

Д.М. Фреїк, І.С. Биліна, Л.Й. Межиловська, Р.В. Уманців

## ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У ПАРОФАЗНИХ НАНОКОНДЕНСАТАХ PbTe:Bi НА СИТАЛІ

Фізико-хімічний інститут

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна, E-mail: vania\_bylina@mail.ru

На основі аналізу результатів АСМ-зображень досліджено процеси структуроутворення парофазних конденсатів легованого 1 ат. % Bi плюмбум телуриду. Осадження пари здійснювали у відкритому вакуумі на підкладки із полікристалічного ситалу за температур випарування  $T_B = (920-1020)$  К, підкладок –  $T_{II} = (420-520)$  К. Час осадження  $\tau$  варіювався в межах  $\tau = (3-120)$  с при товщині конденсатів  $d = (50-2000)$  нм, а середні латеральні ( $D_c$ ) та нормальні ( $h_c$ ) розміри нанокристалітів складали  $D_c = (25-110)$  нм і  $h_c = (8-78)$  нм відповідно. Показано, що у процесах зародження домінує механізм Фольмера-Вебера, при якому утворюються тривимірні наноструктури на поверхні підкладки. Механізми росту нанокристалітів пояснено з позиції оствальдівського дозрівання. З'ясовано, що на поверхні ситалу формуються окремі нанокристали з комбінацій площин  $\{100\}$  і  $\{110\}$  структури NaCl.

**Ключові слова:** плюмбум телурид, парофазні конденсати, механізми росту, оствальдівське дозрівання, орієнтаційні аспекти

### ВСТУП

Халькогеніди свинцю (PbTe, PbSe, і PbS) – напівпровідникові сполуки IV-VI груп Періодичної таблиці, характеризуються вузькою забороненою зоною [1], що обумовлює їх використання для інфрачервоних датчиків (IR), лазерів, світло-випромінюючих пристроїв та у термоелектриці [2–5]. Після теоретичного прогнозу американських фізиків щодо значного збільшення термоелектричної добротності зі зменшенням розмірів конденсатів [6] і подальших експериментальних підтверджень різко зріс інтерес до дослідження наноструктур.

Для отримання тонких плівок сполук IV-VI широко використовуються парофазні вакуумні технології, серед яких особливу увагу привертають методи молекулярно-променевої епітаксії та конденсація пари у квазізамкненому об'ємі, що підтверджено у роботах наукових груп Шпрінгхольца із університету Лінца [7], Цога із Швейцарського національного технологічного інституту [8]. Показано, що формування квантових пірамідальних структур у методах молекулярно-променевої епітаксії [7] та «гарячої стінки» [8] реалізовані за меха-

нізмами Странскі-Крастанова та Фольмера-Фебера відповідно. Раніше нами [10-14] підтверджено можливість реалізації нано- і квантоворозмірних структур відкритим випаровуванням у вакуумі.

Легування суттєвим чином впливає на властивості напівпровідникових матеріалів та наноструктур на їх основі. Зокрема, легування PbTe гетеровалентними домішками, до яких належить і вісмут, обумовлює модифікацію його електронної і фононної підсистем. Це пов'язано із амфотерними властивостями Bi, який може займати місця у катіонній підгратці, будучи ефективним донором, і підгратці халькогену, виступаючи як акцептор [15]. Крім того, тонкоплівковий і нанорозмірний конденсат PbTe:Bi відкриває нові можливості його практичного використання, обумовлені особливостями формування окремих наноструктур і проявом квантових осциляційних ефектів. Із вище зазначених міркувань залишаються актуальними питання, пов'язані із дослідженням особливостей процесів структуроутворення у парофазних конденсатах PbTe:Bi, що і є метою цієї роботи.

Таблиця. Технологічні фактори осадження парофазних конденсатів PbTe:Bi на підкладки із ситалу

№ зразка	Температура випарування $T_B$ , К	Температура підкладки $T_{II}$ , К	Час осадження $\tau$ , с	Товщина конденсату $d$ , нм
1	920	470	15	108
2	920	470	30	220
3	920	470	120	810
4	970	420	15	108
5	970	420	60	540
6	970	420	120	1160
7	970	445	5	65
8	970	445	15	130
9	970	445	60	710
10	970	470	3	54
11	970	470	5	108
12	970	470	7	135
13	970	470	15	162
14	970	470	60	891
15	970	470	120	1890
16	970	495	5	140
17	970	495	15	190
18	970	495	60	1140
19	970	520	15	216
20	970	520	60	1404
21	970	520	120	1755
22	1020	470	10	945
23	1020	470	15	1080
24	1020	470	30	1350

