

Кристалографічний та орієнтаційний характер нанокристалів у тонкоплівкових конденсатах PbTe-Bi₂Te₃ на ситалі

Я.П. Салій¹, Д.М. Фреїк¹, І.С. Біліна^{1,*}, М.О. Галушак²

¹ Фізико-хімічний інститут, ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», вул. Шевченка, 57, 76018 Івано-Франківськ, Україна

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, 76019 Івано-Франківськ, Україна

(Одержано 27.03.2015, у відредагованій формі – 20.04.2015, опубліковано online 10.06.2015)

За допомогою аналізу АСМ- зображень, застосовуючи дискретне перетворення Фур'є та автокореляційну функцію для азимутального кута φ і суму нормальних розподілів для полярного кута ρ , вперше вивчено процеси орієнтаційного структуроутворення нанокристалів у парофазних конденсатах твердих розчинів PbTe-Bi₂Te₃ на ситалі. Виявлено, що підкладка із ситалу не задає певної орієнтації кристалітам. Показано, що на поверхні зразків утворюються об'єкти, утворені площинами куба, ромбічного додекаедра та їх поєднанням. Визначено залежність середніх розмірів нанокристалів та швидкості їх росту від часу осадження. Встановлено характер залежності густини розподілу полярного кута ρ від вмісту Bi₂Te₃ та тривалості осадження.

Ключові слова: Плюмбум телурид, Парофазні конденсати, Нанокристали, Симетрія, Кристалографічна форма.

PACS numbers: 64.60.Qj, 68.03.Fg

1. ВСТУП

Завдяки своїм унікальним властивостям нанорозмірні матеріали займають провідне місце у сучасному матеріалознавстві. Розвиток науки та техніки тісно пов'язаний із вдосконаленням існуючих, та розвитком нових методів отримання та дослідження нанорозмірних структур. Із переходом до наноструктурованих матеріалів мають місце квантово-розмірні ефекти, які створюють цілком нові можливості для застосування даних матеріалів в різних галузях науки та техніки [1].

У створенні нових напівпровідникових приладів все більше застосування знаходять багатокомпонентні тверді розчини, що дозволяють в досить широких межах варіювати параметри матеріалу. Зокрема, тверді розчини на основі плюмбум телуриду зарекомендували себе як важливі промислові матеріали, що можуть широко застосовуватись в термоелектриці [2-4]. Варто відмітити, що PbTe є ефективним термоелектричним матеріалом для області середніх температур (500-750) К [2, 5], а тверді розчини на його основі дозволяють отримати матеріал із покращеними параметрами, необхідними для створення термоелектричних модулів.

Що стосується тонкоплівкового конденсату твердого розчину PbTe-Bi₂Te₃, то він відкриває нові можливості його практичного використання, зумовлені особливостями формування окремих наноструктур [6].

Щоб отримати тонкоплівкові конденсати широко використовують парофазні вакуумні технології [2, 7]. При їх реалізації мають місце морфологічні зміни поверхні нарощуваних шарів за рахунок механічних напружень, які зумовлені невідповідностями у сталіх ґраток, коефіцієнтів лінійного розширення конденсатів та підкладок, на які вони наносяться.

Розвиток атомно-силової мікроскопії (АСМ) та

інших методів високої роздільної здатності відкриває нові можливості спостереження та аналізу стадій росту та формування нанооб'єктів різних розмірів. Важливим етапом у розвитку сучасного тонкоплівкового матеріалознавства є вивчення орієнтаційних та структурних особливостей формування нанокристалів на поверхні тонких плівок.

Тому в даній роботі, яка є логічним продовженням попередніх досліджень [8, 9] на основі аналізу АСМ-зображень представлено результати дослідження статистичних закономірностей у процесах орієнтаційного структуроутворення нанокристалів у парофазних конденсатах PbTe-Bi₂Te₃ на підкладках із ситалу.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Конденсати PbTe-Bi₂Te₃ отримано за допомогою методу відкритого випарування у вакуумі. В якості підкладок використовувалися пластини із полікристалічного ситалу, які піддавалися попередній хімічній очистці. Матеріалом для осадження служив наперед синтезований твердий розчин PbTe-Bi₂Te₃, в якому вміст Bi₂Te₃ варіювався в межах (1-5) мол. %. Температура випарування T_V складала 970 К, а температура осадження T_P – 470 К. Тривалість осадження τ варіювалась в межах (15-75) с. Товщину отриманого конденсату вимірювали за допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4.

Топологію поверхні зразків визначали за допомогою методу атомно-силової мікроскопії Nanoscope 3a Dimension 3000 (Digital Instruments USA) у режимі періодичного контакту. Вимірювання проведені в центральній частині зразків з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм. Квадратне поле конденсату розміром 1 мкм² представлено масивом 512² точок.

* vanjabylina@gmail.com

За результатами АСМ-досліджень у середовищі програми Gwyddion визначено середні розміри наноструктур у нормальному h_c та латеральному D_c до поверхні підкладки напрямках (табл. 1). На основі отриманих результатів побудовано залежності даних характеристик, та величини швидкості їх зміни від тривалості осадження.

Також визначено усереднені полярні ρ та азимутальні φ кути для всіх точок поверхонь конденсатів. Отримані експериментальні результати були проаналізовані за допомогою дискретного перетворення Фур'є $F(k)$ функції $f(n)$ згідно

$$F(k) = \sum f(n) \exp(-i n 2 \pi k / N), \quad (1)$$

та автокореляційної функції $C(l)$:

$$C(l) = (\sum f(l+n) f(n) / N)^{1/2} \quad (2)$$

розподілу азимутального кута φ наноб'єктів відповідно [8, 9].

