

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ Ag-Pb-Te

© 2016 Э. Р. Тагиев, Ф. С. Ибрагимова, Н. Б. Бабанлы, А. Н. Мамедов

*Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева НАНА, пр. Г. Джавида 113, AZ 1143 Баку, Азербайжан
e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.09.2016 г.

Аннотация. Методами ДТА, РФА и термодинамического анализа изучены фазовые равновесия в системе Ag-Pb-Te. Построен ряд политермических разрезов и изотермическое сечение при комнатной температуре фазовой диаграммы, а также проекция поверхности ликвидуса. Определены поля первичной кристаллизации фаз, типы и координаты нон- и моновариантных равновесий. Система Ag-Pb-Te, в которой тройное соединение не образуется, разделяется на три стабильные квазитройные подсистемы: Ag-Ag₂Te-PbTe, Ag₂Te-Te-PbTe, Ag-PbTe-Pb. На основании фазовых диаграмм граничных бинарных систем и ограниченного числа данных ДТА образцов тройной системы с использованием программы OriginLab2015 получены уравнения для расчета и 3D-визуализации поверхностей кристаллизации Ag₂Te, PbTe и поверхности расслаивания в системе Ag-Pb-Te.

Ключевые слова: система серебро-свинец-теллур, фазовая диаграмма, 3D моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Халькогениды серебра с s²p²-элементами являются перспективными функциональными материалами, обладающими эффективными полупроводниковыми, фото- и термоэлектрическими и др. свойствами [1—4]. Оптимизация технологических режимов синтеза и выращивания монокристаллов из жидких равновесных расплавов требует наличия данных для поверхностей кристаллизации соединений в тройной системе. Фазовые диаграммы и термодинамические свойства граничных двойных систем Ag-Te, Pb-Te, Ag-Pb, квазибинарного разреза Ag₂Te-PbTe, а также термодинамические функции жидких сплавов тройной системы Ag-Pb-Te изучены подробно [5—10]. Разрез Ag₂Te-PbTe характеризуется эвтектической фазовой диаграммой с незначительной растворимостью в твердом состоянии [5, 6]. В [5] приведена предполагаемая проекция поверхности ликвидуса системы Ag-Pb-Te. В [6] представлено изотермическое сечение проекции поверхности ликвидуса системы Ag-Pb-Te при температуре 900 К. Отсутствуют сведения об образовании тройного соединения.

Целью этой работы является уточнение полей первичной кристаллизации фаз, типы и координаты нон- и моновариантных равновесий, аналити-

ческое моделирование и 3D-визуализация поверхностей кристаллизации и расслоения жидких фаз в тройной системе Ag-Pb-Te.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования фазовых равновесий в системе Ag-Pb-Te были синтезированы исходные соединения Ag₂Te и PbTe. Синтез проводили сплавлением стехиометрических количеств соответствующих элементарных компонентов высокой степени чистоты в вакуумированных (~10⁻² Па) кварцевых ампулах. Для получения однородного Ag₂Te стехиометрического состава, согласно рекомендации [11], после синтеза произведена закалка от температуры 1100 К в холодную воду.

Индивидуальность синтезированных соединений контролировали методами ДТА и РФА. Расшифровкой порошковых рентгенограмм получены параметры низкотемпературной моноклинной ($a = 0.8058$, $b = 0.4468$, $c = 0.8977$ нм) α -Ag₂Te и высокотемпературной кубической ($a = 0.6643$ нм) решетки β -Ag₂Te, кубической PbTe ($a = 0.6462$ нм), близкие литературным [12, 13].

Сплавлением исходных соединений и элементарных компонентов в различных соотношениях в вакуумированных кварцевых ампулах синтези-

ровали сплавы системы Ag-Pb-Te, которые для гомогенизации отжигались при температурах на 30—50° ниже солидуса в течение 500 ч и охлаждались в режиме выключенной печи. Ряд образцов после отжига закаливались вбрасыванием ампул в холодную воду.

Исследования проводили методами ДТА (NETZSCH 404 F1 Pegasus system) и РФА (порош-

ковый дифрактометр D8 ADVANCE фирмы Bruker, $\text{CuK}\alpha_1$). Триангуляция системы Ag-Pb-Te проведена на основании термодинамических расчетов.

