

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК.546.863.22 + 763.24

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11934>**Физико-химическое исследование фазообразования в системе $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$** И. И. Алиев^{1✉}, Э. И. Мамедов², Ф. В. Юсубов², Л. Ф. Масиева², Х. М. Гашимов³¹Институт катализа и неорганической химии имени М. Ф. Нагиева, пр. Г. Джавида 113, Баку Az 1143, Азербайджан²Азербайджанский технический университет, пр. Г. Джавида 116, Баку Az 1146, Азербайджан³Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, Баку Az 1001, Азербайджан**Аннотация**

Халькогениды хрома и системы на их основе изучены недостаточно. Халькогенидные соединения хрома Cr_2X_3 ($X = S, Se, Te$), новые фазы и твердые растворы на их основе находят широкое применение в полупроводниковой технике, поскольку относятся к материалам с термоэлектрическими и магнитными свойствами. Целью данной работы является изучение химических взаимодействий в системе $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$, построение фазовой диаграммы, поиск новых фаз и твердых растворов.

Методами физико-химического анализа (дифференциально-термического, рентгенофазового, микроструктурного анализа, а также измерением плотности и микротвердости) изучено химическое взаимодействие в системе $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ и построена ее фазовая диаграмма. Фазовая диаграмма системы квазибинарна и характеризуется образованием четверного соединения $Cr_2Sb_2S_3Te_3$.

Соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ плавится incongruently при 610 °C. Микроструктурный анализ показывает, что в системе при комнатной температуре образуются твердые растворы на основе Sb_2S_3 , которые достигают до 5 мол. % Cr_2Te_3 , а на основе Cr_2Te_3 до – 8 мол. % Sb_2S_3 . Образующаяся в системе $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ эвтектика содержит 20 мол. % Cr_2Te_3 и имеет температуру плавления 430 °C. Соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами элементарной ячейки: $a = 10.03$; $c = 16.67 \text{ \AA}$, $z = 7$, $\rho_{\text{пикн.}} = 5.72 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{рент.}} = 5.765 \text{ г/см}^3$.

Ключевые слова: система, фаза, твердый раствор, эвтектика, сингония

Для цитирования: Алиев И. И., Мамедов Э. И., Юсубов Ф. В., Масиева Л. Ф., Гашимов Х. М. Физико-химическое исследование фазообразование в системе $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(2): 197–203. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11934>

For citation: Aliev I. I., Mamedov E. I., Yusubov F. V., Masieva L. F., Gashimov Kh. M. Physicochemical study of phase formation in the $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ system. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(2): 197–203. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11934>

✉ Алиев Имир Ильяс, e-mail: aliyevimir@rambler.ru

© Алиев И. И., Мамедов Э. И., Юсубов Ф. В., Масиева, Л. Ф., Гашимов Х. М., 2024



1. Введение

Поиск функциональных материалов, способных удовлетворить постоянно растущие потребности электронной промышленности, всегда находится в центре внимания. К материалам, отвечающим этим требованиям, относятся халькогенидные соединения сурьмы и сплавы на их основе. Сульфиды и селениды сурьмы используются в оптических системах в качестве светочувствительных материалов [1–7]. Теллуриды сурьмы являются материалами с термоэлектрическими свойствами и применяются в качестве преобразователей энергии [8–15].

Известно, что сам элемент хром и халькогенидные соединения используются не только для изготовления магнитных материалов, но и для получения ферромагнетиков сложного состава с другими халькогенидами. Тройные и более сложные соединения на основе халькогенидов хрома обладают высокими ферромагнитными свойствами [16–19]. В связи с этим при химическом взаимодействии фотоувствительных халькогенидов сурьмы с магнитными халькогенидами хрома получение фотоувствительных и магнитооптических материалов, сохраняющих свойства исходных соединений, имеет как научное, так и практическое значение.

