

to vacuum 10^{-1} mmHg, then it is cut from the vacuum line by the valve and then it heated by electric spiral through thermal fluid. During this process the vapor pressure over the sample is increasing and the pressure value is measured by special sensor. In the case of achieving of the given value there works the electronic comparator and the scheme changes its regime to the proportionate regulation regime for maintenance of temperature of a sample and pressure of its vapors about 100 mmHg. The dosing valve lets off steams and gets a mass spectrum of the sample by a standard for computerized MX-7304A procedure.

Dosing valve and spectrometer are heated up to the temperature of 100°C by arranged heaters. It is necessary to avoid the deposition of sample materials on the walls.

The results of the study of organic matter are shown in this paper. The resulting system is successfully used in the chemical specialties student's laboratory practicum at the Educational center of physics and chemistry research in the ChNU.

Key words: mass spectrometry, a vacuum scheme, pressure, saturated steam, liquid, evaporation.

Одержано редакцією 30.09.2015

Прийнято до друку 07.10.2015

УДК 538.9

PACS 61.72.Ji; 66.10.Cb; 66.30.-h; 66.30.Lw; 68.35.Fx

С.В. Корнієнко

РЕАКЦІЙНА ДИФУЗІЯ В БІНАРНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ЕЛЕКТРОМІГРАЦІЇ, ЗА НАЯВНОСТІ НЕРІВНОВАЖНИХ ВАКАНСІЙ

Розглянуто і проаналізовано модель дифузійного росту нової фази в бінарній системі, при проходженні постійного струму. Особливістю цієї моделі є те, що враховано існування нерівноважних вакансій. Показано, що нерівноважні вакансії не тільки впливають на швидкість росту фази, але і можуть змінити режим росту, тобто визначити, де буде швидше рости фаза – на катоді, чи аноді. Результати чисельного моделювання свідчать також про те, що коли джерела/стоки вакансій діють ефективно, ріст нової фази буде таким, як і для випадку рівноважної концентрації вакансій у системі.

Ключові слова: реакційна дифузія, електроперенесення, нерівноважні вакансії, кінетика росту фази, бінарна система.

1. Вступ

Однією з основних причин відмов пристроїв у сучасній мікроелектроніці є розрив електричного кола завдяки утворенню пор, що виникають у результаті росту інтерметалічних з'єднань на границі лют/електрод. Руйнування такого типу спостерігається при тривалому пропусканні електричного струму, як результат електроміграції [1-3]. Кінетика росту фази при протіканні постійного електричного

струму також суттєво залежить від його напрямку- ефект полярності. Чим більшою є густина струму у системі, тим суттєвішим є прояв цього ефекту [4-8].

Розуміння процесів, що відбуваються при рості інтерметалічних з'єднань під дією постійного електричного струму, потребує аналізу експериментальних даних на основі теоретичних моделей. Одна з перших моделей фазоутворення і конкуренції інтерметалічних фаз у присутності електричного струму була запропонована у роботі [9]. З неї слідує, що електроміграція призводить до поступової зміни кінетики росту ширини нової фази: від параболічної ($\Delta x^2 \sim t$) до лінійної ($\Delta x \sim t$) у випадку, коли напрямок електричного струму сприяє росту фази. Як що ж електричний струм перешкоджає росту нової фази (напрямок руху електронів протилежний до напрямку дифузії найбільш рухливого компонента) то ріст фази постійно сповільнюється, поки зовсім не припиниться. Ці висновки пізніше були підтверджені експериментально [10, 11].

Процес пороутворення при електроміграції можна розглядати, як певне свідчення існування областей з нерівноважною концентрацією вакансій у дифузійній зоні. Тому подальший розвиток вище згаданої моделі полягав у включенні до неї нерівноважних вакансій, джерела та стоки яких діють на міжфазних границях [12,13]. Вперше такий підхід був застосований для процесу взаємної дифузії під дією електричного струму у випадку твердих розчинів Гуровим і Гусаком [14].

Метою даної роботи є дослідити вплив джерел та стоків нерівноважних вакансій, що діють не тільки на міжфазних границях, але і в об'ємі нової фази, на кінетику її росту при електроміграції.

2. Опис моделі

Як модельну систему будемо розглядати бінарну дифузійну пару, що складається з чистих, слабо розчинних (або взаємно нерозчинних) компонентів А і В, що відповідно до діаграми станів (для температури відпалу даної пари) утворюють одну проміжну фазу – α .

