



## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546:815, 681, 659, 22-23

Научная специальность ВАК – 1.4.1. Неорганическая химия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13293>

## Фазовые равновесия и некоторые свойства твердых растворов систем $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{--SmGa}_2\text{S}_4$ и $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SmGa}_2\text{Se}_4$

О. М. Алиев<sup>1</sup>✉, Д. С. Аждарова<sup>1</sup>, Р. М. Агаева<sup>2</sup>, В. М. Рагимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт катализа и неорганической химии им. академика М. Нагиева,  
пр. Г. Джавида, 113, Баку AZ-1143, Азербайджан

<sup>2</sup>Азербайджанский государственный педагогический университет,  
ул. У. Гаджибейли, 68, Баку AZ-1000, Азербайджан

### Аннотация

**Цель статьи:** В связи с переходом к зеленой энергетике поиск, синтез, исследование альтернативных источников и материалов для них имеют большую перспективу. Одним из методов получения таких перспективных материалов является изучение фазовых диаграмм между изоструктурными соединениями. В связи с этим методами физико-химического анализа (ДТА, РФА, измерения микротвердости и плотности) изучены фазовые равновесия в системах  $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{--SmGa}_2\text{S}_4$  и  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SmGa}_2\text{Se}_4$  и построены их диаграммы состояния.

**Выводы:** Установлено, что указанные системы квазибинарные и характеризуются образованием непрерывных областей твердых растворов типа замещения. Твердые растворы  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{Se}_4$  кристаллизуются в орторомбической сингонии и относятся к структурному типу  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$ . Параметры элементарных ячеек их изменяются в пределах:  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$   $a = 20.745 \div 20.706$ ;  $b = 20.464 \div 20.380$ ;  $c = 12.236 \div 12.156$ ;  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{Se}_4$   $a = 21.722 \div 21.782$ ;  $b = 21.202 \div 21.35$ ;  $c = 12.3047 \div 12.390$  Å; пр. гр.  $Fddd$ ,  $z = 32$ . Изучены некоторые физико-химические свойства твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{Se}_4$ .

**Ключевые слова:** система, твердый раствор, элементарная ячейка, параметр решетки, фазовая диаграмма

**Для цитирования:** Алиев О. М., Аждарова Д. С., Агаева Р. М., Рагимова В. М. Фазовые равновесия и некоторые свойства твердых растворов систем  $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{--SmGa}_2\text{S}_4$  и  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SmGa}_2\text{Se}_4$ . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(4): 565–572. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13293>

**For citation:** Aliev O. M., Azhdarova D. S., Agayeva R. M., Ragimova V. M. Phase equilibria and some properties of solid solutions of  $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{--SmGa}_2\text{S}_4$  and  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SmGa}_2\text{Se}_4$  systems. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(4): 565–572. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13293>

✉ Озбек Мисирхан Алиев, e-mail: [ozbek.aliyev41@gmail.com](mailto:ozbek.aliyev41@gmail.com)

© Алиев О. М., Аждарова Д. С., Агаева Р. М., Рагимова В. М., 2025



## 1. Введение

Современный научно-технический прогресс во многом обязан применением функциональных материалов, имеющие уникальные свойства. Все это требует систематического поиска, синтеза, дизайна и всестороннего исследования их фундаментальных свойств. В этом аспекте изучение фазовых диаграмм между изоструктурными соединениями, образующие непрерывные ряды твердых растворов, дает возможность управлять функциональными свойствами полученного материала [1–7].

В настоящее время исследование альтернативных энергетических источников во всем мире является самым приоритетным направлением научных исследований. Решение этого вопроса во многом связано с созданием новых эффективных преобразователей энергии, особенно, термоэлектрических и фотовольтаических материалов [8–15].

