

А. С. Шірінян

## Розмірно-індукована реакційна дифузія у бінарній твердофазній системі

*Фізичний факультет, Київський національний університет ім. Т. Шевченка,  
проспект Академіка Глушкова 2, корпус 1, Київ, 03680, Україна, [aramshirinyan@ukr.net](mailto:aramshirinyan@ukr.net)*

В роботі обґрунтовано розмірну залежність коефіцієнту гетеродифузії атомів в наноматеріалах. Обговорюється проблема опису кінетики росту нової проміжної нанофази в бінарній дифузійній парі під час відпалу. Показано, що відповідно до типу розмірної залежності коефіцієнту дифузії від товщини прошарку нової нанофази показник швидкості росту може зростати або зменшуватися немонотонно.

**Ключові слова:** відпал бінарної дифузійної пари, проміжна фаза, кінетика росту нанофази, коефіцієнт гетеродифузії атомів, показник швидкості росту, товщина прошарку фази.

*Стаття постуила до редакції 17.03.2010; прийнята до друку 15.12.2010.*

### Вступ

У матеріалознавстві ведуться роботи із створення технологічних процесів, наукових і технічних об'єктів для виробництва нових наноматеріалів з бажаними властивостями. В зв'язку з цим однією з найважливіших задач є адекватний опис фізико-хімічних процесів з фазовими перетвореннями першого роду, що відбуваються в наноматеріалах (пристроях) при тривалих часах відпалу (використання). Серед багатьох проблем сучасної фізики залишається відкритим питання щодо залежності коефіцієнта дифузії від об'єму нанорозмірного середовища в таких процесах.

Відпал бінарної дифузійної пари, де народжується і росте нова проміжна фаза нового складу, може розглядатися як приклад фазового переходу першого роду, як приклад реакційної дифузії. Такий процес є багатостадійним процесом релаксації метастабільної системи, де умовно можна виділити зародкоутворення (нуклеацію) і ріст нової фази [1 - 6]. Чим товщі стають прошарки нової фази, тим більше часу потрібно для взаємної дифузії, тим повільніше іде реакція, а швидкість росту фази зменшується із часом. Згідно класичної теорії росту проміжної фази характерна товщина нової фази  $DX$  змінюється при великих часах відпалу за параболічним законом,  $DX = \epsilon t^n$ ,  $n = 1/2$  ( $\epsilon$  – константа росту, яку отримано далі). Показник  $n$  називають показником швидкості росту [7]. Він є одним з головних параметрів, що характеризує механізм і кінетику росту нової фази. Саме тому в роботі основну увагу буде приділено знаходженню

показника швидкості росту  $n$ .

Класична теорія росту була сформульована в роботах Вагнера (С. Wagner), Френкеля (Я. И. Френкель) і дістала подальшого розвитку в роботах Кідсона (G. V. Kidson) [7]. Вона не розглядає концентраційні і розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів, які можуть існувати в фазах на початкових етапах росту. Отже, залишається актуальним і не вирішеним питання щодо на початкових стадій росту прошарку нової фази.

Експериментальні дослідження відпалів дифузійних пар дозволяють знаходити залежності товщини  $DX$  від часу і мають певні обмеження до визначення показника швидкості росту  $n$  як функції товщини. В останніх експериментальних роботах на прикладі Cu/Sn-Pb системи, де народжується прошарок інтерметаліду  $Cu_6Sn_5$  в інтервалі температур (125-175) °C на протязі 30 днів, отримано суттєві відхилення розрахункового показника швидкості росту  $n$  від відповідних значень класичної теорії росту [8]. Однак автори названих експериментів не припускають розмірної залежності коефіцієнта дифузії.

Метою даної роботи є обґрунтування наявності розмірної залежності коефіцієнта дифузії в нанорозмірних середовищах та дослідження впливу розмірно-індукованої дифузії на кінетику початкових стадій росту нової проміжної фази на основі аналітичних розрахунків, чисельного розв'язання рівнянь росту нової фази. Ми побачимо, що таке наближення може давати невідомі до цього часу результати, які полягають у можливості немонотонної швидкості росту товщині прошарку і різних режимів росту.

