450 Å, пр. гр. *R3m*, *D*<sub>3d</sub><sup>5</sup>. Данные работ [28] и [29] хорошо согласуются между собой.

Соединение InSe плавится конгруэнтно при 660°C, относится к структурному типу GaSe и кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами решетки: *a* = 4.04, *c* = 16.92 Å [30].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сплавы системы синтезировали непосредственным сплавлением компонентов Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и InSe ампульным методом в интервале температур 700–900°C с последующим медленным охлаждением в режиме выключенной печи. Для достижения равновесного состояния образцы отжигали при 500°C в течение 140 ч.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) образцов проводили на терморегистраторе Термоскан-2 со скоростью нагревания 9 град/мин. Дифрактограммы снимали на установке D2 Phaser

**Таблица 1.** Межплоскостные расстояния ( $d$ ,  $hkl$ ) и интенсивность линий на дифрактограммах  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  и  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ 

$\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$					$\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$				
$I$ , %	$d$ , Å	$h$	$k$	$l$	$I$ , %	$d$ , Å	$h$	$k$	$l$
15	9.8430	2	0	0	19	9.5565	2	0	0
63	5.0134	3	2	1	100	4.8192	4	0	0
69	4.8575	4	0	0	8	3.4795	3	1	3
19	3.3724	0	0	4	13	3.2231	0	0	4
100	3.1178	6	2	0	56	3.1192	6	1	0
25	3.0301	5	3	2	68	3.0012	5	4	0
6	2.6252	6	1	3	6	2.5293	6	1	3
6	2.5293	6	5	0	21	2.3002	5	3	4
30	2.3202	8	3	0	18	2.2472	8	3	0
9	2.2020	8	4	0	21	2.1090	9	1	0
15	2.1103	9	2	1	13	2.0287	8	5	0
38	2.0245	6	5	4	19	1.9347	7	7	0
13	1.9613	10	2	0	9	1.8843	8	2	4
8	1.7503	11	2	1	6	1.7518	8	0	5
16	1.6901	0	0	8	8	1.6888	8	8	0
10	1.6285	3	1	8	19	1.6131	0	0	8
6	1.5689	10	2	5	4	1.5609	12	0	1

( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение). Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузках, выбранных в результате изучения микротвердости каждой фазы. Микроструктуру сплавов изучали на микроскопе МИМ-8. Для травления шлифов сплавов использовали раствор состава 10 мл  $\text{HNO}_3$ конц +  $\text{H}_2\text{O}_2 = 1 : 2$ , время травления 15–20 с. Плотность определяли пикнометрическим методом, в качестве рабочей жидкости использовали толуол. Электропроводность сплавов системы изучали известными компенсационными методами [31]. Анализ процентного содержания элементов соединений  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  и  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$  проводили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6610–ICP-MS 7700. С помощью масс-спектрометра определено процентное содержание элементов в интервале  $n \times 10^{-8}$ – $n \times 10\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сплавы системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ – $\text{InSe}$  с большим содержанием  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  серебристого цвета, хрупкие, слоистые, с увеличением содержания  $\text{InSe}$  образцы приобретают черный оттенок. Они устойчивы к воздуху и воде, но разлагаются под действием концентрированных минеральных кислот ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), тогда как органические растворители на них не действуют. Равновесные сплавы исследовали методами физико-химического анализа.

ДТА сплавов системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ – $\text{InSe}$  показывает, что на термограммах имеется по два и три эффекта. Результаты микроструктурного анализа (МСА) показали, что на основе исходных компонентов имеются ограниченные гомогенные области. В системе при комнатной температуре рас-

творимость на основе  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  составляет 3 мол. %, а на основе  $\text{InSe}$  – 2 мол. %, полученные сплавы состава 50 и 75 мол. %  $\text{InSe}$  также однофазные.

В системе  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ – $\text{InSe}$  образуются новые соединения состава  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  и  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ , плавающиеся инконгруэнтно при 525 и 600°C соответственно.

