

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ Ag₂Se И PbSe В ТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ Ag-Pb-Se

© 2016 Ф. С. Ибрагимова, Э. Р. Тагиев, 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 19.04.2016 г.

Аннотация. На основании температурной зависимости свободной энергии Гиббса выявлены квазибинарные разрезы Ag-PbSe и Ag₂Se-PbSe в тройной системе Ag-Pb-Se. Показано, что систему Ag-Pb-Se можно разделить на три стабильные квазитройные подсистемы Ag-Ag₂Se-PbSe, Ag₂Se-Se-PbSe, Ag-PbSe-Pb. Представлены прямые и обратные матрицы преобразования концентраций компонентов при переходе от одного стандартного состояния к другому. На основании данных граничных двойных систем с использованием малого числа измерений ДТА и с использованием компьютерных программ OriginLab2015 и grafikus.ru/plot3d осуществлено аналитическое решение задачи 3D-визуализации поверхностей кристаллизации Ag₂Se и PbSe в системе Ag-Pb-Se.

Ключевые слова: система серебро-свинец-селен, аналитическое моделирование, 3D визуализация, поверхность кристаллизации.

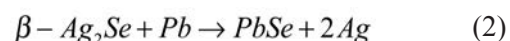
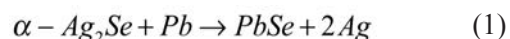
ВВЕДЕНИЕ

Халькогениды серебра и свинца являются перспективными функциональными материалами, обладающими эффективными полупроводниковыми, фото- и термоэлектрическими и др. свойствами [1—3]. Оптимизация технологических режимов синтеза и выращивания монокристаллов из жидких равновесных сплавов требует наличия данных для поверхностей кристаллизации соединений в тройной системе. Фазовая диаграмма системы Ag-Pb-Se изучена по разрезам Ag-PbSe [4] и Ag₂Se-PbSe [5]. Разрез Ag₂Se-PbSe характеризуется эвтектической фазовой диаграммой с незначительной растворимостью в твердом состоянии. Отсутствует сведение об образовании тройного соединения. В то же время фазовые диаграммы граничных двойных систем Ag-Se и Pb-Se, термодинамические и электрофизические свойства полупроводниковых соединений Ag₂Se и PbSe изучены подробно [6, 7].

Целью этой работы является термодинамический анализ и 3D-моделирование поверхностей кристаллизации Ag₂Se и PbSe в тройной системе Ag-Pb-Se на основании данных граничных двойных систем с использованием малого числа измерений ДТА.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

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



по уравнению

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_{298}^0 - \Delta c_{p,298}^0 T [\ln(T/298) + (298/T) - 1], \quad (3)$$

где ΔH_T^0 и ΔS_{298}^0 — интегральные стандартные энтальпии и энтропии реакций (1, 2); $\Delta c_{p,298}^0$ — изменение молярной изобарной теплоемкости веществ, участвующих в реакции.

Низкотемпературная модификация $\alpha - Ag_2Se$ при 401 К переходит в модификацию $\beta - Ag_2Se$. Энтальпия и энтропия превращения $\alpha \rightarrow \beta$ составляют $\Delta H_{401}^0 = 7030$ Дж·моль⁻¹, $\Delta S_{401}^0 = 17.6$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹. Эти величины, а также ниже приведенные термодинамические величины, использованные для определения температурной зависимости энергии Гиббса по уравнению (3), заимствованы из справочника [6]:

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^0(\alpha - Ag_2Se) &= -43\,540 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}, \\ S_{298}^0(\alpha - Ag_2Se) &= 150 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(\alpha - Ag_2Se) &= 81.8 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta H_{298}^0(\beta - Ag_2Se) &= -36\,500 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}, \\ S_{298}^0(\beta - Ag_2Se) &= 167.6 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(\beta - Ag_2Se) &= 80.8 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta H_{298}^0(PbSe) &= -99\,200 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}, \\ S_{298}^0(PbSe) &= 102.6 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(PbSe) &= 50.2 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ S_{298}^0(Pb) &= 64.8 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(Pb) &= 26.4 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ S_{298}^0(Ag) &= 42.6 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \\ \Delta c_{298}^0(Ag) &= 25.4 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}. \end{aligned}$$

Температурные зависимости свободной энергии реакций (1, 2) имеют вид

$$\Delta G_T^0 = -55700 + 27.2T + 7.2T[\ln(T/298) + (298/T) - 1]; T = 298 \div 401\text{K}, \quad (4)$$

$$\Delta G_T^0 = -62700 + 43.6T + 8.2T[\ln(T/298) + (298/T) - 1]; T = 401 \div 1170\text{K}. \quad (5)$$

Эти зависимости представлены на графике (рис. 1).