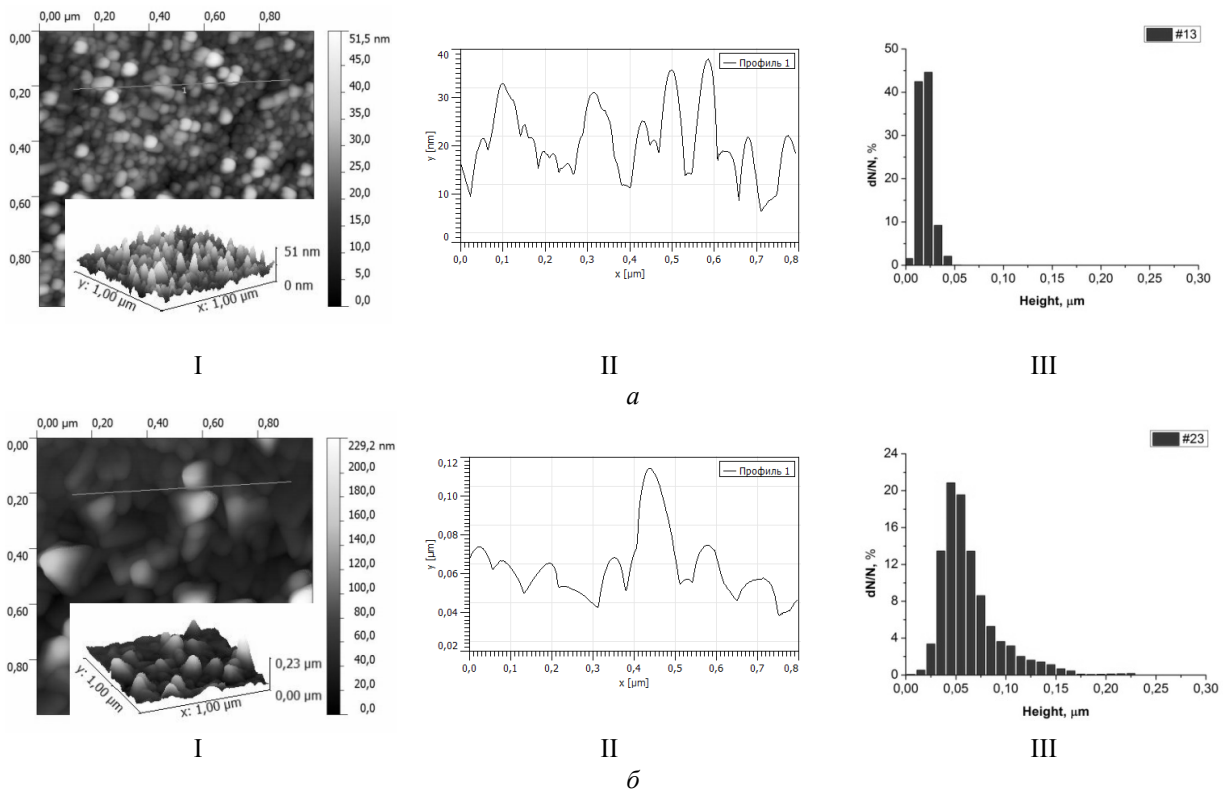
## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Тонкоплівкові наноструктури отримували із парової фази за допомогою методу відкритого випарування у вакуумі наперед синтезованої сполуки PbTe:Bi із 1 ат.% вісмуту. Як підкладки використовували пластини ситалу, які піддавалися попередній хімічній очистці. Температура випарника змінювалася в інтервалі  $T_B = (920-1020)$  К, підкладок –  $T_{II} = (420-520)$  К. Час осадження  $\tau$  варіювався в межах від 3 до 120 с відповідно (таблиця). Морфологія поверхні наноструктур досліджувалася методами атомно-силової мікроскопії (АСМ), Nanoscope 3a Dimension 3000 (Digital Instruments, USA) у режимі періодичного контакту в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ). Вимірювання були проведені в центральній частині зразків з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм (NTOMDT, Росія). За результатами АСМ-досліджень, крім морфології поверхні та профілограм (рис. 1–3), у програмі Gwyddion було проведено розрахунки розмірів нанокристалів у латеральному та нормальному напрямках а також визначено шорсткість поверхні, на основі чого побудовано залежності основних характеристик від різних технологічних умов (рис. 4). Також за допомогою

цієї програми були розглянуті деякі орієнтаційні аспекти, а саме, виміряно полярні  $\rho$  та азимутальні  $\phi$  кути для всіх точок поверхні, а також для граней окремих нанокристалів, за якими розраховували кути між нормаллями до площин цих граней. Використовуючи програму OriginPro 8.5.1, побудовано гістограми розподілу нанокристалів за висотами (рис. 1–3, III).

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Встановлено, що при підвищенні температури випарування  $T_B$  і сталих температурі підкладки  $T_{II} = 470$  К і часу осадження ( $\tau = 15$  с) характерним є збільшення максимальних висот наноструктур (рис. 4 а – крива 1) Так, зокрема, при  $T_B = (920-1020)$  К відбувається збільшення максимальних  $h_m = (28-229)$  нм (рис. 1 – I) та середніх  $h_c = (10-63)$  нм висот (рис. 4 а – крива 1) відповідно. Це підтверджується і гістограмами розподілу висот (рис. 1 – III), які побудовані із кроком 10 нм. Максимум розподілу висот зміщується в область більших значень при підвищенні температури випарування  $T_B$  (рис. 1 – III). Що стосується латеральних розмірів та шорсткості, то їхні середні значення збільшуються адекватно до висот і складають  $D_c = (37-94)$  нм та  $R_a = 1.2-3.4$  нм (рис. 4 а – криві 2, 3) відповідно.



**Рис. 1.** 3D і 2D АСМ-зображення (I), профілограми (II) та гістограми розподілу нанокристалів за висотою (III) у конденсатах PbTe:Vі, отриманих на підкладках із ситалу при температурі випарування  $T_B$ , К: 970(№13) –а, 1020(№23) – б;  $T_{II} = 470$  К,  $\tau = 15$  с

Щодо впливу температури підкладки  $T_{II}$ , за сталих температур випарування ( $T_B = 970$  К) і часу осадження ( $\tau = 60$  с), то тут має місце почергове збільшення та зменшення основних топологічних параметрів наноструктур (рис. 2). Так, якщо при  $T_{II} = 420$  К максимальна висота наноструктур складає  $h_m = 22$  нм, то при  $T_{II} = 470$  К – вже  $h_m = 209$  нм. При подальшому підвищенні температури підкладки, за сталих  $T_B$ ,  $\tau$ , спочатку зменшуються максимальні висоти окремих наноструктур до  $h_m = 47$  нм при  $T_{II} = 495$  К, а згодом вони знову збільшуються до  $h_m = 93$  нм при  $T_{II} = 520$  К. Така сама тенденція проявляється і у гістограмах розподілу (рис. 2 – III). По аналогії проявляється залежність і для середніх висот  $h_c$  (рис. 4 б – крива 1), середніх латеральних розмірів  $D_c$  (рис. 4 б – крива 2), середньої шорсткості  $R_a$  (рис. 4 б – крива 3). При цьому на деяких зразках проявляються пірамідальні утворення (рис. 2 – I; б, з).