С целью подтверждения результатов ДТА и МСА проводили рентгенофазовый анализ. На рис. 1 приведены рентгенограммы сплавов 50 и 75 мол. %  $\text{InSe}$  и исходных компонентов. Установлено, что на дифрактограммах сплавов 50 и 75 мол. %  $\text{InSe}$  имеются дифракционные линии, которые по интенсивности и расположению межплоскостных расстояний не соответствуют дифракционным линиям исходных компонентов. Соединение  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a = 19.686$ ,  $c = 13.490$  Å;  $\rho_{\text{пикн}} = 6.18$ ,  $\rho_{\text{рент}} = 6.25$  г/см<sup>3</sup>. Соединение  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$  изоструктурно  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  и кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a = 19.113$ ,  $c = 12.892$  Å;  $\rho_{\text{пикн}} = 5.88$ ,  $\rho_{\text{рент}} = 5.96$  г/см<sup>3</sup>. Рентгенографические данные для соединений  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  и  $\text{InSb}_2\text{Te}_4$  приведены в табл. 1.

Спектры и микроструктуры соединений  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  и  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$  сняты сканирующем электронном микроскопе и показаны на рис. 2, 3.

На основании данных, полученных в результате проведенных исследований, построена  $T$ – $x$ -фазовая диаграмма системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ – $\text{InSe}$  (рис. 4).

Ликвидус системы состоит из четырех кривых первичного выделения  $\alpha$ -твердого раствора на