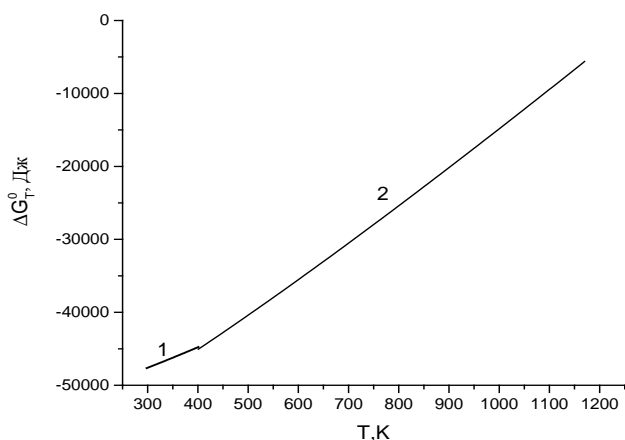


Рис. 1. Температурные зависимости свободной энергии Гиббса реакций (1) и (2)

Из рис. 1 следует, что в интервале температур $T=298\div 1170\text{ К}$ (от комнатной температуры до температуры плавления Ag_2Se , $T=1170\text{ К}$) реакции (1 и 2) направлены в сторону образования $PbSe$, и, исходя из этого, составлена триангуляция тройной системы $Ag-Pb-Se$ (рис. 2).

При переходе от одного стандартного состояния к другому пересчитываются концентрации компонентов. Для упрощения этой задачи и выполнения расчетов на компьютере целесообразно использовать матрицы, связывающие концентрации компо-

нентов тройной системы $Ag-Se-Pb$ с компонентами ее подсистем. Связь между концентрацией (моль доля) компонентов (x_i) тройной системы и ее подсистем (x_i^*) выражается формулами [8—10]:

$$x_i = Mx_i^*; \quad x_i^* = M^{-1}x_i$$

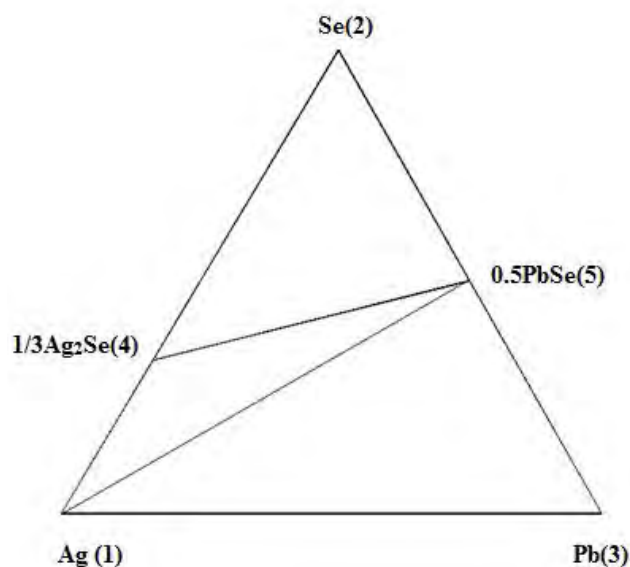


Рис. 2. Триангуляция тройной системы $Ag-Se-Pb$

Здесь M и M^{-1} — квадратная матрица третьего порядка и обратная матрица, указывающие концентрации компонентов в узлах тройной системы и подсистем соответственно. Для подсистемы 1—4—5 (рис. 2):