На рис. 3 а, б представлено 3D і 2D АСМ-зображення (I), профілограми (II), а також гістограми розподілу нанокристалів за

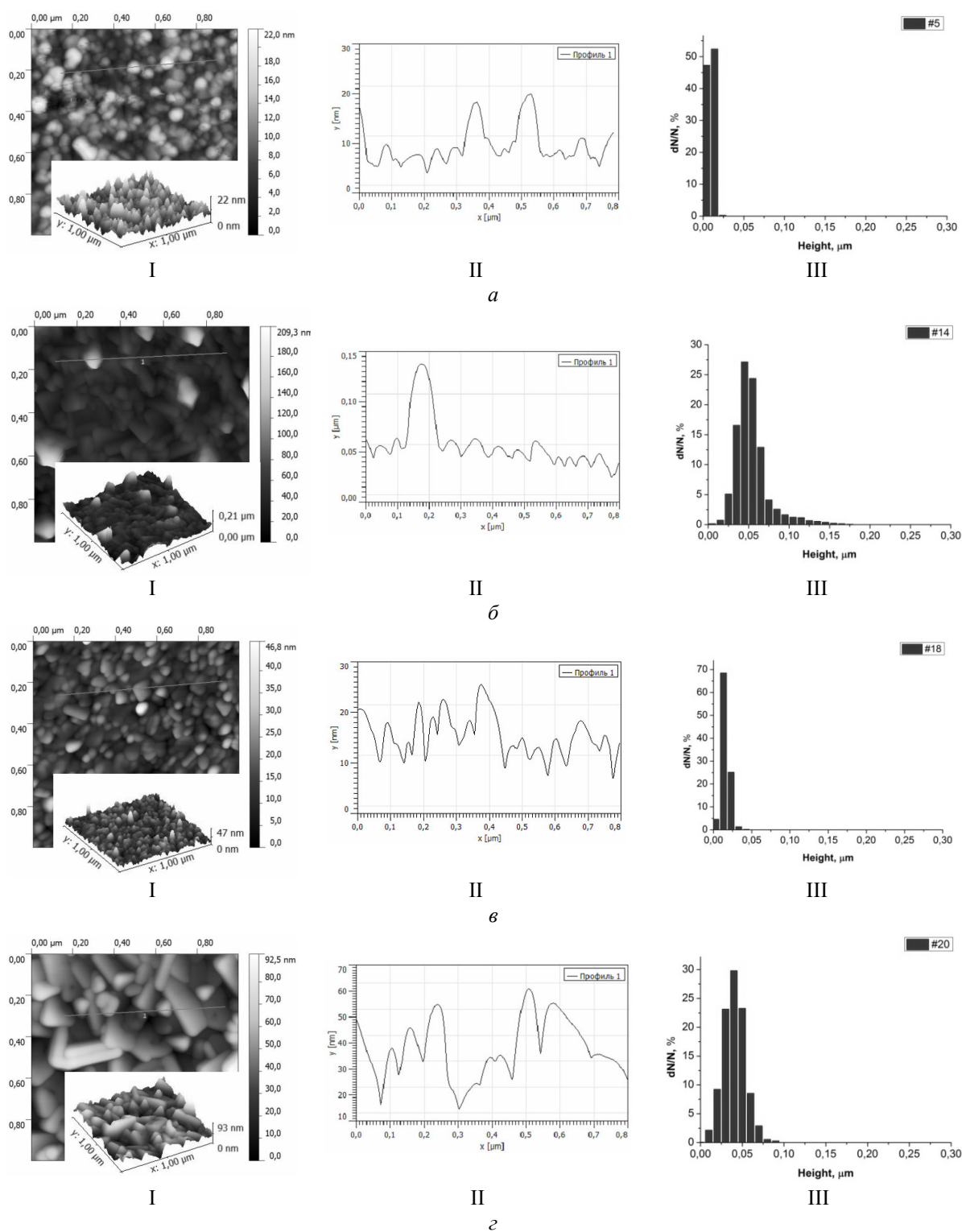
висотою (III) від часу осадження  $\tau$ , с за сталих температур випарування  $T_B = 970$  К і підкладок  $T_{II} = 470$  К. Для заданих умов, як і для умов із змінною  $T_B$ , характерним є постійний ріст максимальних висот із збільшенням часу осадження. Так, при зміні часу  $\tau$  від 7 с до 120 с максимальні значення висот  $h_m$  зростають від 24 до 230 нм. Те саме відбувається і для середніх латеральних розмірів  $D_c$  (рис. 4 в – крива 2) та шорсткості  $R_a$  (рис. 4 в – крива 3).

#### АНАЛІЗ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

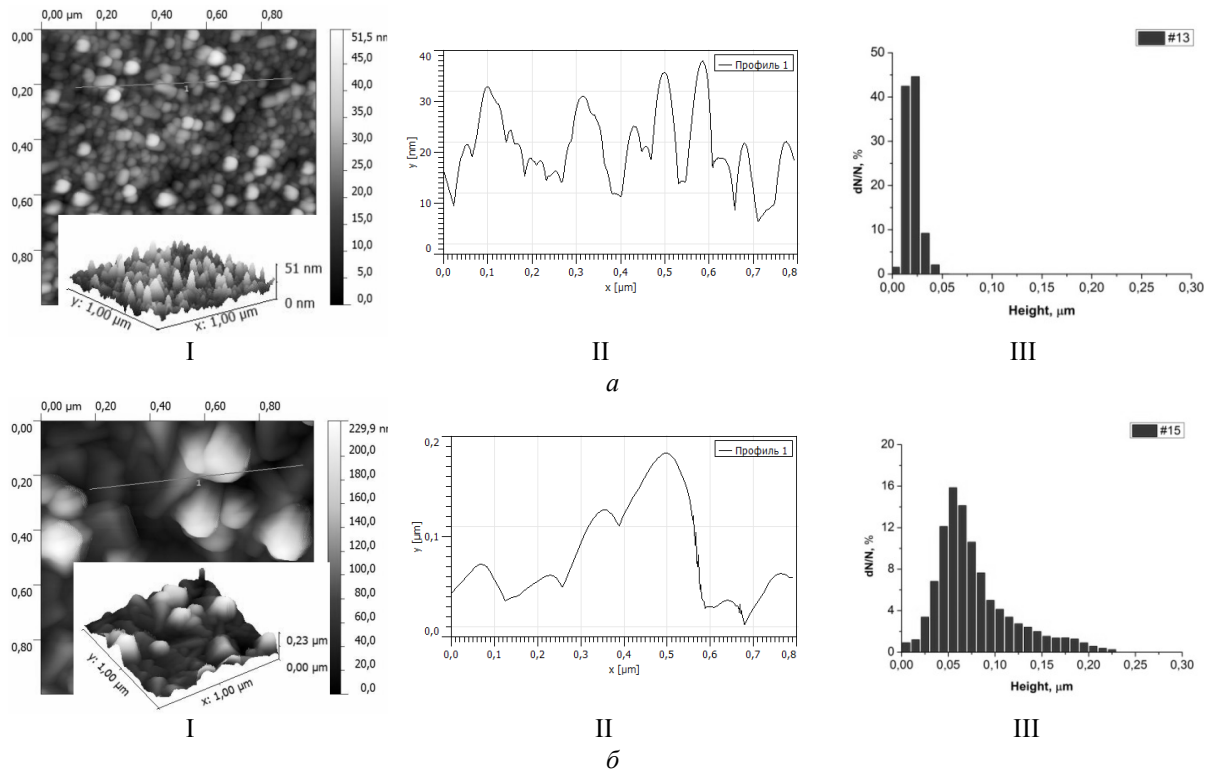
**Механізми зародження.** Механізми зародження самоорганізованих структур є досить складними процесами [16]. Можна стверджувати, що вони є наслідком самочинної адсорбції і випаровування частинок адсорбату при контакті парової фази з поверхнею твердого субстрату. У даному процесі важливою є стадія утворення двовимірних кластерів, міграція адатомів (незакріплені атоми) і їх коалесценція (злиття). При реалізації пошарового механізму Франка- Ван-дер-Мерве утворені двовимірні кластери розростаються і,