Результаты обработки экспериментальных данных и термодинамических расчетов приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 1. Нонвариантные равновесия в системе Ag-Pb-Te (рис. 2)

Точка на рис.	Равновесие	Состав, ат. %		T, К
		Pb	Te	
D ₁	$L \leftrightarrow \text{Ag}_2\text{Te}(\alpha')$	-	33.33	1233
D ₂	$L \leftrightarrow \text{PbTe}(\beta)$	50	50	1197
P ₁	$L + \alpha' \leftrightarrow \text{Ag}_{1,88}\text{Te}$	-	49	738
P ₂	$L + \text{Ag}_{1,88}\text{Te} \leftrightarrow \text{Ag}_5\text{Te}_3$	-	51	733
U ₁	$L + \alpha' \leftrightarrow \alpha_1 + \beta$	52	14	813
U ₂	$L + \alpha' \leftrightarrow \text{Ag}_{1,88}\text{Te} + \beta$	8	50	675
U ₃	$L + \text{Ag}_{1,88}\text{Te} \leftrightarrow \text{Ag}_5\text{Te}_3 + \beta$	7	51	670
e ₁	$L_1 \leftrightarrow \alpha' + \text{Pb}$	96	-	577
e ₂	$L_1 \leftrightarrow \alpha_1 + \alpha'$	-	8	1146
e ₃	$L \leftrightarrow \text{Ag}_5\text{Te}_3 + \text{Te}$	-	67	624
e ₄	$L \leftrightarrow \beta + \text{Te}$	14.5	85.5	678
e ₅	$L \leftrightarrow \alpha' + \beta$	14	37,5	965
e ₆	$L \leftrightarrow \beta + \text{Pb}$	>99	<1	600
E ₁	$L \leftrightarrow \text{Ag}_5\text{Te}_3 + \beta + \text{Te}$	5	65	600
E ₂	$L \leftrightarrow \alpha' + \beta + \text{Pb}$	~ 95	<1	575
m(m)	$L_2 \leftrightarrow L_1 + \alpha'$	-	31(10)	1165
M(M)	$L_2 \leftrightarrow L_1 + \alpha' + \beta$	20(41)	33(19)	910

Примечание: α_1 , $\alpha(\alpha')$, β — твердые растворы на основе Ag, Ag_2Te и PbTe

Таблица 2. Моновариантные равновесия в системе Ag-Pb-Te (рис. 2)

Кривая на рис.	Равновесие	Интервал темпер., К
1	2	3
e ₂ U ₁	$L_1 \leftrightarrow \alpha_1 + \alpha'$	1146—813
U ₁ E ₂	$L \leftrightarrow \alpha_1 + \beta$	813—575

Окончание табл. 2

1	2	3
e_1E_2	$L \leftrightarrow \alpha 1 + Pb$	577—575
e_6E_2	$L \leftrightarrow \beta + Pb$	600—575
$e_5M; e_5U_2$	$L_2 \leftrightarrow \alpha' + \beta$	965—910; 965—675
$M'U_1$	$L_1 \leftrightarrow \alpha' + \beta$	910—813
P_1U_2	$L + \alpha' \leftrightarrow Ag_{1,88}Te$	738—675
P_2U_3	$L + Ag_{1,88}Te \leftrightarrow Ag_5Te_3$	733—670
U_2U_3	$L \leftrightarrow Ag_{1,88}Te + \beta$	675—670
U_3E_1	$L \leftrightarrow Ag_5Te_3 + \beta$	670—600
e_3E_1	$L \leftrightarrow Ag_5Te_3 + Te$	624—600
e_4E_1	$L \leftrightarrow \beta + Te$	678—600
$mM(m'M')$	$L_2 \leftrightarrow L_1 + \alpha'$	1165—910
$KM(K'M')$	$L_2 \leftrightarrow L_1 + \beta$	960—910