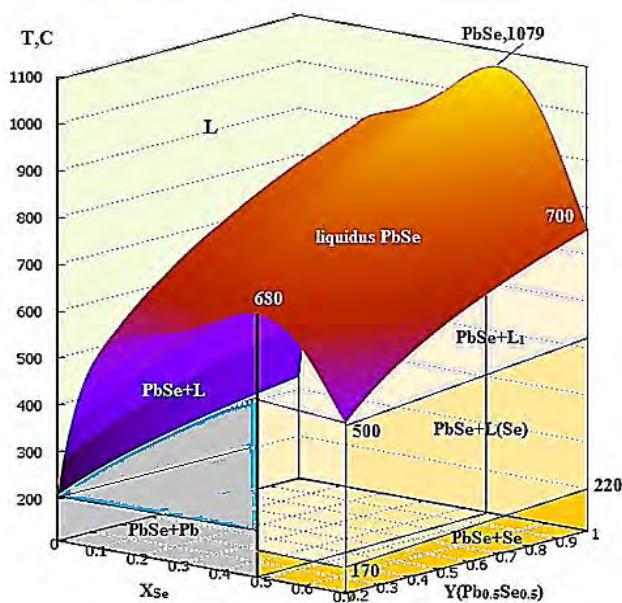


Рис. 3. 3D-модель поверхности кристаллизации $PbSe$ в системе $Ag-Pb-Se$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_4^* \\ x_5^* \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_4^* \\ x_5^* \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

где x_1, x_2, x_3 — моль доли Ag, Se, Pb в тройной системе Ag-Se-Pb; x_1^*, x_4^*, x_5^* — моль доли Ag, Ag_{0.667}Se_{0.333} (Ag₂Se) и соединения Pb_{0.5}Se_{0.5} (PbSe) в квазитройной системе 1–4–5.

$$M(1-4-5) = \begin{vmatrix} 1 & 0.667 & 0 \\ 0 & 0.333 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{vmatrix}$$

$$M^{-1}(1-4-5) = \begin{vmatrix} 1 & -2.003 & 2.003 \\ 0 & 3.003 & -3.003 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1^* + 0.667x_4^*; & x_1^* &= x_1 - 2.003x_2 + 2.003x_3; \\ x_2 &= 0.333x_4^* + 0.5x_5^*; & x_4^* &= 3.003x_2 - 3.003x_3; \\ x_3 &= 0.5x_5^*; & x_5^* &= 2x_3. \end{aligned}$$

Для M и M⁻¹ квазитройных систем 4–2–5 и 1–5–3 (на рис. 2) имеем:

$$M(4-2-5) = \begin{vmatrix} 0.667 & 0 & 0 \\ 0.333 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{vmatrix},$$

$$M^{-1}(4-2-5) = \begin{vmatrix} 1.49925 & 0 & 0 \\ -0.49925 & 1 & -1 \\ 0.0 & 0 & 2 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$M(1-5-3) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{vmatrix}$$

$$M^{-1}(1-5-3) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad (8)$$

Матрицы (6–8) могут быть использованы для расчета моль доли компонентов тройной системы на основании моль долей компонентов квазитройных систем Ag–(1/3Ag₂Se)–(0.5PbSe), (1/3Ag₂Se)–Se–(0.5PbSe), Ag–(0.5PbSe)–Pb или решения обратной задачи.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Аппроксимация ликвидуса соединений Ag₂Se и PbSe

Для кривых ликвидуса соединений в двойных системах с использованием программы Origin-Lab2015 получены следующие аналитические выражения:

Для ликвидуса Ag₂Se в системе Ag-Se

$$T, C = 840 + 6237(X_{Se} - 0.31)222691(X_{Se} - 0.31)^2 + 2219400(X_{Se} - 0.31)^3 - 7621500(X_{Se} - 0.31)^4. \quad (9)$$

Для ликвидуса PbSe в системе Pb-Se

$$T, C = 26811X_{Se}^6 + 50223 X_{Se}^5 - 178433 X_{Se}^4 + 151208X_{Se}^3 - 54226 X_{Se}^2 + 9112X_{Se} + 327. \quad (10)$$

Несмотря на асимметричной зависимости температуры от состава, полиномы (9, 10) с достаточной точностью аппроксимируют кривые ликвидуса Ag₂Se и PbSe (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Зависимость температуры от состава по кривой ликвидуса Ag₂Se в системе Ag-Se

X _{Se}	0.31	0.32	0.33	0.35	0.37	0.40	0.42
T, C (экспер)	840	880	897	850	797	714	670
T, C (по 9)	840	882	892	856	793	715	670

Таблица 2. Зависимость температуры от состава по кривой ликвидуса PbSe в системе Pb-Se

X _{Se}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.76
T, C (экспер)	327	830	920	967	1015	1079	955	757	678
T, C (по 10)	327	830	922	960	1029	1064	955	753	679

3D-моделирование ликвидусов Ag₂Se и PbSe в тройной системе Ag-Pb-Se

Для решения этой задачи использована расчетная методика, описанная в [11, 12]. На основании (9) и (10) получены следующие зависимости:

$$T, C(Ag_2Se, Ag-Pb-Se) = [840 + 6237(X_{Se} - 0.31) - 222691(X_{Se} - 0.31)^2 + 2219400(X_{Se} - 0.31)^3 - 7621500(X_{Se} - 0.31)^4](1 - Y)^{1.346}. \quad (11)$$

$$T, C(PbSe, Ag-Pb-Se) = (26811X_{Se}^6 + 50223 X_{Se}^5 - 178433 X_{Se}^4 + 151208 X_{Se}^3 - 54226 X_{Se}^2 + 9112 X_{Se} + 327)Y^{0.274}. \quad (12)$$

В уравнениях (11, 12) Y является моль долей селенида свинца в квазибинарном разрезе:

$$(1 - Y)(\text{Ag}_{0.667}\text{Se}_{0.333}) - Y(\text{Pb}_{0.5}\text{Se}_{0.5});$$

где $X_{\text{Ag}} = 0.667(1 - Y)$; $(1 - Y) = X_{\text{Ag}}/0.667$. Для определения значений степени Y и $(1 - Y)$ в (11 и 12) использованы следующие данные по квазибинарному разрезу $\text{Ag}_{0.667}\text{Se}_{0.333} - (\text{Pb}_{0.5}\text{Se}_{0.5})$:

$$T^{\text{пл}}(\text{Ag}_2\text{Se}) = 897 \text{ }^\circ\text{C}, T^{\text{пл}}(\text{PbSe}) = 1079 \text{ }^\circ\text{C};$$

эвтектика $(0.543 X_{\text{Ag}}, T = 680 \text{ }^\circ\text{C}, Y = 0.814$.

3D-моделирование поверхностей кристаллизации Ag_2Se и PbSe в тройной системе Ag-Pb-Se (рис. 3 и 4), проведено решением уравнений (11 и 12) с помощью программы grafikus.ru/plot3d.

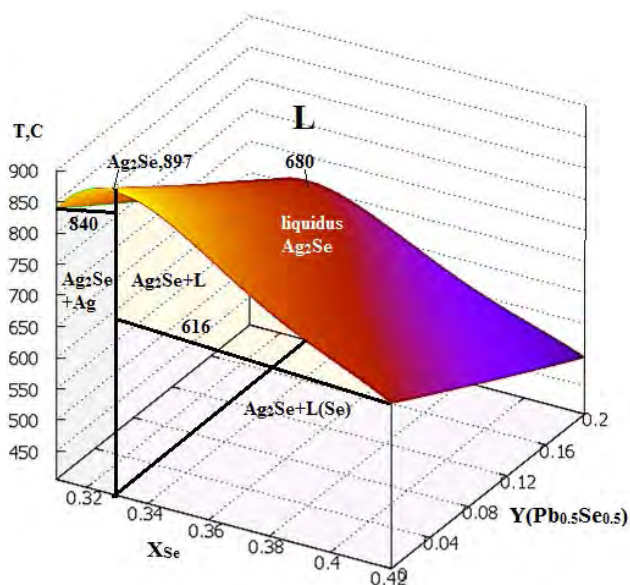


Рис. 4. 3D-модель поверхности кристаллизации Ag_2Se в системе Ag-Pb-Se

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурные зависимости свободной энергии Гиббса возможных реакций выявили, что систему Ag-Pb-Se можно разделить на три стабильные квазитройные подсистемы $\text{Ag-Ag}_2\text{Se-PbSe}$, $\text{Ag}_2\text{Se-Se-PbSe}$, Ag-PbSe-Pb .