Соединение Sb_2S_3 плавится конгруэнтно при $559.5\text{ }^\circ\text{C}$ и кристаллизуется в ромбической сингонии с параметрами решетки: $a = 11.229$; $b = 11.310$; $c = 3.83\text{ \AA}$, пр. гр. $Pbnm-D_{2h}^{16}$, плотность 4.63 г/см^3 , микротвердость 1400 МПа [20]. Соединение Cr_2Te_3 конгруэнтно плавится при $1280\text{ }^\circ\text{C}$ и кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 6.811$; $c = 12.062\text{ \AA}$, пр. гр. $hP20-P31c$ [21]. Фазовый переход $\alpha-Cr_2Te_3$ имеет температуру $480\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Экспериментальная часть

Сплавы системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ синтезировали из компонентов Sb_2S_3 и Cr_2Te_3 в вакуумированной кварцевой ампуле при давлении 0.133 Па в интервале температур $600-1100\text{ }^\circ\text{C}$. Образцы подвергали термообработке при $500\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 240 ч для обеспечения равновесия.

Равновесные сплавы исследовали методами дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА), микроструктурного (МСА) анализа, а также путем измерения микротвердости и плотности.

ДТА-анализ образцов проводили на низкочастотном пирометре НТР-73, погрешность составляла $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$. Запись кривых нагревания и охлаж-

дения проводили на пирометре Н. С. Курнакова марки НТР-73. Исследуемое вещество помещали в кварцевую ампулу длиной $0.10-0.11\text{ м}$, диаметром $8-10\cdot 10^{-3}\text{ м}$, которую откачали до 0.1333 Па и запаивали. Термопару, пропущенную через отверстие соответствующего диаметра керамического блока, подводили к пробе снизу. Для нагрева использовали трубчатую печь, внутри которой помещали стальной блок. В качестве эталонных использовали $NaCl$, KCl , Na_2SO_4 , K_2SO_4 , кривые нагревания и охлаждения которых записывали в аналогичных условиях со скоростью нагрева $10\text{ }^\circ\text{C/мин}$. На основе данных, полученных для эталонных веществ, построили градуировочную кривую, которую проверили через 15 дней . В работе в основном анализировали термические эффекты, обнаруженные на кривых нагревания. В качестве термопары использовался хромель-алюмель.

РФА проводили на рентгеновском приборе модели D2 PHASER в CuK_α -излучении с Ni-фильтром.

Анализ микроструктуры (МСА) выполняли под микроскопом МИМ-8. Раствор $1\text{ н. HNO}_3:H_2O_2 = 1:1$ использовали в качестве осветлителя для определения фазовых границ. Микротвердость измеряли на металлографическом микроскопе ПМТ-3. Плотность образцов определяли пикнометрическим методом, в качестве наполнителя был взят толуол.

3. Результаты и их обсуждение

Образцы, богатые Sb_2S_3 , легко плавятся, образуя компактную массу. После синтеза соединения Cr_2Te_3 образуется в виде неоднородных слитков. Поэтому неоднородный слиток измельчали в порошок и прессовали под давлением 200 атм , получая его в виде таблеток. В форме таблетки образец помещали в кварцевую ампулу и запечатывали, отсасывая воздух и плавя его в газовой лампе. Затем проводился твердофазный синтез путем термообработки образца при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 100 часов . Убедившись в образовании соединения Cr_2Te_3 , были синтезированы сплавы системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$.

Сплавы системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ исследованы методами физико-химического анализа. По данным ДТА установлено, что на термограммах сплавов получены два и три эндотермических эффекта.

После фазового анализа сплавов системы было установлено, что сплавы вблизи исходных компонентов и содержащие 50 мол. \%

Cr_2Te_3 являются однофазными. При содержании выше 5 мол. % Cr_2Te_3 образуется вторая фаза, т. е. начинаются двухфазные области (рис. 1б). На рис. 1 представлены микроstructures сплавов, содержащие 5, 10 и 50 мол. % Cr_2Te_3 системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$. Как показано, 2 мол. % Cr_2Te_3 и образец с 50 мол. % Cr_2Te_3 представляют собой однофазные твердые растворы (рис. 1а, в). Образец, содержащий 10 мол. % Cr_2Te_3 – двухфазный (рис. 1б).