зливаючись між собою, утворюють суцільний моношар. Механізм Фольмера-Вебера пов'язаний із утворенням одразу тривимірних

окремих зародків наноструктур на поверхні субстрату.



**Рис. 2.** 3D і 2D ACM-зображення (I), профілограми (II) та гістограми розподілу нанокристалів за висотою (III) у конденсах PbTe:Bi, отриманих на підкладках із ситалу при температурі осадження  $T_{\text{п}}$ , К: 420(№5) – а, 470(№14) – б, 495(№18) – в, 520(№20) – г;  $T_{\text{в}} = 970$  К;  $\tau = 60$  с



**Рис. 3.** 3D і 2D АСМ-зображення (I), профілограми (II) та гістограми розподілу нанокристалів за висотою (III) у конденсатах PbTe:Bi, отриманих на підкладках із ситалу при часі осадження  $\tau$ : с: 15(№13) – а, 120(№15) – б;  $T_B = 970$  К;  $T_{II} = 470$  К

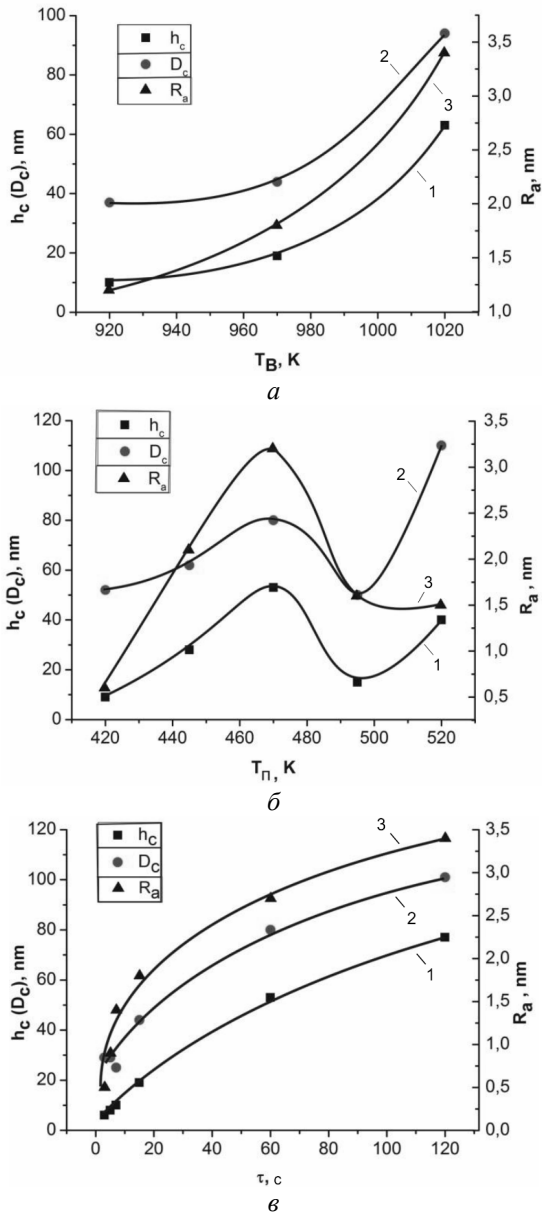
Проміжним, між зазначеними вище двома, є механізм зародження Странські-Крастанова, який передбачає на початкових етапах осадження утворення так званого змочуючого шару з подальшим ростом тривимірних наноструктур за рахунок зняття пружних деформацій [17]. Проаналізувавши АСМ-зображення (рис. 1–3), приходимо до висновку, що в нашому випадку має місце механізм Фольмера-Вебера, а саме відбувається утворенням тривимірних окремих зародків наноструктури на поверхні підкладки. Це особливо характерно при малих часах осадження (рис. 3 а). Цим же самим механізмом можна пояснити і тенденцію змін у топологічних характеристиках за варіювання температури підкладки (рис. 2; 4 б – криві 1, 2). При підвищенні температури підкладки, змінюється інтенсивність росту плівки, за рахунок процесів репарування та різної швидкості поверхневої дифузії адсорбованих атомів і зміни характеру їх взаємодії із конденсатом.