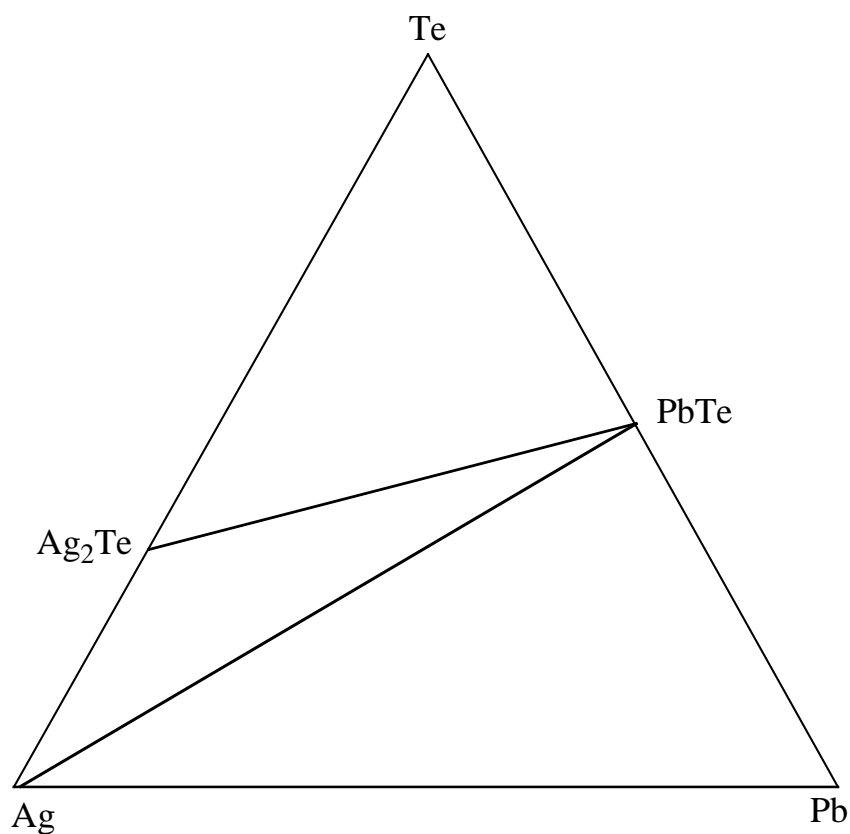


Рис. 1. Триангуляция тройной системы Ag-Pb-Te

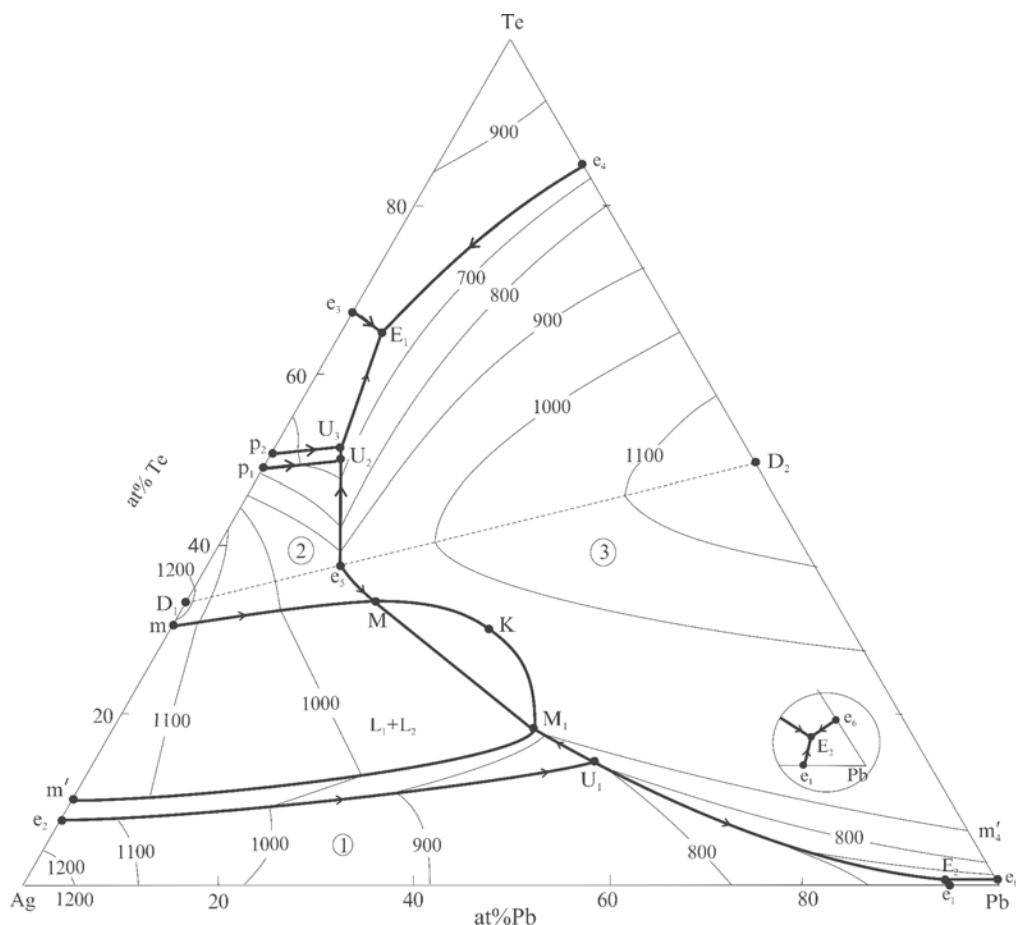
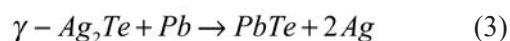
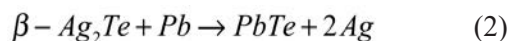
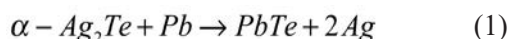