При ізотермічному відпалі такої дифузійної пари на границі А|В росте проміжна фаза α . Розглянемо цей процес при наявності в даній системі електричного струму. Нехай електричне поле (напруженості \vec{E}) спрямовано вздовж вісі ОХ. Припустимо також, що компонент А більш рухливий, ніж компонент В ($D_A > D_B$), тоді (принаймні, у відсутність струму) результуючий потік речовини буде спрямований вздовж ОХ, а результуючий потік вакансій у протилежний бік (рис.1).

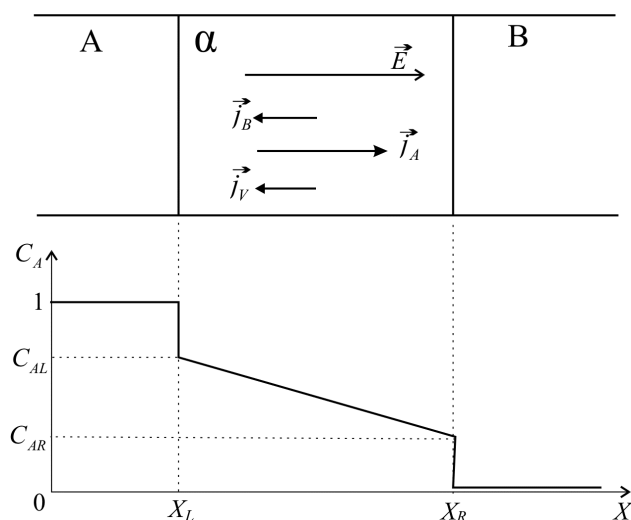


Рис.1. На границі між А і В утворюється у вигляді суцільного прошарку фаза α . Концентраційний профіль компоненту А у фазі α .

Оскільки ми вважаємо, що компоненти А і В слаблорозчинні, то потоки речовини можна розглядати тільки у фазі α , нехтуючи ними в інших частинах дифузійної пари. У цій моделі будемо описувати процес росту проміжної фази α , починаючи з того моменту, коли вона вже має вигляд суцільного шару товщиною $\Delta x_{кр}$ (стадії зародкоутворення і латерального росту зародків не розглядаються).

Запишемо рівняння швидкості росту товщини фази α :

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = \frac{1}{c_A c_B} J_A. \quad (1)$$

де $\Delta x = (x_R - x_L)$ - ширина фази α ;

J_A - густина потоку компонента А в лабораторній системі відліку;

c_A, c_B - відносна концентрація (середнє значення) у фазі α атомів сорту А і В.

Рівняння для густини потоку компонента А в лабораторній системі відліку пов'язане з густиною потоку компонента А і вакансій в системі кристалічної ґратки наступним співвідношенням:

$$J_A = j_A + c_A j_V \quad (2)$$

де j_A, j_V - густина потоку в системі відліку кристалічної ґратки у фазі α компоненту А і вакансій, відповідно.

Тепер запишемо рівняння потоків у фазі α для компонентів А і В у системі кристалічної ґратки з урахуванням наявності нерівноважних вакансій і дії електричного струму. Будемо вважати також, що атоми А і В мають однакові об'єми.

$$\Omega j_A = -D_A \frac{\partial c_A}{\partial x} + \frac{c_A D_A^*}{kT} E_x z_A e + \frac{c_A D_A^*}{c_V} \frac{\partial c_V}{\partial x} \quad (3)$$

$$\Omega j_B = -D_B \frac{\partial c_B}{\partial x} + \frac{c_B D_B^*}{kT} E_x z_B e + \frac{c_B D_B^*}{c_V} \frac{\partial c_V}{\partial x} \quad (4)$$

Оскільки $j_V = -(j_A + j_B)$, то можемо записати наступний вираз для густини потоку вакансій:

$$\Omega j_V = (D_A - D_B) \frac{\partial c_A}{\partial x} - \frac{E_x e}{kT} (c_A D_A^* z_A + c_B D_B^* z_B) - \frac{(c_A D_A^* + c_B D_B^*)}{c_V} \frac{\partial c_V}{\partial x} \quad (5)$$

де E_x - проекція напруженості електричного поля на вісь ОХ;

z_A і z_B - ефективні заряди атомів сорту А і В, відповідно;

c_V - відносна концентрація вакансій у фазі α ;

D_A, D_B - парціальні коефіцієнти дифузії компонентів А і В у фазі α ;

D_A^*, D_B^* - коефіцієнти ізотопної дифузії компонентів А і В у фазі α ;

j_A, j_B, j_V - густина потоку в системі відліку кристалічної ґратки у фазі α компонентів А, В і вакансій, відповідно;

Ω - об'єм, що припадає на один атом.