**Процеси росту.** Отримані результати щодо формування наноструктур PbTe:Bi можна

пояснити з позицій реалізації оствальдівського дозрівання [18]. Так, згідно теорії, закладеної у роботах Оствальда [18], Ліфшица і Сльозова [19], Вагнера (ЛСВ) [20], Венгреневича [21] стосовно поверхневих дискретних систем і, зокрема, острівцевих плівок і напівпровідникових гетероструктур з квантовими точками, розрізняють дифузійний процес росту кластерів і процес, контрольований швидкістю утворення хімічних зв'язків на їх поверхні. Ці два процеси можуть конкурувати, тобто реалізовуватися одночасно за умови, якщо електронні процеси утворення хімічних зв'язків є активаційними і енергії активації обох процесів – електронного і дифузійного – порівнювані між собою. При цьому загальний потік  $j$  атомів буде дорівнювати сумі дифузійного  $j_0$  і вагнерівського (електронного)  $j_v$  потоків ( $j = j_0 + j_v$ ). За умови, що

$$x = \frac{j_v}{j}, 1 - x = \frac{j_0}{j}, \frac{j_v}{j_0} = \frac{x}{1 - x}, \quad (1)$$

$x$  буде визначати частку  $j_v$  у загальному потоці  $j_a$ , а  $(1-x) - j_0$  у загальному потоці  $j$  відповідно.



**Рис. 4.** Залежності середніх нормальних ( $h_c$  – ■) та латеральних розмірів ( $D_c$  – ●) нанокристалітів і шорсткості ( $R_a$  – ▲) парофазних конденсатів PbTe:Bi на підкладках ситалу від температури випарування  $T_B$ (a), температури осадження  $T_{II}$ (б) та часу осадження  $\tau$ (в)

Згідно [18], відношення критичного радіуса  $r_k$ , який у рамках теорії ЛСВ співпадає з середнім радіусом кластера  $r_k = \langle r \rangle$ , до максимального розміру  $r_g$  пов'язане із часткою вагнерівського потоку  $x$  у загальному потоці співвідношенням

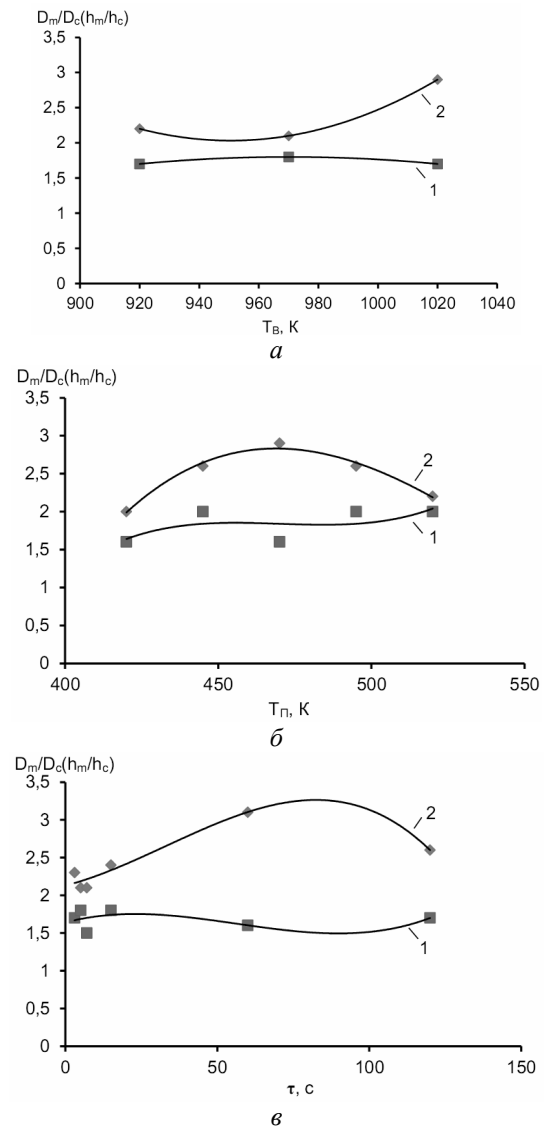
$$\frac{r_g}{r_k} = \frac{2+x}{1+x} \quad (2)$$

При  $x=1$  ріст кластерів повністю контролюється коефіцієнтом об'ємної дифузії

$$\frac{r_g}{r_k} = \frac{3}{2}, \quad (3)$$

а при  $x=0$  процес повністю контролюється кінетикою переходу через межу поділу кластер-матриця і