Рис. 2. Проекция поверхности ликвидуса системы Ag-Pb-Te
1, 2, 3 — поля кристаллизации Ag, Ag₂Te, PbTe соответственно

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для триангуляции системы Ag-Pb-Te определили температурную зависимость свободной энергии Гиббса реакций:



по уравнению из [14]:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_{298}^0 - \Delta c_{p,298}^0 T [\ln(T/298) + (298/T) - 1] \quad (4)$$

где ΔH_T^0 и ΔS_{298}^0 — интегральные стандартные энтальпии и энтропии реакций (1—3); $\Delta c_{p,298}^0$ — изменение молярной изобарной теплоемкости веществ, участвующих в реакции.

Низкотемпературная модификация $\alpha - Ag_2Te$ при 378 К переходит в модификацию $\beta - Ag_2Te$.

Эта модификация при 963 К переходит в $\gamma - Ag_2Te$. Энтальпия и энтропия фазовых превращений составляют: $\Delta H_{378}^{\alpha \rightarrow \beta} = 6603 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $\Delta S_{378}^{\alpha \rightarrow \beta} = 15.68 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\Delta H_{963}^{\beta \rightarrow \gamma} = 691 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $\Delta S_{963}^{\beta \rightarrow \gamma} = 1.63 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Эти величины, а также ниже приведенные термодинамические величины, использованные для определения температурной зависимости энергии Гиббса по уравнению (4), заимствованы из справочников [15, 16]:

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^0(\alpha - Ag_2Te) &= -36010 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}, \\ S_{298}^0(\alpha - Ag_2Te) &= 153.7 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(\alpha - Ag_2Te) &= 83.7 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta H_{298}^0(PbTe) &= -68630 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}, \\ S_{298}^0(PbTe) &= 110.1 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(PbTe) &= 50.6 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ S_{298}^0(Pb) &= 64.8 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(Pb) &= 26.4 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ S_{298}^0(Ag) &= 42.6 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(Ag) &= 25.4 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ S_{298}^0(Te) &= 49.5 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(Te) &= 25.8 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}. \end{aligned}$$

В результате расчетов было выявлено, что для реакций (1, 2, 3) в соответствующих температурных интервалах свободная энергия (4) имеет отрица-