Для подтверждения результатов ДТА и МСА был проведен рентгенофазовый анализ сплавов 30, 50 и 92 мол. % Cr_2Te_3 системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ (рис. 2). Как видно из рис. 2, дифракционные линии образца 92 мол. % Cr_2Te_3 не отличаются от рентгенограммы соединения Cr_2Te_3 , и наблюдается небольшой сдвиг. Этот образец представляет собой твердый раствор на основе Cr_2Te_3 . На дифрактограммах образцов с 30 и 70 мол. % Cr_2Te_3 присутствуют диф-

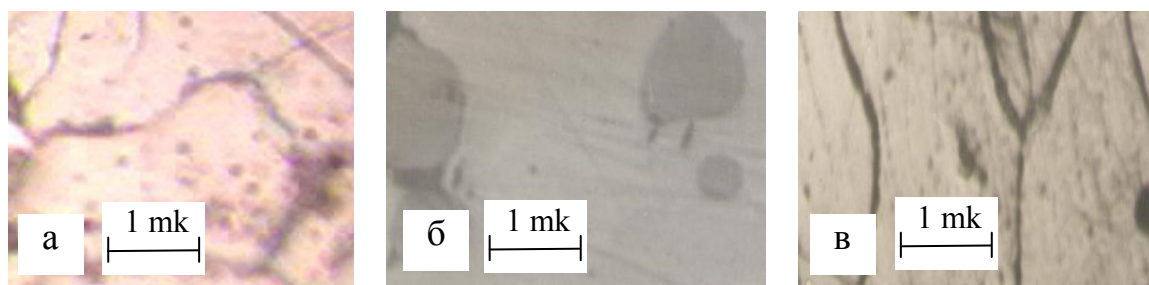


Рис. 1. Микроstructures сплавов системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ ($\times 340$): а) – 5 мол. %, б) – 10 мол. %, в) – 50 ($Cr_2Sb_2S_3Te_3$) мол. % Cr_2Te_3