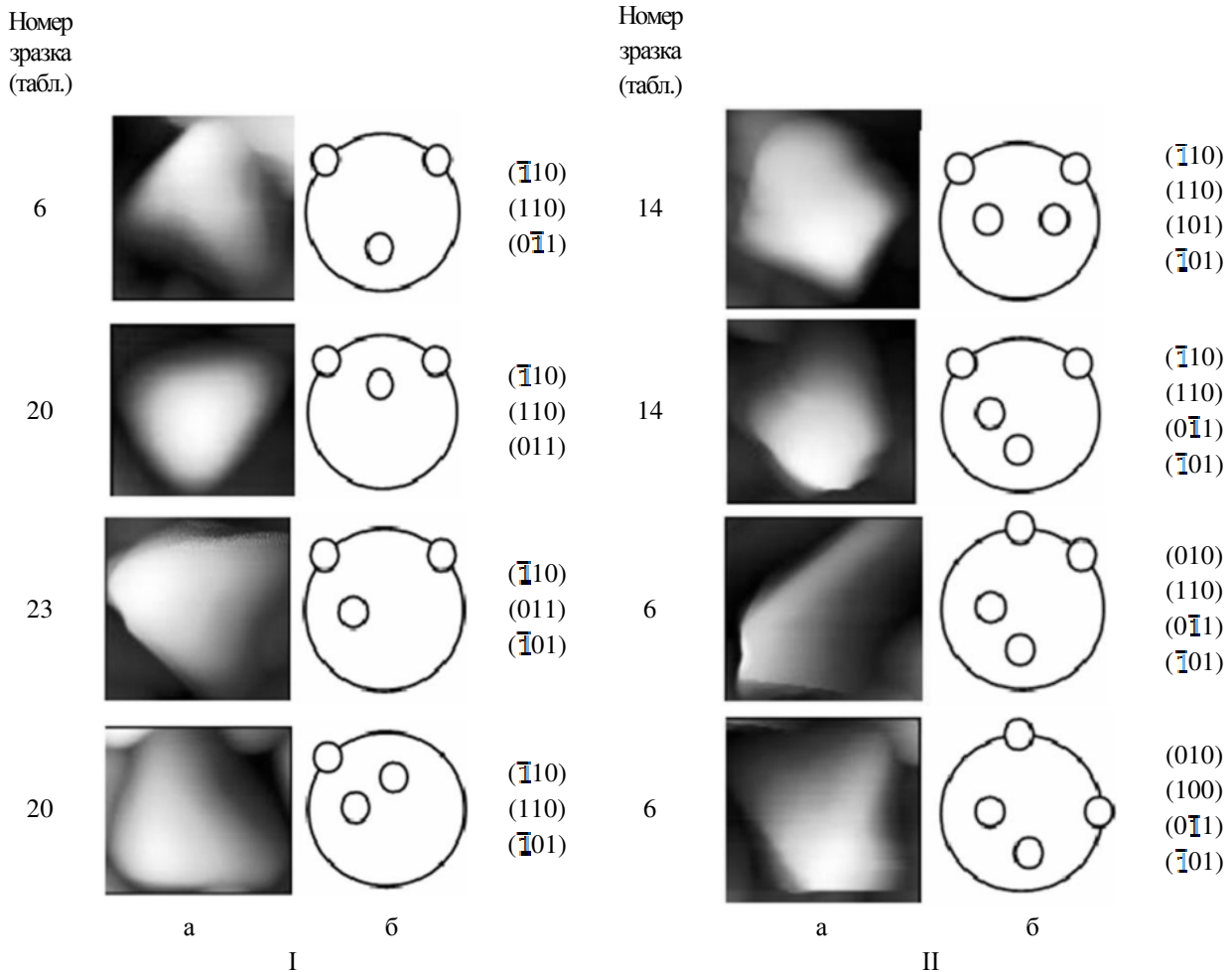
$$\frac{r_g}{r_k} = 2. \quad (4)$$



**Рис. 5.** Залежність відношення максимальних до середніх латеральних ( $D_m/D_c - 1$ ) та максимальних до середніх нормальних ( $h_m/h_c - 2$ ) розмірів нанокристалітів у парофазних конденсатах PbTe:Bi на підкладках ситалу від температури випарування ( $T_B$  – a), температури підкладки ( $T_{II}$  – б) та часу осадження ( $\tau$  – в)

Визначивши максимальні  $h_m(D_m)$  та середні  $h_c(D_c)$  нормальні (латеральні) розміри наноструктур РbТе:Ві та їхнє відношення (рис. 5), можна зробити висновок, що в нашому випадку має місце реалізація двох процесів – вагнерівського і дифузійного. При цьому, якщо латеральний ріст наноструктур реалізується із домінуванням дифузійних кінетичних процесів

( $D_m/D_c \approx 1.5$ , рис. 5 – криві 1), то у нормальному – за рахунок вагнерівських електронних ( $h_m/h_c \geq 2$  (рис. 5 – криві 2) за всіх умов осадження  $T_B, T_{II}, \tau$  (рис. 5 – а, б, в). У останньому випадку формування нанокристалів реалізується за рахунок «терас росту», при якому роль хімічних зв'язків є домінуючою.



**Рис. 6.** АСМ-зображення окремих тригональних (I, а) та тетрагональних (II, а) пірамід у структурах наноконденсатів РbТе:Ві на підкладках ситалу, утворених гранями із комбінацій площин {100} і {110} та їх представлення гномостереографічними проекціями (I, б і II, б) відповідно

**Кристалграфічні форми.** Особливістю підкладок із ситалів є те, що вони містять велику кількість дрібних (<1 мкм) кристалітів, пов'язаних між собою скловидним міжкристалічним прошарком, тому епітаксійні об'єкти на їх поверхні можуть формуватися на окремих їх площинах. У структурі ситалу відсутні пори, пустоти і інші об'ємні дефекти. Вони характеризуються також доброю термостійкістю, що обумовлено температурним

коефіцієнтом лінійного розширення  $\alpha \approx (5-10) \cdot 10^{-7} 1/K$  і досить високою теплопровідністю 2.1–5.5 Вт/(м·К). Саме тому ці підкладки вибрані для дослідження особливостей росту парофазних структур на їхній поверхні. При цьому виявлено, що парофазні структури РbТе:Ві на поверхні ситалу наслідують у певній мірі орієнтацію граней систем  $\{00\bar{1}0\}$ -гексагональної призми,

$\{10\bar{1}1\}$  – ромбоедра,  $\{0001\}$  – моноедра окремих кристалітів підкладки. Кристали PbTe належать до речовин з переважаючим йон-йонним зв'язком зі структурою типу NaCl, а електрично-нейтральними поверхнями з найбільшими ретикулярними густинами є атомні площини систем  $\{100\}$  і  $\{110\}$ . Саме шість площин систем  $\{100\}$  і дванадцять – системи  $\{110\}$  за певних умов будуть утворювати наноб'єкти на поверхні конденсату. У роботі [22] шляхом повного перебору можливих комбінацій трьох площин із згаданих двох систем показано, що можливі 15 різних варіантів тригранних пірамід.

На АСМ-зображеннях PbTe:Bi на ситалі при малих часах осадження на поверхні конденсату не виявлено об'єктів кристалічного габітусу (рис. 1 а, 2 а, 3 а). При збільшенні тривалості осадження починають з'являтися утворення з плоскими гранями (рис. 1 б, 2 б, 3 з). На рис. 6 представлено приклади тригональних (рис. 6 а) та тетрагональних (рис. 6 б) пірамід у наноконденсатах PbTe:Bi, сформованих гранями систем  $\{1\ 1\ 0\}$  та  $\{1\ 1\ 0\}$ . Поряд із зображеннями окремих пірамід праворуч розміщено площини, якими утворені їхні грані. Встановлено, що при збільшенні температури випаровування  $T_B$  об'єкти більш стрімкі, тобто формуються нанокристали з тетрагональною симетрією у перерізі, паралельному до підкладки, що є можливим для об'єктів кубічної сингонії.

## ВИСНОВКИ

1. Представлено результати АСМ-зображень наноструктур PbTe:Bi, осаджених на підкладки із ситалу, отриманих відкритим випаровуванням у вакуумі за різних технологічних умов: температура випаровування  $T_B$ , температура підкладки  $T_P$ , час осадження  $\tau$ .

2. Показано що зародження парофазних структур PbTe:Bi на ситалі відбувається за механізмом Фольмера-Вебера, а їх ріст здійснюється за умов реалізації одночасно двох механізмів – дифузійного і вагнерівського.