Запишемо рівняння балансу для вакансій у середині фази α :

$$\frac{\partial c_V}{\partial t} = - \frac{\partial(\Omega j_V)}{\partial x} - \frac{(c_V - c_V^{eq})}{\tau_{Vg}} \quad (6)$$

де τ_{Vg} - час релаксації вакансій в об'ємі фази α ;

c_V^{eq} - рівноважна концентрація вакансій у фазі α .

Позначимо $(c_V - c_V^{eq}) = u$.

За умови квазістаціонарності: $\frac{\partial c_V}{\partial t} = 0$, з урахуванням (5) рівняння (6) набуває вигляду:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(D_A - D_B) \frac{\partial c_A}{\partial x} - \frac{E_x e}{kT} (c_A D_A^* z_A + c_B D_B^* z_B) - D_V \frac{\partial u}{\partial x} \right] = -\frac{u}{\tau_{Vg}} \quad (7)$$

При отриманні цього співвідношення враховано наступне: $\frac{\partial c_V}{\partial x} = \frac{\partial u_V}{\partial x}$, оскільки $\frac{\partial c_V^{eq}}{\partial x} = 0$, а також $D_V c_V = (c_A D_A^* + c_B D_B^*)$.

Припустимо, що фаза α має вузьку область концентраційної гомогенності, а коефіцієнти дифузії мало міняються усередині цієї області (вважаємо, їх сталими величинами). Це дозволить нам зробити лінійне наближення концентраційного профілю для компонентів:

$$\frac{\partial c_A}{\partial x} \approx \frac{\Delta c}{\Delta x}; \quad \frac{\partial c_B}{\partial x} = -\frac{\partial c_A}{\partial x} \approx -\frac{\Delta c}{\Delta x};$$

де Δx – ширина фази α ;

Δc – концентраційний інтервал гомогенності фази α по компоненті А ($\Delta c = c_{AR} - c_{AL}$, c_{AR} , c_{AL} – концентрація компонента А на лівій і правій границі у фазі α).

Лінійність концентраційного профілю також означає, що $\frac{\partial^2 c_A}{\partial x^2} = 0$.

З урахуванням зазначених припущень, рівняння (7) приймає наступний вигляд:

$$D_V \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u}{\tau_{Vg}} \quad (8)$$

Розв'язком цього рівняння є таке співвідношення:

$$u = M \exp\left(\frac{x}{L_V}\right) + N \exp\left(-\frac{x}{L_V}\right) \quad (9)$$

де $L_V = \sqrt{D_V \tau_{Vg}}$ – характерна довжина для блукання вакансій в об'ємі фази;

M, N – константи інтегрування.

Запишемо вираз для густини потоку вакансій (5) з урахуванням (9)

$$\Omega j_V = (D_A - D_B) \frac{\partial c_A}{\partial x} - \frac{E_x e}{kT} (c_A D_A^* z_A + c_B D_B^* z_B) - \frac{D_V}{L_V} \left(M \exp\left(\frac{x}{L_V}\right) - N \exp\left(-\frac{x}{L_V}\right) \right) \quad (10)$$

Для того, щоб виразити константи інтегрування M, N через інші параметри системи, запишемо рівняння балансу вакансій для лівої і правої границь фази α .

$$\begin{aligned} \text{L:} \quad & \frac{\partial c_V}{\partial t} = -\frac{\Omega j_V}{\delta} - \frac{u}{\tau_{Vb}}, \\ \text{R:} \quad & \frac{\partial c_V}{\partial t} = \frac{u}{\tau_{Vb}} - \frac{\Omega j_V}{\delta}, \end{aligned} \quad (11)$$

де τ_{Vb} – час релаксації вакансій на міжфазних границях;

u – відхилення концентрації вакансій від рівноважного значення ($c_V - c_V^{eq}$);

δ – ширина міжфазної границі.

За умови квазістаціонарності на міжфазних границях $\partial c_V / \partial t = 0$ отримаємо:

$$\begin{aligned} \text{L:} \quad \Omega j_V &= -\frac{\delta}{\tau_{Vb}} u, \\ \text{R:} \quad \Omega j_V &= \frac{\delta}{\tau_{Vb}} u. \end{aligned} \quad (12)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (12) з урахуванням (10), визначимо константи M і N . Після цього, зробивши певні нескладні, але громіздкі перетворення, отримаємо остаточний вираз для швидкості росту фази α :