Исходные соединения ( $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ ,  $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$ ) довольно подробно изучены [16–25]. По данным [17] соединение  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  образуется по перитектической реакции  $\text{ж} + \text{PbS} \leftrightarrow \text{PbGa}_2\text{S}_4$  и плавится инконгруэнтно при 1203 К, кристаллизуется в ромбической сингонии с параметрами элементарной ячейки:  $a = 20.44$ ;  $b = 20.64$ ;  $c = 12.09$  Å, пр. гр.  $Fddd$ ,  $z = 32$ ,  $d = 4.94$  г/см<sup>3</sup> и относится к структурному типу  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$ . По данным работы [13]  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  плавится конгруэнтно при 1163 К с параметрами решетки:  $a = 20.706$ ;  $b = 20.380$ ;  $c = 12.156$  Å. Анализ литературных данных [13, 16–18] показал, что кроме одной работы [18], все остальные авторы утверждают, что соединение  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  плавится конгруэнтно. Поэтому в настоящем исследовании мы основывались на результатах последних работ [13]. Результаты синтезированного и исследованного нами соединения  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  подтвердили конгруэнтный характер его плавления, что совпадает с [16, 17].  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  является широкозонным полупроводником и характеризуется полифункциональными свойствами: лазерными [13], парамагнитными [26], оптически активными свойствами [27–29].  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  также плавится конгруэнтно при 1050 К [19–21] и относится к структурному типу  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$  ( $a = 21.72$ ;  $b = 21.20$ ;  $c = 12.30$ ).

Соединение  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  плавится конгруэнтно при температуре 1750 К [23–25], кристаллизуется в орторомбической сингонии с параметрами решетки:  $a = 20.745$ ;  $b = 20.464$ ;  $c = 12.236$  Å, пр.

гр.  $Fddd$ ,  $z = 32$ ,  $\text{H}\mu = 2800$ ,  $d = 4.28$  г/см<sup>3</sup>.  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  полупроводник с шириной запрещенной зоны  $\Delta E = 2.20$  эВ [23, 24]. В отличие от  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  соединение  $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  плавится инконгруэнтно при 1200 К и относится к структурному типу  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$  ( $a = 21.700$ ;  $b = 21.23$ ;  $c = 12.39$  Å),  $\text{H}\mu = 2700$ ;  $d = 6.02$  г/см<sup>3</sup>,  $\Delta E = 1.40$  эВ [1, 25].

Поскольку тии- и селеногаллаты свинца и самария обладают лазерными, оптическими и люминесцентными свойствами, изучение химического взаимодействия между ними обещает получение материалов с полифункциональными свойствами.

Цель настоящей работы состоит в изучении фазового равновесия в системах  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  и в исследовании физико-химических свойств твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{S}_4(\text{Se}_4)$ .