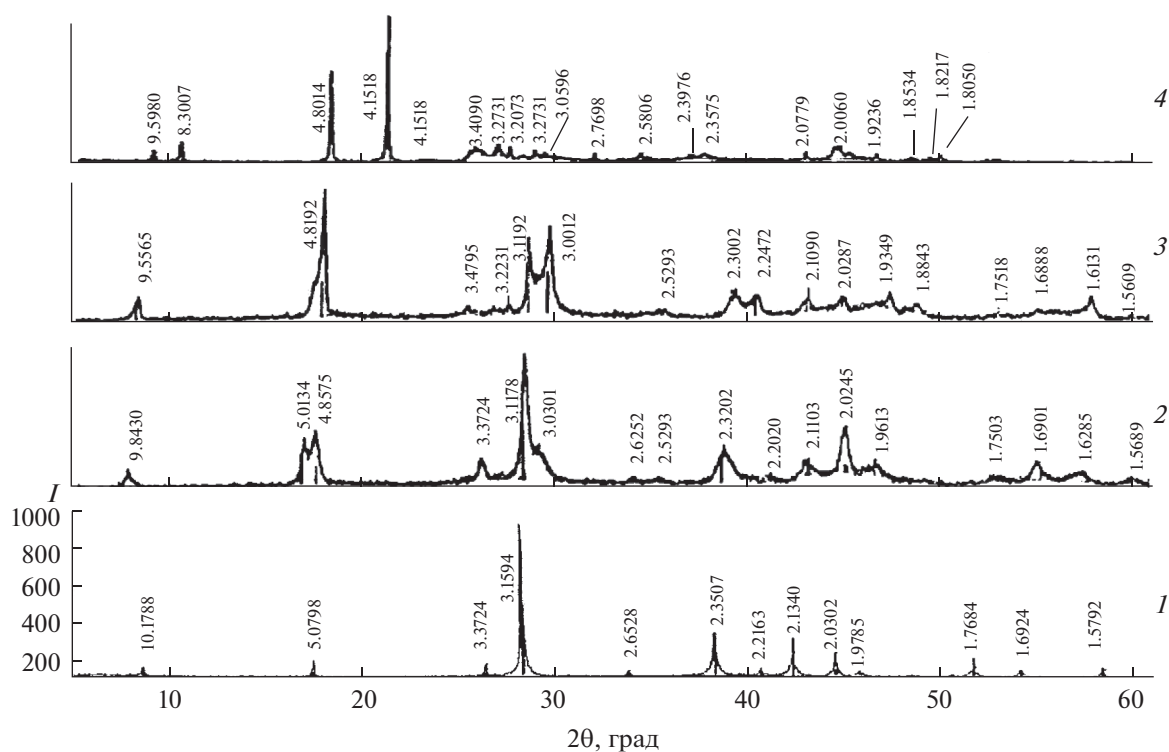


Рис. 1. Диффрактограммы сплавов системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3\text{--InSe}$ : 1 –  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , 2 –  $\text{InSb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ , 3 –  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ , 4 –  $\text{InSe}$ .

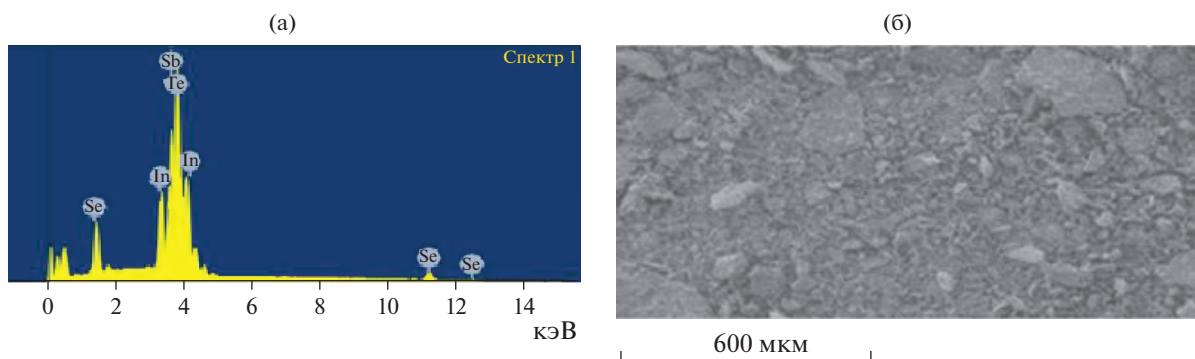


Рис. 2. Спектры (а) и микроструктура (б) соединения  $\text{InSb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ .

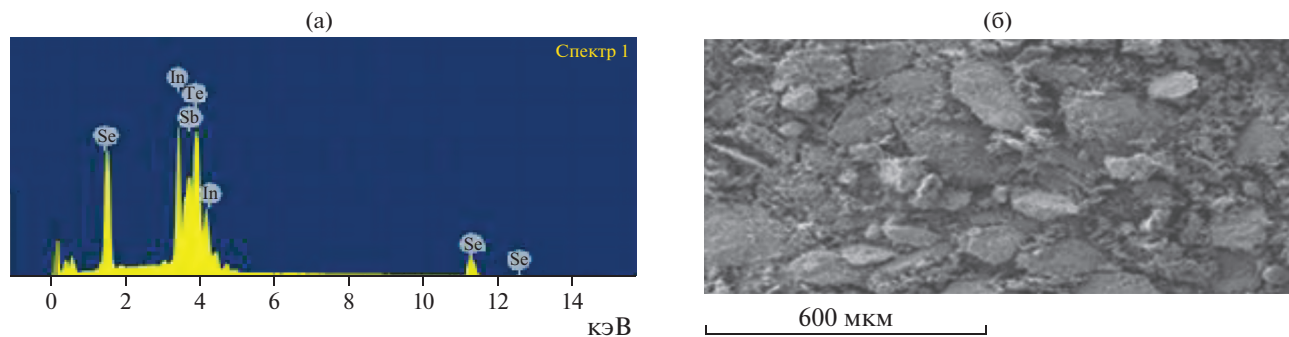


Рис. 3. Спектры (а) и структура (б) соединения  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ .

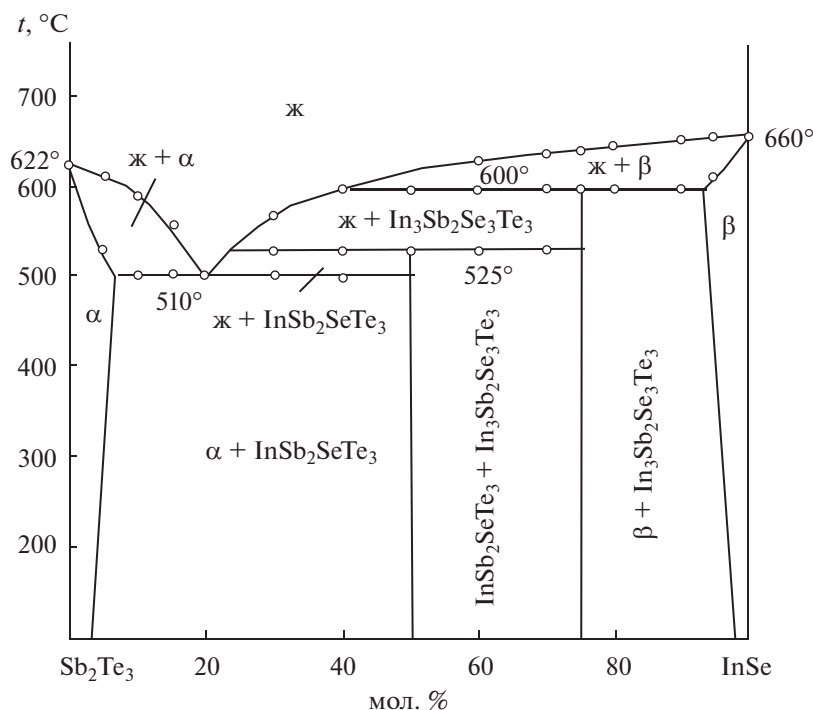


Рис. 4.  $T$ - $x$ -фазовая диаграмма системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ - $\text{InSe}$ .

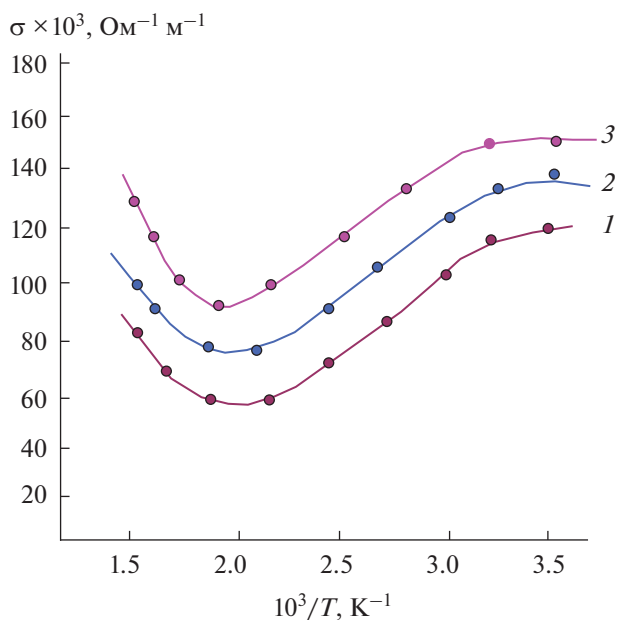


Рис. 5. Температурная зависимость электропроводности твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$ : 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3 мол. %  $\text{InSe}$ .