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta x)}{dt} &= \frac{\tilde{D}}{c_A c_B} \left| \frac{\Delta c}{\Delta x} \right| \left[\frac{(\exp(\Delta x/L_V) - 1) + \frac{\tilde{D}}{D_{NG}} \frac{L_{Vb}^2}{\delta} (\exp(\Delta x/L_V) + 1)}{(\exp(\Delta x/L_V) - 1) + \frac{L_{Vb}^2}{\delta \cdot L_V} (\exp(\Delta x/L_V) + 1)} \right] - \\ &- \frac{E_x e}{c_A c_B kT} (c_A D_A^* z_A + c_B D_B^* z_B) \frac{(\tilde{D} - D_{NG})}{(D_A - D_B)} \left[\frac{(\exp(\Delta x/L_V) + 1)}{\left(1 + \frac{\delta \cdot L_V}{L_{Vb}^2}\right) \exp(\Delta x/L_V) + \left(1 - \frac{\delta \cdot L_V}{L_{Vb}^2}\right)} \right] + \\ &+ \frac{E_x e}{kT} (D_A^* z_A - D_B^* z_B). \end{aligned} \quad (13)$$

де $L_{Vb} = \sqrt{D_V \tau_{Vb}}$ – характерна довжина блукання вакансій поблизу міжфазних границь;

\tilde{D} – коефіцієнт взаємної дифузії за Даркеном ($\tilde{D} = c_A D_B + c_B D_A$);

D_{NG} – коефіцієнт дифузії Назарова-Гурова $D_{NG} = \frac{D_A D_B}{c_A D_A + c_B D_B}$.

Рівняння (13) виражає швидкість росту товщини нової фази під дією постійного електричного струму, коли в системі існують нерівноважні вакансії. При цьому, джерела/стоки вакансій діють у фазі α , як на міжфазних границях, так і в її об'ємі.

3. Аналіз рівняння для швидкості росту проміжної фази

Розглянемо граничні випадки рівняння (13):

1. $\Delta x \ll L_V$

Ця умова відповідає випадку, коли джерела/стоки вакансій в об'ємі фази α працюють слабо.

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta x)}{dt} &= \frac{\tilde{D}}{c_A c_B} \left| \frac{\Delta c}{\Delta x} \right| \left[\frac{\left(\Delta x + 2 \frac{\tilde{D}}{D_{NG}} \frac{L_{Vb}^2}{\delta}\right)}{\left(\Delta x + 2 \frac{L_{Vb}^2}{\delta}\right)} + \frac{E_x e}{kT} (D_A^* z_A - D_B^* z_B) - \right. \\ &- \left. \frac{E_x e}{c_A c_B kT} (c_A D_A^* z_A + c_B D_B^* z_B) \frac{(\tilde{D} - D_{NG})}{(D_A - D_B)} \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta \cdot \Delta x}{2L_{Vb}^2}\right)} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Отриманий вираз для швидкості росту товщини фази відповідає моделі цього процесу, коли джерела/стоки вакансій діють лише на міжфазних границях [12, 13].

2. $\Delta x \gg L_V$

За цієї умови джерела/стоки вакансій в об'ємі фази α працюють добре.

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = \frac{\tilde{D}}{c_A c_B} \left| \frac{\Delta c}{\Delta x} \right| \left(1 + \frac{\tilde{D}}{D_{NG}} \frac{L_{vb}^2}{\delta \cdot L_V} \right) + \frac{E_x e}{kT} (D_{A^*} z_A - D_{B^*} z_B) - \frac{E_x e}{c_A c_B kT} (c_A D_{A^*} z_A + c_B D_{B^*} z_B) \frac{(\tilde{D} - D_{NG})}{(D_A - D_B)} \frac{1}{\left(1 + \frac{\tilde{D}}{D_{NG}} \frac{L_{vb}^2}{\delta \cdot L_V} \right)}. \quad (15)$$

Далі продовжимо аналіз отриманого рівняння для випадку, коли рухливості компонентів суттєво відрізняються, наприклад, $D_A \gg D_B$. Таке наближення дозволяє зробити у (15) наступне спрощення $\frac{(\tilde{D} - D_{NG})}{(D_A - D_B)} \approx c_B$.

$$2a) L_V \gg \frac{L_{vb}^2}{\delta}$$

Умова 2а) відповідає випадку, коли джерела/стоки вакансій на міжфазних границях працюють краще, ніж в об'ємі. Рівняння для швидкості росту фази буде мати такий вигляд:

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = \frac{\tilde{D}}{c_A c_B} \left| \frac{\Delta c}{\Delta x} \right| + \frac{E_x e}{kT} (D_{A^*} z_A - D_{B^*} z_B). \quad (16)$$

Отримане рівняння (16) відповідає випадку, коли в системі підтримується рівноважна концентрація вакансій.