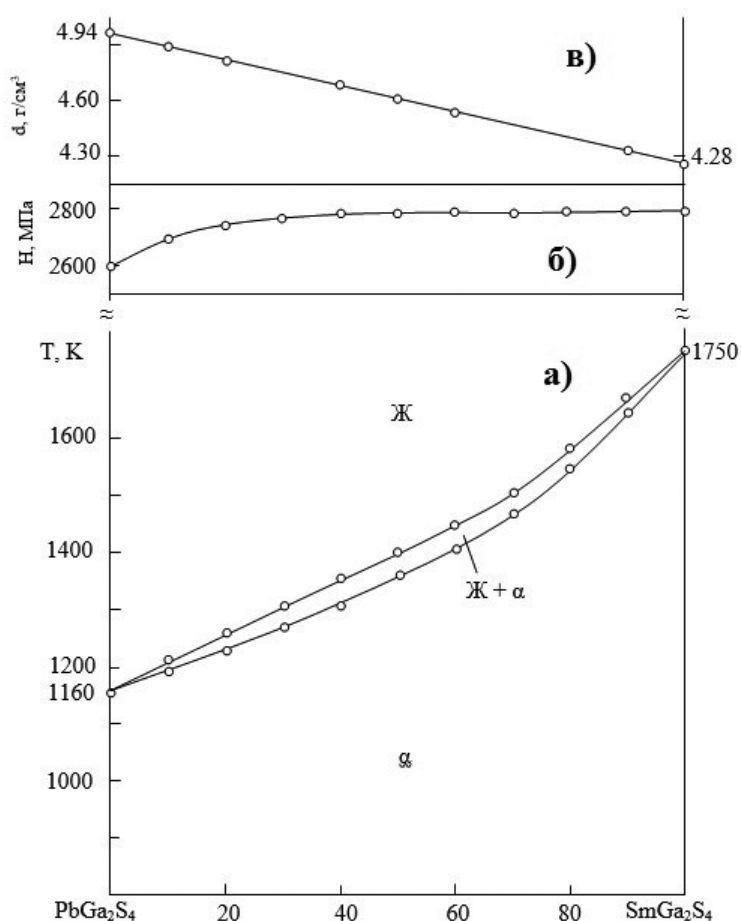
## 2. Экспериментальная часть

Сплавы получили расплавлением тройных сульфидов или селенидов свинца и самария ( $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ ,  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$ ) в вакуумированных кварцевых ампулах при температуре 1300–1400 К. Исходные тройные сульфиды и селениды свинца и самария синтезировали сплавлением особо чистых элементарных компонентов. Расплавленные сплавы выдерживали при максимальной температуре (1300–1400 К) 30–40 минут и после этого охлаждали до 1000 К и выдерживали при этом режиме в течение 1200 часов для гомогенизации. В результате были получены плотные сплавы желтого цвета, пригодные для физико-химического анализа.

Сплавы (образцы массой 0.1–0.3 г) исследовались посредством дифференциально-термического анализа (ДТА) на установке Netzsch STA 449 F3 (платин–платин/родиевые термодпары, в интервале температур от комнатной до ~ 1450 К со скоростью нагревания 10 К·мин<sup>–1</sup>), рентгенофазового анализа (РФА, D2 PILSENER фирмы Bruker,  $\text{CuK}\alpha$  излучение), измерения микротвердости (на установке PMT-3) и определения плотности (определяли пикнометрическим методом, наполнителем служил толуол). Погрешность ДТА, РФА, микротвердости и плотности составляла:  $\pm 3$  К,  $\pm 0.001$  Å,  $\pm 3$  МПа,  $\pm 0.3$  г/см<sup>3</sup> соответственно.

## 3. Результаты и их обсуждение

Диаграмма состояния системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ , построенная по данным физико-химического анализа, приведена на рис. 1а.



**Рис. 1.**  $T$ - $x$  фазовая диаграмма системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  (а), зависимость микротвердости (б) и плотности (в) от состава

Как видно из рис. 1а, система  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  характеризуется полным совместным растворением компонентов в жидком и твердом состояниях и относится к фазовым диаграммам первого типа по Розебому [30]. Экстремальная точка на кривых ликвидуса и солидуса отсутствует, температура их монотонно изменяется между температурами плавления исходных тройных сульфидов ( $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  и  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ ).

Максимальная разница температур между точками на линиях ликвидуса и солидуса составляет 25 K (см. рис. 1а). Поэтому в этой системе можно было ожидать общую экстремальную точку (min или max) на кривых ликвидуса и солидуса. С другой стороны, следует отметить, что диаграммы состояния первого типа по Розебому обычно реализуются в тех системах, в которых и в жидких, и в твердых состояниях термодинамические функции смешиваемости составляют очень низкие или очень близкие друг к другу значения. На рис. 1б и 1в представлены зависимости ми-

кротвердости и плотности от состава системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ .

Рентгенофазовый анализ образцов, отожженных при 1000 K после термической обработки показывает, что все образцы системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ , в том числе исходные сульфиды, имеют дифракционные линии, характерные орторомбической сингонии (рис. 2). Это показывает, что при 1000 K в системе  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  между исходными соединениями образуются непрерывные ряды твердых растворов ромбической структуры. На рис. 3 приведена зависимость параметров решетки от состава, которая имеет линейный характер, что действительно подтверждает образование непрерывного ряда твердых растворов. На основе компьютерной программы TOPAZ-3 определены структурный тип и вычислены параметры элементарных ячеек твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ , которые приведены в табл. 1.

В табл. 1 приведены также результаты ДТА после термической обработки при 1000 K. На основании этих результатов, а также учиты-

