

УДК 546.72, 682.815+22
DOI: 10.17223/24135542/16/4

У.А. Гасанова

*Институт катализа и неорганической химии им. академика М.Ф. Нагиева
Национальной АН Азербайджана (Республика Азербайджан, Баку)*

Диаграмма состояния системы $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$. Получение и некоторые свойства четверного соединения $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$

Методами физико-химического анализа впервые изучены фазовые равновесия в системе $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ и построена диаграмма ее состояния. Установлено, что система $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ является квазибинарным сечением квазитройной системы $\text{FeS-In}_2\text{S}_3\text{-PbS}$ и характеризуется образованием четверного соединения состава $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ ($\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$). Соединение $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ плавится конгруэнтно при 1150 К и является фазой переменного состава. Растворимость на основе троилитной модификации (FeS) при 300 К составляет 1,0 мол. %, на основе четверного соединения растворимость охватывает от 35 до 46 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, а растворимость на основе $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ составляет 10 мол. % FeS . Установлено, что соединение $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ с исходными сульфидами образует эвтектическое равновесие.

Ключевые слова: диаграмма состояния, фазовое равновесие, соединение, эвтектика, растворимость, рентгенографический анализ.

Введение

Из литературных данных известно, что многокомпонентные сульфидные соединения, особенно содержащие магнитные (FeGa_2S_4 , $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$, FeIn_2S_4 и др.) ионы, являются функциональными материалами и используются в изготовлении магнитооптических приборов [1–5].

В системе $\text{PbS-In}_2\text{S}_3$ образуются тройные соединения состава PbIn_2S_4 и $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ [5]. Оба соединения плавятся конгруэнтно при температуре 1163 и 1178 К соответственно, образуя между собой и исходными сульфидами эвтектики. По данным [5], соединение $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ кристаллизуется в моноклинной сингонии (параметры кристаллической решетки $a = 27,632$; $b = 3,863$; $c = 15,705 \text{ \AA}$; $\beta = 95,9$; $z = 2$, пр. гр. c^2/m), а PbIn_2S_4 относится к ромбической сингонии с параметрами кристаллической решетки $a = 11,688$; $b = 3,8528$; $c = 13,763 \text{ \AA}$; $Z = 4$, пр. гр. Pnma .

Цель настоящей работы – определение фазового равновесия в системе $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ и изучение некоторых физико-химических свойств образующихся фаз переменного состава.

Экспериментальная часть

В качестве исходных веществ для синтеза сплавов $(\text{FeS})_{1-x}(\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21})_x$ были взяты элементарные компоненты особой чистоты: индий марки ВЗ, сера «ОСЧ» марки В4, железо карбонильное В4 и свинец марки С000.

Синтез образцов для исследования проводили в откачанных кварцевых ампулах при температуре 1 250–1 300 К. Следует отметить, что сплавы, содержащие >70 мол.% FeS из-за растрескивания ампулы и увеличения объёма получали в двустенных кварцевых ампулах. После 45-минутного удержания ампулы при максимальной температуре, образцы охлаждали со скоростью 40 °/м и отжигали при 600–400 К. После такой термообработки удалось получить компактные образцы, пригодные для физико-химического анализа.

Следует отметить, что четверные сплавы получены сплавлением из исходных сульфидов (FeS, Pb₆In₁₀S₂₁) ампульным методом при 1 350–1 400 К. В этом случае в качестве исходного была взята троилитная модификация FeS, полученная нами по специальной методике [8–9]. Всего было синтезировано 20 сплавов различного состава, включая исходные компоненты (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