3. Встановлено, що окремі ограничені нанокристали утворені системою площин  $\{100\}$  і  $\{110\}$ .

Автори висловлюють вдячність Криськову Ц.А. (Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка) за сприяння при синтезі сполуки для наважок, Яворському Я.С. (ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника») при отриманні конденсатів, Литвину П.К. (Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України) при проведенні АСМ-досліджень.

Робота виконана згідно комплексного наукового проекту МОН України (державний реєстраційний номер 0113U000185), та ДФФД України (державний реєстраційний номер 0113U003689) та у рамках програми «Наука заради миру» Відділу Публічної Дипломатії НАТО (NUKR.SFPP984536).

## Процессы структурообразования в парофазных наноконденсатах PbTe:Bi на ситалле

Д.М. Фреик, И.С. Былина, Л.И. Межиловская, Р.В. Уманцев

Физико-химический институт

ДВНЗ «Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника»

ул. Шевченко, 57, Ивано-Франковск, 76000, Украина, vania\_bylina@mail.ru

На основе анализа результатов АСМ-изображений исследовано процессы структурообразования парофазных конденсатов легированного 1 ат. % Bi теллурида свинца. Осаждение пара осуществляли в открытом вакууме на подложки из поликристаллического ситалла при температурах испарения  $T_B = (920-1020)$  К, подложек –  $T_P = (420-520)$  К. Время осаждения  $\tau$  варьировалось в пределах  $\tau = (3-120)$  с при толщине конденсатов  $d = (50-2000)$  нм, а средние латеральные ( $D_c$ ) и нормальные ( $h_c$ ) размеры нанокристаллитов составляли  $D_c = (25-110)$  нм и  $h_c = (8-78)$  нм соответственно. Показано, что в



процессах зарождения доминирует механизм Фольмера-Вебера, при котором образуются трехмерные наноструктуры на поверхности подложки. Механизмы роста нанокристаллитов объяснено с позиции оствальдовского созревания. Выяснено, что на поверхности ситалла формируются отдельные нанокристаллы из комбинаций плоскостей {100} и {110} структуры NaCl.

**Ключевые слова:** теллурид свинца, парофазные конденсаты, механизмы роста, оствальдовское созревания, ориентационные процессы

## Processes of structure formation in the vapor phase nanocondensates of PbTe:Bi on pyroceram

D.M. Freik, I.S. Bylina, L.Y. Mezhylovska, R.V. Umantsiv

Physico-Chemical Institute

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, vania\_bylina@mail.ru

By analyzing the results of AFM imaging, processes have been studied of structure formation of vapor-phase condensates of doped 1 at. % Bi lead telluride. Vapor deposition was carried out in an open vacuum on to substrates of polycrystalline ceramics at evaporation temperatures  $T_v = (920-1020)$  K, substrates –  $T_p = (420-520)$  K; deposition time  $\tau$  varied within  $\tau = (3-120)$  s with a thickness of condensates  $d = (50-2000)$  nm, and average lateral ( $D_c$ ) and normal ( $h_c$ ) nanocrystal dimensions were  $D_c = (25-110)$  nm and  $h_c = (8-78)$  nm, respectively. It has been shown that in the process of nucleation, Folmer-Weber mechanism dominates, when the three-dimensional nanostructures are formed on the substrate surface. Mechanisms of nanocrystal growth are explained from the standpoint of Ostwald maturation. It has been found that the surface of ceramics individual nanocrystals are formed from combinations of planes {100} and {110} of NaCl structure

**Keywords:** Lead telluride, vapor-phase condensates, mechanisms of growth, Ostwald maturation, orientation aspects

### ЛІТЕРАТУРА

1. Agrawal G.P., Dutta N.K. Semiconductor Lasers. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. – 547 p.
2. Chatterjee S., Pal U. Low-cost solar selective absorbers from Indian galena // J. Opt. Eng. – 1993. – V. 32, N 7. – P. 2923–1929.
3. Chaudhuri T.K. A solar thermophotovoltaic converter using Pbs photovoltaic cells // Int. J. Energy Res. – 1992. – V. 16, N 6. – P. 481–487.
4. Dughaish J.H. Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation // Physica B. – 2002. – V. 322. – P. 205–212.
5. Wood C. Materials for thermoelectric energy conversion // Rep. Prog. Phys. – 1988. – V. 51, N 4. – P. 459–468.

### REFERENCES

1. Agrawal G.P., Dutta N.K. *Semiconductor Lasers*. (New York: Van Nostrand Reinhold, 1993).
2. Chatterjee S., Pal U. Low-cost solar selective absorbers from Indian galena. *J. Opt. Eng.* 1993. **32**(7): 2923.
3. Chaudhuri T.K. A solar thermophotovoltaic converter using Pbs photovoltaic cells. *Int. J. Energy Res.* 1992. **16**(6): 481.
4. Dughaish J.H. Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation. *Physica B.* 2002. **322**: 205.
5. Wood C. Materials for thermoelectric energy conversion. *Rep. Prog. Phys.* 1988. **51**(4): 459.