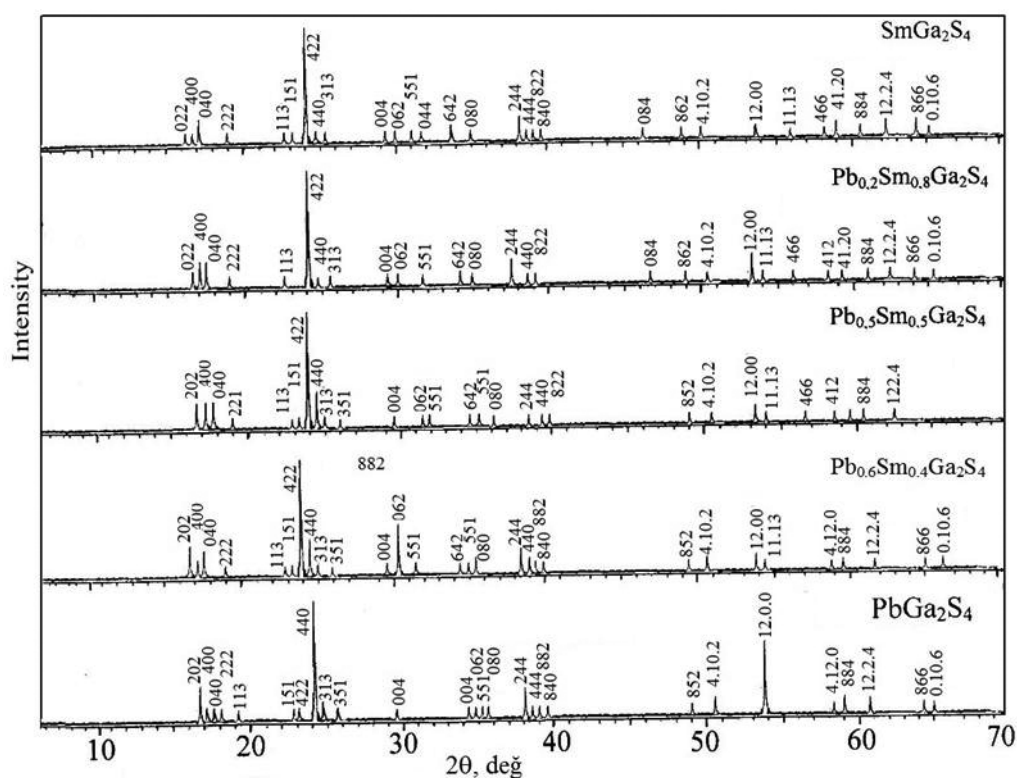


Рис. 2. Дифрактограммы сплавов системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$

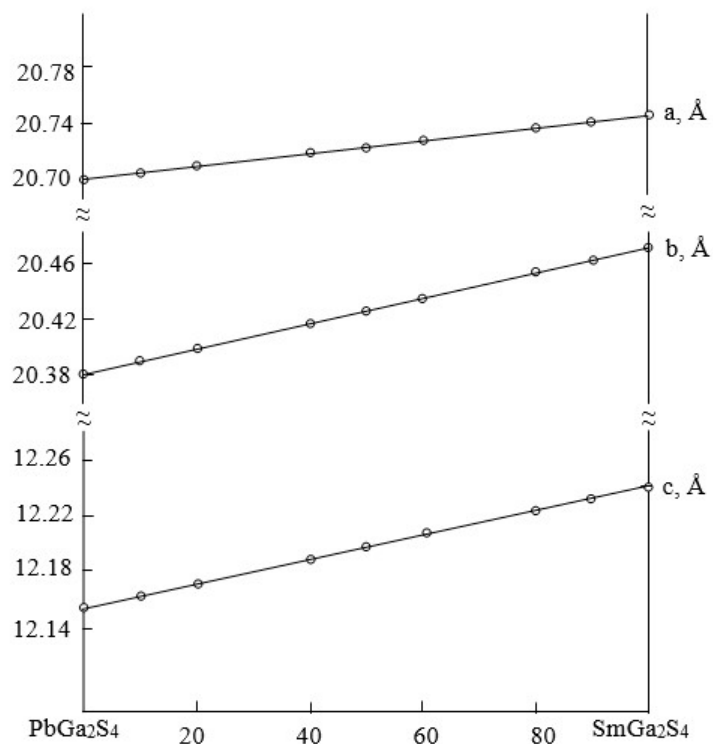


Рис. 3. Зависимость параметров решетки от состава твердых растворов системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$

**Таблица 1.** Результаты ДТА, РФА, микротвердости и плотности сплавов системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$ 

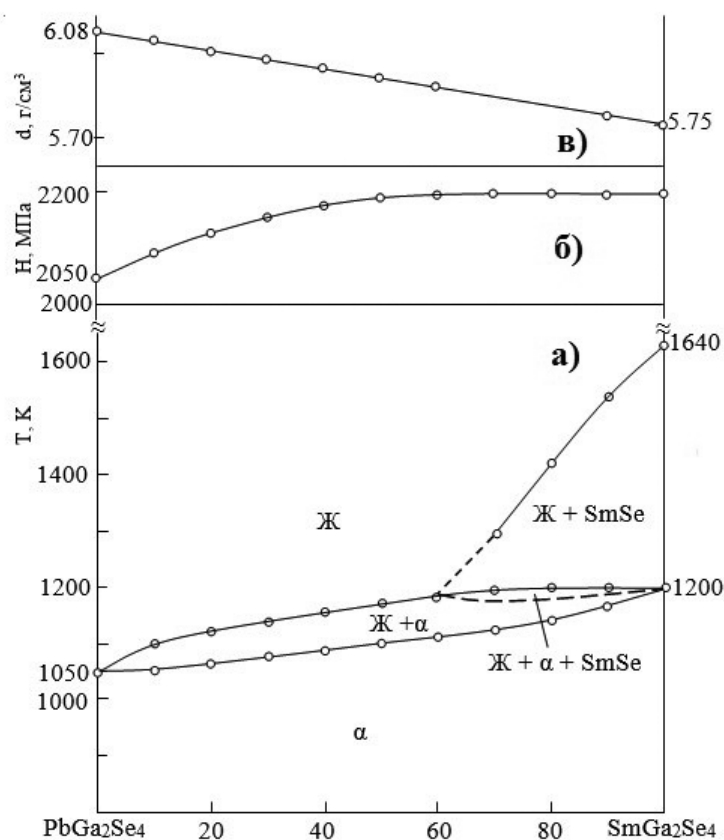
Состав, мол. % $\text{SmGa}_2\text{S}_4$	Термич. эффекты, К	Параметры решетки, Å			Пр. гр.	Z	$H_v$ , МПа	$d_{\text{пик}}$ , г/см <sup>3</sup>
		a	b	c				
$\text{PbGa}_2\text{S}_4$	1163	20.706	20.380	12.156	Fddd	32	2650	4.94
10	1205, 1225	20.708	20.378	12.164	Fddd	32	2700	4.85
20	1230, 1260	20.712	20.384	12.180	Fddd	32	2750	4.70
40	1320, 1350	20.716	20.420	12.198	Fddd	32	2760	4.56
50	1390, 1410	20.728	20.425	12.218	Fddd	32	2780	4.48
60	1455, 1480	20.732	20.440	12.220	Fddd	32	2790	4.36
80	1575, 1610	20.736	20.460	12.226	Fddd	32	2800	–
90	1666, 1680	20.740	20.462	12.234	Fddd	32	2800	4.30
$\text{SmGa}_2\text{S}_4$	1750	20.745	20.464	12.236	Fddd	32	2800	4.28

вая результаты РФА, построена  $T$ - $x$  фазовая диаграмма системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  (рис. 1а).

Таким образом, в жидких и твердых растворах отклонение от идеальности в замещении свинца самарием очень низкая.

Как видно из рис. 4а, система  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  является частично квазибинарной. Вследствие инконгруэнтного плавления  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  в сплавах вблизи этого соеди-

нения квазибинарность системы нарушается. Поэтому в интервале концентрации 60–100 мол. %  $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  при высокой температуре наблюдается образование трехфазной области, однако при низкой температуре образуются непрерывные ряды твердых растворов типа  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$ . В интервале концентрации 0–40 мол. %  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  из жидкости первично выпадают кристаллы  $\alpha$ -твердых раство-


**Рис. 4.**  $T$ - $x$  фазовая диаграмма системы  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{S}_4$  (а), зависимость микротвердости (б) и плотности (в) от состава



ров. В области же с большей концентрацией  $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  кристаллизуется соединение  $\text{SmSe}$ . Как результат моновариантной перитектической реакции  $\text{ж} + \text{SmSe} \leftrightarrow \alpha$  в этой области ниже температуры 1200 К должна образоваться трехфазная область  $\text{ж} + \text{SmSe} + \alpha$ . Однако это поле экспериментально не зафиксировано из-за узкого температурного интервала и отмечено пунктиром.

Ликвидусу системы  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  соответствуют два поля, отвечающие первичной кристаллизации соединения  $\text{SmSe}$  и  $\alpha$ -фазы.