Значення полярних кутів ρ апроксимували сумою двох нормальних розподілів

$$f(\rho) = A_1 \exp(-(\rho - \rho_{m1})^2 / \sigma_1^2) / (2\pi \sigma_1^2)^{1/2} + A_2 \exp(-(\rho - \rho_{m2})^2 / \sigma_2^2) / (2\pi \sigma_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

Фазовий склад синтезованого твердого розчину РbТе-Vi₂Те₃ визначали методами рентгенографії на установці ДРОН-3 у хромовому випромінюванні за методом порошків у геометрії Бреґґа-Брентано в діапазоні кутів сканування $20^\circ \leq 2\theta \leq 110^\circ$. Обробка результатів рентгенофазового аналізу проводилася із використанням повнопрофільного методу Рітвелда із застосуванням програмного пакету FulProf. Досліджені зразки, що пройшли різні етапи підготовки та обробки виявилися практично однофазними. Основною фазою можна вважати Рb_{1-x}Vi_xТе структурного типу NaCl (просторова група Fm-3m) з параметром елементарної ґраткової кубічної комірки $a = 6.4564$.

Таблиця 1 – Технологічні фактори і найбільш ймовірні значення полярного кута ρ_m бімодального розподілу та коефіцієнти порівняння вкладів площин різних форм K_ρ і K_φ наноструктур у парофазних конденсатах РbТе-Vi₂Те₃ на ситалі

№ зразка	Вміст x, % Vi ₂ Те ₃	τ^* , с	d^* , нм	$\rho_{m1} \pm \sigma_1$	$\rho_{m2} \pm \sigma_2$	K_ρ	K_φ
4	5	15	270	12 ± 6	22 ± 10	4,9	1,3
5		30	410	20 ± 10	36 ± 13	0,7	0,8
6		45	540	27 ± 12	50 ± 13	3 □ 7	0,4
7		60	810	27 ± 4	50 ± 13	1,8	0,2
8		75	1220	21 ± 11	41 ± 12	0,1	1,6
16	3	15	160	11 ± 6	24 ± 13	2,7	1,0
15		30	270	9 ± 5	23 ± 16	0,7	3,2
14		60	1000	12 ± 10	33 ± 17	1,5	3,9
13		75	1220	23 ± 11	52 ± 10	4,2	0,4
24	1	15	410	14 ± 8	28 ± 13	0,4	1,0
23		30	630	9 ± 6	21 ± 12	0,7	1,2
22		60	920	12 ± 6	27 ± 14	1,3	1,4
21		75	2030	11 ± 6	38 ± 16	1,3	2,1

Примітка: τ^* – час осадження; d^* – товщина конденсату.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Деякі із результатів АСМ-дослідження поверхні конденсатів РbТе-Vi₂Те₃, що осаджувались на підкладку із ситалу зображені на рис. 1, 2 та представлені в таблиці. Слід відмітити що основною особливістю ситалу є те, що цей матеріал містить велику кількість дрібних (< 1 мкм) кристалітів, пов'язаних між собою скловидним міжкристалічним прошарком, тому епітаксійні об'єкти на його поверхні можуть формуватися на окремих площинах кристалітів. У об'ємі цього матеріалу, як правило, відсутні пори, пустоти і інші дефекти, а його добра термостійкість (коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \approx (5-10) \cdot 10^{-7}$ 1/К) і досить висока теплопровідність (2.1-5.5 Вт/м·К) робить матеріал цікавим для застосування в якості підкладки при дослідженні особливостей росту епітаксійних парофазних структур. Не менш важливу роль відіграють і технологічні параметри в процесі осадження, адже вони визначають процеси зародження, росту і формування окремих куполоподібних острівців на поверхні конденсату.

Так, за оптимізованих значень температур випарування ($T_B = 970$ К) та підкладки ($T_H = 470$ К) для досліджуваних зразків на початкових етапах осадження мають місце процеси, які включають зародження нової фази у вигляді окремих куполоподібних острівцевих наноутворень висотою (10-45) нм і діаметром (30-65) нм (рис. 1а; табл. 1). В подальшому зародження нових острівців припиняється, а адсорбовані на поверхні молекули беруть участь у рості вже сформованих структур.

На пізніх стадіях осадження ($\tau = 60-75$ с) реалізується вже режим коалесценції, при якому відбувається злиття окремих наноструктур, що зумовлює