## I. Фізичні причини розмірно-індукованої залежності коефіцієнта дифузії

Дамо прості феноменологічні міркування, які приводять до необхідності врахування розмірної залежності коефіцієнта дифузії в наноматеріалах.

Для цього розглянемо дифузію в бінарній системі з позицій енергоактивованого процесу [9]:

$$D = D_0 \exp(-Q/kT). \quad (1)$$

Тут  $D_0$  – передекспоненціальний частотний фактор,  $Q$  – енергія активації процесу дифузії,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура. Передекспоненціальний фактор  $D_0$  визначається частотою коливання атомів, яка залежить від температури і не суттєво залежить від розмірів наносистеми. Водночас невелика зміна у енергії активації  $Q$  буде суттєво впливати на значення коефіцієнта дифузії (1).

Розмірна залежність енергії активації взаємної дифузії може бути оцінена достатньо просто, якщо згадати той факт, що в наносистемах експериментально спостерігається зміна температури плавлення  $T_{пл}$  і температур фазових перетворень речовин [10 - 13]. Відповідна залежність має вигляд:

$$T_{пл} = T_{\infty} \cdot \{1 - \beta/(2L)\}, \quad (2)$$

Для неорганічних матеріалів, оцінка формулою (2) дає значення  $\beta$  в межах від 0,4 до 3,3 нм, тут  $L$  вимірюється в метрах.

З іншого боку, статистичні розрахунки для хімічних елементів і теоретичні наближення показують кореляцію між енергією активації дифузії (3), теплотою плавлення і температурою плавлення матеріалу (2), яку можна записати у вигляді простої оцінки [9]:

$$Q = 18kT_{пл}. \quad (3)$$

Враховуючі той факт, що зменшене значення температури плавлення  $T_{пл}$  залишається більшим за температуру Дебая, то для опису розмірної залежності коефіцієнта дифузії можна не враховувати квантово-механічні ефекти.

Підстановка формул (2 - 3) в формулу (1) дає оцінку розмірної залежності коефіцієнта дифузії:

$$D = D_0 \exp(-18T_{\infty} \{1 - \beta/(2\Delta X)\}/T). \quad (4)$$

Ця залежність є монотонно спадаючою функцією товщини нової фази  $\Delta X$ .

У загальному випадку необхідно врахувати розмірну залежність як величини  $D_0$  так і енергії активації  $Q$ , що може приводити до більш складних функціональних залежностей ніж формула (4).

Фізичну причину існування розмірної залежності коефіцієнта дифузії можна зрозуміти також з мікроскопічних міркувань і експериментальних спостережень, які мають місце у різних галузях фізики матеріалів.

1. Ріст проміжної фази супроводжується появою зерен нової фази. З'являється взаємна кореляція між товщиною проміжної фази, розмірами зерен нової фази, дисперсністю, дефектністю границь прошарку нової фази і коефіцієнтом дифузії. Під час росту

механізм дифузії змінюється від поверхневого до об'ємного, а потім від об'ємного до зернограничного всередині самої проміжної фази. Отже, можна оцінити в такому разі ефективний коефіцієнт дифузії на великих часах відпалу за формулою:  $D \approx D_{од} + D_{гз} \delta / \Delta X$ , де  $\delta$  є середньою шириною каналу зернограничної дифузії (товщина поверхневого прошарку між зернами нової фази). Коефіцієнт зернограничної дифузії,  $D_{гз}$ , є набагато більшим за коефіцієнт об'ємної дифузії,  $D_{од}$ .

2. В процесі росту нової фази аморфна фаза стає кристалічною [14 - 15]. Така структурна залежність дифузії приведе до залежності коефіцієнта дифузії від розміру нової фази.

3. Відбувається зміна кристалічних модифікацій зі зміною товщини півки [16 - 18].