тельные значения. Следовательно, в интервале температур $T, K = 298 \div 1235$ (от комнатной температуры до температуры плавления $Ag_2Te, T=1235 K$) реакции (1, 2 и 3) направлены в сторону образования $PbTe$, и, исходя из этого, составлена триангуляция тройной системы $Ag-Pb-Te$ (рис. 1).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для 3D-моделирования поверхностей моновариантных равновесий в тройной системе 1—2—3 определяются температурные зависимости от состава в виде явной функции $T=f(x, y)$, где x — атомная доля базисного компонента, допустим компонента 1. Примем, что $x=X_1$, тогда $y=Y=X_2/(X_2+X_3)$. Этот метод аналитического 3D-моделирования поверхностей моновариантных равновесий тройных систем успешно апробирован на конкретных системах и подробно описан в работах [17, 18]. В этой работе для поверхностей кристаллизации соединений Ag_2Te и $PbTe$ и расслоения жидких фаз в тройной системе $Ag-Pb-Te$ получены следующие аналитические выражения:

$$T, K (Ag_2Te, Ag-Pb-Te) = (-100989 + 1.10823E6X - 4.68996E6X^2 + 9.70272E6X^3 - 9.85267E6X^4 + 3.93775E6X^5) \times (1 - 1.8523Y + 3.8878Y^2) \quad (5)$$

$$(X = X_{Te} = 0.303 \div 0.56; Y = 0 \div 0.2554)$$

$$T, K (PbTe, Ag-Pb-Te) = (600 + 6748X - 38140X^2 + 84742X^3 + 11426X^4 - 308980X^5 + 408942X^6 - 165767X^7) \times (0.769 + 0.1556Y + 0.0754Y^2) \quad (6)$$

$$(X = X_{Te} = 0 \div 0.89; Y = 0.2154 \div 1.0)$$

$$T, K (\text{поверхность расслоения, Ag-Pb-Te}) = (630.6 + 385.15636X + 70787.37286X^2 - 371290.9748X^3 + 502599.44731X^4)(1 - Y)^{0.276} \quad (7)$$

$$(X = X_{Te} = 0.119 \div 0.36; Y = 0 \div 0.6)$$

В уравнениях (5—7): $Y = X_{Pb}/(X_{Pb} + X_{Ag})$; X_{Te}, X_{Pb}, X_{Ag} — атомные доли компонентов в жидких сплавах системы $Ag-Pb-Te$; полиномы $f(X)$ определены на основании кривых ликвидуса $Ag_2Te, PbTe$ и кривой расслоения в двойных граничных системах $Ag-Te$ и $Pb-Te$ [11, 12]; полиномы $f(Y)$ определены на основании кривых ликвидуса квазибинарной системы $Ag_2Te - PbTe$ [6].

Эти аналитические выражения с достаточной точностью в явном виде связывают температуры ликвидуса и составы компонентов тройной системы и позволили осуществить задачу 3D-визуализации поверхностей кристаллизации $Ag_2Te, PbTe$ и поверхности расслоения системы $Ag-Pb-Te$ на одном графике (рис. 3).