Результаты РФА, зависимости параметров решетки от состава (рис. 5), а также измерения микротвердости и плотности (рис. 4б, в) согласуются с фазовой диаграммой системы  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$ .

В системе  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  исходные соединения и все сплавы имеют аналогичные дифракционные картины с небольшим смещением рефлексов. Изменение параметров орторомбической решетки твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ga}_2\text{Se}_4$  в зависимости от состава, а также результаты ДТА сплавов приведены в табл. 2.

#### 4. Заключение

Методами физико-химического анализа впервые изучены фазовые равновесия в сис-

темах  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  и  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  и построены их диаграммы состояния. Установлено, что система  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  является квазибинарной и характеризуется образованием непрерывного ряда твердых растворов. Система  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$  является частично квазибинарной, при низкой температуре (в субсолидусе) исходные компоненты полностью растворяются друг в друге. Установлено, что твердые растворы кристаллизуются в орторомбической сингонии и относятся к структурному типу  $\text{EuGa}_2\text{S}_4$ .

#### Заявленный вклад авторов

О. М. Алиев – научное руководство, редактирование текста. Д. С. Аждарова – концепция исследования, обсуждение результатов, участие в обработке полученных результатов, написание статьи. Р. М. Агаева – обработка полученных результатов и участие в написании статьи. В. М. Рагимова – поиск литературы и участие в проведении экспериментов.

#### 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.

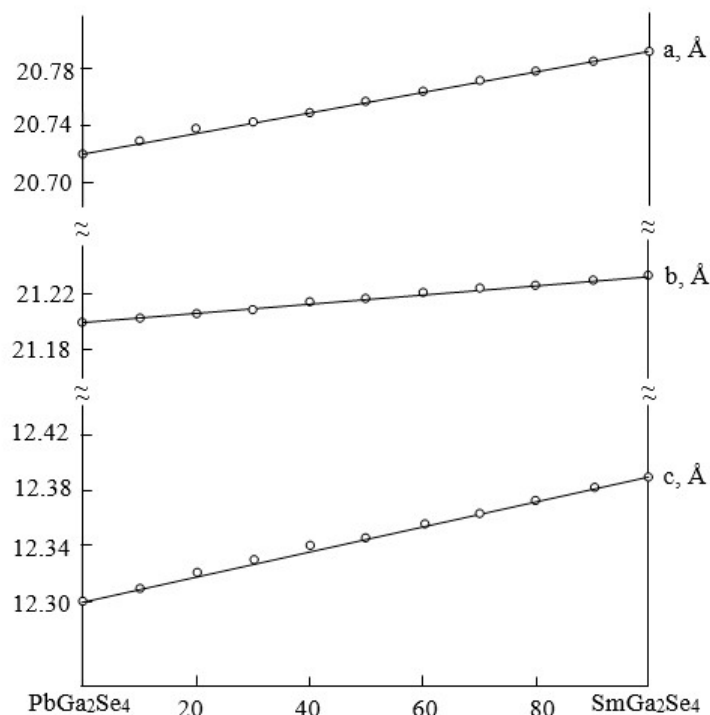


Рис. 5. Зависимость параметров решетки от состава твердых растворов системы  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$

**Таблица 2.** Результаты ДТА, РФА, микротвердости и плотности сплавов системы  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ – $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$ 

Состав, мол. % $\text{SmGa}_2\text{Se}_4$	Термич. эффекты, К	Параметры решетки, Å			$H_v$ , МПа	$d_{\text{пик}}$ , г/см <sup>3</sup>
		$a$	$b$	$c$		
$\text{PbGa}_2\text{Se}_4$	1150	21.722	21.202	12.304	2050	6.08
10	1060, 1090	21.724	21.204	12.310	2100	5.90
20	1065, 1120	21.735	21.205	12.320	2140	5.85
30	1070, 1140	21.740	21.207	12.330	2180	5.84
40	1080, 1160	21.748	21.208	12.338	2180	5.82
50	1100, 1180	21.752	21.210	12.344	2190	5.80
60	1110, 1190	21.758	21.218	12.358	–	5.78
70	1120, 1200, 1390	21.760	21.220	12.364	–	–
80	1140, 1210, 1470	21.775	21.224	12.378	2200	–
90	1170, 1210, 1570	21.780	21.225	12.384	2200	5.77
$\text{SmGa}_2\text{Se}_4$	1200, 1640	21.782	21.235	12.390	2220	5.75