4. Існує анізотропність значень коефіцієнта дифузії - різні значення у різних кристалографічних напрямках навіть для однієї решітки [9].

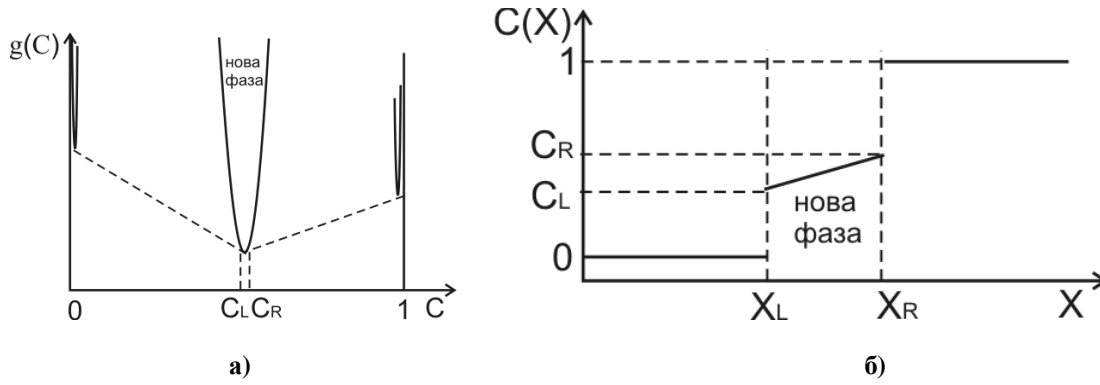
5. В багатокомпонентних системах має місце концентраційна залежність коефіцієнта гетеродифузії, яка приведе до просторової залежності, а, саме, залежності від товщини прошарку нової фази. Крім того, в наносистемах спостерігається зміщення концентраційних границь розчинності. Спостерігається зміщення умов рівноваги співіснування наночастинок у порівнянні з макроскопічними матеріалами [19].

Таким чином, наведені факти показують, що коефіцієнт дифузії в наноматеріалах стає залежним від розміру. Застосуємо отриманий загальнофізичний результат щодо розмірної залежності коефіцієнта дифузії атомів для дослідження випадку відпалу бінарної дифузійної пари, де народжується і росте нова проміжна наночастина нового складу. Автором обрано плоску геометрію для того, щоб виокремити «загальнофізичну» (розмірно-індуковану) поведінку від можливих «інших» припущень (наприклад, впливу кривизни поверхні матеріалу на поведінку коефіцієнта дифузії).

## II. Класична модель росту однієї фази

Нагадаємо коротко класичну модель росту нової проміжної фази. Оберемо, що на початку реакційної дифузії атоми сорту А знаходяться ліворуч, атоми В – праворуч, а під час росту нової фази атоми А і В дорожують фазу всередині нової фази за рахунок взаємної дифузії. Припустимо, що за певних умов існує концентраційний інтервал гомогенності проміжної фази  $DC = C_R - C_L$ , в межах якого може народитися і рости нова фаза, на границях якої  $X_R$  і  $X_L$ , вже встановлено термодинамічно рівноважні концентрації  $C_R$  і  $C_L$ , відповідно (рисунок 1а). Такий ріст називають також дифузійно-контрольованим ростом нової фази.

Швидкість росту проміжної фази визначається лише середнім по фазі ефективним коефіцієнтом взаємної дифузії атомів  $D$  (коефіцієнтом гетеродифузії) і термодинамічним стимулом



**Рис. 1.** Схематичне зображення термодинамічного стимулу перетворення для дифузійно-контрольованого росту (а) і відповідного концентраційного профілю для росту нової фази між нерозчинними компонентами (б).  $g(C)$  – залежність густини енергії Гіббса нової фази від складу,  $DX = X_R - X_L$  – характерна товщина нової фази. Похилі пунктирні лінії, що сполучають залежність густини енергії Гіббса нової фази від складу з залежностями для компонентів А і В, є спільними дотичними, які визначають склад у фазах.