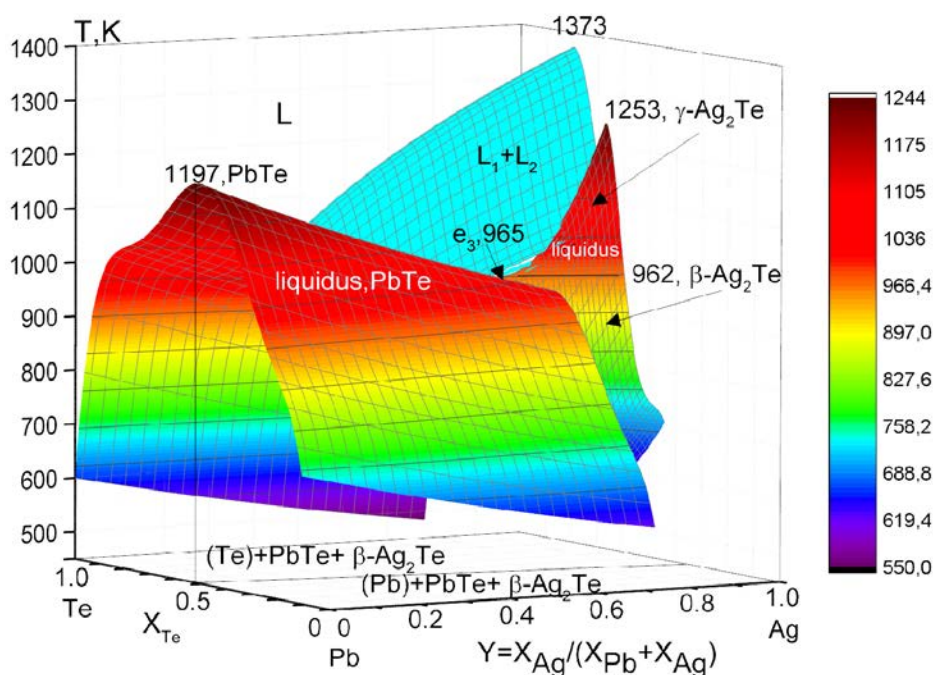


Рис. 3. 3D-модель поверхностей кристаллизации $Ag_2Te, PbTe$ и поверхности расслоения в системе $Ag-Pb-Te$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рис. 1—3 и табл. 1, 2, а также из литературных данных следует, что в системе Ag-Pb-Te тройное соединение не образуется, и фазовая диаграмма в основном состоит из полей моновариантных равновесий PbTe и модификаций Ag₂Te с другими фазами.

Температурные зависимости свободной энергии Гиббса возможных реакций выявили, что систему Ag-Pb-Te можно разделить на три стабильные квазитройные подсистемы: Ag-Ag₂Te-PbTe, Ag₂Te-Te-PbTe, Ag-PbTe-Pb.

На основании фазовых диаграмм граничных бинарных систем с использованием ограниченного числа данных ДТА с помощью компьютерной программы OriginLab2015 получены аналитические выражения с достаточной точностью в явном виде связывающие температуры ликвидуса и концентрации компонентов. Решена задача 3D-визуализации поверхностей кристаллизации Ag₂Te, PbTe и поверхности расслоения системы Ag-Pb-Te на одном графике.

Работа выполнена при поддержке Фонда Науки при Государственной Нефтяной Компании Азербайджанской Республики (Грант по проекту «Получение и исследование новых функциональных материалов на основе многокомпонентных халькогенидов металлов для альтернативных источников энергии и электронной техники», 2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li C. C., Drymiotis F., Liao L. L., Dai M. J., Liu C. K., Chen C. L., Chen Y. Y., Kao C. R., Snyder G. J. // *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 98, pp. 134—137.

2. Charoenphakdee A., Kurosaki K., Muta H., Uni M., Yamanaka S. // *Phys. Stat. Sol (RPL)*, 2008, vol. 2, pp. 65—67.

3. West A. R. *Solid State Chemistry and its Applications 2nd Edition*. Wiley, 2014, 584 p.

4. Pei Y. Z., Lensch-Falk J., Toberer E. S., Medlin D. L., Snyder G. J. // *Adv. Funct. Mater.*, 2011, vol. 21, № 2, pp. 241—249.

5. Grieb B., Lugscheider E., Wilden. J. *Silver-Lead-Tellurium, Ternary Alloys*, vol. 2. VCH, 1988, pp. 465—476.

6. Gierlotka W., Łapsa J., Fitzner, K. // *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2010, vol. 31, № 6, pp. 509—517.

7. Gierlotka W. // *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 485, № 1—2, pp. 231—235.

8. Gierlotka W., Łapsa J., Jendrzeczyk-Handzlik D. // *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 479, № 1—2, pp. 152—156.

9. *ASM Alloy Phase Diagrams Center* / Eds.: P. Villars, H. Okamoto and K. Cenzual. ASM International, Materials Park, OH, USA, 2006—2016.

10. Romermann F., Blachnik R. // *J. Alloys Compd.*, 1998, vol. 280, № 1—2, pp. 147—157.

11. Бабанлы М. Б., Юсубов Ю. А. *Электрохимические методы в термодинамике неорганических систем*. Баку, ЭЛИМ, 2011, 306 с.

