

УДК. 24621.472.629.78

## ПОВЕРХНЕВІ НАНОСТРУКТУРИ КОНДЕНСАТУ CdTe НА СКЛІ ТА СИТАЛІ

Я. П. Салій<sup>1</sup>, І. С. Биліна<sup>1</sup>, О. Л. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра фізики і хімії твердого тіла,

<sup>2</sup>Фізико-хімічний інститут,

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,  
Івано-Франківськ, Україна

Надійшла до редакції 18.12.2015

Виконано дослідження структур на поверхні конденсату CdTe, осадженого методом гарячої стінки на підкладках із скла та ситалу. З топограм атомно-силового мікроскопа методом водорозділу одержано нормальні  $h$  і латеральні  $D$  розміри поверхневих об'єктів та побудовано їх гістограми розподілу. Проаналізовано залежності середніх значень нормальних і латеральних розмірів та фактора форми кристалітів від технологічних умов: часу осадження, температур підкладки і випарника. Підтверджено кореневу квадратичну залежність середніх розмірів від тривалості осадження.

**Ключові слова:** кадмій телурид, наноструктури, парофазний конденсат, кінетика росту, фактор форми.

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ КОНДЕНСАТА CdTe НА СТЕКЛЕ И СИТАЛЛЕ

Я. П. Салий, И. С. Былина, А. Л. Соколов

Выполнены исследования структур на поверхности конденсата CdTe, осажденного методом горячей стенки на подложках из стекла и ситалла. Из топограмм атомно-силового микроскопа способом водораздела получены нормальные и латеральные размеры поверхностных объектов и построены их гистограммы распределения. Проанализированы зависимости средних значений нормальных и латеральных размеров, а также фактора формы кристаллитов от технологических условий: времени осаждения, температур подложки и испарителя. Подтверждено корневую квадратичную зависимость средних размеров от продолжительности осаждения.

**Ключевые слова:** кадмий теллурид, наноструктуры, парофазный конденсат, кинетика роста, фактор формы.

## SURFACES NANOSTRUCTURES OF CONDENSATE CdTe ON GLASS AND CERAMICS

Ya. P. Saliy, I. S. Bylina, O. L. Sokolov

The research of structures on the surface of condensate CdTe, deposited by a method hot wall on substrates of glass and ceramics, are investigated. Normal and lateral sizes of surface objects are obtained from the topography of an atomic force microscope by a method watershed and their distribution histogram are constructed. The depending of mean values of normal, lateral size and form factor of crystallites from technological conditions: deposition time, substrate temperature and vaporization temperature are analyzed. The root quadratic dependence of the average sizes on the duration deposition is confirmed.

**Keywords:** cadmium telluride, nanostructures, vapor-phase condensate, kinetics of growth, form factor.

### ВСТУП

Напівпровідник CdTe кристалізується у структурі цинкової обманки зі сталою ґратки  $a = 6,481 \text{ \AA}$  та плавиться при  $1074 \text{ }^\circ\text{C}$  [1, 2]. Він є перспективним матеріалом, має вдалу для практичного використання сукупність основних фізико-хімічних

параметрів: високий коефіцієнт поглинання, малу концентрацію власних носіїв заряду, добрі механічні та теплові характеристики [3]. Телурид кадмію  $p$ - типу провідності є оптимальним матеріалом для створення високоефективних сонячних елементів наземного використання [4]. Ширина

забороненої зони напівпровідника 1.45 eV відповідає максимуму спектра сонячного випромінювання, тому сонячні елементи з базовим шаром телуриду кадмію мають високий коефіцієнт корисної дії.

На сьогодні існує значна кількість методів одержання тонких шарів CdTe, серед яких перспективним є метод квазізамкненого об'єму [5–9]. Цей метод, завдяки конструктивним особливостям випарника, дає змогу одержувати плівки високої чистоти під час добре контрольованого технологічного процесу.

У цей час дослідження даного матеріалу в якості складової сонячних елементів перебуває в активній фазі вивчення [10–13]. Однак велика кількість невирішених фізико-технологічних проблем стають перешкодою на шляху до отримання якісних функціональних плівок CdTe з контрольованими властивостями. Тому важливим є вивчення механізмів формування тонких плівок CdTe [14–20]. Ці проблеми зумовлені складністю процесів випаровування і перенесення речовини у паровій фазі, конденсації пари на підкладку тощо. В даній роботі представлено результати дослідження процесу формування об'єктів на поверхні конденсату CdTe, що є продовженням наших попередніх досліджень [21, 22] для інших матеріалів.

#### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівкові конденсати CdTe осаджували методом гарячої стінки на хімічно очищені підкладки зі скла та ситалу. Температуру підкладки  $T_s$  задавали в межах 420–520 К, а температуру випаровування  $T_v$  наважки із наперед синтезованої сполуки CdTe — в інтервалі 670–770 К. У цій області температур CdTe випаровується конгруентно з більш ніж 98 % молекул CdTe у парі [23]. Температура стінки  $T_w$  підтримувалась на 50 К вище температури випарника, завдяки чому унеможлиблювалося осадження молекул на стінку. При цьому тривалість осадження т складала 20–60 с.

Топологію поверхні зразків досліджували методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimension 3000 у режимі періодичного контакту. Квадратне поле

зображення поверхні конденсату розміром 1 мкм<sup>2</sup> представлене масивом 512<sup>2</sup> точок. Отримані АСМ-зображення аналізували у середовищі програми Gwyddion, де за допомогою методу водорозділу визначено розміри окремих об'єктів у нормальному  $h$  та латеральному  $D$  відносно поверхні підкладки напрямках. Використовуючи програму OriginPro 8.5.1, побудовано залежності середніх значень  $h_m$  і  $D_m$  та фактора форми  $k = h/D$  від технологічних факторів.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**Топологія поверхні конденсатів.** Як відомо, процеси зародження і росту тонкоплівкових наноструктур мають складний характер [24]. В результаті формування тонкої плівки мають місце наступні етапи структуроутворення: адсорбція, десорбція, виникнення критичних зародків, ріст і коалесценція двовимірних острівців. Розрізняють три механізми зародження тонкоплівкових конденсатів. Перший, зародковий механізм росту Фолмера-Вебера, реалізується на атомно-гладких щільно упакованих гранях ідеального кристала. Такими гранями являються грані із малими індексами Міллера. Ріст плівок в цьому випадку відбувається через початкове формування двовимірних чи тривимірних зародків, які в подальшому розростаються в суцільну плівку на поверхні підкладки. Другий, пошировий механізм зародження (механізм Франка-ван-дер-Мерве), реалізується при наявності на поверхні підкладки нерівностей, джерелом яких є природна шорсткість граней з великими індексами Міллера. При даному механізмі відсутня необхідність в утворенні зародків. Проміжним, між відзначеними вище двома, є механізм зародження Странскі-Крастанова, який передбачає на початкових етапах осадження утворення так званого змочувального шару з подальшим ростом тривимірних наноструктур за рахунок зняття пружних деформацій [25].

Для випадку росту тривимірних наноструктур, важливим є їх розподіл за розмірами як у латеральному, так і у нормальному напрямках по відношенню до поверхні підкладки, на якій осаджується конденсат, а також їх поверхнева щільність

та однорідність. Згадані параметри утворень можна задавати родом підкладки, кількістю осадженого на поверхню матеріалу та швидкістю його осадження. У зв'язку із цим визначення механізмів зародження і росту наноструктур, а також залежності розподілу їх за розмірами від умов осадження є важливою задачею як теорії, так і практики.

У таблиці наведено технологічні параметри отримання конденсату, а також характеристики після обробки АСМ-зображення. На рис. 1 продемонстровано 2D АСМ-зображення (I) і гістограми розподілу нормальних (II) та латеральних (III) розмірів поверхневих кристалітів конденсатів, отриманих на підкладках із ситалу при різному часі осадження. Гістограми розподілу висот будувалися із кроком 5 нм, а діаметрів — 10 нм. При  $\tau = 20$  с максимум розподілу висот знаходиться в інтервалі 5–10 нм (рис. 1, IIa, а латеральних розмірів — 30–40 нм рис. 1, IIIa). При збільшенні тривалості осадження до 30 с максимумами розподілу розмірів наноструктур на поверхні конденсату (рис. 1, IIб, IIIб) зміщуються в область більших значень.

Аналогічне представлення для конденсатів на підкладках із скла при різних температурах осадження наведено на рис. 2. Тут як для висот, так і для діаметрів побудова гістограм розподілу відбувалася із кроком 10 нм. В даному випадку суттєвого зміщення максимуму розподілів від температури підкладки не спостерігається. Зокрема для висот об'єктів максимум розподілу як при  $T_s = 470$  К (рис. 2, IIa), так і  $T_s = 520$  К (рис. 2, IIб) знаходиться в межах 20–30 нм. Для діаметрів проявляється така сама тенденція, де максимумами розподілу також не зміщуються з температурою осадження і знаходяться в інтервалі 40–50 нм.

Розглянемо також середні розміри наноструктур (таблиця), оскільки гістограми розподілу даних характеристик є асиметричними. Так, при збільшенні температури осадження спостерігається деяке зменшення середніх розмірів наноструктур як на підкладці зі скла, так і на підкладці із ситалу (рис. 3 a). Зауважимо, що за сталої тривалості осадження середні розміри об'єктів на склі є більшими, ніж на ситалі. Це пояснюється відмінністю підкладок, скло є аморфним,

Таблиця

**Технологічні фактори отримання та структурні характеристики парофазних конденсатів CdTe, осаджених на підкладки із скла та ситалу**

Технологічні параметри				Структурні характеристики					
Змінний параметр	Сталі параметри	Значення змінного параметра	№ зразків	$h_m$ , нм		$D_m$ , нм		$k$	
				скло	ситал	скло	ситал	скло	ситал
$\tau$ , с	$T_v = 770$ К	20	15	19	8	62	48	$0,30 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
	$T_s = 520$ К	30	14	36	25	88	51	$0,42 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,01$
	$T_w = 820$ К	60	13	41	50	106	75	$0,36 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$
$T_s$ , К	$T_v = 720$ К	420	25	67	17	86	50	$0,81 \pm 0,05$	$0,34 \pm 0,01$
	$T_w = 770$ К	470	26	34	18	79	54	$0,44 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,01$
	$\tau = 60$ с	520	27	33	17	57	43	$0,55 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,01$
$T_v$ , К	$T_n = 520$ К	670	23	31	8	80	49	$0,37 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
	$T_w = T_v + 50$ К	720	27	33	17	57	43	$0,55 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,01$
	$\tau = 60$ с	770	13	41	50	106	75	$0,36 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$

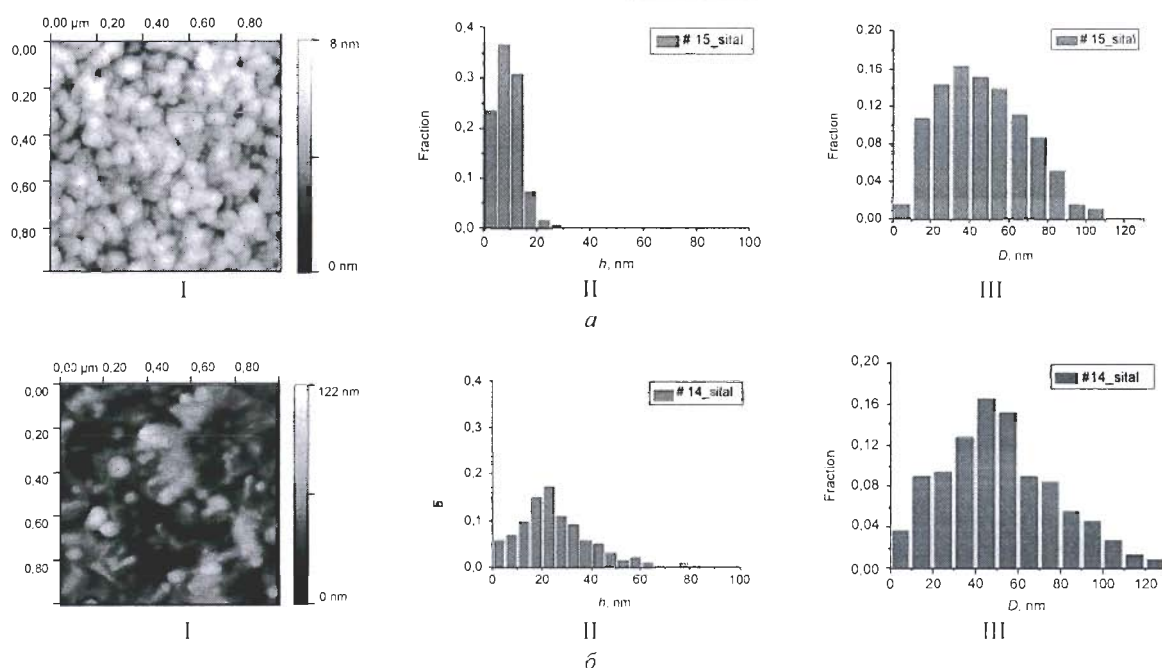


Рис. 1. 2D АСМ-зображення (I) та гістограми розподілу висот (II) і латеральних розмірів (III) поверхневих нанокристалітів парофазних конденсатів CdTe, отриманих на підкладках із ситалу для часу осадження  $\tau$ , с: 20, 30; а) зразок № 15 і б) — № 14 відповідно