6. Dresselhaus M.S., Chen G., Tang M.Y. et al. Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit // *Adv. Mater.* – 2007. – V. 19, N 3. – P.1043–1062.
7. Springholz G., Holy V., Pinczolits M., Bauer G. Self-organized growth of three-dimensional quantum-dot crystals with fcc-like stacking and a tunable lattice constant // *Science.* – 1998. – V. 282. – P. 734–737.
8. Alchalabi K., Zimin D., Kistorz G., Zogg H. Self-assembled semiconductor quantum dots with nearly uniform sizes // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V. 90, N 2. – P. 026104.
9. Водопьянов В.Н., Бахтинов А.П., Слынько Е.И. и др. Самоорганизация трехмерных нанобразований теллурида свинца в условиях, близких к термодинамическому равновесию // *Письма в ЖТФ.* – 2005. – Т. 31, № 16. – С. 88–94.
10. Фреїк Д.М., Ліщинський І.М., Литвин П.М., Бачук В.В. та ін. Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур PbTe на сколах слюди-мусковіт // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2008. – Т. 9, № 4. – С. 736–743.
11. Фреїк Д.М., Литвин П.М., Чав'як І.І. та ін. Процеси росту нанорозмірних структур PbTe і освальдівське дозрівання // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2009. – Т. 10, № 4. – С. 789–799.
12. Бачук В.В. Процеси освальдівського дозрівання і гаусіани у розподілі висот наноструктур PbTe/(0001) слюда // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2012. – Т. 13, № 1. – С. 88–93.
13. Фреїк Д.М., Салій Я. П., Ліщинський І.М. та ін. Еволюція процесів росту парофазних наноструктур телуриду свинцю // *Журнал Нано- та Електронної Фізики.* – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 02012-1–02012-5.
14. Салій Я.П., Бачук В.В., Фреїк Д.М., Ліщинський І.М. Моделі топології поверхні і кінетика процесу росту нанокристалічних структур PbTe на сколах слюди-мусковіт // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2012. – Т. 13, № 2. – С. 379–383.
15. Абрикосов Н.Х., Шелимова Л.Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений  $A^4B^6$ . – Москва: Наука, 1975. – 195 с.
6. Dresselhaus M.S., Chen G., Tang M.Y., Yang R.G., Lee H., Wang D.Z., Ren Z.F., Fleurial J.-P., Gogna P. New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials. *Adv. Mater.* 2007. **19**(8): 1043.
7. Springholz G., Holy V.V., Pinczolits M., Bauer G. Self-organized growth of three-dimensional quantum-dot crystals with fcc-like stacking and a tunable lattice constant. *Science.* 1998. **282**(5389) 734.
8. Alchalabi K., Zimin D., Kistorz G., Zogg H. Self-assembled semiconductor quantum dots with nearly uniform sizes. *Phys. Rev. Lett.* 2003. **90**(2): 026104.
9. Vodopyanov V.N., Bakhtinov A.P., Slynko Ye.I. Self-organization of three-dimensional nanostructures of lead telluride nanoislands under conditions close to thermodynamic equilibrium. *Technical Physics Letters.* 2005. **31**(18): 716.
10. Freik D.M., Lishchynskiy I.M., Lytvyn P.M., Bachuk V.V. Surface Topology and Growth Processes of PbTe Nanocrystalline. Structures on Mica-Muscovite Cleavages Substrate. *Physics and Chemistry of Solid State.* 2008 **9**(4): 736 [in Ukrainian].
11. Freik D.M., Litvin P.M., Chav'jak I.I., Lishchynskiy I.M., Bachuk V.V. The processes of growth of nanoscale structures PbTe and ripening ostvald. *Physics and Chemistry of Solid State.* 2009. **10**(4) 789 [in Ukrainian].
12. Bachuk V.V. Processes Ostvald's Maturation and Gaussians in the Heights Distribution of Nanostructures PbTe/(0001) Mica. *Physics and Chemistry of Solid State.* 2012. **13**(1): 88 [in Ukrainian].
13. Freik D.M., Salij Ya.P., Lischinskij I.M., Bachuk V.V., Stefaniv N.Ya. Evolution of Growth Processes of Paraphase Nanostructures of Lead Telluride. *J. Nano-Electron. Phys.* 2012. **4**(2): 02012—1 [in Ukrainian].
14. Salij Ya.P., Bachuk V.V., Freik D.M., Lishchynsky I.M. Models of Surface Topology and Kinetics of the Process of Growth of Nanocrystalline Structures of PbTe on Chips of Mica-Muscovite. *Physics and Chemistry of Solid State.* 2012. **13**(2): 379 [in Ukrainian].
15. Abrikosov N.Kh., Shelimova L.Ye. *Semiconductor materials based on compounds of  $A^4B^6$ .* (Moscow: Nauka, 1975) [in Russian].

16. Волков С.В., Ковальчук Є.П., Огенко В.М., Решетняк О.В. Нанохімія, наносистеми, наноматеріали. – Київ: Наукова думка, 2008. – 423 с.
17. Зимин. С.П., Горлачев Е.С. Наноструктурированые халькогениды свинца: монографія. – Ярославль: ЯрГУ, 2011. – 232 с.
18. Ostwald W. Über die Vermeintliche isometric das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflachenspannung fester Korper // *Js. Physics Chemistry*. – 1900. – V. 34. – P. 495–503.
19. Лифшиц И.М., Слѣзов В.В. О кинетике дифузного распада пересыщенных твердых растворов // *ЖЭТФ*. – 1958. – Т. 35, № 2. – С. 479–492.
20. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung). // *Zs. Electrochem.* – 1961. – В. 65, М. 7/8. – P. 581–591.
21. Венгреневич Р.Д., Іванський Б.В., Москалюк А.В. До теорії Ліфшица-Сльозова-Вагнера // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 19–30.
22. Салій Я.П., Фреїк Д.М., Межиловська Л.Й. та ін. Процеси формування і структура тонких плівок РbТе:Sb. // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 766–774.
16. Volkov S.V., Kovalchuk Ye.P., Ohenko V.M., Reshetnyak O.V. *Nanochemistry, nano-systems, nanomaterials*. (Kyiv: Naukova dumka, 2008) [in Ukrainian].
17. Zimin. S.P., Gorlachev Ye.S. *Nanostructuring lead chalcogenides: monograph*. (Yaroslavl: YarGU, 2011) [in Russian].
18. Ostwald W. «Über die Vermeintliche isometric das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflachenspannung fester Korper». *Js. Physics Chemistry*. 1900. **34**: 495.
19. Lifshits I.M., Slezov V.V. On the kinetics of diffusion decomposition of supersaturated solid solutions. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1958 **35**(2): 479 [in Russian].
20. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung). *Zs. Electrochem*. 1961. **65**(7/8): 581.
21. Venhrenovych R.D., Ivanskyi B.V., Moskaliuk A.V. To the Lifshitsa-Slozova-Vagnera theory. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2009. **10**(1): 19 [in Ukrainian].
22. Salij Ja.P., Freik D.M., Mezhilovs'ka L.J., Bilina I.S., Freik I.M. Processes of formation and structure of thin films PbTe:Sb. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2013 **14**(4): 766 [in Ukrainian].

Надійшла 07.07.2014, прийнята 19.06.2015