12. Van Der Lee A., De Boer J. L. // *Acta Crystallogr.*, 1993, B49, pp. 1444—1446.

13. Noda Y., Ohba S., Sato S., Sato Y. // *Acta Crystallogr.*, 1983, C39, pp. 312—317.

14. Asadov S. M., Mamedov A. N., Kulieva S. A. // *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, № 9, pp. 876—885.

15. *PURE4.4 SGTE Pure Elements (Unary) Database*. Scientific Group Thermodata Europe. 1991—2006.

16. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник* / Отв. ред. А. В. Новоселова, В. Б. Лазарев. М.: Наука, 1979. 338 с.

17. Ибрагимова Ф. С., Тагиев Э. Р., Бабанлы Н. Б., Мамедов А. Н. // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2016, т. 18, № 2, с. 219—224.

18. Mamedov A. N., Salimov Z. E., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. // *American Chemical Science Journal*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5.

PHYSICAL-CHEMICAL ANALYSIS AND 3D-MODELING OF THE Ag-Pb-Te SYSTEM

©2016 E. R. Tagiev, F. S. Ibragimova, N. B. Babanly, A. N. Mamedov

*Nagiyev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry ANAS, G. Javid av., 113, AZ 1134, Baku, Azerbaijan
e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru*

Received 28.09.2016

Abstract: Phase equilibria in the system Ag-Pb-Te using DTA, XRD and thermodynamic analysis have been studied. Polytermic and isothermal sections and the projection of the liquidus surface of phase diagram were constructed. The fields of primary crystallization phase, the types and coordinates

of invariant and monovariant equilibria are presented in tables. The quasibinary sections Ag-PbTe and Ag₂Se-PbTe in the ternary Ag-Pb-Te system are revealed on the basis of the temperature dependence of the Gibbs free energy. System Ag-Pb-Te, where the ternary compound is not formed, is divided into three stable quasiternary subsystems Ag-Ag₂Te-PbTe, Ag₂Te-Te-PbTe, Ag-PbTe-Pb. The analytical expressions of liquidus surfaces of the Ag₂Te and PbTe compounds and immiscibility of surface in the ternary Ag-Pb-Te were obtained by using a small number of DTA measurements:

$$T, \text{ K (Ag}_2\text{Te, Ag-Pb-Te)} = (-100989 + 1.10823\text{E}6\text{X} - 4.68996\text{E}6\text{X}^2 + 9.70272\text{E}6\text{X}^3 - 9.85267\text{E}6\text{X}^4 + 3.93775\text{E}6\text{X}^5)(1 - 1.8523\text{Y} + 3.8878\text{Y}^2)$$

$$(X = X_{\text{Te}} = 0.303 \div 0.56; Y = 0 \div 0.2554)$$

$$T, \text{ K (PbTe, Ag-Pb-Te)} = (600 + 6748\text{X} - 38140\text{X}^2 + 84742\text{X}^3 + 11426\text{X}^4 - 308980\text{X}^5 + 408942\text{X}^6 - 165767\text{X}^7)(0.769 + 0.1556\text{Y} + 0.0754\text{Y}^2)$$

$$(X = X_{\text{Te}} = 0 \div 0.89; Y = 0.2154 \div 1.0)$$

$$T, \text{ K (immiscibility surface, Ag-Pb-Te)} = (630.6 + 385.15636\text{X} + 70787.37286\text{X}^2 - 371290.9748\text{X}^3 + 502599.44731\text{X}^4)(1 - \text{Y})^{0.276}$$

$$(X = X_{\text{Te}} = 0.119 \div 0.36; Y = 0 \div 0.6)$$

In the equations: $Y = X_{\text{Pb}}/(X_{\text{Pb}} + X_{\text{Ag}})$; X_{Te} , X_{Pb} , X_{Ag} - atom fractions of tellurium, lead and silver in liquid alloys of the ternary Ag-Pb-Te system. Analytical modeling and 3D-visualization of crystallization surfaces of Ag₂Te, PbTe compounds and immiscibility of surface in the ternary Ag-Pb-Te system were performed by using of OriginLab2015 computer program.

Keywords: system of silver-lead-tellurium, phase diagram, 3D modeling.