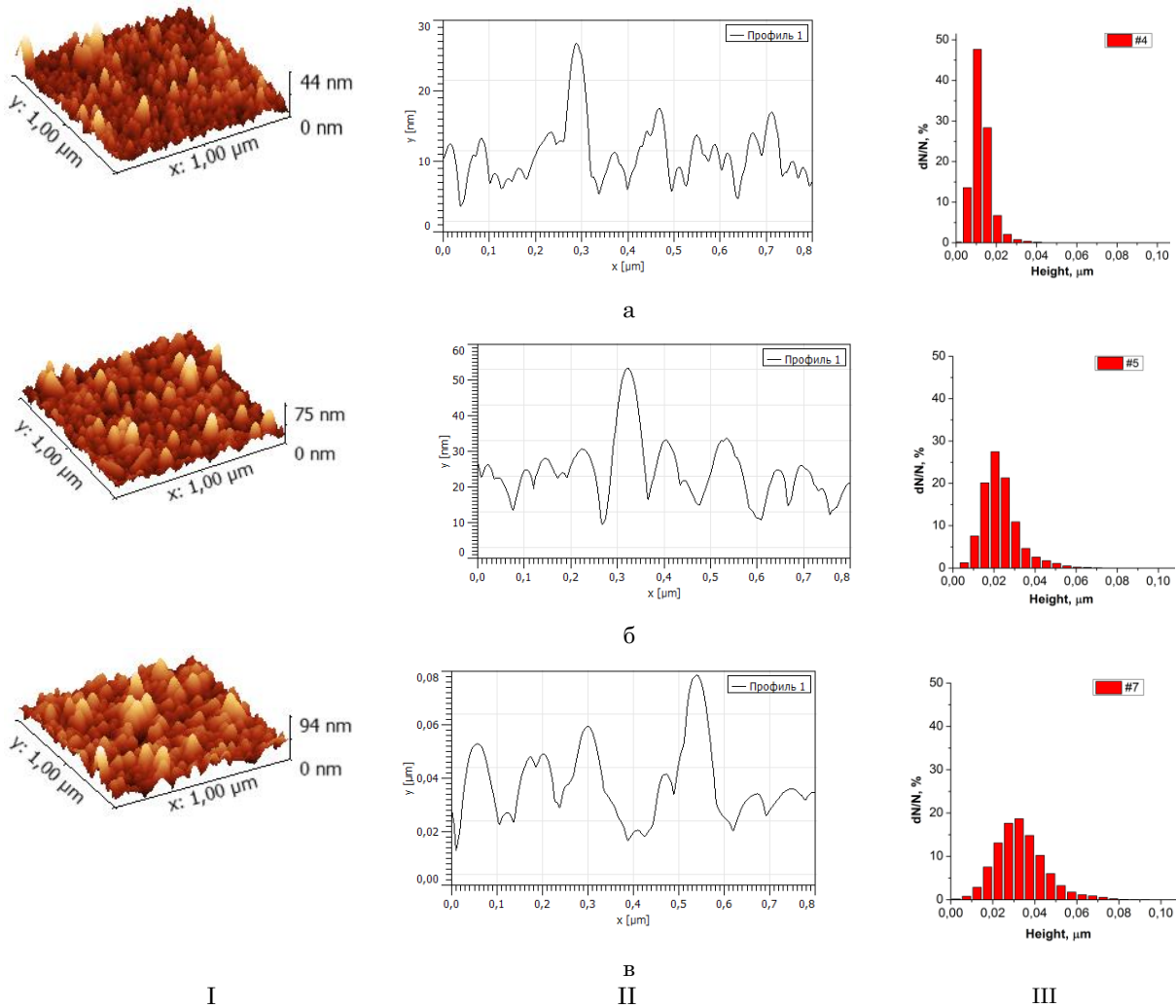


Рис. 1 – 3D АСМ-зображення (I), профілограми (II) та гістограми розподілу висот (III) поверхні парофазних конденсатів РbТе-5 мол. % Ві₂Те₃, отриманих на підкладках із ситалу при часі осадження τ , с: 15 (а, № 4), 30 с (б, № 5), 60с (в, № 7); $T_B = 970$ К, $T_{II} = 470$ К

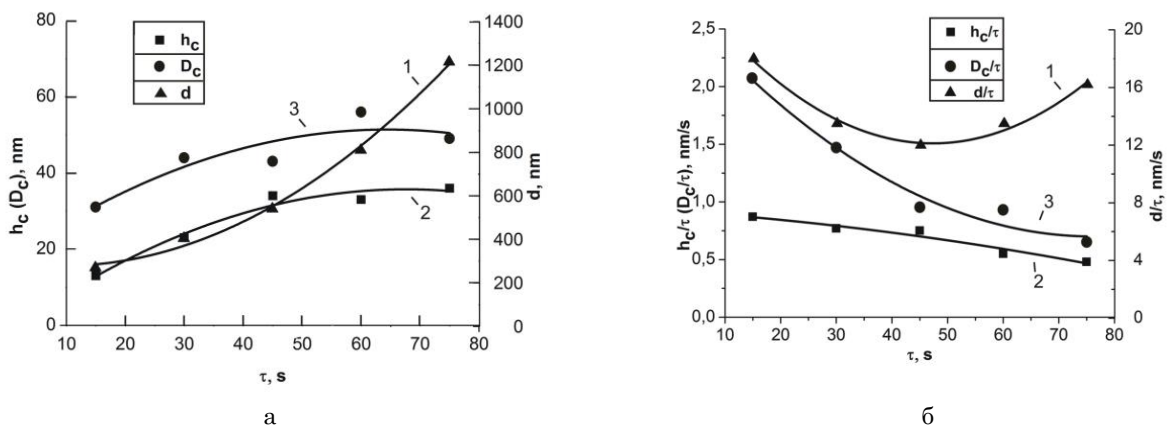


Рис. 2 – Залежності товщини плівок d (▲, 1) та середніх нормальних h_c (■, 2) і латеральних D_c (●, 3) розмірів нанокристалітів (а); швидкості їх осадження d/τ (▲, 1) та росту h_c/τ (■, 2), D_c/τ (●, 3) парофазних конденсатів РbТе-5 мол. % Ві₂Те₃ на підкладках із ситалу від часу осадження τ , с; $T_B = 970$ К, $T_{II} = 470$ К

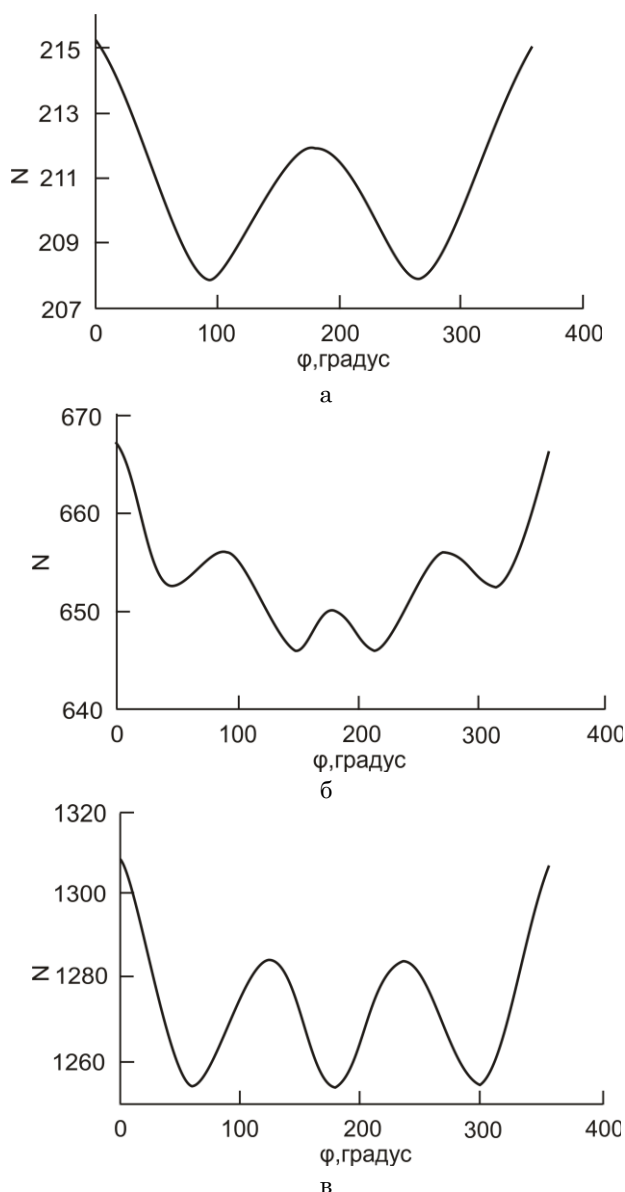


Рис. 3 – Характерні автокореляційні функції розподілу азимутального кута φ нанокристалів у парофазних конденсатах PbTe-5 мол. % Bi₂Te₃ на ситалі при часі осадження τ : с: 15 (а, зразок № 4), 30 (б, зразок № 5), 45 (в, зразок № 6); табл. 1

зменшення їх щільності та збільшення нормальних та латеральних розмірів, внаслідок чого відбувається і збільшення шорсткості поверхні (рис. 1в; табл. 1).

Слід відмітити, що при зростанні загальної товщини d (табл. 1, рис. 2а – крива 1, ▲) конденсатів із часом осадження τ , середні нормальні h_c та латеральні D_c розміри нанокристалів мають тенденцію до насичення (рис. 2а – криві 2, ■; 3, ●), а їх швидкості росту h_c/τ та D_c/τ зменшуються (рис. 2б – криві 2, ■; 3, ●). Таких ефект пояснюється тим, що при збільшенні тривалості осадження наноструктури стають більш масивнішими і відповідно кожне приєднання однакової кількості атомів чи кластерів до певного острівця вноситиме все меншу частку у ріст даної наноструктури в нормальному чи латеральному напрямку. При цьому швидкість осадження d/τ характеризується деяким мінімумом в середньому часовому інтервалі (рис. 2б – крива 1, ▲).

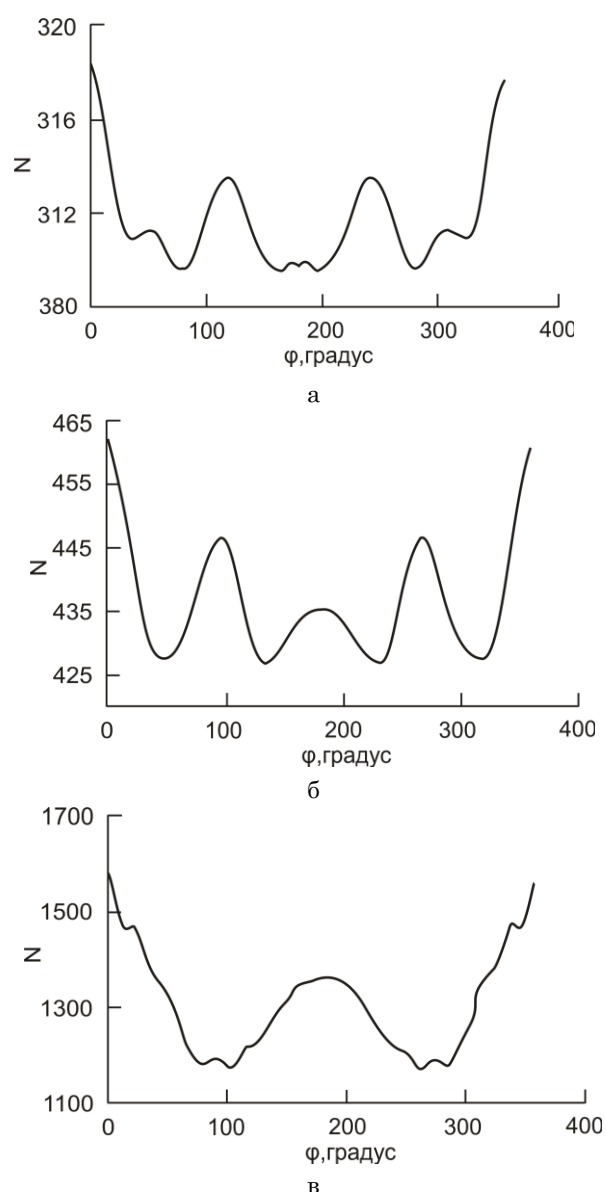


Рис. 4 – Характерні автокореляційні функції розподілу азимутального кута φ нанокристалів у парофазних конденсатах PbTe-3 мол. % Bi₂Te₃ на ситалі при часі осадження τ : с: 15 (а, зразок № 16), 30 (б, зразок № 15), 60 (в, зразок № 14); табл. 1

Контрольоване вирощування тонкоплівкових структур з потрібними властивостями можна реалізувати процесами росту. Опис реальної кінетики формування зародків нової фази і подальше заповнення ними осаджуваної поверхні – одна із основних задач теорії поверхневих фазових переходів першого роду. В роботі [10] досліджується кінетична модель росту тонкої плівки на твердій підкладці за умови двовимірного зародкоутворення. В умовах великих перенасичень газоподібної фази отримані розв'язки для функції розподілу острівців за розмірами на початковому етапі росту, ступеня заповнення підкладки на етапі коалесценції, швидкості вертикального росту плівки та шорсткості її поверхні. Зокрема авторами теоретично доведено що після початку зародження має місце закон, за яким середній розмір острівців росте пропорційно часу осадження $\tau^{1/2}$.