$$2б) L_V \ll \frac{L_{vb}^2}{\delta}$$

За умови 2б) джерела/стоки вакансій в об'ємі фази працюють краще, ніж на її міжфазних границях. Рівняння (15) приймає наступний вигляд:

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = \frac{D_{NG}}{c_A c_B} \left| \frac{\Delta c}{\Delta x} \right| - \frac{E_x e}{kT} D_{B^*} z_B \left(1 + \frac{c_B}{c_A} \right). \quad (17)$$

Тепер зробимо порівняльний аналіз виразів (16) і (17). У випадку 2 а) ріст фази буде відбуватися швидше ніж у випадку 2 б), оскільки $\tilde{D} \gg D_{NG}$. Ще одна суттєва відмінність полягає у тому, що знаки біля електроміграційної складової у рівнянні швидкості росту фази різні: для випадку 2 а) це «+» а для 2 б) це «-». Отже, при однакових дифузійних параметрах для компонентів системи, але різних для вакансій кінетика росту фази на аноді і катоді може суттєво відрізнятись. Так, якщо, наприклад, для випадку 2 а) на аноді фаза росте швидше, ніж на катоді, то для випадку 2 б), при тих самих значеннях дифузійних параметрів компонентів А і В, все буде навпаки – швидше буде рости фаза на катоді, а повільніше на аноді.

4. Моделювання росту нової фази під дією електричного струму

Для дослідження впливу джерел/стоків вакансій, що знаходяться в об'ємі нової фази, на кінетику її росту було проведено чисельне моделювання за рівнянням (13 2.2.11). Також зроблено порівняння з відповідними результатами, отриманими для інших моделей процесу реакційної дифузії при електроміграції:

Модель №1 - Рівноважна концентрація вакансій в системі (позначення: 1-А – фаза на аноді; 1-К - фаза на катоді).

Модель №2 - Джерела/стоки вакансій діють лише на міжфазних границях (позначення: 2-А – фаза на аноді; 2-К - фаза на катоді) [12,13].

Модель №3 – Джерела/стоки вакансій діють, як на міжфазних границях, так і в об'ємі нової фази (позначення: 3-А – фаза на аноді; 3-К - фаза на катоді). Дана модель описується рівнянням (13).

Параметри системи при яких проводилось моделювання:

$\Delta c = 0.01$ концентраційний інтервал гомогенності фази α по компоненту А;

$c_A = 0.3$ – відносна середня концентрація компонента А у фазі α ;

$c_B = 0.7$ – відносна середня концентрація компонента В у фазі α ;

$D_A^* = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнти ізотопної дифузії компонента А;

$D_B^* = 1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнти ізотопної дифузії компонента В;

$D_V = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт дифузії вакансій;

$\varphi = 10$ - термодинамічний множник;

$z_A = -12$ – ефективний заряди атомів сорту А;

$z_B = -6$ – ефективний заряд атомів сорту В;

$T = 600 \text{ К}$ – температура;

$\tau_{Vg} = 0.01 \text{ с}$ – час релаксації вакансій в об'ємі фази α ;

$\tau_{Vb} = 0.01 \text{ с}$ – час релаксації вакансій на міжфазних границях фази α ;

$j = 1 \cdot 10^{+11} \text{ А}/\text{м}^2$ – густина струму;

$\delta = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ – ширина міжфазної границі;

$\rho = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2$ – питомий електричний опір фази α ;

$\Delta x_0 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ – початкова ширина фази α .

При проведенні моделювання, змінювалось лише значення величини часу релаксації для вакансій в об'ємі фази – τ_{Vg} , всі інші параметри системи залишались постійними (тому зміни будуть тільки для результатів, що відповідають моделі №3). При вибраних параметрах системи кінетика росту фаз для моделей №2 і №3 повністю співпадає: ріст фази відбувається швидше на аноді ніж на катоді (рис.2). На катоді ріст фази триває до тих пір поки ширина фази не досягне певної критичної величини при якій потік компоненту А обумовлений градієнтом концентрацій не стане рівним потоку обумовленому електроміграцією (напрямок якого протилежний до першого потоку). Слід зазначити, що час релаксації вакансій порядку 10^{-2} с, відповідає випадку неефективної роботи джерел і стоків вакансій. В той же час для моделі №1 (рівноважна концентрація вакансій у системі) все навпаки: швидше росте фаза на катоді, ніж на аноді. По мірі зменшення величини τ_{Vg} (що відповідає підвищенню ефективності роботи джерел/стоків нерівноважних вакансій у об'ємі фази α) фаза на аноді для моделі №3 починає рости повільніше, а на катоді швидше у порівнянні з моделлю №2, (рис.3). Коли τ_{Vg} досягає значення 10^{-5} с, то для досліджуваної моделі №3 відбувається зміна режиму росту фази: на катоді фаза починає рости швидше ніж на аноді (рис. 4). При подальшому зменшенні величини τ_{Vg} кінетика росту фази на катоді та аноді для моделі №3 наближається до кінетики для моделі №1 (рис 5). Отже, за достатньо ефективною роботи джерел/стоків вакансій в об'ємі фази модель №3 дає результати, що відповідають випадку, коли в системі підтримується рівноважна концентрація вакансій.