утворення фази.

Згідно класичної теорії росту нової фази рівняння балансу речовини на рухомих границях нової фази може бути представлено у вигляді [20 - 22]:

$$\frac{1}{2} \frac{d\Delta X^2}{dt} = \frac{1 - \Delta C}{(1 - C_R)C_L} D \Delta C, \quad (5)$$

де  $DX = X_R - X_L$ ,  $DC = C_R - C_L$ ,  $DC \ll 1$ . Якщо коефіцієнт гетеродифузії є сталим, то формула (1) і рівняння (5) дають аналітичний розв'язок - добре відомий параболічний закон росту фази:

$$(\Delta X)^2 = (\Delta X_0)^2 + \frac{2(1 - \Delta C)D \Delta C}{(1 - C_R)C_L} (t - t_0). \quad (6)$$

Тут  $DX_0$  є товщиною первинного суцільного прошарку після зародкоутворення в момент часу  $t_0$ .

Перейдемо до аналізу запропонованого автором розмірно-індукованого росту нової проміжної фази і покажемо основні відмінності результатів такого підходу. У наступному аналізі коефіцієнт  $D$  стає функцією товщини нової фази:  $D = D(DX)$ .

### III. Розмірно-індуковані залежності коефіцієнта гетеродифузії

Запишемо узагальнене рівняння (5) росту для нашого випадку:

$$\frac{1}{2} \frac{d\Delta X^2}{dt} = \frac{1 - \Delta C}{(1 - C_R)C_L} D(\Delta X) \Delta C \quad (7)$$

Припустимо, що ріст нової фази можна описати за допомогою ступеневої залежності:  $DX = \varepsilon(t - t_0)^n + DX_0$ .

Тоді оцінка показника  $n$  може бути здійснена за допомогою простого співвідношення:

$$n \equiv \frac{d \ln(\Delta X - \Delta X_0)}{d \ln(t - t_0)} = \frac{(t - t_0)}{\Delta X - \Delta X_0} \frac{d(\Delta X)}{dt}. \quad (8)$$

Покажемо, що формула (8) дозволяє знаходити аналітичний розв'язок для показника швидкості росту. Для цього замінимо в правій частині (8) останній дріб на рівняння росту (7). Така заміна дає для (8):

$$n \equiv \frac{(t - t_0)}{\Delta X - \Delta X_0} \frac{1 - \Delta C}{(1 - C_R)C_L} D(\Delta X) \frac{\Delta C}{\Delta X} \quad (9)$$

Заслугує на увагу той факт, що вирази для рівнянь росту не змінюють знак для будь-якої товщини  $DX > DX_0$ . Це означає, що товщина нової фази  $DX$  є монотонно зростаючою функцією часу. Тому рівняння (7) може бути розв'язано відносно не часу, а координат за умов припущення існування оберненої залежності  $t(DX)$ . Отже, якщо шукати час  $t$  як функцію товщини, то таким чином можна отримати аналітичний розв'язок. З цих позицій, рівняння (7) буде мати такий розв'язок:

$$t - t_0 = \frac{(1 - C_R)C_L}{(1 - \Delta C)\Delta C} \int_{\Delta X_0}^{\Delta X} \frac{y}{D(y)} dy. \quad (10)$$

В даному рукописі здійснено аналіз рівняння (7) як аналітично (10) – для демонстрації методики, так і за допомогою чисельних розв'язків – для знаходження спектру всіх величин, що описують процес росту.

**Залежності коефіцієнта гетеродифузії.** Ми дослідили різні типи залежностей коефіцієнту

**Таблиця 1**

Вибіркові розміри залежності кінетичних коефіцієнтів для опису росту нової проміжної фази у бінарній наносистемі.

№ випадку	Назва залежності	$D/D_0=f(DX)$
1	параболічна	$f = \text{const}_1 + \text{const}_2 \cdot (DX - \text{const}_3 \cdot DX_0)^2$
2	експоненціальна	$f = \text{const}_4 \pm \exp(-\text{const}_5 \{1 - \text{const}_6/DX\})$ .