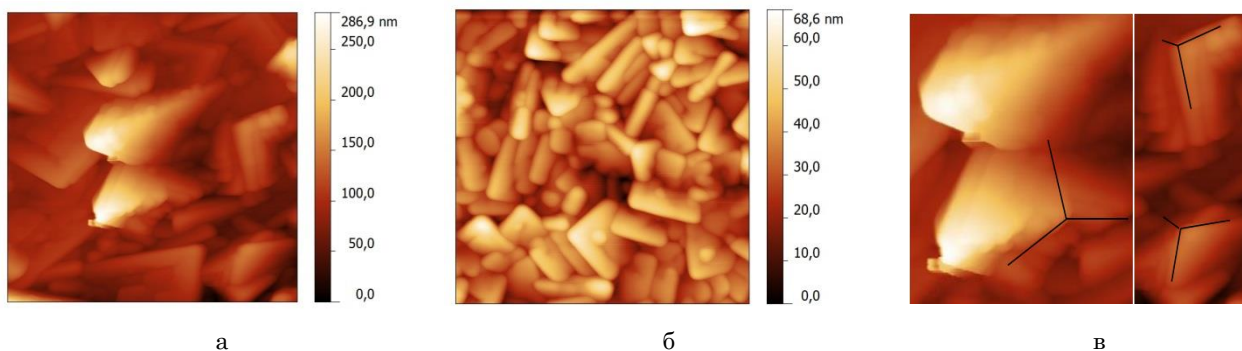


Рис. 5 – АСМ-зображення поверхні зразків РbТе-1 мол. % Вi₂Те₃, отриманих при часі осадження $\tau = 75$ с (а, № 21) і $\tau = 60$ с (б, № 22), а також збільшені вирізки з них, на яких промальовані ребра кубів (в)

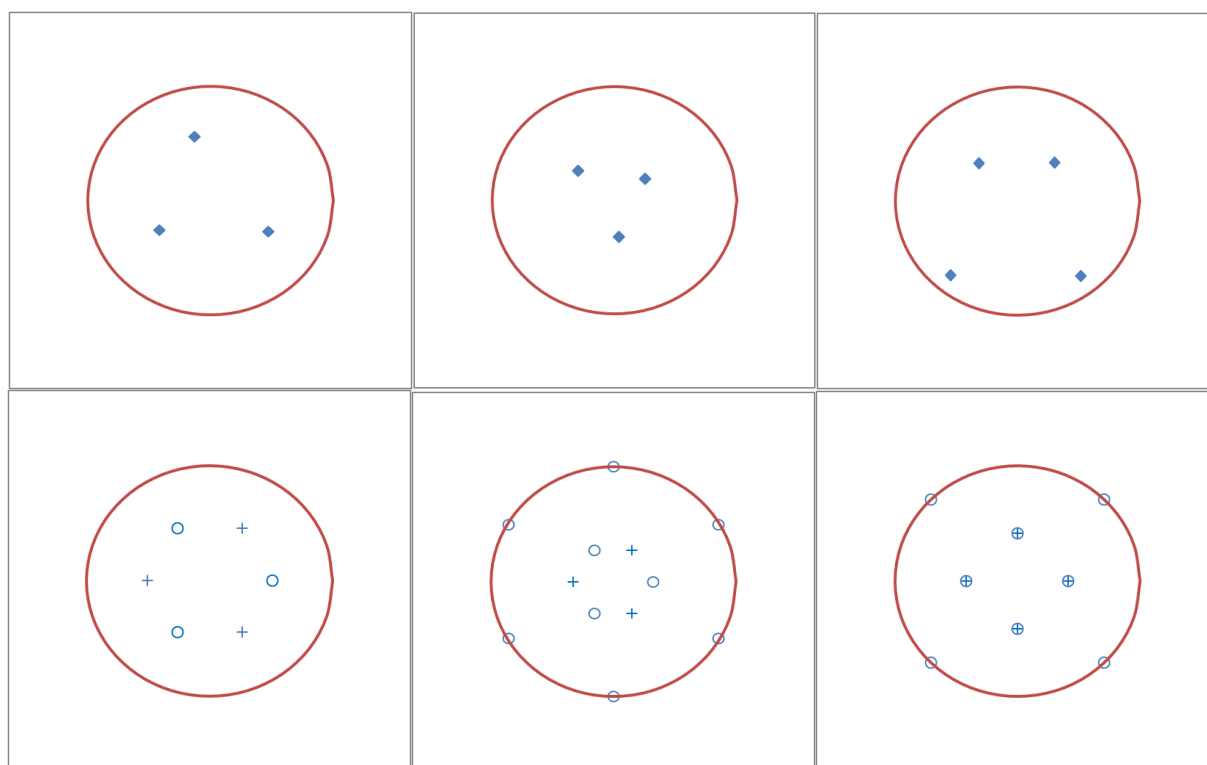


Рис. 6 – Гномо-стереографічні проєкції об'єктів на поверхні плівок № 6, № 7, № 13 (верхній ряд); куба і ромбічного додекаедра, якщо полярна вісь йде вздовж [111], а також ромбічного додекаедра, якщо полярна вісь йде вздовж [001] (нижній ряд). Об'єкти перераховані зліва на право

В зв'язку з цим, в нашому дослідженні залежності середніх нормальних h_c та латеральних D_c розмірів для вибраної серії зразків від часу (рис. 2а) було апроксимовано функцією виду $y = ax^b$, де $y = h_c, D_c$, a – деякий коефіцієнт пропорційності ($a = h_0, D_0$), $x = \tau$, b – показник степеня. У результаті було отримано значення b для середніх нормальних розмірів h_c , яке становило $b = 0,62 \pm 0,14$, що наближено можна вважати $b \approx 1/2$. Для середніх латеральних розмірів D_c показник степеня рівний $b = 0,44 \pm 0,08$, тобто і в цьому випадку $b \approx 1/2$. Отже, ріст середніх нормальних h_c та латеральних D_c розмірів наноструктур РbТе-Вi₂Те₃ справді пропорційний $\tau^{1/2}$, що підтверджується експериментально.