**Результаты ДТА, РФА и металлографических измерений
для сплавов системы FeS-Pb₆In₁₀S₂₁**

Состав, мол. %		Тепловые эффекты нагрева, К	Плотность, г/см ³	Микротвердость, МПа	Фазовый со- став
FeS	Pb ₆ In ₁₀ S ₂₁				
100	0,0	1 400	4,84	2 500 ----	α (однофазн. FeS)
97	3,0	1270, 1 340	4,85	2 550 ----	двухфазн. (α+γ)
95	5,0	410, 560, 1 160, 1 280	4,85	2 550 ----	α- FeS+γ
90	10	410, 560, 980, 1 275	4,90	2 550 ----	α- FeS+γ
85	15	410, 560, 980, 1 070	4,96	2 550 ----	α- FeS+γ
80	20	420, 560, 980	5,00	2 550 ----	α- FeS+γ
75	25	410, 560, 480, 1 050	5,16	2 550 ----	α- FeS+γ
70	30	400, 560, 1 000, 1 150	5,38	эвтектика	α- FeS+γ
65	35	1 080, 1 130	5,75	2 550	α- FeS+γ
60	40	1 150	5,893	2 850	γ-(однофазн.)
55	45	1 100, 1 140	5,870	2 950	γ
50	50	1030, 1 115	5,82	2 950	двухфазн. (α+γ)
40	60	950, 1 050	5,76	2 950	γ+σ
35	65	950, 1 000	5,70	3 350	γ+σ
30	70	950	5,64	эвтектика	γ+σ
20	80	950, 1 060	5,40	----3 350	γ+σ
15	85	950, 1 100	5,42	----3 350	γ+σ
10	90	1 010, 1 135	4,76	----3 350	однофазн. (σ)
5,0	95	1 040, 1 165	4,65	----3 280	σ
0,0	100	1 178	4,62	----3 200	однофазн. (σ)

Синтезированные сплавы изучали методами физико-химического анализа, дифференциального термического анализа (ДТА) (термоанализатор НТР-73, термопара хромель-алюмелевая, скорость нагрева 7 °/мин, этало-

ном служил прокаленный Al_2O_3). Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) (CuK_α -излучение, Ni-фильтр), микроструктурный анализ выполняли на микроскопе типа МИМ-7, а микротвердость определяли на микротвердомере марки PMT-3.

Результаты и их обсуждение

По данным дифференциального термического анализа в системе $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ протекает сложное химическое взаимодействие. На термограммах сплавов системы имеются по два тепловых эффекта (за исключением сплавов, содержащих 5–30 мол.% $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, который имеет четыре тепловых эффекта, связанных с фазовым переходом сульфида железа), относящиеся к ликвидусу и солидусу.

Микроскопическое исследование полированных и протравленных образцов (в качестве травителя использовали разбавленный раствор азотной кислоты) показало, что образцы, содержащие 0÷1,0; 35÷46 и 90–100 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, однофазные, а все остальные промежуточные сплавы являются двухфазными.

Диаграмма состояния системы $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, построенная по данным физико-химического анализа, приведена на рис. 1.