$D = f(DX)$  (таблиця 1). В наведеному дослідженні ми покажемо лише два випадки монотонно спадаючих залежностей від розміру, пам'ятаючи про монотонну залежність коефіцієнта дифузії за формулою (4).

Оберемо, наприклад, перший випадок параболічної залежності  $D/D_0 = f(DX) = \text{const}_1 + \text{const}_2 \cdot (DX - \text{const}_3 \cdot DX_0)^2$ . Інтегрування (10) дає:

$$t - t_0 = \frac{(1 - C_R)C_L}{(1 - \Delta C)D_0 \cdot \Delta C} \left[ \frac{1}{2 \text{const}_2} \ln \left\{ \frac{(\Delta X - \text{const}_3 \Delta X_0)^2 + \frac{\text{const}_1}{\text{const}_2}}{\Delta X_0^2 (1 - \text{const}_3)^2 + \frac{\text{const}_1}{\text{const}_2}} \right\} + \frac{\text{const}_3 \Delta X_0}{2 \sqrt{\text{const}_1 \cdot \text{const}_2}} \left\{ \arctg \left( \sqrt{\frac{\text{const}_2}{\text{const}_1}} [\Delta X - \text{const}_3 \Delta X_0] \right) - \arctg \left( \sqrt{\frac{\text{const}_2}{\text{const}_1}} [\Delta X_0 (1 - \text{const}_3)] \right) \right\} \right]$$

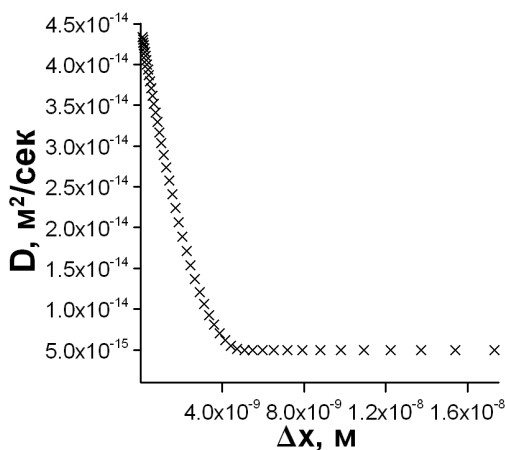
Як бачимо, ми отримали нелінійний і громіздкий щодо значень  $DX$  розв'язок для закону росту прошарку нової фази. Це означає, що дослідження кінетики росту за допомогою чисельних розрахунків може бути більш ефективним, ніж аналітичний розв'язок задачі.

Перейдемо до відповідних результатів

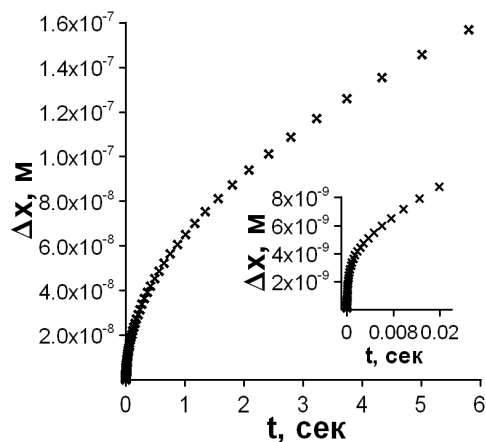
чисельного розрахунку, що перевірялися аналітичними розв'язками.