Орієнтаційні особливості та кристалографічні форми нанокристалів у парофазних конденсатах визначали за їх усередненими азимутальними φ та полярними ρ кутами згідно [8].

Для аналізу використано дискретне перетворення Фур'є (1) і автокореляційну функцію (2) розподілу азимутального кута φ елементів площин поверхні АСМ- зображень зразків.

З метою виявлення впливу підкладки на орієнтацію об'єктів на поверхні плівки, який може бути представлений орієнтацією осей 3-го і 4-го порядків, введено коефіцієнт, що характеризує відношення амплітуд компонент третьої і четвертої гармонік перетворення Фур'є F_k :

$$K_\varphi = F_3 / F_4$$

Значення цього коефіцієнта наведено в таблиці 1.

Зі збільшенням часу осадження для вмісту 5 мол. % Вi₂Те₃ латеральна симетрія змінюється з 2-го (присутня і слабо виражена вісь 3-го) порядку (рис. 3 – а) спочатку

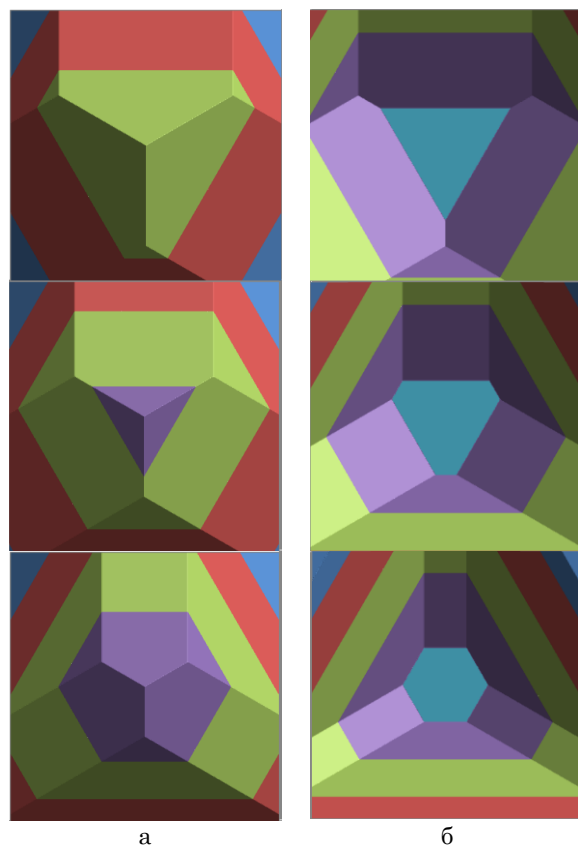


Рис. 7 – Складена форма, що містить грані {100} і {110} (а), додатково зображена горизонтальна площина (111) (б). Зверху вниз зростає вклад стрімкіших граней куба.

до 4-го (також проявляється 3-го) (рис. 3 – б), а потім до 3-го (рис. 3 – в) порядків.

Для часів осадження 60 с (зразок № 7) і 75 с (зразок № 8) порядок симетрії знову змінюється з 3-го на 4-ий (табл. 1). Варто відмітити, якщо при малих часах $K_\phi = 4,9$, то при великих це значення зменшується до $K_\phi = 0,1$, тобто можна констатувати той факт, що при збільшенні часу осадження вклад осі 3-го порядку по відношенню до вкладу осі 4-го порядку різко зменшується.

Зі збільшенням часу осадження для вмісту 3 мол. % Bi_2Te_3 латеральна симетрія змінюється з 3-го (в меншій мірі 6-го) порядку (рис. 4 – а) спочатку до 4-го (3-го) (рис. 4 – б), а потім до 2-го (3, 4-го) (рис. 4 – в) порядків. Що стосується відношення амплітуд компонент третьої і четвертої гармонік перетворення Фур'є K_ϕ , то вклад фігур, симетричних відносно осі 3-го порядку над фігурами, симетричними відносно осі 4-го порядку змінюється від $K_\phi = 0,7$ (при $\tau = 30$ с) до $K_\phi = 4,2$ (при $\tau = 75$ с), тобто переважає вісь 3-го порядку (табл. 1).

Для всіх часів осадження при вмісті 1 мол. % Bi_2Te_3 переважаючою є латеральна симетрія 2-порядку, а вклади осей 3-го, 4-го та 6-го порядків є співмірними, хоча при малих часах осадження вклад осі 4-го порядку переважає над вкладом осей 3-го та 6-го порядків.

Таким чином вісь, перпендикулярна до поверхні плівки не є чітко вираженою, а звідси слідує, що підкладка з ситалу не задає вибраної орієнтації криста-