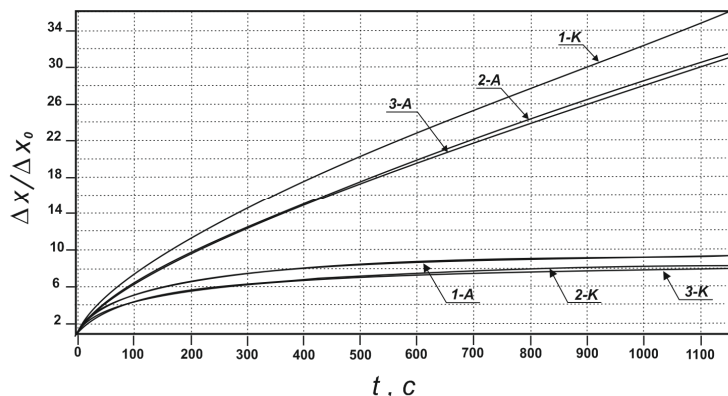


Рис. 2. Залежність ширини фази від часу проведення експерименту (час релаксації вакансій в об'ємі фази α $\tau_{Vg} = 1 \cdot 10^{-2} c$).

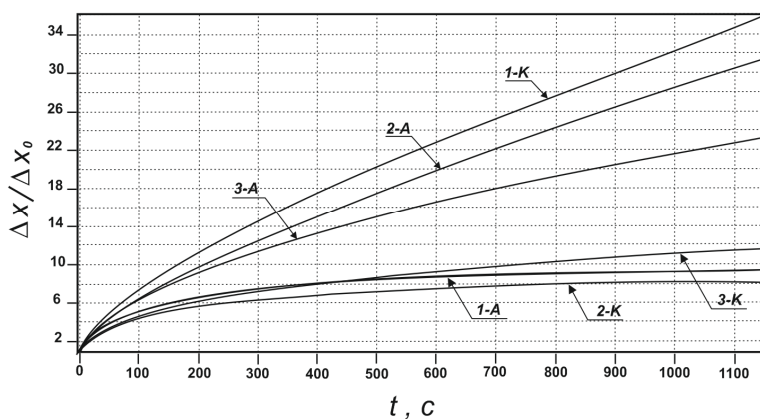


Рис. 3. Залежність ширини фази від часу проведення експерименту (час релаксації вакансій в об'ємі фази α $\tau_{Vg} = 1 \cdot 10^{-5} c$).

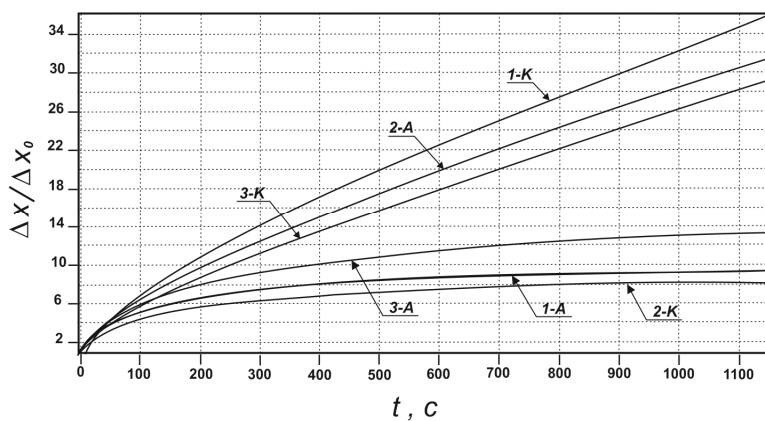


Рис. 4. Залежність ширини фази від часу проведення експерименту (час релаксації вакансій в об'ємі фази α $\tau_{Vg} = 1 \cdot 10^{-6} c$).