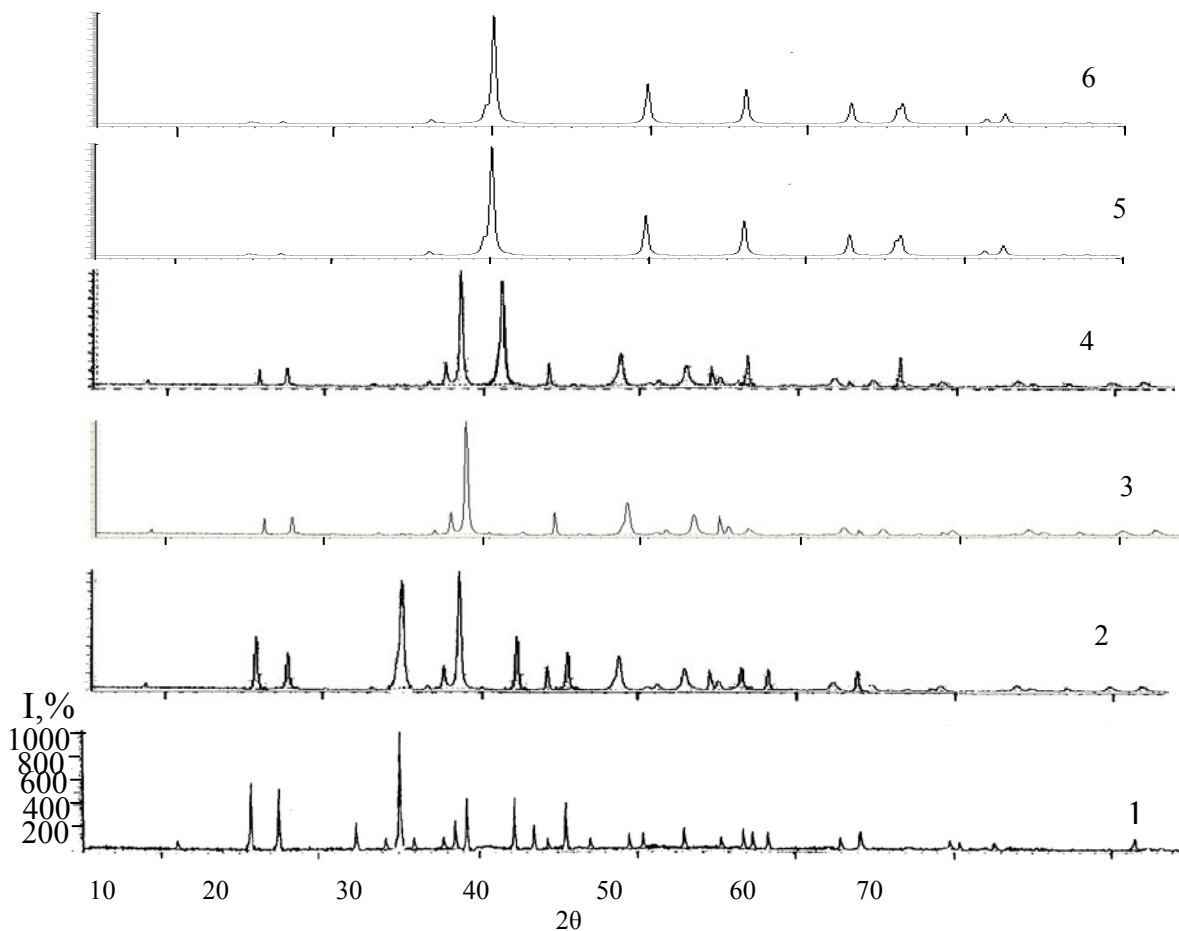


Рис. 2. Дифрактограммы сплавов системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$: 1 – Sb_2S_3 ; 2 – 30; 3 – 50 ($Cr_2Sb_2S_3Te_3$); 4 – 70; 5 – 92; 6 – 100 мол. % Cr_2Te_3

рациональные линии исходных компонентов, т. е. образцы двухфазные.

Дифракционные пики на дифрактограмме образца, содержащего 50 мол. % Cr_2Te_3 , отличаются от дифракционных линий на дифрактограммах исходных компонентов межплоскостными расстояниями и интенсивностью. В результате было получено новое четверное соединение, содержащее $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ (рис. 2). Соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ можно рассматривать как производное $CrSbTe_3$, полученное анионным замещением $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ (сокращенно $CrSbS_{1.5}Te_{1.5}$).

В результате физико-химического анализа построена квазибинарная фазовая диаграмма системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ (рис. 3). Соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ образуется в результате перитектической реакции: $Ж + Cr_2Te_3 \leftrightarrow Cr_2Sb_2S_3Te_3$ при $610^\circ C$.

Ликвидус системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ состоит из моновариантных равновесных кривых для α -твердого раствора на основе соединения Sb_2S_3 , нового соединения $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ и β -твердого раствора на основе соединения Cr_2Te_3 . Образовавшаяся в системе бинарная эвтектика имеет содержание Cr_2Te_3 20 мол. % и температуру плавления $430^\circ C$.

Кристаллизация α -твердого раствора завершается в системе в интервале концентраций 0–20 мол. % Cr_2Te_3 . В диапазоне 0–20 мол. %

Cr_2Te_3 ниже кривой ликвидуса находятся двухфазные сплавы ($Ж+\delta$) (рис. 3). Двухфазные сплавы, состоящие из ($\delta + Cr_2Sb_2S_3Te_3$), ниже линии солидуса кристаллизуются в области 5–50 мол. % Cr_2Te_3 . В интервале концентраций 50–92 мол. % Cr_2Te_3 ниже линии солидуса кристаллизуются двухфазные сплавы ($Cr_2Sb_2S_3Te_3+\alpha$). Некоторые физико-химические свойства сплавов приведены в табл. 1.

В результате измерения микротвердости были получены три различных значения. Величина микротвердости (1400–1470) МПа соответствует микротвердости α -твердого раствора на основе Sb_2S_3 . Величина микротвердости (1750–1880) МПа соответствует микротвердости соединения $Cr_2Sb_2S_3Te_3$, а величина (2070–2150) МПа – микротвердости β -твердого раствора на основе Cr_2Te_3 . Зависимость плотности сплавов системы от состава показывает, что резкого изменения не наблюдается.

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 10.03$; $c = 16.67 \text{ \AA}$, $z = 7$, $\rho_{\text{пикн.}} = 5.72 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{рент.}} = 5.75 \text{ г/см}^3$. Кристаллографические данные соединения $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ приведены в табл. 2.