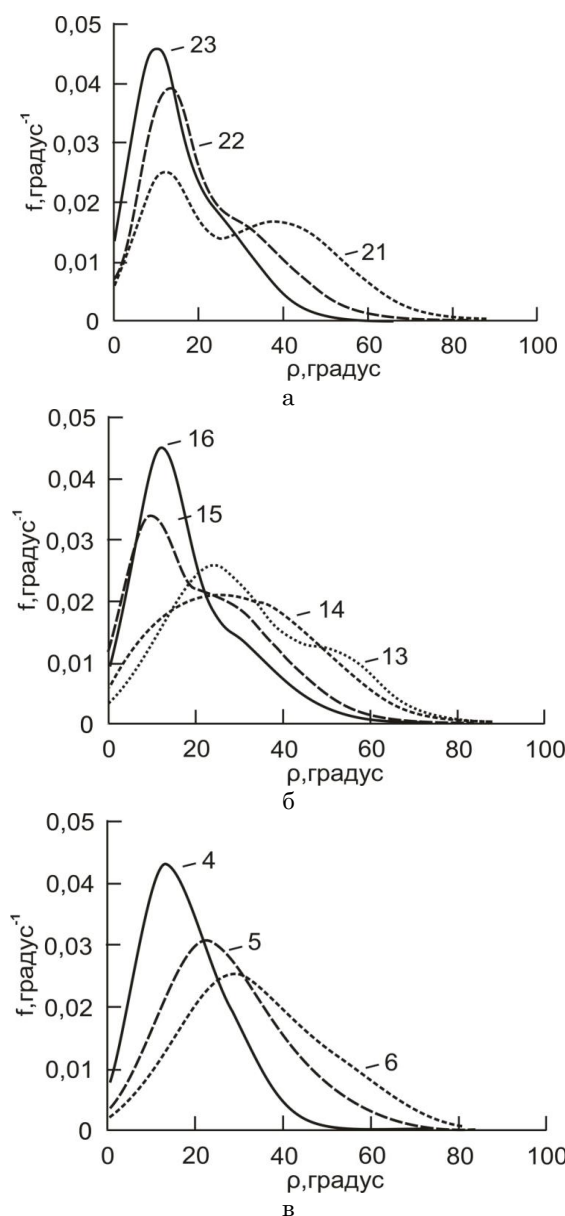


Рис. 8 – Залежність густини розподілу полярного кута ρ нанокристалів у парофазних конденсатах $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ на ситалі від часу осадження для вмісту Bi_2Te_3 , мол. %: 1 (а), 3 (б), 5 (в); цифри біля кривих відповідають номерам зразків табл. 1

літам PbTe або задає довільну орієнтацію. Збільшення вмісту Bi_2Te_3 призводить до домінування осі 3-го порядку.

На всіх зразках крім № 21, на якому спостерігаються двійники (рис. 5), вісь 6-го порядку не є домінуючою, а вісь 3-го порядку присутня всюди, що вказує на формування кристалітів кубічної сингонії. На рис. 5 присутні тригональні і тетрагональні піраміди великого розміру, а також грані і ребра кубів. Проявляється неузгодженість орієнтації кристалітів. Аналогічна ситуація була характерна для зразків PbTe:Sb , осаджених на ситалі [8].

Тепер розглянемо окремі об'єкти, щоб визначити прості кристалографічні форми. Для цього на повер-

хні плівки знайдено орієнтацію їх площин. Тригранні піраміди зразка № 6 утворені площинами куба {100}, а зразка № 7 – площинами ромбічного додекаедра {110}, при чому площина (111) паралельна підкладці. Грані об'єкта зразка № 13 відповідають площинам складеної форми, що поєднує грані куба і ромбічного додекаедра, при цьому площина (001) паралельна підкладці. Вказані вище форми представлені на рис. 6 за допомогою гномостереографічних проєкцій. На поверхні інших плівок виявлені складені форми також з гранями пентагон-додекаедра {120}.

Різний вклад граней простих форм в складеній формі наведено на рис. 7, на якому зображено три грані куба (100), (010), (001) і три грані ромбічного додекаедра (110), (101), (011). Зі зростанням вкладу граней куба чіткіше проявляється вісь 6, а коли вклади сумірні, тоді знову переважає вісь 3.

Густина розподілу полярного кута ρ апроксимували сумою двох нормальних розподілів (3). В таблиці подано відношення амплітуд правого доданку до лівого K_r . З таблиці видно, що полярний кут домінуючого розподілу знаходиться в межах 20° - 30° . Кут $22,21^\circ$ складає нормаль до граней форми {123} з напрямком [111], це вісь 3-го порядку в кристалах кубічної сингонії. Зі збільшенням вмісту Bi_2Te_3 і часу осадження з'являються стрімкіші форми: {110}, {120}, {100}.

Із рис. 8а, б бачимо, що розподіл носить бімодальний характер. Зі зростанням часу осадження домінуючий максимум зміщується в сторону більших кутів. Як із таблиці так із рис. 8а спостерігаємо присутність піку на куті 22° . При легуванні 5 мол. % Bi_2Te_3 бімодальний розподіл практично не проявляється і обидва піки зливаються в один рис. 8в.

Кристаллографический и ориентационный характер нанокристаллитов в тонкопленочных конденсатах $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ на ситалле

Я.П. Салий¹, Д.М. Фрейк¹, И.С. Былина¹, М.О. Галуцка²

¹ Физико-химический институт, ГВУЗ «Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника», ул. Шевченка, 57, 76018 Ивано-Франковск, Украина

² Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, 76019 Ивано-Франковск, Украина

С помощью анализа АСМ-изображений, применяя дискретное преобразование Фурье и автокорреляционную функцию для азимутального угла ϕ и сумму нормальных распределений для полярного угла ρ , первые изучены процессы ориентационного структурообразования нанокристаллов в парофазных конденсатах твердых растворов $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ на ситалле. Выявлено, что подложка из ситалла не задает определенной ориентации кристаллитов. Определено, что на поверхности образцов образуются объекты, образованные плоскостями куба, ромбического додекаедра и их сочетанием. Выявлена зависимость средних размеров нанокристаллов и скорости их роста от времени осаждения. Установлен характер зависимости плотности распределения полярного угла ρ от содержания Bi_2Te_3 и продолжительности осаждения.

Ключевые слова: Плюмбум теллурид, Парофазные конденсаты, Нанокристаллы, Симметрия, Кристаллографическая форма.