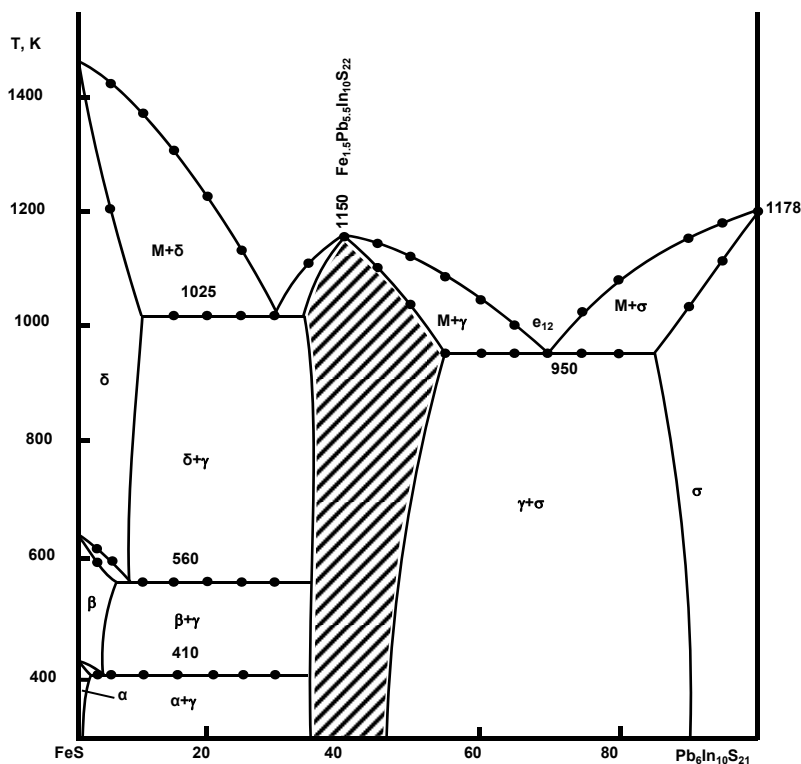


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}$

Как видно из рис. 1, система является квазибинарным сечением и характеризуется образованием четверного соединения при соотношении компонентов 2:3. Рациональный состав соединения $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{10}\text{S}_{44}(\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22})$. Это соединение плавится конгруэнтно при температуре 1150 К и является фазой переменного состава. Область гомогенности соединения $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$ в интервале концентрации 35 и 56 мол. % $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$. Как видно из рис. 1, четверное соединение делит систему $\text{FeS}-\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ на две подсистемы: $\text{FeS}-\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ и $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22} - \text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$. Как видно, обе подсистемы относятся к эвтектическому типу. Координаты эвтектик: 20 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, $T = 980\text{K}$ и 70 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$, $T = 950\text{K}$.

Ликвидус системы состоит из трех ветвей первичной кристаллизации фаз $\delta\text{-FeS}$, $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$. Область первичной кристаллизации $\delta\text{-FeS}$ охватывает интервал концентрации 0–20 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ и $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$. Область первичной кристаллизации α -фазы расположена в интервале концентрации 70–100 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$.

Как видно из T-X диаграммы состояния на рис. 1, при низкой температуре (360 К) между компонентами образуются ограниченные области твердых растворов. По результатам микроскопического анализа на основе $\alpha\text{-FeS}$ образуются 1,0 мол. %, на основе тройного соединения ($\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$) 10 мол. % твердых растворов.

Под влиянием второго компонента температуры фазовых переходов $\alpha\text{-FeS} \leftrightarrow \beta\text{-FeS} \leftrightarrow \delta\text{-FeS}$ уменьшаются и происходят при 410 и 560 К, соответственно. Указанные фазовые переходы относятся к эвтектоидным типам.

Образование в системе $\text{FeS}-\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ новой фазы подтверждено и данными РФА (см. табл. 2, рис. 2).

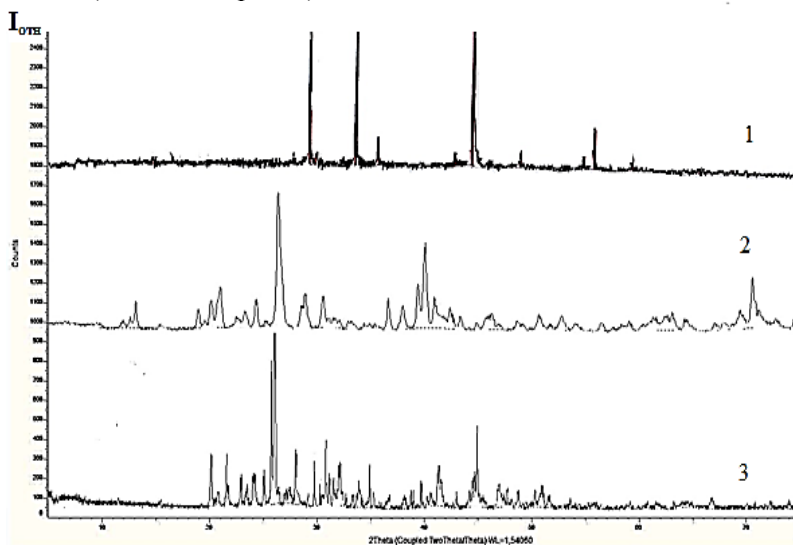


Рис. 2. Дифрактограмма сплавов системы $\text{FeS}-\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$:
1 – FeS ; 2 – $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$; 3 – $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$

Таблица 2

Рентгенограмма троилита (α -FeS) тройного соединения и новой фазы ($Fe_{1,5}Pb_{5,5}In_{10}S_{22}$) для сравнения