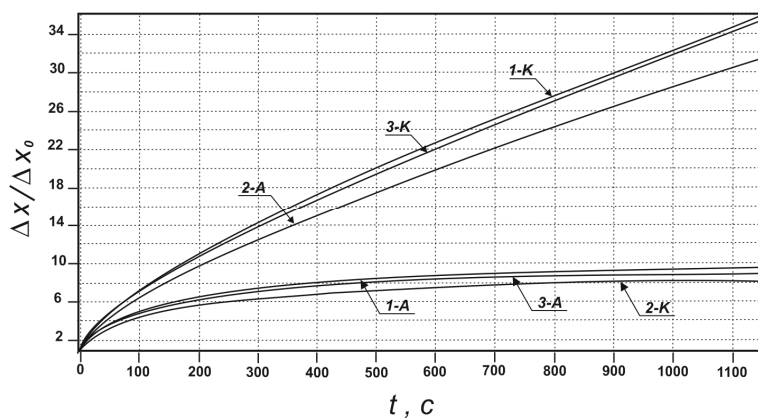


Рис. 5. Залежність ширини фази від часу проведення експерименту (час релаксації вакансій в об'ємі фази α $\tau_{Vg} = 1 \cdot 10^{-7} c$).

Висновки

1. Аналіз розробленої моделі реакційної дифузії при електроміграції показав, що джерела/стоки нерівноважних вакансій можуть впливати не тільки на кінетику цього процесу, але і на його режим: де буде швидше рости фаза на катоді чи на аноді.

2. Як свідчать результати моделювання для розглянутої в роботі моделі реакційної дифузії, при ефективній роботі джерел/стоків вакансій в об'ємі нової фази, її ріст відбувається так сам, як для системи в якій підтримується рівноважна концентрація вакансій.

3. У випадку, коли джерела/стоки вакансій в об'ємі фази діють не достатньо ефективно, кінетика росту фази та її режим, можуть суттєво відрізнятись від випадку рівноважної концентрації вакансій у системі.

Список використаної літератури

1. Tu K. N. Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 94. – P. 5451 – 5473.

2. Chen C. Electromigration and thermomigration in Pb-free flip-chip solder joints / C. Chen, H. M. Tong, and K. N. Tu // *Annu.Rev.Mater.Res.* – 2010. – Vol. 40. – P. 531.

3. An R. Electromigration-induced intermetallic growth and voids formation in symmetrical Cu/Sn/Cu and Cu/Intermetallic compounds (IMCs)/Cu joints / R. An, Y. Tian, R. Zhang, C. Wang // *J Mater Sci:Mater.Electron* – 2015. – Vol. 26. – P. 2674 – 2681.

4. Huang M.L. Electromigration-induced interfacial reactions in Cu/Sn/Electroless Ni-P Solder Interconnects/ M. L. Huang, S. M. Zhou, L. D. Chen // *J. Electron. Mater.* – 2012. –Vol.41., № 4. – P. 730 – 740.

5. Tu K. N. Polarity effect of electromigration on kinetics of intermetallic compound formation in Pb-free solder V-groove samples / K. N. Tu, H. Gan // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – № 97. – P. 063514.

6. Huang M. L. A synchrotron radiation real-time in situ imaging study on the reverse polarity effect in Cu/Sn–9Zn/Cu interconnect during liquid–solid electromigration / M. L. Huang, Z. J. Zhang, N. Zhao, Q. Zhou // *Scripta Materialia*. – 2013. – № 68. – P. 853–856.

7. Зраєв Д. О. Експериментальне дослідження кінетики росту фази під дією постійного електричного струму в системі мідь-олово / Д. О. Зраєв, С. В. Корнієнко // *Вісник Черкаського університету, серія фізико – математичні науки*. – 2013. – № 16(269). – С.64–69.

8. Зраєв Д. О. Дослідження кінетики росту інтерметалічного з'єднання в системі мідь-олово при електроміграції / Д. О. Зраєв, С. В. Корнієнко // *Вісник Черкаського університету, серія фізико – математичні науки*. – 2014. – № 16(309). – С.64–70.

9. Gurov K.P. On the theory of phase growth in the diffusion zone during mutual diffusion in an external electric field./ K.P.Gurov, A.M.Gusak // *Phys. Met. Metall.* – 1987. – Vol. 52, №4. – P.767–773.

10. Chen C. M. Electromigration effect upon the Sn–0.7 wt% Cu/Ni and Sn–3.5 wt% Ag/Ni interfacial reactions / C. M.Chen , S.W.Chen // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – № 90. – P. 1208 – 1214.

11. Chen S. W. Electromigration effects upon interfacial reactions / S. W.Chen, C. M. Chen // *JOM*. – 2003. – № 55. – P. 62 – 67.

12. Гусак А.М. Фазоутворення при електроміграції / А.М. Гусак, С.В. Корнієнко // *Вісник Черкаського університету*. – 2007. – № 114. – С.11–38.