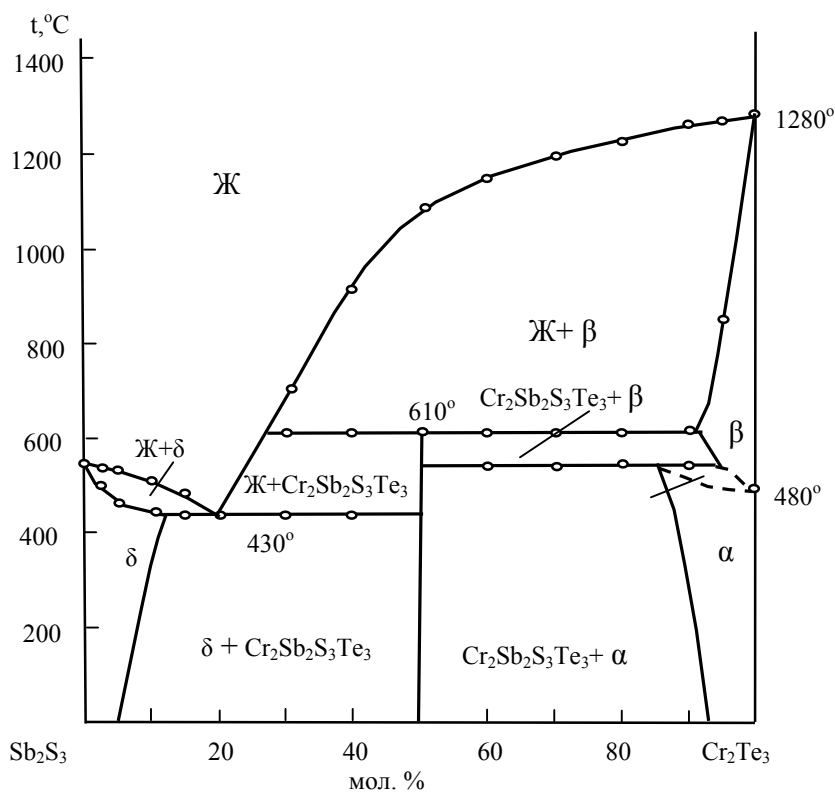


Рис. 3. Фазовая диаграмма системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$

Таблица 1. Состав сплавов системы $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$, результаты ДТА, определения микротвердости и плотности

Состав, мол. %		Термические эффекты, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3	Микротвердость, МПа		
Sb_2S_3	Cr_2Te_3			α	$Sb_2Cr_2S_3Te_3$	β
				$P = 0.1 \text{ Н}$		$P = 0.2 \text{ Н}$
100	0.0	560	4.63	1400	–	–
97	3.0	500, 555	4.70	1450	–	–
95	5.0	470, 530	4.78	1470	–	–
90	10	440, 515	4.86	1470	–	–
85	15	430, 480	4.97	–	–	–
80	20	430	5.06	Эвтек.	Эвтек.	–
70	30	430, 610, 700	5.29	–	–	–
60	40	430, 610, 920	5.51	–	1750	–
50	50	610, 1090	5.72	–	1750	3280
40	60	540, 610, 1150	5.94	–	1800	3280
30	70	540, 610, 1195	6.16	–	1850	3280
20	80	540, 610, 1230	6.39	–	1880	3280
10	90	540, 610, 1260	6.65	–	–	3280
5.0	95	850, 1270	6.83	–	–	3280
0.0	100	480, 1280	6.82	–	–	3250

Таблица 2. Межплоскостные расстояния (d), интенсивность (I) линий и индексы решетки (hkl) на дифрактограмме соединения $Cr_2Sb_2S_3Te_3$