#### IV. Розмірно-індукований ріст фази лімітований дифузією в новій фазі

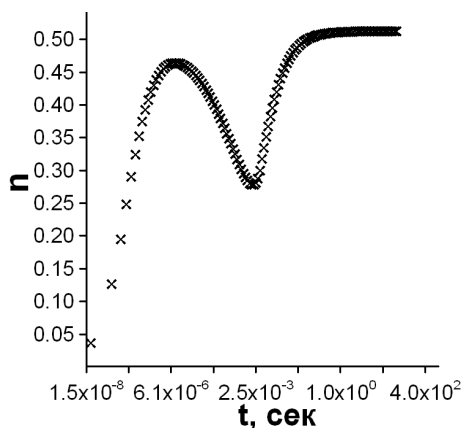
Випадок 1 таблиці 1 – параболічна залежність



а)



б)



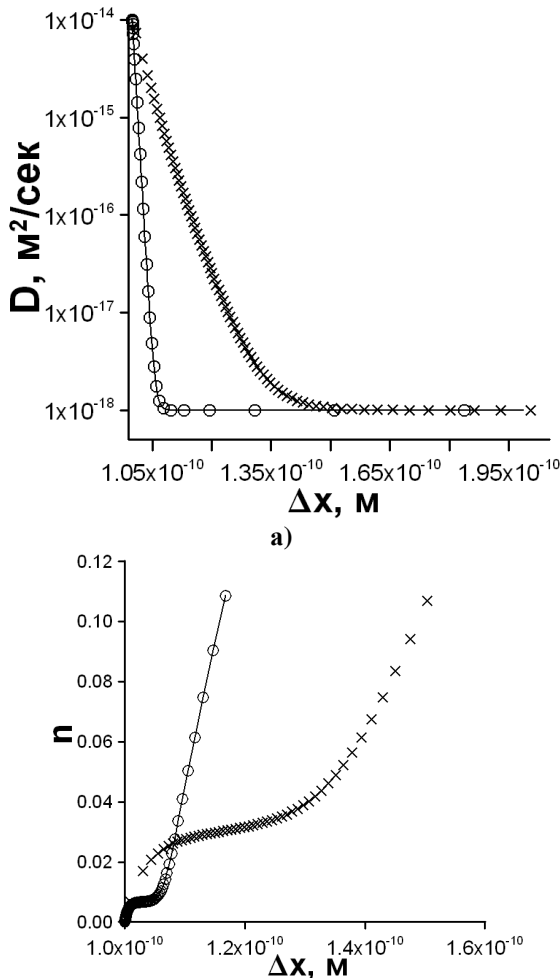
в)

**Рис. 2.** Кінетика розмірно-індукованого росту нової проміжної фази, що контролюється швидкістю гетеродифузії атомів всередині нової фази: (а) – розмірна (параболічна) залежність коефіцієнта дифузії, (б) – отримана часова залежність товщини проміжної фази, (в) – еволюція в часі показника швидкості росту. Асимптотичне значення показника  $n$  дорівнює 0.5.

**D.** Для даного випадку нами обрано такі параметри для товщини  $DX \leq 50DX_0$ :  $D_0 = 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с,  $C_L = 0,45$ ,  $C_R = 0,55$ ,  $DX_0 = 10^{-10}$  м,  $t_0 = 10^{-10}$  с,  $const_1 = 0,5$ ,  $const_2 = 0,0016 / DX_0^2$ ,  $const_3 = 50$ . Для товщини  $DX > 50DX_0$  коефіцієнт  $D$  приймався постійним і рівним  $D = const_1 D_0$ . Результати представлено на рисунку 2.

Ми бачимо, що результуючі значення товщини нової фази під час росту не мають особливостей, а сама залежність є дуже схожою до звичайного параболічного росту (рис. 2б). Водночас аналіз показника  $n$  вказує на можливу немонотонність швидкості росту (рис. 2в). Таким чином, вплив розмірно-індукованої дифузії може бути суттєвим для визначення показника швидкості росту і «непоказовим» для часової залежності товщини нової фази.

Детальний аналіз цього випадку дозволяє зробити висновок: чим повільніше змінюється коефіцієнт дифузії, тим менше значення  $n$  в точці



**Рис. 3.** Розмірно-індукований ріст нової проміжної фази, що контролюється швидкістю гетеродифузії: (а) – розмірна (експоненціальна) залежність коефіцієнта дифузії, (б) – зміна показника  $n$  з зміною товщини нової фази. Асимптотичне значення показника  $n$  дорівнює 0.5. Параметри системи подано у основному тексті.