REFERENCES

- Li C. C., Drymiotis F, Liao L. L., Dai M. J., Liu C. K., Chen C. L., Chen Y. Y., Kao C. R., Snyder G. J. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 98, pp. 134—137. DOI.org/10.1016/j.enconman.2015.03.089
- Charoenphakdee A., Kurosaki K., Muta H., Uni M., Yamanaka S. *Phys. Stat. Sol. (RPL)*, 2008, vol. 2, pp. 65—67. DOI: 10.1002/pssr.200701302
- West A. R. *Solid State Chemistry and its Applications 2nd Edition*. Wiley, 2014, 584 p.
- Pei Y. Z., Lensch-Falk J., Toberer E. S., Medlin D. L., Snyder G. J. *Adv. Funct. Mater.*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 241—249. DOI: 10.1002/adfm.201000878
- Grieb B., Lugscheider E., Wilden. J. *Silver-Lead-Tellurium, Ternary Alloys*, vol. 2. VCH, 1988, pp. 465—476.
- Gierlotka, W., Łapsa, J., Fitzner, K. *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2010, vol. 31, no. 6, pp. 509—517. DOI:10.1007/s11669-010-9791-8
- Gierlotka W. *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 485, no. 1—2, pp. 231—235. DOI.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.028
- Gierlotka W., Łapsa J., Jendrzeczyk-Handzlik D. *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 479, no. 1—2, pp. 152—156. doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.083
- ASM Alloy Phase Diagrams Center / Eds.: P. Villars, H. Okamoto and K. Cenzual*. ASM International, Materials Park, OH, USA, 2006—2016.
- Romermann F., Blachnik R. *J. Alloys Compd.*, 1998, vol. 280, № 1—2, pp. 147—157. doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00666-5
- Babanly M. B., Yusibov Yu. A. *Elektrokhimicheskie metody v termodinamike neorganicheskikh sistem*. Baku, ELM Publ., 2011, 306 p.
- Van Der Lee A., De Boer J. L. *Acta Crystallogr.*, 1993, B49, pp. 1444—1446.
- Noda Y., Ohba S., Sato S., Sato Y. *Acta Crystallogr.*, 1983, C39, pp. 312—317.
- Asadov S. M., Mamedov A. N., Kulieva S. A. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 876—885. DOI: 10.1134/S00201685160900162016
- PURE4.4 SGTE Pure Elements (Unary) Database*. Scientific Group Thermodata Europe. 1991—2006.
- Fiziko-khimicheskie svoistva poluprovodnikovykh veshchestv. Spravochnik / Otv. red. A. V. Novoselova, V. B. Lazarev*. Moscow, Nauka Publ., 1979, 338 p.
- Ibragimova F. S., Tagiev Eh. R., Babanly N. B., Mamedov A. N. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy [Condensed Matter and Interphases]*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 219—224. Available at: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_18_2_2016_005.pdf
- Mamedov A. N., Salimov Z. E., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. *American Chemical Science Journal*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5. DOI: 10.9734/ACSJ/2016/21808

Тагиев Элмaddin Расул оглы — диссертант Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +9 (945) 52204342, e-mail: tagiyevelm@rambler.ru

Ибрагимова Фидан Самир гызы — диссертант, Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +9 (945) 03888206, e-mail: ifs@live.ru

Бабанлы Низамеддин Баба оглы — к. х. н., докторант, Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +9 (945) 18378621, e-mail: babanly_mb@rambler.ru

Мамедов Асиф Насиб оглы — д. х. н., профессор, заведующий лабораторией, Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +9 (945) 03372845, e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru

Tagiev Elmaddin Rasul ogly — post-graduate student, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); ph.: +9 (945) 52204342, e-mail: tagiyevelm@rambler.ru

Ibragimova Fidan Samir gyzy — post-graduate student, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); ph.: +9 (945) 03888206, e-mail: ifs@live.ru

Babanly Nizameddin Baba ogly — Cand. Sci. (Chem.), doctorate, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); ph.: +994518378621, +9(945) 18378621, e-mail: babanly_mb@rambler.ru

Mamedov Asif Nasib ogly — Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Head of the Laboratory Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); ph.: +9 (945) 03372845, e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru