

УДК 532.72;546.3-14

Оглобля В.І.¹, к.ф.-м.н., доц.,
Оглобля О.В.¹, к.ф.-м.н., доц.,
Стефанишина Г.О.¹, студ.

V.I. Ogloblya¹, PhD,
O.V. Ogloblya¹, PhD,
G.O. Stephanyshyna¹, stud.

Дифузія та в'язкість розплавів Ga-In і Se-In

Diffusion and viscosity of Ga-In and Se-In melts

¹Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул.
Володимирська 64/13
e-mail: alekson@kiev ldc.net

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,
01601, Kyiv, Volodymyrska St., 64/13,
e-mail: alekson@kiev ldc.net

Розраховані в моделі рідин твердих сфер атомарні коефіцієнти дифузії Ga, In та малої домішки ^{108m}Ag в розплавах Ga-In в широкому температурному і концентраційному інтервалах узгоджуються з експериментальними даними[1], що свідчить про безактиваційний моноатомний механізм дифузії. Розраховані по модифікованій формулі Стокса-Ейнштейна значення в'язкості η цих розплавів також узгоджуються з експериментальними даними. В системі Se-In отримані по формулі Стокса-Ейнштейна (з використанням, розрахованих в моделі рідин твердих сфер, атомарних коефіцієнтів дифузії Se,In) значення η не узгоджуються з експериментальними даними[2]. Це свідчить про дифузійну Se,In не лише в атомарному вигляді а і у вигляді комплексів, що складаються з декількох атомів (найбільш імовірно це комплекси типу GaIn₂), які з підвищенням температури дисоціюють.

Ключові слова: розплави, дифузія, в'язкість, комплекси.

Calculated in the framework of rigid spheres liquid model atomic diffusion coefficients of Ga, In and small impurities ^{108m}Ag in Ga-In melts in broad temperature and concentration interval are in agreement with experimental results[1]. This let us conclude about unactivation monoatomic nature of diffusion in such systems. Viscosity η of this melts where calculated by utilizing improved formula of Stoks-Einstein. Acquired quantities are in good agreement with experimental results. Viscosity η of the system Se-In where also calculated by utilizing formula of Stoks-Einstein (using atomic diffusion coefficients of Se,In calculated in framework of rigid spheres model). But this quantities are not agreed with experimental results[2]. This let us conclude about diffusion of Se,In not only in atomic form but also in the form of complexes, which consists of several atoms (the most probable form is GaIn₂). With temperature increase this complexes dissociates.

Key words: melts, diffusion, viscosity, complexes.

Статтю представив член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. Макара В.А

Вступ

Процеси дифузії, в'язкості достатньо добре (експериментально та теоретично) досліджені в чистих рідких металах та в іонно-електронних бінарних розплавах з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому стані (система Ga-In)[1]. Показано, що в таких системах температурна залежність експериментальних коефіцієнтів самодифузії та дифузії малих домішок близька до лінійної і добре описується в рамках моделі рідин твердих сфер. Це свідчить про безактиваційний, моноатомний механізм дифузії. Наявність в розплавах таких систем домішок кисню, азоту

може привести до утворення комплексів (наноугруповань) типу: метал-розчинник + домішка, що дифундує + кисень чи азот, які складаються з 3÷30 атомів і з підвищенням температури дисоціюють (розпадаються). При температурах нижчих, ніж температура дисоціації комплексів, в дифузійних процесах приймають участь як окремі атоми, так і наноугруповання, поведінка яких описується в рамках флуктуаційної моделі дисоціації комплексів [1]. На жаль в бінарних іонно-електронних розплавах з обмеженою розчинністю в рідкому стані (система Se-In) дифузійні процеси не досліджувались. Відсутні

як експериментальні, так і теоретичні дослідження дифузійних процесів в таких системах [2]. Але в літературі існують детальні експериментальні дослідження в'язкості таких систем як в межах так і за межами бінодалі [2]. Маючи експериментальні дані по дифузії компонентів в системі в широкому температурному інтервалі, можна, по модифікованій формулі Стокса-Ейнштейна, розрахувати в'язкість таких розплавів і, навпаки, маючи надійні експериментальні дані по в'язкості, можна із модифікованої формули Стокса-Ейнштейна отримати значення коефіцієнтів самодифузії компонентів і, потім, порівняти їх зі значеннями коефіцієнтів самодифузії, розрахованими в моделі рідин твердих сфер, для випадку моноатомної дифузії компонентів і, відповідно, робити висновок про атомарну дифузію компонентів чи дифузію компонентів у вигляді комплексів (наноугрупвань).

Способи розрахунку коефіцієнтів дифузії компонентів, домішок та в'язкості у розплавах системи Ga-In та Se-In

При описанні явищ масопереносу в розплавах бінарних систем іноді застосовується модель активованих переміщень [3], частіше модель рідин твердих сфер [1,4,5].

$$D_1 = kT \left[\frac{16\pi N}{3V} \left\{ x_1 \sigma_{11}^2 g_{11} \left(\frac{m_1 kT}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + x_2 \sigma_{12}^2 g_{12} \left(\frac{m_1 m_2 kT}{2\pi(m_1 + m_2)} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right]^{-1} c(\eta_m), \quad (1)$$

$$D_2 = kT \left[\frac{16\pi N}{3V} \left\{ x_2 \sigma_{22}^2 g_{22} \left(\frac{m_2 kT}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + x_1 \sigma_{12}^2 g_{12} \left(\frac{m_1 m_2 kT}{2\pi(m_1 + m_2)} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right]^{-1} c(\eta_m), \quad (2)$$

Функції розподілу визначаються через коефіцієнт пакування суміші η_m за формулами:

$$g_{11} = \frac{1 + 0.5\eta_m + \frac{\pi N}{4V} x_2 \sigma_{22}^2 (\sigma_{11} - \sigma_{22})}{(1 - \eta_m)^2},$$

$$g_{22} = \frac{1 + 0.5\eta_m + \frac{\pi N}{4V} x_1 \sigma_{11}^2 (\sigma_{22} - \sigma_{11})}{(1 - \eta_m)^2},$$

$$g_{12} = (g_{11}\sigma_{22} + g_{22}\sigma_{11}) / (\sigma_{11} + \sigma_{22}).$$

У межах активаційної моделі не можна розрахувати ні температурну, ні концентраційну залежність коефіцієнтів дифузії компонентів у бінарних розплавах. Безактиваційна модель рідин твердих сфер, яка розглядає хаотичний рух частинок у рідині, дозволяє обчислювати як температурні, так і концентраційні залежності коефіцієнтів самодифузії, причому, у випадку дифузії в розплавах з необмеженою розчинністю в рідкому стані, теоретичні значення D добре узгоджуються з експериментальними результатами [1,5, 6].

Для обчислення коефіцієнтів самодифузії компонентів бінарної суміші рідин твердих сфер у [4] отримано формули які з урахуванням молекулярно-динамічного фактора $c(\eta_m)$ мають вигляд (1,2). Де D_1, D_2 – коефіцієнти самодифузії атомів першого та другого компонентів; V – молярний об'єм сплаву; x_1, x_2 – атомні частки компонентів; σ_{11}, σ_{22} – діаметри твердих сфер атомів відповідних компонентів; $\sigma_{12} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}$;

m_1, m_2 – маси твердих сфер першого та другого компонентів; g_{11}, g_{22}, g_{12} – функції розподілу взаємодіючих пар атомів першого виду, другого, першого та другого видів відповідно оцінені в точці контакту.

Коефіцієнт пакування однокомпонентної рідини визначається за мольним об'ємом і діаметром твердої сфери:

$$\eta = \frac{\pi \sigma^3 N}{6V},$$

а коефіцієнт пакування суміші визначається з виразу: $\eta_m = \frac{\pi N}{6V} (\sigma_{11}^3 x_1 + \sigma_{22}^3 x_2)$.

Для обчислення коефіцієнтів дифузії атомів малої домішки третього виду в бінарних розплавах можна запропонувати вираз, аналогічний (1), (2), а саме [6]:

$$D_3 = kT \left(\frac{16\pi N}{3V} \sigma_{13}^2 g_{13} \left(\frac{\bar{m} m_3 kT}{2\pi(\bar{m} + m_3)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} c(\eta_m), \quad (3)$$

де m_3 – маса атома домішки, σ_{33} – діаметр сфери атома домішки,

$$g_{33} = \frac{1 + 0.5\eta_m + \frac{\pi N}{4V} (\sigma_{11}x_1 + \sigma_{22}x_2)^2 (\sigma_{33} - \sigma_{11}x_{11} - \sigma_{22}x_2)}{(1 - \eta_m)^2}, \quad \bar{g}_{13} = \frac{\bar{g}\sigma_{33} + g_{33}(\sigma_{11}x_1 + \sigma_{22}x_2)}{\sigma_{11}x_1 + \sigma_{22}x_2 + \sigma_{33}},$$

$$\text{де } \bar{g} = \frac{1 + 0.5\eta_m}{(1 - \eta_m)^2}.$$

Формули (1), (2) та (3) можна використовувати не лише для систем з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому стані (система Ga-In) а і для розрахунку коефіцієнтів самодифузії, коефіцієнтів дифузії малих домішок у системах з розшаруванням в рідкому стані (система Se-In), якщо дифузія відбувається в атомарному вигляді. Але, так як, в області меж бінодалі (спінодалі) в таких системах існує нестабільний стан і є значні флуктуації густини, то можлива не лише атомарна дифузія компонентів та домішок, а і дифузія у вигляді комплексів розміри (діаметри) яких великі ($\sigma \sim 4-6\text{\AA}$) при температурах плавлення, а при підвищенні температури наногрупуювання розпадаються (дисоціюють) і дифузія відбувається в атомарному вигляді. Можна припустити, що в області меж бінодалі вклад в дифузійні процеси вносять як окремі атоми, так і наногрупуювання різного складу.

Відсутність надійних експериментальних даних по коефіцієнтах самодифузії в таких системах, нажаль, не дозволяє перевірити відповідність розрахованих в моделі рідин твердих сфер коефіцієнтів самодифузії окремих атомів компонентів їх експериментальним значенням. Для того, щоб розв'язати цю задачу нами був запропонований метод розрахунку коефіцієнтів дифузії з надійних експериментальних даних по в'язкості таких систем, з використанням модифікованого співвідношення Стокса-Ейнштейна

$$\eta = \frac{kT}{4\pi r D}, \quad (4)$$

де η - динамічна в'язкість (Па·с), k - константа Больцмана, T - термодинамічна температура системи, r - ефективний радіус:

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2,$$

$$\sigma_{13} = \frac{\sigma_{11}x_1 + \sigma_{22}x_2 + \sigma_{33}}{2}, \quad \bar{m} = m_1x_1 + m_2x_2.$$

Функції розподілу взаємодіючих атомів третього виду g_{33} , а також першого, другого та третього видів g_{13} , визначаються за формулами:

(x_1, x_2 - атомні доли першого та другого компонента, r_1, r_2 - радіуси дифундуючи частинок першого і другого виду), D – ефективний коефіцієнт дифузії при досліджуваній температурі:

$$D = x_1 D_1 + x_2 D_2.$$

Тут D_1 та D_2 – відповідно коефіцієнти дифузії першого та другого компонента в досліджуваній системі.

Отримані результати та їх обговорення

В моделі рідин твердих сфер за формулами (1) та (2) нами були розраховані коефіцієнти самодифузії Ga та In в розплавах Ga-In в широкому концентраційному (від чистого Ga з кроком 5% ат. до чистого In) та температурному інтервалі (від температур плавлення до 1000K). По формулі (3) були розраховані коефіцієнти дифузії малої домішки ^{108m}Ag , а також по цій формулі були розраховані коефіцієнти дифузії малих домішок ^{70}Ga та ^{114m}In . Значення коефіцієнтів самодифузії Ga та In розрахованих по формулах (1) і (2) співпадають із значеннями коефіцієнтів дифузії малих домішок ^{70}Ga та ^{114m}In розрахованих за формулою (3) (розходження не перевищувало 3%). Як приклад на рис. 1.2 та в табл. 1 приведені розраховані в моделі рідин твердих сфер атомарні коефіцієнти дифузії Ga, In, Ag. В табл. 1 також приведені розраховані за формулою (4) значення динамічної в'язкості $\eta_{\text{ат}}$ (з використанням атомарних коефіцієнтів дифузії Ga, In). Коефіцієнти самодифузії Ga та In, коефіцієнти дифузії малої домішки Ag^{108m} розраховані для розплавів чистого Ga, In та розплавів системи Ga-In (в широкому концентраційному та температурному інтервалі) добре узгоджуються з літературними експериментальними даними [1]. Температурна залежність D близька до лінійної, це свідчить про

дифузію малих домішок In, Ga, Ag в даних розплавах лише в атомарному вигляді. Далі нами, з використанням формул (1), (2) та формули (3), були розраховані атомарні коефіцієнти самодифузії Se, In та атомарні коефіцієнти дифузії малої домішки ^{75}Se та $^{114\text{m}}\text{In}$ для системи з обмеженою розчинністю в рідкому стані Se-In (концентрацію Se зменшували в межах бінодалі від 25% ат. до 0% ат. з кроком 5% ат., в температурному інтервалі 800-1150K). Значення отримані з формул (1,2) для атомарних коефіцієнтів самодифузії Se, In та з формули (3) для атомарних коефіцієнтів дифузії малих домішок ^{75}Se та $^{114\text{m}}\text{In}$ добре узгоджуються. Нажаль, порівняти розрахункові значення атомарних коефіцієнтів дифузії з експериментальними не було можливості, оскільки такі дані в літературі відсутні.

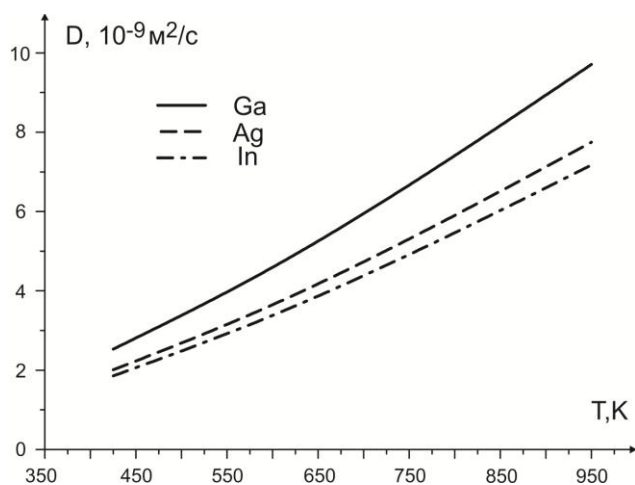


Рис. 1. Температурні залежності атомарних коефіцієнтів дифузії Ga, In та Ag в розплавах чистого In

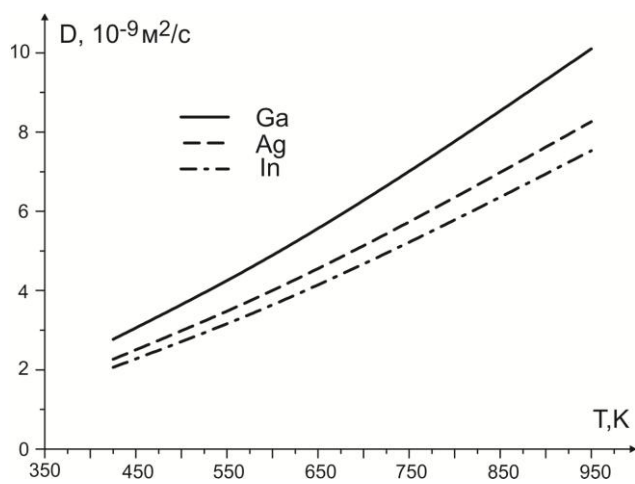


Рис. 2. Температурні залежності атомарних коефіцієнтів дифузії Ga, In та Ag в розплавах Ga(50% ат.)-In(50% ат.)

Використовуючи модифіковану формулу Стокса-Ейнштейна (4) розраховали в'язкість η розплавів In-Ga (як приклад див. табл. 1) в широкому температурному та концентраційному інтервалах. Отримані розрахункові значення в'язкості η в межах похибки експерименту узгоджуються з експериментальними даними [7]. Це свідчить про те, що модифіковану формулу (4) можна успішно використовувати для систем з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому стані, коли компоненти системи дифундують в атомарному вигляді.

Розрахунок в'язкості за формулою (4) з використанням атомарних коефіцієнтів дифузії Se та In для розплавів системи Se-In (з обмеженою розчинністю у рідкому стані) дав значення які не узгоджуються в межах бінодалі з експериментальними даними [2]. Як приклад для системи Se (25% ат.) - In (75% ат.) на рис. 3 наведено температурну залежність атомарних коефіцієнтів дифузії ^{75}Se та $^{114\text{m}}\text{In}$ розрахованих за формулою (3), яка близька до лінійної. В таблиці 2 для системи Se (20% ат.) - In (80% ат.) наведені розраховані за формулою (3) атомарні коефіцієнти дифузії ^{75}Se та $^{114\text{m}}\text{In}$ та розраховані за модифікованою формулою Стокса-Ейнштейна (4) значення в'язкості $\eta_{\text{ат.}}$ (отримані з використанням атомарних коефіцієнтів дифузії Se, In). Бачимо, що $\eta_{\text{ат.}}$ не узгоджується з експериментальними значеннями $\eta_{\text{експ.}}$ [2]. Щоб узгодити $\eta_{\text{експ.}}$ [2] з розрахованими за формулою (4) значеннями в'язкості необхідно використовувати ефективний коефіцієнт дифузії ($D = D_{\text{еф}}$) приблизно в 1.5 рази менший атомарних коефіцієнтів Se, In (див. табл. 2). Для системи Se (25% ат.)-In (75% ат.) для узгодження в межах бінодалі експериментальної в'язкості з теоретичною необхідно взяти $D_{\text{еф}}$ приблизно в два рази менший атомарних значень коефіцієнтів дифузії Se, In. В системі Se (5% ат.)-In (95% ат.) $D_{\text{еф}}$ майже співпадає з атомарними коефіцієнтами дифузії Se, In. Зрозуміло, що при зменшенні в розплавах концентрації Se основний вклад в значення $D_{\text{еф}}$ вносить коефіцієнт дифузії In тому можна вважати, що в даному випадку In дифундує, в основному, в атомарному вигляді, а Se у вигляді

комплексів, що складаються з двох-трьох атомів. Експериментальні дані по дифузії Se, In в

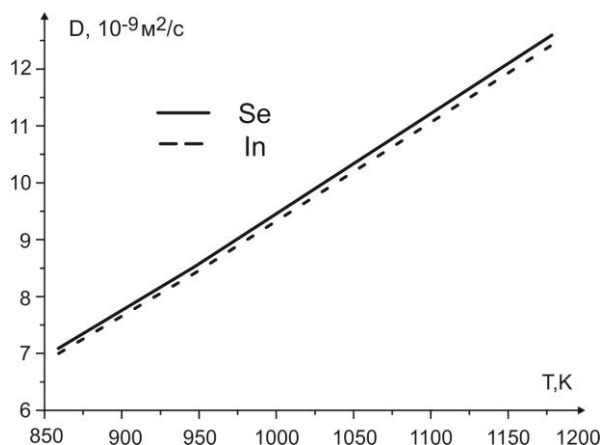


Рис. 3. Температурні залежності атомарних коефіцієнтів дифузії Se, In в розплавах Se (25% ат.)-In(75% ат.)

розплавах Se-In відсутні. Експериментальні ж дані по дифузії ^{114m}In в чистому In отримані в широкому температурному інтервалі[1] свідчать про без активаційний моно атомний механізм дифузії In.

Можна вважати, що в досліджених розплавах Se-In дифузія Se, In відбувається як в атомарному вигляді так і у вигляді комплексів, що складаються з декількох атомів з ефективним діаметром $\sigma \sim 3.5\text{\AA}$ (при $T=912\text{K}$). Найбільш імовірно це комплекси типу SeIn_2 які згідно з флуктуаційною теорією дисоціації комплексів [1] при температурах вищих за температури дисоціації повністю розпадаються. При $T=1120\text{K}$ значення в'язкості $\eta_{\text{ат}}$ розраховані за формулою (4) в досліджених концентраційних інтервалах (з використанням атомарних коефіцієнтів дифузії Se, In) узгоджуються з експериментальними значеннями в'язкості[2].

Таблиця 1

Розраховані атомарні коефіцієнти Ga, In, Ag та в'язкість розплавів Ga(10% ат.)-In(90% ат.)

T, K	373	395	425	475	525	575	665	785	953
$\sigma_{11}, 10^{-10} \cdot \text{м (Ga)}$	2,56	2,55	2,54	2,53	2,52	2,50	2,49	2,47	2,44
$\sigma_{22}, 10^{-10} \cdot \text{м (In)}$	2,93	2,92	2,91	2,89	2,88	2,86	2,84	2,82	2,79
$\sigma_{33}, 10^{-10} \cdot \text{м (Ag)}$	2,75	2,74	2,73	2,72	2,70	2,69	2,67	2,65	2,62
η_m	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,41	0,39
$V_{\text{Ga}}, 10^{-5} \cdot \text{м}^3/\text{МОЛЬ}$	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,21	1,22	1,25
$V_{\text{In}}, 10^{-5} \cdot \text{м}^3/\text{МОЛЬ}$	1,63	1,63	1,64	1,65	1,66	1,67	1,68	1,71	1,74
$V_{\text{In-Ga}}, 10^{-5} \cdot \text{м}^3/\text{МОЛЬ}$	1,58	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,64	1,66	1,69
\bar{g}	4,64	4,54	4,41	4,22	4,06	3,92	3,71	3,48	3,24
$C(\eta_m)$	0,64	0,67	0,71	0,76	0,82	0,87	0,95	1,04	1,15
$\sigma_{13}, 10^{-10} \cdot \text{м}$	2,82	2,81	2,8	2,79	2,77	2,76	2,74	2,72	2,69
$g_{33} \text{ (Ag)}$	4,51	4,54	4,41	4,22	4,06	3,92	3,71	3,48	3,24
g_{13}	4,58	4,54	4,41	4,22	4,06	3,92	3,71	3,48	3,24
$D_{\text{Ag}}, 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	1,64	1,79	2,05	2,5	2,97	3,46	4,40	5,76	7,84
$\sigma_{13}, 10^{-10} \cdot \text{м}$	2,72	2,72	2,71	2,69	2,68	2,67	2,65	2,62	2,60
$g_{33} \text{ (Ga)}$	4,34	4,24	4,12	3,95	3,8	3,68	3,48	3,28	3,05
g_{13}	4,48	4,38	4,26	4,08	3,92	3,79	3,59	3,37	3,14
$D_{\text{Ga}}, 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	2,02	2,25	2,57	3,12	3,71	4,33	5,50	7,18	9,77
$\sigma_{13}, 10^{-10} \cdot \text{м}$	2,91	2,90	2,89	2,87	2,86	2,85	2,82	2,80	2,77
$g_{33} \text{ (In)}$	4,68	4,57	4,44	4,25	4,09	3,95	3,73	3,50	3,26
g_{13}	4,66	4,56	4,42	4,23	4,07	3,93	3,72	3,49	3,25
$D_{\text{In}}, 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	1,49	1,65	1,89	2,30	2,74	3,19	4,06	5,31	7,23
$\eta, 10^{-3} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$	1,84	1,76	1,66	1,53	1,43	1,35	1,24	1,13	1,02

Таблиця 2

Результати розрахунку в'язкості $\eta_{\text{ат}}$, розплавів Se(20% ат.)- In(80% ат.), атомарних коефіцієнтів дифузії Se, In та ефективного коефіцієнта дифузії $D_{\text{еф}}$