На основании координат кривых кристаллизации соединений Ag_2Se и PbSe в соответствующих граничных системах и квазибинарного сечения $\text{Ag}_2\text{Se-PbSe}$ с использованием компьютерных про-

грамм OriginLab2015 и grafikus.ru/plot3d получены аналитические выражения поверхностей ликвидуса этих соединений в тройной системе Ag-Pb-Se :

$$T, C(\text{Ag}_2\text{Se}, \text{Ag-Pb-Se}) = [840 + 6237(X_{\text{Se}} - 0.31) - 222691(X_{\text{Se}} - 0.31)^2 + 2219400(X_{\text{Se}} - 0.31)^3 - 7621500(X_{\text{Se}} - 0.31)^4](1 - Y)^{1.346}$$

$$T, C(\text{PbSe}, \text{Ag-Pb-Se}) = (26811X_{\text{Se}}^6 + 50223X_{\text{Se}}^5 - 178433X_{\text{Se}}^4 + 151208X_{\text{Se}}^3 - 54226X_{\text{Se}}^2 + 9112X_{\text{Se}} + 327)Y^{0.274}$$

Эти аналитические выражения с высокой точностью в явном виде связывают температуры ликвидуса и моль доли компонентов тройной системы и позволили нам осуществить задачу 3D-визуализации поверхностей кристаллизации Ag_2Se и PbSe в системе Ag-Pb-Se .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oliveria M., McMullan R.K., Wuensch B. J. // *Solid State Ionics*, 1988, vol. 28/30, pp. 1332—1337.
2. Wieggers G. A. // *Am. Mineral*, 1971, vol. 56, pp. 1882—1888.
3. Noda Y., Masumoto K., Ohba S., et al. // *Acta Crystallogr*, 1987, vol. 43, pp. 1443—1445.
4. Legendre B., Souleau M. // *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1972, pp. 463—472.
5. Novoselova A. V., Shleifman Z. G., Zlomanov V. P., Sloma R. K. // *Inorg. Mater.*, 1967, № 3, pp. 1010—1013.
6. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*. Справочник. Коллектив авторов. Москва, Наука, 1978. 339 с.
7. *ASM Alloy Phase Diagrams Center*. P. Villars, editor-in-chief; H. Okamoto and K. Cenzual, section editors; ASM International, Materials Park, OH, USA, 2006—2016.
8. Мамедов А. Н. *Термодинамика систем с немолькулярными соединениями: расчет и аппроксимация термодинамических функций и фазовых диаграмм*. LAP. Germany, 2015, 124 с.
9. Мамедов А. Н., Аббасов М. М., Мехдиев И. Г., Ибадова И. Ф. // *Ж. Неорганической химии*, 1994, № 11, с. 1921—1925.
10. Mamedov A. N., Mekhdiev I. G. // *Thermochimica Acta*, 1995, vol. 269/270, pp. 73—78.
11. Mamedov A. N., Salimov Z. E., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. // *American Chemical Science Journal*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5.
12. Mamedov A. N., Tagiev E. R., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. // *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5.

3D-MODELING OF CRYSTALLIZATION SURFACES OF Ag₂Se AND PbSe IN THE TERNARY SYSTEM Ag-Pb-Se

©2016 F. S. Ibragimova, E. R. Tagiev, 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 19.04.2016

Abstract: The quasibinary sections Ag-PbSe and Ag₂Se-PbSe are revealed in the ternary Ag-Pb-Se system on the basis of the temperature dependence of the Gibbs free energy. It is shown that the system Ag-Pb-Se can be divided to three following stable quasiternary subsystems Ag-Ag₂Se-PbSe, Ag₂Se-Se-PbSe, Ag-PbSe-Pb. The direct and inverse transformation matrix of component concentrations at transition from one state to another standard state are presented. The analytical expressions of liquidus surfaces of the Ag₂Se and PbSe compounds in the ternary Ag-Pb-Se were obtained by using a small number of DTA measurements:

$$T, C(\text{Ag}_2\text{Se}, \text{Ag-Pb-Se}) = [840 + 6237(X_{\text{Se}} - 0.31) - 222691(X_{\text{Se}} - 0.31)^2 + 2219400(X_{\text{Se}} - 0.31)^3 - 7621500(X_{\text{Se}} - 0.31)^4](1 - Y)^{1.346} \quad (1)$$