№	$I, \%$	$d_{\text{экс.}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч.}}, \text{Å}$	$1/d^2_{\text{экс.}}, \text{Å}^{-2}$	$1/d^2_{\text{выч.}}, \text{Å}^{-2}$	hkl
1	5.9	10.0289	10.0289	0.0099	0.0099	100
2	15.8	5.5561	5.5561	0.0324	0.0324	003
3	17.4	5.0252	5.0125	0.0396	0.0398	200
4	4.1	3.8528	3.8490	0.0674	0.0675	104
5	6.1	3.3509	3.3445	0.0891	0.0894	300
6	22.5	3.2277	3.2042	0.0960	0.0974	204
7	100	3.1236	3.1159	0.1025	0.1030	311
8	4.4	2.7857	2.7810	0.1288	0.1293	320
9	26	2.6254	2.6380	0.1451	0.1437	322
10	30.	2.3265	2.3344	0.1848	0.1835	331
11	19	2.1097	2.1035	0.2247	0.2260	217
12	23	2.0357	2.0404	0.2413	0.2402	108
13	8.3	1.9602	1.9672	0.2602	0.2584	510
14	8.6	1.7506	1.7453	0.3265	0.3283	426
15	7.2	1.6772	1.6718	0.3555	0.3578	600
16	4.9	1.5776	1.5788	0.4018	0.4012	601
17	6.2	1.5639	1.5665	0.4089	0.4075	540
18	7.1	1.4570	1.4580	0.4711	0.4704	339
19	6.0	1.3475	1.3492	0.5507	0.5493	722
20	6.8	1.3142	1.3170	0.5790	0.5765	730

4. Выводы

Таким образом, методами физико-химического анализа изучена система $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ и построена ее фазовая диаграмма. Установлено, что разрез $Sb_2S_3-Cr_2Te_3$ является квазибинарным эв-

тектического типа. Образуется четверное соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ в системе при анионном обмене компонентов в соотношении 1:1. Соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ образуется по перитектической реакции $M + Cr_2Te_3 \leftrightarrow Cr_2Sb_2S_3Te_3$ при 610 °C. В системе

между α -фазой и $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ образуется эвтектика состава 20 мол. % Cr_2Te_3 , температура 430 °C. В системе на основе Sb_2S_3 твердые растворы достигают до 5 мол. % Cr_2Te_3 , а на основе Cr_2Te_3 – до 8 мол. % Sb_2S_3 . По результатам рентгенофазового анализа установлено, что соединение $Cr_2Sb_2S_3Te_3$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 10.03$; $c = 16.67$ Å, $z = 7$, плотность $\rho_{\text{пикн.}} = 5.72$ г/см³, $\rho_{\text{рент.}} = 5.5$ г/см³.

Заявленный вклад авторов

Алиев И. И. – написание статьи и руководство научным исследованием; Мамедов Э. И. – идея научной работы и написание статьи; Юсубов Ф. В. – научное редактирование текста, итоговые выводы; Масиева Л. Ф. – исполнитель научного исследования; Гашимов Х. М. – исполнитель научного исследования.

Конфликт интересов

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

Список литературы

1. Zhou Y., Wang L., Chen S., ... Tang J. Thin-film Sb_2Se_3 photovoltaics with oriented one-dimensional ribbons and benign grain boundaries. *Nature Photonics*. 2015;9: 409–415. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.78>

2. Fernandez A., Merino M. Preparation and characterization of Sb_2Se_3 thin films prepared by electro-deposition for photovoltaic applications. *Thin Solid Films*. 2000;366: 202–206. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00716-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00716-1)

3. Chen, C., Bobela D. C., Yang Y., ... Tang J. Characterization of basic physical properties of Sb_2Se_3 and its relevance for photovoltaics. *Frontiers of Optoelectronics*. 2017;10: 18–30. <https://doi.org/10.1007/s12200-017-0702-z>

4. Магомедов А. З., Алиев А. О., Асланов М. А., Мусаева С. М., Джавадова С. Д. Особенность температурной зависимости спектрального распределения фоточувствительности сегнетоэлектриков-полупроводников $Sb_2S_3-Sb_2Se_3$. *Вестник Бакинского университета. Серия физико-математических наук*. 2004;4: 163–169.

5. Ju T., Koo B., Jo J. W., Ko M. J. Enhanced photovoltaic performance of solution-processed Sb_2Se_3 thin film solar cells by optimizing device structure. *Current Applied Physics*. 2020;20(2): 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.11.018>

6. Kumar P., Sathiaraj T. S., Thangaraj R. Optical properties of amorphous $Sb_2Se_3:Sn$ films. *Philosophical*

Magazine Letters. 2010;90(3): 183–192 <https://doi.org/10.1080/09500830903520704>

7. Rajpure K. Y., Bhosale C. H. Effect of Se source on properties of spray deposited Sb_2Se_3 thin films. *Materials Chemistry and Physics*. 2000;62: 169–174. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00173-x](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00173-x)