T, K	912	920	936	964	1012	1062	1087
$\sigma_{11}, 10^{-10} \cdot \text{м (Se ат.)}$	3,00	3,0	2,99	2,99	2,98	2,97	2,97
$\sigma_{22}, 10^{-10} \cdot \text{м (In ат.)}$	2,80	2,80	2,79	2,79	2,78	2,78	2,77
$D_{\text{ат}}(\text{Se}), 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	7,75	7,87	8,12	8,55	9,32	10,15	10,58
$D_{\text{ат}}(\text{In}), 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	7,64	7,76	8,00	8,43	9,19	10,00	10,42
$\eta_{\text{ат}}, 10^{-3} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$	0,92	0,92	0,90	0,89	0,86	0,83	0,81
$\eta_{\text{експ}}, 10^{-3} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$	1,47	1,27	1,21	1,15	1,08	1,02	1,00
$\sigma_{11}, 10^{-10} \cdot \text{м (Se компл.)}$	3,44	3,32	3,29	3,27	3,24	3,22	3,21
$r, 10^{-10} \cdot \text{м}$	1,46	1,45	1,45	1,44	1,44	1,43	1,43
$D_{\text{еф}}, 10^{-9} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	5,04	5,52	5,90	6,37	7,17	7,97	8,38

Отже $T \approx 1120 \text{ K}$ можна вважати температурою дисоціації цих комплексів. При температурах $T < 1120 \text{ K}$ в досліджених розплавах Se-In можлива дифузія Se, In як у вигляді комплексів так і у вигляді окремих атомів із

різним співвідношенням між потоками частинок, що дифундують. Тому можна говорити лише про певний ефективний коефіцієнт дифузії Se, In та про ефективний діаметр дифундуючої частинки.

Список використаних джерел

1. Булавін Л.А. Фізика іонно-електронних рідин: монографія / Л.А. Булавін, В.І. Лисов, С.Л. Рево, В.І. Оглобля, Т.Л. Цареградська.–К.: ВПЦ "Київський університет", 2008. –367с.
2. Булавін Л.А. Критичні явища розшарування в монотектичних та евтектичних розплавах металів / Л.А. Булавін, Ю.О. Плавачук, В.М. Склярчук, А.І. Момот. - Полтава: АСМІ, 2010. –336с.
3. Френкель Я.І. Кінетична теорія рідин / Я.І. Френкель. – Л.: Наука, 1975. – 598с.
4. Аль-Челабі Н.А. Взаємо та самодифузія в бінарних сумішах / Н.А. Аль-Челабі, Е. Мак Лангліні // Mol. Phys. – 1970. – Vol. 19, № 5. – P.703-715.
5. Харьков І.Е. Самодифузія в рідких металах та сплавах / І.Е. Харьков, С.Ю. Якушевський // УФЖ. – 1975. – т. 20, №4. –с. 551-557.
6. Лозовой В.І. Концентраційна залежність коефіцієнтів дифузії компонентів та домішок в розплавах Ag-In / В.І. Лозовой, В.І. Оглобля, Л.Е. Михайлова //Металофізика. – 1979. – т. 1, №2. – с. 122-127.
7. Кононенко В.І. Про структуру рідких сплавів в системі галій-індій / В.І. Кононенко, С.В. Голубев, А.В. Рябина, В.В. Торокін // Расплавы, 1998. — №6, с. 33-37.

References

1. BULAVIN, L.A. et al. (2008), *Physics of ion-electronic liquids: monograph*. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichnyj centr Kyivskyj universytet.
2. BULAVIN, L.A. et al. (2010) *Critical phenomena of exfoliation in monotectic and eutectic metal melts*. Poltava: АСМІ.
3. FRENKEL, Y.I. (1975) *Kinetic theory of liquids*. Leningrad: Science.
4. AL-CHALABI, N.A., MC LANGHLIN, E. (1970) *Mutual and self-diffusion in binary mixtures*. Mol. Phys. 19 (5). p.703-715.
5. HARKOV, I.E., YAKUSHEVSKYY, S.YU. (1975) *Selfdiffusion in liquid melts and alloys*. UPJ. 20 (4). p.551-557.
6. LOZOVY, V.I., OGLOBLYA, V.I., MIHALOVA, L.E. (1979) *Concentrational dependence of diffusion coefficients of components and impurities in Ag-In melts*. Matalophysics. 1 (2). p.122-127.
7. KONONENKO, V.I., GOLUBEV, S.V., RIABINA, A.V., TOROKIN, V.V. (1998) *About liquid alloys structure of Gallium-Indium system*. Melts. 6. p.33-37.

Надійшла до редколегії 25.04.14