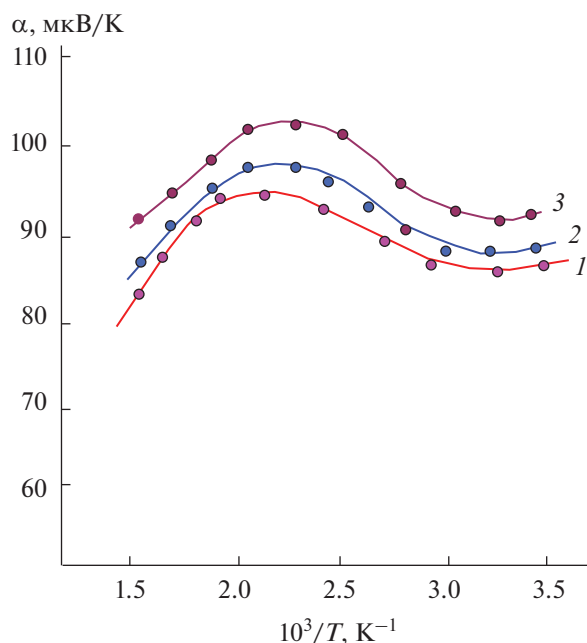
основе  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$ ,  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$  и  $\beta$ -твердого раствора на основе  $\text{InSe}$ . В системе совместная кристаллизация  $\alpha$ -фазы и  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  заканчивается в двойной эвтектике состава 20 мол. %  $\text{InSe}$  при температуре  $510^\circ\text{C}$ . В интервале концен-

траций 0–20 мол. %  $\text{InSe}$  из жидкости выделяются первичные кристаллы  $\alpha$ -фазы, а в интервале 40–100 мол. %  $\text{InSe}$  – первичные кристаллы  $\beta$ -фазы. В пределах 3–50 мол. %  $\text{InSe}$  ниже линии солидуса кристаллизуются двухфазные сплавы  $\alpha + \text{InSb}_2\text{SeTe}_3$ , в интервале 50–75 мол. %  $\text{InSe}$  ниже линии солидуса – двухфазные сплавы  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3 + \text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ , а в интервале 75–98 мол. %  $\text{InSe}$  – двухфазные сплавы  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3 + \beta$ .

При определении микротвердости сплавов системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ - $\text{InSe}$  получено четыре различных значения: 860–890 МПа соответствует микротвердости  $\alpha$ -фазы твердых растворов на основе  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , 900–930 МПа – новой фазе  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$ , 1210 МПа – новой фазе  $\text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ , для  $\beta$ -твердых растворов на основе  $\text{InSe}$  микротвердость составляет 600–700 МПа.

Для твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$  ( $x = 0.01, 0.02, 0.03$ ) измеряли температурную зависимость электропроводности (рис. 5) и термо-э.д.с. (рис. 6) в интервале температур 25– $400^\circ\text{C}$ . Выявлено, что в низкотемпературной области (25– $225^\circ\text{C}$ ) проводимость носит металлический характер, а в высокотемпературной ( $225^\circ\text{C}$  и выше) – полупроводниковый.

Электропроводность сплавов твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$  с содержанием 1, 2 и 3 мол. %  $\text{InSe}$  в зависимости от состава растет от  $\sigma = 120 \times 10^3$ ,  $137 \times 10^3$  до  $150 \times 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Температурная зависимость электропроводности сплавов с содер-



**Рис. 6.** Температурная зависимость термо-э.д.с. твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$ : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3 мол. % InSe.

жанием 1, 2 и 3 мол. % InSe носит металлический характер, поэтому сначала электропроводность уменьшается до температуры 500 К, при дальнейшем увеличении температуры начинается собственная проводимость, и электропроводность сплавов, содержащих 1, 2 и 3 мол. % InSe, увеличивается.

На рис. 6 приведена температурная зависимость термо-э.д.с. твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$  ( $x = 0.01, 0.02, 0.03$ ). Как видно из рис. 6, температурная зависимость термо-э.д.с. сплавов обнаруживает экстремум: от комнатной температуры до  $\sim 180^\circ\text{C}$  термо-э.д.с. увеличивается, а в области высоких температур ( $180\text{--}400^\circ\text{C}$ ) наблюдается ее монотонное понижение. Зависимость  $\alpha \sim f(1/T)$  также можно разделить на две части, как и зависимость  $\sigma \sim f(1/T)$ . Значение термо-э.д.с. увеличивается с добавлением содержания InSe. По знаку термо-э.д.с. установлено, что в исследуемом температурном интервале все изученные сплавы твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$  ( $x = 0.01, 0.02, 0.03$ ) являются полупроводниками  $p$ -типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью выяснения химического взаимодействия между компонентами системы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3\text{--InSe}$  она исследована в широком интервале концентраций. Установлено, что система  $\text{Sb}_2\text{Te}_3\text{--InSe}$  является квазибинарной эвтектического типа. В системе при соотношении компонентов 1 : 1 и 1 : 3 по

перитектической реакции образуются два соединения: 1)  $\text{ж} + \text{InSe} \leftrightarrow \text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  ( $525^\circ\text{C}$ ) и 2)  $\text{ж} + \text{ж} + \text{InSb}_2\text{SeTe}_3 \leftrightarrow \text{In}_3\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$  ( $600^\circ\text{C}$ ).

Результаты МСА показали наличие ограниченных областей твердых растворов на основе исходных компонентов, которые составляют 3 мол. % InSe и 2 мол. %  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Установлено, что в интервале концентраций 0–20 мол. % InSe из жидкости кристаллизуются  $\alpha$ -фазы, т.е. твердые растворы на основе  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .  $\alpha$ -Фаза и  $\text{InSb}_2\text{SeTe}_3$  образуют между собой эвтектику с координатами 20 мол. % InSe и  $510^\circ\text{C}$ . Исследована температурная зависимость электропроводности и термо-э.д.с. сплавов из области твердых растворов  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}(\text{InSe})_x$  ( $x = 0.01, 0.02, 0.03$ ). По знаку электропроводности и термо-э.д.с. установлено, что в исследуемом температурном интервале все изученные составы образуют  $p$ -тип проводимости.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрусевич В.А., Сергеева В.М. Оптические и фотоэлектрические свойства  $\text{In}_2\text{Te}_3$  // Физика твердого тела. 1960. № 2. С. 2858.
2. Зорина Е.Л., Гулиев Т.Н. // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 22. № 6. С. 919.
3. Коломиец Б.Т., Рывкин С.М. Фотоэлектрические свойства сульфида и селенида индия // Журн. техн. физики. 1974. № 19. С. 2041.
4. Белоцкий Д.П., Бабюк П.Ф., Демянчук Н.В. // Низкотемпературные термоэлектрические материалы. Кишинев, 1970. С. 29.
5. Заславский А.И., Сергеева В.М., Смирнов И.А. // Физика твердого тела. 1960. № 2. С. 2885.
6. Кязым-заде А.Г., Агаева А.А., Салманов В.М., Мохтари А.Г. // Журн. техн. физики. 2007. Т. 7. № 4. С. 80.
7. Магомедов А.З., Алиев А.О., Асланов М.А. и др. // Вестн. Бакинского ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2004. № 4. С. 163.
8. Магомедов А.З., Гасанова Л.Г., Алиев А.О. и др. // Физика. 2007. Т. 13. № 4. С. 164.
9. Zybala R., Mars K., Mikula A. et al. // Arch. Metall. Mater. 2017. V. 62. № 2. P. 1067. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0155>
10. Fernandez A.M., Merino M.G. // Thin Solid Films. 2000. V. 366. № 1–2. P. 202.
11. Свечникова Т.Е., Шелимова Л.Е., Константинов П.П. и др. // Неорг. материалы. 2006. Т. 42. № 12. С. 1437.
12. Vieira E.M.F., Figueirab J., Pires A.L. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 774. P. 1102. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.324>
13. Bin Xu, Jing Zhang, Gongqi Yu et al. // J. Appl. Phys. 2018. V. 124. P. 165104. <https://doi.org/10.1063/1.5051470>