α -FeS		$Fe_{1,5}Pb_{5,5}In_{10}S_{22}$		$Pb_6In_{10}S_{21}$	
d-эксп.	I/J ₀	d-эксп.	I/J ₀	d-эксп.	I/J ₀
5,15858	3,2	3,4955	5	13,6423	5
4,72840	3,5	4,6638	8	13,7474	5
2,98650	75,4	4,5243	20	9,8469	5
2,93453	4,6	4,2721	5	7,8205	5
2,66088	75	3,9589	25	6,5447	10
2,52734	13	3,8767	30	5,4341	10
2,15453	6,9	3,8037	40	4,9224	10
2,13830	2,8	3,6812		4,5862	20
2,09139	100	3,63085	20	4,5169	55
1,95262	3	3,5806	30	4,2813	10
1,92420	8,6	3,4203	100	3,9585	50
1,7483	6,4	3,28197	25	3,4050	20
1,72463	2,1	3,1833	20	3,8649	60
1,63694	1,3	3,12978	10	3,8255	20
1,62682	2,6	3,05198	5	3,7259	5
1,50366	2,7	2,89096	40	3,6999	5
1,46878	2,3	2,83284	30	3,6564	20
1,44766	1,9	2,7443	80	3,5599	100
1,42304	2,6	2,7095	40	3,4979	5
1,34569	0,6	2,6663	20	3,4291	65
1,33129	7,4	2,6317	15	3,2709	65
		2,53436	15	3,1906	10
		2,4514	10	3,1607	10
		2,34255	20	3,1335	30
		2,33335	20	3,1037	5
		2,2348	20		
		2,05127	20		
		1,92382	70		
		1,83840	25		
		1,82911	10		
		1,80038	10		
		1,77746	5		
		1,73402	5		
		1,70263	5		
		1,67420	20		
		1,66045	10		

Как видно из рис. 2, сравнение рентгенограмм FeS, $Pb_6In_{10}S_{21}$ и $Fe_{1,5}Pb_{5,5}In_{10}S_{22}$ показывает, что на рентгенограмме четверного соединения имеется ряд сильных дифракционных линий, которые по значениям межплоскостных расстояний и интенсивностей отличаются от линий исходных сульфидов.

По данным РФА, в интервале концентраций 35–46 мол. % $Pb_6In_{10}S_{21}$ на рентгенограммах присутствуют только дифракционные линии четверного соединения $Fe_3Pb_{11}In_{20}S_{44}$. Это показывает, что соединение $Fe_3Pb_{11}In_{20}S_{44}$

является фазой переменного состава. В интервале концентраций 1,0–35 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ наблюдаются линии $\alpha\text{-FeS}$ (твердый раствор на основе FeS и γ -твердый раствор на основе $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$), а в области концентрации 46–90 мол. % $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ наблюдаются линии γ и δ (твердый раствор на основе $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$).

Расчет рентгенограммы четверного соединения $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$ показал, что оно кристаллизуется в моноклинной сингонии и имеет следующие параметры кристаллической решетки: $a = 14,558$; $b = 3,8556$; $c = 15,558$ Å, $\beta = 96,876^\circ$, $V = 867\text{Å}^3$, $z = 1$. Экспериментальные и вычисленные плотности составляют $d = 5,845$ и $d = 5,893$ г/см³ соответственно. Анализ литературных данных показывает, что соединение $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$ изоструктурно с известным соединением $\text{Sn}_{5,5}\text{In}_{11}\text{S}_{22}$ [10]. Образование в системе $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ новой фазы $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ подтверждено и результатами измерения микротвердости. Измерение показало, что в зависимости от состава наблюдается три набора значений микротвердости: 2 500–2 550, 2 850–2 950, 3 200–3 350 МПа, относящиеся к микротвердостям α -твердых растворов на основе $\alpha\text{-FeS}$, α -твердых растворов на основе четверного соединения и $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$.

Вычислены стандартные термодинамические функции соединения $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$, имеющие следующие значения: $-\Delta_f H_{298}^0 = 833 \pm 34$ кс/мол, $-\Delta_f G_{298}^0 = 757 \pm 34$ кс/мол, $S_{298}^0 = 334 \pm 2$ мол/К.