мінімуму, тобто більшою є амплітуда відхилення значень показника швидкості росту  $n$  від 0.5 в точці мінімуму.

**Випадок 2 таблиці 1 – експоненціальна залежність D.** Розглянемо тепер задачу (7) для іншої функціональної залежності коефіцієнта дифузії. Для даного випадку нами обрано такі параметри:  $C_L = 0,45$ ,  $C_R = 0,55$ ,  $DX_0 = 10^{-10}$  м,  $t_0 = 10^{-10}$  с,  $D_0 = 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с,  $const_4 = 0,001$ ,  $const_5 = 18T_Y/T$ ,  $const_6 = 10^{-10}$  м. Для одного випадку обрано значення температур  $T_Y = 800$  К,  $T = 400$  К (на рисунку 3 показано символом  $\times$ ), для другого випадку -  $T_Y = 2800$  К,  $T = 300$  К (на рисунку 3 показано символом  $o$ ).

Експоненціальна залежність коефіцієнта дифузії (4) дає трьохстадійний ріст прошарку нової фази на початкових стадіях росту, однак, показник швидкості росту  $n$  монотонно зростає до свого асимптотичного значення  $n = 0,5$ .

### Висновки і перспективи дослідження

В роботі отримано, що коефіцієнт дифузії в наноматеріалах стає розмірно-залежним. З цих позицій автором здійснено узагальнення класичної теорії росту проміжної фази в бінарній дифузійній парі. За допомогою такого опису отримано, що показник швидкості росту нової фази може бути немонотонним в часі, процес росту може уповільнюватись і прискорюватись.

Останній результат отримано для випадку росту однієї фази з вузьким концентраційним інтервалом при відпалі пари зразків із взаємно майже нерозчинних матеріалів, коли: і) потужності джерел і стоків вакансій на границях фазового шару, що росте, є достатніми для забезпечення квазірівноважності вакансійної підсистеми, ii) дифузійний потік по товщині нової фази (добуток коефіцієнта взаємної дифузії на градієнт концентрації всередині фази) вздовж фази є однаковим, профіль концентрації всередині фази є майже лінійним (рисунк 1б).

Врахування розмірної залежності кінетичних коефіцієнтів дозволить не тільки зрозуміти початкові стадії росту нової нанофази, а й розв'язати «обернену» задачу - знаходити значення кінетичних коефіцієнтів з експериментальних даних по кривих товщини росту  $DX(t)$ , середньому розміру зерен нової фази при різних температурах. Така робота ведеться і є предметом окремого дослідження.

Наступним актуальним загальнофізичним завданням є опис процесів розмірно-індукованої дифузії в наноматеріалах.

### Подяки.

Робота виконана в рамках спільного російсько-українського проекту номер Ф.28.7/049 Державному Фонду Фундаментальних Досліджень України і Російського Фонду Фундаментальних Досліджень номер 09-08-90406.

**Шірінян А.С.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент фізичного факультету Київського національного університету ім. Т. Шевченка, докторант.