**Список литературы**

1. Рустамов П. Г., Алиев О. М., Эйнуллаев А. В., Алиев И. П. *Хальколантанаты редких элементов*. М.: Наука, 1989, 284 с.
2. Mammadov F. M., Babanly D. M., Amiraslanov I. R., Tagiev D. B., Babanly M. B. System  $\text{FeS}$ – $\text{Ga}_2\text{S}_3$ – $\text{In}_2\text{S}_3$ . *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2021;66(10): 1533. <https://doi.org/10.1134/S0036023621100090>
3. Amiraslanova A. J., Babanly K. N., Imamaliyeva S. Z., Yusibov Y. A., Babanly M. B. Phase equilibria in the  $\text{Ag}_8\text{SiSe}_6$ – $\text{Ag}_8\text{SiTe}_6$  system and characterization of solid solutions  $\text{Ag}_8\text{SiSe}_{1-x}\text{Te}_x$ . *Applied Chemical Engineering*. 2023;6(2): 1. <https://doi.org/10.24294/ace.v6i2.2162>
4. Мамедов Ф. М., Имамалиева С. З., Джафаров Я. И., Бахтиярлы И. Б., Бабанлы М. Б. Фазовые равновесия в системе  $\text{MnTe}$ – $\text{MnGa}_2\text{Te}_4$ – $\text{MnIn}_2\text{Te}_4$ . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 335–344. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9856>
5. Kondrotas R., Colina M., Guc M., ... Saucedo E. Towards In-reduced photovoltaic absorbers: evaluation of zinc-blende  $\text{CuInSe}_2$ – $\text{ZnSe}$  solid solution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017;160: 26. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.023>
6. Skoug E. J., Cain J. D., Morelli D. T. High thermoelectric figure of merit the  $\text{Cu}_3\text{SbS}_4$ – $\text{Cu}_3\text{SbSe}_4$  solid solution. *Applied Physics Letters*. 2011;98(26): 261911. <https://doi.org/10.1063/1.3605246>
7. Singh U. P., Patra S. P. Progress in polycrystalline thin-film  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  Solar Cells. *Internationals Journal of Photoenergy*. 2010; 201(1): 1. <https://doi.org/10.1155/2010/468147>
8. Navratil J., Kucek V., Plechacek T. Thermoelectric properties of  $\text{Cu}_2\text{HgSnSe}_4$ – $\text{Cu}_2\text{HgSnTe}_4$  solid solution. *Journals Electronic Materials*. 2014;43(10): 3719. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3075-8>
9. Chand S., Sharma P. Synthesis and characterization of Ag-chalcogenide nano particles for possible applications in photovoltaics. *Materials Science-Poland*. 2018;36(3): 375. <https://doi.org/10.2478/msp-2018-0064>
10. Orokov M. M., Klimovskikh I. I., Bentmann H., ... Chulkov E. V. Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator. *Nature*. 2019;576: 416. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1840-9>
11. Shevelkov A. V. Chemical aspects of the thermoelectric materials engineering. *Russian Chemical Review*. 2008;77(1): 19. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n01ABEH003746>
12. Wang Y., Zhao Y., Ding X., Qiao L. Recent advances in the electrochemistry of layered post transition metal chalcogenids nanomaterials for hydrogen evolution reaction. *Journal of Energy Chemistry*. 2021;60(1): 451. <https://doi.org/10.1016/j.jchem.2021.01.021>
13. Бадиков Д., Бадиков В., Дорошенко М., Финтисова А., Шевырдяева Г. Низкофононный кристалл тигаллата свинца в качестве матрицы для лазеров среднего ИК диапазона. *Фотоника*. 2008;4: 24. Режим доступа: [https://www.photonics.su/files/article\\_pdf/2/article\\_2631\\_62.pdf](https://www.photonics.su/files/article_pdf/2/article_2631_62.pdf)
14. Marshall J. M., Dimova-Malinovska D. (Eds.). *Photovoltaic and photoactive materials, properties, technology and applications*. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry (NAII, volume 80). 2002. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0632-3>
15. *Chalcogenides advances in research and applications* / P. Woodrow (Ed.). Nova Science Publ.; 2018, 111 p.
16. Головей В. М., Оболенчик В. А., Головей М. И. Система  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ – $\text{PbS}$ . *Журнал неорганической химии*. 1981;26(7): 1970–1978.
17. Chilout A., Mazurier A., Guittaed M. Systeme  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ – $\text{PbS}$ . Diagramma de phase, etude cristallographique. *Materials Research Bulletin*. 1979;14(9): 1119. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(79\)90205-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(79)90205-8)
18. Eholie R., Kom I. K., Flahaut J. Diagram de phase  $\text{PbS}$ – $\text{Ga}_2\text{S}_3$  system. *Acad. Sci. Paris, ser. C*. 1969;268: 700–702.
19. Klee N., Schofer H. Zur kennznis von  $\text{PbAl}_2\text{Se}_4$  and  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ . *Materials Research Bulletin*. 1980;15(7): 1033. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90230-5](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90230-5)
20. Sosovska S. M., Oleksyuk I. D., Parasyuk O. V. The  $\text{CdSe}$ – $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ – $\text{PbSe}$  system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;453: 115. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.11.051>