Заключение

Таким образом, в работе впервые изучены фазовые равновесия в системе $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ и построена ее диаграмма состояния. Установлено, что диаграмма состояния системы $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ является квазибинарной и характеризуется образованием четверного соединения состава $\text{Fe}_{1,5}\text{Pb}_{5,5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$, плавящегося конгруэнтно при 1 150 К. Четверное соединение кристаллизуется в моноклинной сингонии и имеет параметры решетки: $a = 14,558$; $b = 3,8556$; $c = 15,558$; $\beta = 96,876^\circ$; $z = 1$.

Литература

1. Nakatsuiji S., Tonomura H., Onuma K. et al. Spin disorder and order in quasi 2D triangular Heisenberg antiferromagnetics: comparative study of FeGa_2S_4 , $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ and NiGa_2S_4 // Phys. Rev. Letters. 2007. Vol. 99, № 1–4. P. 157–203.
2. Rusuanskii K.Z., Haeuseler H., Bercha D.M. Band structure calculations on the layered compounds FeGa_2S_4 and NiGa_2S_4 // J. Phys. Chem. solids. 2002. Vol. 63, № 11. P. 2019–2028.
3. Haeuseler H. CoGaInS_4 , eine neue Verbindung mit FeGa_2S_4 -Struktur = CoGaInS_4 , un nouveau composé de structure de type FeGa_2S_4 , CoGaInS_4 , a new compounds with FeGa_2S_4 // Mater. Res. Bull. 1986. Vol. 21, № 6. P. 709–712.
4. Аминов Т.Г., Шабунина Г.Г., Новоторцев В.М. Магнитные свойства твердых растворов $(\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5})_{1-x}\text{Cr}_2\text{S}_4$ // ЖНХ. 2016. Т. 61, № 2. С. 461–467.
5. Аминов Т.Г., Шабунина Г.Г., Бушева Е.В., Новоторцев В.М. Магнитные диаграммы твердых растворов $\text{Cu}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Se}_4$ // ЖНХ. 2017. Т. 62, № 2. С. 361–371.

6. Труханов С.В., Боднар И.В., Зафар М.А. Магнитные и электрические свойства твердых растворов $(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$ // J. Magn. Magn. Mater. 2015. Vol. 379, № 1. P. 22–27.
7. Kramer V., Berroth K. Phase investigations in the system $\text{PbS-In}_2\text{S}_3$ and the crystal structure of PbIn_2S_4 and $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ // Mater. Res. Bull. 1980. Vol. 15, № 3. P. 299–308.
8. Гасанова У.А., Алиев О.М., Бахтиярлы И.Б., Мамедов Ш.Г. Исследование системы FeS-PbS // ЖНХ. 2019. Т. 64, № 2. С. 1–5.
9. Asadov M.M., Mustafayeva S.N., Hasanova U.A., Aliev O.M. et.al. Thermodynamics of $\text{FeS-PbS-In}_2\text{S}_3$ and properties of intermediate phases // Defect and Diffusion Forum. 2018. Vol. 385. P. 175–281.
10. Matsushita Y., Ueda Y. Crystal structure and physical properties of $\text{Sn}_{5.5}\text{In}_{11}\text{S}_{22}$ // J. Inorgan Chem. 2006. Vol. 45. P. 2022–2026.

Информация об авторе:

Гасанова Ульвия Адыгозал, аспирант, Институт катализа и неорганической химии им. Академика М.Ф. Нагиева Национальной АН Азербайджана (Баку, Республика Азербайджан). E-mail: inulviyya@mail.ru

Tomsk State University Journal of Chemistry, 2019, 15, 39–46. DOI: 10.17223/24135542/16/4

Ulvia A. Hasanova

*Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry Academician M.F. Nagiyev,
National Academy of Sciences of Azerbaijan (Baku, Azerbaijan)*

System state diagram $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$. Preparation and some properties of the quaternary compound $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$