$$(X_{\text{Se}} = 0.31 \div 0.42; Y = 0 \div 0.186)$$

$$T, C(\text{PbSe}, \text{Ag-Pb-Se}) = (26811X_{\text{Se}}^6 + 50223X_{\text{Se}}^5 - 178433X_{\text{Se}}^4 + 151208X_{\text{Se}}^3 - 54226X_{\text{Se}}^2 + 9112X_{\text{Se}} + 327)Y^{0.274} \quad (2)$$

$$(X_{\text{Se}} = 0 \div 0.76; Y = 0.186 \div 1.0)$$

In the equations (1,2): X_{Se} - mole fraction of selenium in liquid alloys of the ternary Ag-Pb-Se system; Y - mole fraction of lead selenide in the quasibinary section: $(1-Y)(\text{Ag}_{0.667}\text{Se}_{0.333})-Y(\text{Pb}_{0.5}\text{Se}_{0.5})$. Analytical modeling and 3D-visualization of crystallization surfaces of Ag₂Se and PbSe compounds in the ternary Ag-Pb-Se system were performed by using of OriginLab2015 and grafikus.ru/plot3d computer programs.

Keywords: system of silver-lead-selenium, analytical modeling, 3D visualization, crystallization surface.

REFERENCES

1. Oliveria M., McMullan R.K., Wuensch B. J. // *Solid State Ionics*, 1988, vol. 28/30, pp. 1332—1337.
2. Wiegiers G. A. // *Am. Mineral*, 1971, vol. 56, pp. 1882—1888. Available at: http://www.minsocam.org/amin/AM56/AM56_1882.pdf
3. Noda Y., Masumoto K., Ohba S., et al. // *Acta Crystallogr.*, 1987, vol. C43, pp. 1443—1445. doi:10.1107/S0108270187091509
4. Legendre B., Souleau M. // *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1972, pp. 463—472.
5. Novoselova A. V., Shleifman Z. G., Zlomanov V. P., Sloma R. K. // *Inorg. Mater.*, 1967, no. 3, pp. 1010—1013.
6. *Fiziko-khimicheskie svoistva poluprovodnikovyx veshchestv*. Spravochnik. Kollektiv avtorov. Moscow, Nauka Publ., 1978. 339 p.
7. *ASM Alloy Phase Diagrams Center*. P. Villars, editor-in-chief; H. Okamoto and K. Cenzual, section editors; ASM International, Materials Park, OH, USA, 2006—2016.
8. Mamedov A. N. *Termodinamika sistem s nemolekulyarnymi soedineniyami: raschet i approksimatsiya termodinamicheskikh funktsii i fazovykh diagramm*. LAP. Germany, 2015, 124 p.
9. Mamedov A. N., Abbasov M. M., Mekhdiev I. G., Ibadova I. F. *Zh. Neorganicheskoi khimii*, 1994, № 11, pp. 1921—1925.
10. Mamedov A. N., Mekhdiev I. G. // *Thermochimica Acta*, 1995, vol. 269/270, pp. 73—78. doi:10.1016/0040-6031(95)02535-9
11. Mamedov A. N., Salimov Z. E., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. // *American Chemical Science Journal*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5. Article no.ACSJ.21808 ISSN: 2249—0205 DOI: 10.9734/ACSJ/2016/21808
12. Mamedov A. N., Tagiev E. R., Mashadiyeva L. F., Babanly M. B. // *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2016, vol. 10(2), pp. 1—5. Article no.IRJPAC. 21890 ISSN: 2231—3443, NLM ID: 101647669 DOI: 10.9734/IRJPAC/2016/21890

Ибрагимова Фидан Самир-гызы — диссертант, Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +994503888206, e-mail: ifs@live.ru

Тагиев Элмaddin Расул-оглы — диссертант Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М. Нагиева Национальной Академии наук Азербайджана (ИКНХ НАНА); тел.: +994552204342, e-mail: tagiyevelm@rambler.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.: +994518378621, 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.: +994503372845, e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru

Ibragimova Fidan Samir-gyzy — postgraduate student, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); mobil: +994503888206

Tagiev Elmaddin Rasul-ogly — postgraduate student, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); mobil: +994552204342

Babanly Nizameddin Baba-ogly — Cand. Sci. (Chem.), doctorate, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); mobil: +994518378621

Mamedov Asif Nasib-ogly — Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Head of Laboratory, Nagiev Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (ICICH); mobil: +994503372845, e-mail: asif.mammadov.47@mail.ru