13. Kornienko S. V. The cooperative effect of Electromigration and Non-Equilibrium Vacancies on Reactive Phase Growth / S. V. Kornienko , A. M. Gusak // *Philosophical Magazine*. – 2009. – Vol.89, №9. – P.525–534.

14. Gurov K.P. Mutual diffusion in an external electric field with allowance for non-equilibrium vacancies. / K.P.Gurov, A.M.Gusak // *Phys. Met. Metall.* – 1981. – Vol. 52, №3. – P.131–138.

References

1. Tu K. N. (2003). Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects. *Journal of Applied Physics*, 94, 5451-5473.
2. Chen C., Tong H. M., Tu K. N. (2010). Electromigration and thermomigration in Pb-free flip-chip solder joints. *Annu.Rev.Mater.Res.*, 40, 531-555.
3. An R., Tian Y., Zhang R., Wang C. (2015). Electromigration-induced intermetallic growth and voids formation in symmetrical Cu/Sn/Cu and Cu/Intermetallic compounds (IMCs)/Cu joints. *J Mater Sci:Mater.Electron*, 26, 2674-2681.
4. Huang M. L., Zhou S. M., Chen L. D. (2012). Electromigration-induced interfacial reactions in Cu/Sn/Electroless Ni-P Solder Interconnects. *J. Electron. Mater.* 41(4), 730-740.
5. Tu K. N., Gan H. (2005). Polarity effect of electromigration on kinetics of intermetallic compound formation in Pb-free solder V-groove samples *Journal of Applied Physics*. 97, 063514.
6. Huang M. L., Zhang Z. J., Zhao N., Zhou Q. (2013). A synchrotron radiation real-time in situ imaging study on the reverse polarity effect in Cu/Sn-9Zn/Cu interconnect during liquid-solid electromigration. *Scripta Materialia*. 68, 853-856.
7. Zraev D. O., Kornienko. S. V. (2013). Experimental research of the growth kinetics of the new phase in the system copper - tin under electric current. *Visnyk Cherkaskoho universytetu (Bulletin of Cherkasy University)*. 16(269), 64-69.
8. Zraev D. O., Kornienko. S. V. (2014). Investigation of the growth kinetics of the intermetallic compound in the system copper - tin with electromigration. *Visnyk Cherkaskoho universytetu, seriia fizyko – matematychni nauky. (Bulletin of Cherkasy University)*. 16(309). 64-70.
9. Gurov K. P., Gusak A. M. (1987). On the theory of phase growth in the diffusion zone during mutual diffusion in an external electric field. *Fizika metallov i Metallovedenie (Physics of metals and Metallography)*, 52(4),767-773.
10. Chen C. M., Chen S. W. (2001). Electromigration effect upon the Sn-0.7 wt% Cu/Ni and Sn-3.5 wt% Ag/Ni interfacial reactions. *Journal of Applied Physics*. 90, 1208-1214.
11. Chen S. W., Chen C. M. (2003), Electromigration effects upon interfacial reactions. *JOM*. 55, 62-67.
12. Gusak A. M., Kornienko. S. V. (2007). Phase formation during electromigration. *Visnyk Cherkaskoho universytetu (Bulletin of Cherkasy University)*. 114, 11-38.
13. Kornienko S. V., Gusak A. M. (2009). The cooperative effect of Electromigration and Non-Equilibrium Vacancies on Reactive Phase Growth. *Philosophical Magazine*. 89(9), 525-534.
14. Gurov K. P., Gusak A. M. (1981). Mutual diffusion in an external electric field with allowance for non-equilibrium vacancies. *Fizika metallov i Metallovedenie (Physics of metals and Metallography)*, 52(3), 131-138.

Summary. S.V. Kornienko. Electromigration effects on reaction diffusion in a binary system with non-equilibrium vacancies. *The model of reaction diffusion in the binary system under an electric current has been considered. The existence of non-equilibrium vacancies in the diffusion system is a feature of the model. Sources / sinks of vacancies are at the interface and in the bulk of the new phase. There has been done numerical modeling of a new phase growth based on this model. The comparing of the simulations results for different models of reaction diffusion process under electromigration have been compared. It is shown that nonequilibrium vacancies can significantly affect on the kinetics of diffusion phase growth. A new phase can grow faster either at the cathode or at the anode, depending on the efficiency of the sources / sinks of vacancies. If the sources / sinks of vacancies are effective, a phase growth will be the same as at the case of the equilibrium concentration of vacancies in the system.*

Keywords: reaction diffusion, electromigration, non-equilibrium vacancies, phase growth kinetics, binary system.