4. ВИСНОВКИ

1. За допомогою аналізу АСМ-зображень досліджено кристаллографічні форми нанокристалів та їх орієнтаційні особливості у тонкоплівкових конденсатах твердих розчинів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$, вирошених на підкладках із ситалу шляхом відкритого випаровування у вакуумі за оптимізованих температур випарування $T_B = 970$ К та осадження $T_D = 470$ К. Час осадження змінювався в інтервалі ($\tau = 15$ -75 с).

2. Встановлено, що зі збільшенням часу осадження середні розміри нанооб'єктів в нормальному h_c та латеральному D_c до поверхні підкладки напрямках збільшуються пропорційно $\tau^{1/2}$; зберігають тенденцію до насичення, а швидкості їх росту зменшуються.

3. Визначено, що підкладка із ситалу не задає певної орієнтації кристалітам, а на поверхні зразків утворюються об'єкти, утворені площинами куба і ромбічного додекаедра та їх поєднаннями.

4. Показано, що при малому вмісті Bi_2Te_3 густина розподілу полярного кута ρ носить бімодальний характер, при чому зі збільшенням тривалості осадження домінуючий максимум зміщується в сторону більших кутів. При 5 мол. % Bi_2Te_3 бімодальний розподіл практично не проявляється і обидва піки зливаються в один.

Робота виконана згідно наукового проекту відділу публічної дипломатії НАТО програми «Наука заради миру» (NUKR, SEPP 984536) та комплексного наукового проекту МОН України (державний реєстраційний номер 0115U002303).

Crystallographic and Orientation Features of Nanocrystals in Thin Film Condensates PbTe-Bi₂Te₃ on Glass Ceramics

Ya.P. Saliy¹, D.M. Freik¹, I.S. Bylina¹, M.O. Galushchak²

¹ *Physical-Chemical Institute, Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University, 57, Shevchenko Str., 76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

² *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska Str., 76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

With the help of the AFM-images analysis, using the discrete Fourier transformation, the autocorrelation function for the azimuthal angle φ and the amount of normal distributions for the polar angle ρ we have investigated the orientation process of structure formation of the nanocrystals in vapor-phase condensates of PbTe-Bi₂Te₃ solid solution on glass ceramics. It was detected that the substrate of glass ceramics does not depend on a particular orientation of crystallites. We determined that objects, which had been created by the planes of the cube, rhombic dodecahedron and their combinations, are formed on the sample surface. It was demonstrated the dependence between the average sizes of nanocrystals, their growth rate and the deposition time. We established the character of the dependence of the density distribution of the polar angle ρ and the Bi₂Te₃ content and duration of deposition.

Keywords: Lead telluride, Vapor-phase condensates, Nanocrystals, Symmetry, Crystallographic form.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Н. Кобаяси, *Введение в нанотехнологию* (М.: БИНОМ. Лаборатория знаний: 2008) (N. Kobayasy, *Vvedeniye v nanoitekhnologiyu* (M.: BYNOM. Laboratorya znanyu: 2008)).
2. Д.М. Фрейк, М.А. Галушчак, Л.И. Межиловская, *Физика и технология полупроводниковых пленок* (Львів: Вища школа: 1988) (D.M. Freik, M.A. Galushchak, L.I. Mezhilovskaya, *Fizika i tekhnologiya poluprovodnikovyykh plenok* (L'viv: Vishcha shkola: 1988)).
3. Л.П. Булат, Е.К. Иорданишвили, А.А. Пустовалов, М.И. Федоров, *Термоэлектричество* 4, 7 (2009) (L.P. Bulat, Ye.K. Iordanishvili, A.A. Pustovalov, M.I. Fedorov, *Termoelektrichestvo* 4, 7 (2009)).
4. З.М. Дашевский, *Термоэлектричество в халькогенидах свинца* (Гордон & Брич: 2002) (Z.M. Dashevskiy, *Termoelektrichestvo v khal'kogenidakh svintsa* (Gordon & Brich: 2002)).
5. В.М. Шперун, Д.М. Фрейк, Р.І. Запужляк, *Термоэлектрика телуриду свинцю та його аналогів* (Івано-Франківськ: Плай: 2000) (V.M. Shperun, D.M. Freyik, R.I. Zapukhlyak, *Termoelektryka telurydu svyntsyu ta yoho analogiv* (Ivano-Frankivsk: Play: 2000)).
6. С.П. Зимин, Е.С. Горлачев, *Наноструктурированные халькогениды свинца* (Ярославль: ЯрГУ: 2011) (S.P. Zymun, E.S. Horlachev, *Nanostrukturuyrovanye khal'kohenydy svyntsa* (Yaroslavl: YarHU: 2011)).
7. Ю.З. Бубнов, М.С. Лур'е, Ф.Г. Старос, Г.А. Филаретов, *Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме* (Львів: Энергия: 1975) (Yu.Z. Bubnov, M.S. Lur'e, F.G. Staros, G.A. Filaretov, *Vakuumnoye naneseniye plenok v kvazizamknutom ob'eme* (L'vov: Energiya: 1975)).
8. Я.П. Салій, Д.М. Фрейк, І.С. Биліна, І.М. Фрейк, *Наноструктурное материаловедение*, №3-4, 20 (2013) (Ya.P. Saliy, D.M. Freik, I.S. Bylina, I.M. Freik, *Nanostrukturnoye materialovedeniye* No 3-4, 20 (2013)).
9. Я.П. Салій, І.І. Чав'як, І.С. Биліна, Д.М. Фрейк, *Ж. нано-електронної фіз.*, 6, № 4, 04020 (2014) (Ya.P. Saliy, I.I. Chaviak, I.S. Bylina, D.M. Freik, *J. Nano-Electron. Phys.* 6 No 4, 04020 (2014)).
10. В.Г. Дубровский, Г.Е. Цырлин, *ФТП* 39 № 11, 1312 (2005) (V.G. Dubrovskiy, G.Ye. Tsyrlin, *FTP* 39 No 11, 1312 (2005)).