- [1] A.L. Greer. Diffusion and reaction in thin films // *Applied Surface Science*, **86**, pp. 329-337 (1995).
- [2] А.М. Гусак. Особенности зародышеобразования в поле градиента концентраций бинарной системы // *УФЖ*, **35**, сс. 725-729 (1990).
- [3] P.J. Desre, A.P. Yavari. Suppression of crystal nucleation in amorphous layers with sharp concentration gradients // *Physical Review Letters*, **64**, pp. 1533-1535 (1990).
- [4] F. Hodaj and P.J. Desre. Effect of sharp gradient of concentration on nucleation of intermetallics at interfaces between polycrystalline layers // *Acta Materialia*, **44**, pp. 4485-4490 (1996).
- [5] А.С. Шірінян, А.М. Гусак. Термодинаміка зародкоутворення проміжної фази в полі градієнта концентрації з урахуванням перерозподілу компонентів // *УФЖ*, **42**, сс. 1276 - 1284 (1997).
- [6] A.S. Shirinyan. Effect of sharp concentration gradient on nucleation during the interdiffusion – reconsideration of different modes of thermodynamics of nucleation // *Bulletin of Cherkasy State University. Physics. Proceedings of DIFTRANS'2001*, **36-37**, pp. 129-144 (2002).
- [7] Б.А. Гуров, Б.А. Карташкин, Ю.Э. Угастэ. *Взаимная диффузия в многофазных металлических системах*. Наука, М. (1981) 352 с.
- [8] K. H. Prakash, T. Sritharan. Effects of solid state annealing on the interfacial intermetallics between tin-lead solders and copper // *Journal of Electronic Materials*, **32**, pp. 939-947 (2003).
- [9] Б.С. Бокштейн, *Диффузия в металлах*. Металлургия, М. (1978) 248 с.
- [10] P. Pawlow. Über die Abhängigkeit des Schmelzpunktes von den Oberflächenenergie eines festen Körpers // *Zeitschrift für Phys. Chemie*, **65**, pp. 1-35 (1909).
- [11] Ph. Buffat, J-P. Borel. Size effect on the melting temperature of gold particles // *Physical Review A*, **13**, pp. 2287-2298 (1976).
- [12] P.R. Couchman, W.A. Jesser. Thermodynamic theory of size dependence of melting temperature in metals // *Nature*, **269**, pp. 481-483 (1977).
- [13] A. Shirinyan, M. Wautelet. Phase separation in nanoparticles // *Nanotechnology*, **15**, pp. 1720-1731 (2004).
- [14] A. Blatter, M. Allmen. Reversible amorphization in laser-quenched titanium alloys // *Physical Review Letters*, **54**, pp. 2103-2106 (1985).
- [15] А.В. Серебряков. О переходах из кристаллического и жидкого в аморфное состояние // *МФУИТ*, **13**, сс. 115-121 (1991).
- [16] K. Barmak, C. Michaelsen, G. Lucadamo. Reactive phase formation in sputter-deposited Ni/Al multilayer thin films // *Journal Materials Research*, **12**, pp. 133-146 (1997).
- [17] И. Д. Морохов, В. И. Петин, Л. И. Трусов, В. Ф. Петрунин. Структура и свойства малых металлических частиц // *УФН*, **133**, сс. 653-689 (1981).
- [18] Ю.Ф. Комник, *Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты*. Атомиздат, М. 264 с. (1979).
- [19] Л.С. Палатник, М.Я. Фукс, В.М. Косевич, *Механизм образования и субструктура конденсированных пленок*. Наука, М. (1972) 252 с.
- [20] Б.Я. Любков *Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах*. Наука, М. (1981) 296 с.
- [21] Я.Е. Гегузин *Диффузионная зона*. Наука, М. (1979) 344 с.
- [22] А.М. Гусак, О.О. Богатирьев, Т.В. Запорожець, А.О. Ковальчук, С.В. Корнієнко, Г.В. Луценко, Ю.О. Ляшенко, А.С. Шірінян, *Модели твердофазных реакций*. ЧНУ, Черкаси. 314 с. (2004)

A.S. Shirinyan

## Size-Induced Diffusion Reaction in a Binary Solid Phase System

*Department of Metal Physics, Physics Faculty, Taras Shevchenko National University at Kiev,  
Academic Glushkov avenue, 2, building 1, Kiev, 01601, Ukraine*

Size dependence of heterodiffusion coefficient of atoms in nanomaterials is substantiated. The problem of description of growth kinetics of new intermediate nanophase in a binary diffusion couple during annealing is discussed. It is shown that depending on the type of diffusion coefficient dependence from the thickness of new nanophase layer the time exponent can grow and decrease nonmonotonically.

**Key-words:** binary diffusion couple annealing, intermediate phase, kinetics of nanophase growth, heterodiffusion coefficient of atoms, growth rate index, thickness of phase layer.