It is known that multicomponent sulfide compounds especially containing magnetic (FeGa_2S_4 , $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$, FeIn_2S_4 , etc.) ions are functional materials and are used in the manufacture of magneto-optical devices. The synthesized alloys were studied by methods of physicochemical analysis, differential thermal analysis (DTA) (NTR-73 thermal analyzer chromel-alumel thermocouple, heating rate 70 / min, calcined Al_2O_3 served as a reference). X-ray diffraction analysis was carried out on a Bruker D2 PHASER X-ray diffractometer ($\text{CuK}\alpha$ radiation, Ni filter); MSA- was performed on a MIM-7 microscope, and microhardness was determined on a PMT-3 microhardness tester. Using the methods of physicochemical analysis, the phase equilibria in the $\text{FeS-Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ system were studied and its state diagram was constructed first time. It has been established that the system is a quasibinary section of the quasiternary system $\text{FeS-In}_2\text{S}_3\text{-PbS}$ and is characterized by the formation of a quaternary compound of the composition $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ ($\text{Fe}_{1.5}\text{Pb}_{5.5}\text{In}_{10}\text{S}_{22}$). The $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ compound melts congruently at 1150 K and is a phase of variable composition. The solubility based on troilite modification (FeS) at 300K is 1.0 mol%, based on the quasiternary compound, the solubility covers 35 to 46 mol% of $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ and the solubility based on $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$ is 10 mol% FeS . It was found that the compound $\text{Fe}_3\text{Pb}_{11}\text{In}_{20}\text{S}_{44}$ with the initial sulfides forms a eutectic equilibrium.

Keywords: state diagram, phase equilibrium, compound, eutectic, solubility, X-ray analysis.

References

1. Nakatsuiji S.; Tonomura H.; Onuma K. et al. Spin disorder and order in quasi 2D triangular Heisenberg antiferromagnetics: comparative study of FeGa_2S_4 , $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ and NiGa_2S_4 , Phys. Rev. Lettters. 2007, 99, 1–4, 157–203.

2. Rusuanskii K.Z.; Haeuseler H.; Bercha D.M. Band structure calculations on the layered compounds FeGa_2S_4 and NiGa_2S_4 . *J. Phys. Chem solids*. 2002, 63, 2019–2028.
3. Haeuseler H. CoGaInS_4 , eine neue Verbindung mit FeGa_2S_4 -Struktur CoGaInS_4 , un nouveau composé de structure de type FeGa_2S_4 , CoGaInS_4 , a new compound with FeGa_2S_4 . *Mater. Res. Bull.* 1986, 21 (6), 709–712.
4. Aminov T.G.; Shabunina G.G.; Novotortsev V.M. Magnetic properties of solid solutions $(\text{Cu}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{1-x}\text{Cr}_2\text{S}_4$. *ZhNKh*. 2016, 61 (2), 461–467.
5. Aminov T.G.; Shabunina G.G.; Busheva E.V.; Novotortsev V.M. Magnetic diagrams of $\text{Cu}_2\text{-xSbxSe}_4$ solid solutions. *ZhNKh*. 2017, 62 (2), 361–371.
6. Trukhanov S.V.; Bodnar I.V.; Zafar M.A. Magnetic and electrical properties of $(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$ solid solutions. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015, 379 (1), 22–27.
7. Kramer V.; Berroth K. Phase investigations in the system $\text{PbS-In}_2\text{S}_3$ and the crystal structure of PbIn_2S_4 and $\text{Pb}_6\text{In}_{10}\text{S}_{21}$. *Mater. Res. Bull.* 1980, 15 (3), 299–308.
8. Hasanova U.A.; Aliev O.M.; Bakhtiyar I.B.; Mamedov Sh.G. Investigation of the FeS-PbS system. *ZhNKh*. 2019, 64 (2), 1–5.
9. Asadov M.M.; Mustafayeva S.N.; Hasanova U.A.; Aliev O.M. et. al. Thermodynamics of $\text{FeS-PbS-In}_2\text{S}_3$ and properties of intermediate phases. *Defect and Diffusion Forum*. 2018, 385, 175–281.
10. Matsushita Y.; Ueda Y. Crystal structure and physical properties of $\text{Sn}_{5.5}\text{In}_{11}\text{S}_{22}$. *J. Inorgan. Chem.* 2006, 45, 2022–2026.

Information about the author:

Gasanov Ulvia Adygozal, graduate student, Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Academician M.F. Nagiyev National Academy of Sciences of Azerbaijan (Baku, Azerbaijan). E-mail: inulviyya@mail.ru