14. *Kulbachinskii V.A., Kytin V.G., Zinoviev D.A. et al.* // *Semiconductors*. 2019. V. 53. P. 638. <https://doi.org/10.1134/S1063782619050129>
15. *Parekh P., Chiang P.T.* // *Alloys Can. J. Phys.* 2011. V. 43. № 4. P. 653. <https://doi.org/10.1139/p65-060>
16. *Min Ho Lee, Ka-Ryeong Kim, Jong-Soo Rhyee et al.* // *J. Mater. Chem. C*. 2015. V. 3. P. 10494. <https://doi.org/10.1039/C5TC01623A>
17. *Morikawa S., Inamoto T., Takashiri M.* // *Nanotechnology*. 2018. V. 9. № 7. P. 075701. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaa31f>
18. *Xiao-Yu Wang, Hui-Juan Wang, Bo Xiang et al.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. V. 10. № 27. P. 23277. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b01719>
19. *Bakhtiyarly I.B., Ismaylova R.A., Gasymov V.A. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2009. V. 54. № 11. P. 1820. [*Бахтиярлы И.Б., Исмайллова Р.А., Гасымов В.А., Гейдарова Э.А.* // *Журн. неорганической химии*. 2009. Т. 54. № 11. С. 1900.]
20. *Aliiev I.I., Magammedragimova R.S., Aliiev O.M., Babanly K.N.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. № 4. P. 527. [*Алиев И.И., Магаммедрагимова Р.С., Алиев О.М., Бабанлы К.Н.* // *Журн. неорганической химии*. 2019. Т. 64. № 4. С. 421.] <https://doi.org/10.1134/S003602361904003X>
21. *Садыгов Ф.М., Ильяслы Т.М., Ганбарова Г.Т. и др.* // *Неорганические материалы*. 2017. Т. 53. № 7. С. 681. [*Sadygov F.M., Ilyasly T.M., Ganbarova G.T. et al.* // *Inorg. Mater.* 2017. V. 53. P. 665.] <https://doi.org/10.7868/S00022337X17070016>
22. *Садыгов Ф.М., Мамедова С.Г., Бабанлы М.Б., Ильясов Т.М.* // *Журн. неорганической химии*. 2001. Т. 46. № 8. С. 1382. [*Sadygov F.M., Mamedova S.G., Babanly M.B., Ilyasov T.M.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2001. V. 46. № 8. P. 1247.]
23. *Кертман А.В.* // *Журн. неорганической химии*. 2019. Т. 64. № 1. С. 93. [*Kertman A.V.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. № 1. P. 130.] <https://doi.org/10.1134/S0044457X19010136>
24. *Максудова Т.Ф., Алиев И.И.* // *Журн. неорганической химии*. 2003. Т. 48. № 3. С. 497. [*Maksudova T.F., Aliiev I.I.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2003. V. 48. № 3. P. 425.]
25. *Заргарова М.И., Мамедов А.Н., Аждарова Д.С. и др.* *Справочник. Неорганические вещества, синтезированные и исследованные в Азербайджане*. Баку: ЭЛМ, 2004. 462 с.
26. *Haixu Qin, Jianbo Zhu, Bo Cui et al.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. V. 12. № 1. P. 945. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b19798>
27. *Абрикосов Н.Х., Банкина В.Ф., Проецкая Л.В. и др.* *Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе*. М.: Наука, 1975. 220 с.
28. *Donnay D.H., Ondik H.M.* // *U.S. Comm. Nat. Bur. Stand. and joint. Commit. Powd. Diff. Stand.* 1973. V. 2. P. 1902.
29. *Кузнецов В.Г., Палкина К.К.* // *Журн. неорганической химии*. 1963. Т. 8. № 5. С. 1204. [*Kuznetsov V.G., Palkina K.K.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 1963. V. 8. P. 1204.]
30. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* / Под ред. Лякишева Н.П. М.: Машиностроение, 2001. Т. 3. 872 с.
31. *Коломиец Н.Б.* // *Заводская лаборатория*. 1962. Т. 28. № 2. С. 238.