21. Bellagra H. K., Kogut T. M., Piskach V. V. Component interaction in the quasi-ternary system  $\text{PbSe}$ – $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ – $\text{GeSe}_2$ . *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2022;44(1): 3. <https://doi.org/10.1007/s11669-022-01017-9>
22. Chen W.-F., Liu B.-W., Jiang X.-M., Guo G.-C. Infrared nonlinear optical performances of a new sulfide  $\beta$ - $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ . *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;905: 164090. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164090>
23. Алиев О. М., Ахмедова Н. Р. Физико-химические и фотоэлектрические свойства кристаллов тетратиоиндатов и тетратиогаллатов самария и твердых растворов на их основе. *Азербайджанский химический журнал*. 2010;3: 67.
24. Алиев О. М., Алиева О. А., Эйнуллаев А. В. Тройная система  $\text{Sm}$ – $\text{Ga}$ – $\text{S}$ . *Журнал неорганической химии*. 1993;38(8): 1418.
25. Алиев О. М., Алиева О. А., Алиев И. П. Синтез и физико-химические свойства халькогаллатов и халькоиндатов самария. *Неорганические материалы*. 1993;29(6): 831. <https://doi.org/10.1002/chin.199348031>
26. Асатрян Г. Р., Бадиков В. В., Крамущенко Д. Д., Храмцов В. А. ЭПР ионов  $\text{Dy}^{3+}$  в монокристаллах тиогаллата свинца. *Физика твердого тела*. 2012;54(6): 1164–1167. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20322485>
27. Каменщиков В. Н., Сусликов Л. М. Расчет оптических свойств кристалла  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ . *Оптика и спектроскопия*. 2014;116(4): 606–608. <https://doi.org/10.7868/s0030403414040138>
28. Badikov V., Badikov D., Doroshenko M., Panyutin V., Chizhikov V. I., Shevyrdyaeva G. Optical properties of lead thiogallate. *Optical Materials*. 2008;31(2): 184. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2008.03.001>
29. Basiev T. T., Doroshenko M. E., Osiko V. V., Shevyrdyaeva G. S. Qualitative improvement in the lasing performance of  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ :  $\text{Dy}^{3+}$  crystals through  $\text{Na}^+$  doping. *Quantum Electronics*. 2010;40(7): 596–598. <https://doi.org/10.1070/QE2010v040n07ABEH014351>
30. Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. *Основы физико-химического анализа*. М.: Изд-во Наука;1976. 114–116. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-osnovyfiziko-himicheskogoanaliza.pdf>

### Информация об авторах

Алиев Озбек Мисирхан, д. х. н., профессор, гл. н. с., Институт катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-6411-108X>  
 ozbek.aliyev41@gmail.com

Аждарова Дилбар Самад, д. х. н., доцент, гл. н. с., Институт катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-8119-733X>  
 zangi1941@mail.ru

Агаева Рейхан Миргусейн, к. х. н., доцент, Азербайджанский государственный педагогический университет (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0000-0002-2924-3204>  
 agayeva.reyhan@mail.ru

Рагимова Валида Мирза, к. х. н., доцент, в. н. с., Институт катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0009-0008-9157-1592>  
 Valide.rehimova1945@gmail.com

Поступила в редакцию 07.01.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2025; принята к публикации 15.04.2025; опубликована онлайн 25.12.2025.