8. Vieira E. M. F., Figueira J., Pires A. L., ... Goncalves L. M. Enhanced thermoelectric properties of Sb_2Te_3 and Bi_2Te_3 films for flexible thermal sensors. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;774(5): 1102–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.324>

9. Zhang H., Liu C.-X., Qi X.-L., Dai X., Fang Z., Zhang, S.-C. Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface. *Nature Physics*. 2009;5(6): 438–442. <https://doi.org/10.1038/nphys1270>

10. Wang G., Cagin T. Electronic structure of the thermoelectric materials Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 from first-principles calculations. *Physical Review B*. 2007;76: 075201–8. <https://doi.org/10.1103/physrevb.76.075201>

11. Xu B., Zhang J., Yu G., Ma S., Wang Y., Wang Y. Thermoelectric properties of monolayer Sb_2Te_3 . *Journal of Applied Physics*. 2018;124(16): 165104. <https://doi.org/10.1063/1.5051470>

12. Kulbachinskii V. A., Kytin V. G., Zinoviev D. A., ... Banerjee A. Thermoelectric properties of Sb_2Te_3 -based nanocomposites with graphite. *Semiconductors*. 2019;53: 638–640 <https://doi.org/10.1134/S1063782619050129>

13. Liu X., Chen J., Luo M., ... Tang J. Thermal evaporation and characterization of Sb_2Se_3 thin film for substrate Sb_2Se_3/CdS solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014;6: 10687–10695. <https://doi.org/10.1021/am502427s>

14. Kutasov V. A. Shifting the maximum figure-of-merit of $(Bi, Sb)_2(Te, Se)_3$ thermoelectrics to lower temperatures. In: *Thermoelectrics Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press; 2005. 37-18–37-31. <https://doi.org/10.1201/9781420038903.ch37>

15. Заргарова М. И., Мамедов А. Н., Аждарова Д. С., Ахмедова (Велиев) Дж. А., Абилов Ч. И. *Неорганические вещества, синтезированные и исследованные в Азербайджане*. Справочник. Баку: Элм.; 2004. 462 с.

16. Yamashita O., Yamauchi H., Yamaguchi Y. et al. Magnetic properties of the system $CuCr_2Se_4 \cdot xYx$ ($Y=C1, Br$). *Journal of the Physical Society of Japan*. 1979;47(2): 450–454. <https://doi.org/10.1143/jpsj.47.450>

17. Koroleva L. I., Lukina L. N., Busheva E. V., Shabunina G. G., Aminov T. G. $CuCr_2Se_4 \cdot xSb_x$: a new magnetic semiconductor. *Inorganic Materials*. 1999;35(12): 1217–1220. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13328594>

18. Aminov T. G., Arbuzova T. I., Busheva E. V., Shabunina G. G. $CuCr_{2-x}SSb_xSe_4$ and $Cu_{1-y}Sb_yCr_2Se_4$

solid solution. *Inorganic Materials*. 2000;36(2): 114–118. <https://doi.org/10.1007/BF02758008>

19. Nakatani I., Nose H., Masumoto K. Magnetic properties of $CuCr_2Se_4$ single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1978;39(7): 743–749. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(78\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0022-3697(78)90008-2)

20. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*. Справочник. М.: Изд. Наука. 1979. 339 с.

21. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Справочник. В 3-х т. / Под. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение. 1997. 1023 с.

Информация об авторах

Алиев Имир Ильяс оглы, д. х. н., профессор, руководитель лаборатории, Институт катализа и неорганической химии им. акад. М. Ф. Нагиева Национальной академии наук Азербайджана (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-7694-1400>
aliyevimir@rambler.ru

Мамедов Эльман Идрис оглы, д. х. н., профессор, Азербайджанский технический университет (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0009-0000-8948-7019>
kimya@aztu.edu.az

Юсубов Фехраддин Вели оглы, д. х. н. профессор, заведующий кафедрой Азербайджанский технический университет (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-3496-8947>
yusubov@asoju.edu.az

Масиева Ламан Фахири кызы, аспирантка, Азербайджанский технический университет (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-9908-7294>
leman_mesiyeva@mail.ru

Гашимов Халиг Мамед оглы, к. х. н., доцент, Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-2208-2655>
xaliq1949@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 15.11.2023; опубликована онлайн 25.06.2024.