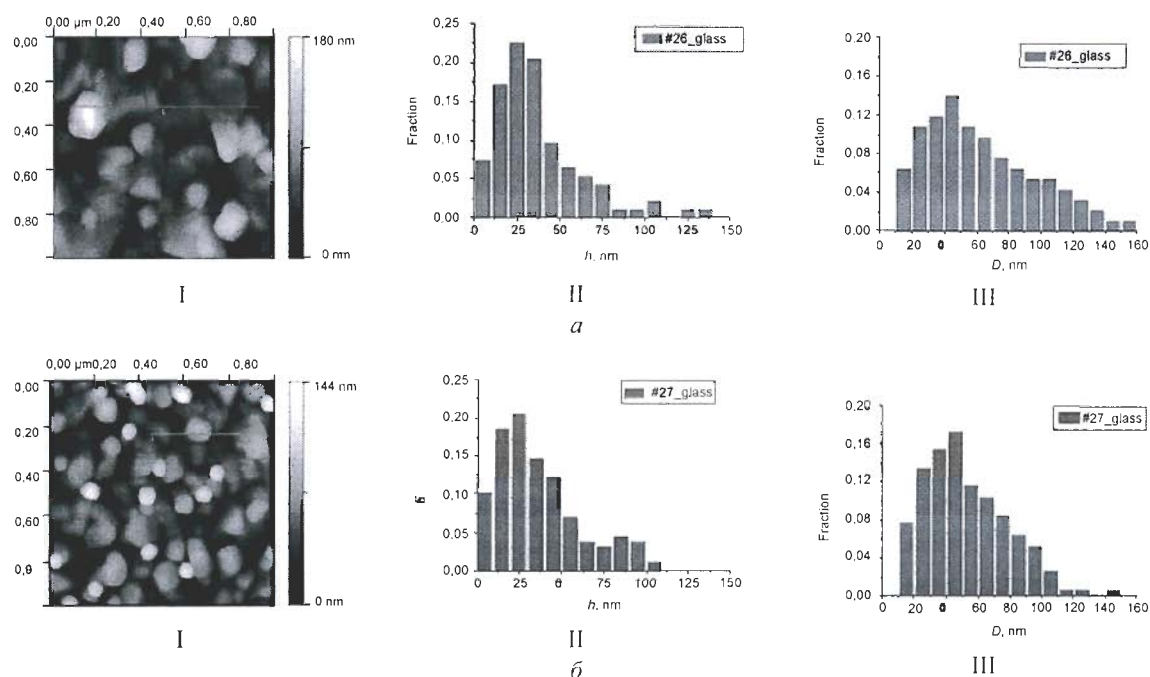


Рис. 2. 2D АСМ-зображення (I) та гістограми розподілу нанокристалітів за висотою (II) і латеральними розмірами (III) у конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла при температурі підкладки  $T_{\text{п}}$ , К: 470, 520; а) зразок № 26 і б) — № 27 відповідно

а ситал — полікристалічним. Кристаліти розмірами менше 1 мкм пов'язані між собою скловидним прошарком, тому епітаксійні об'єкти на його поверхні можуть формуватися на окремих площинах кристалітів.

При збільшенні температури випарування простежується збільшення середніх нормальних та латеральних розмірів наноструктур на обох видах підкладок (рис. 3б; таблиця). Така залежність пов'язана з тим,

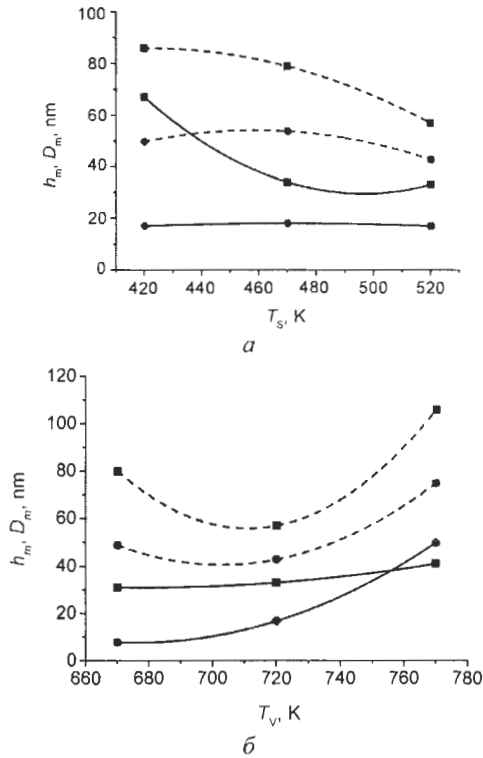


Рис. 3. Залежності середніх нормальних (суцільні криві) та латеральних (штриховані криві) розмірів нанокристалітів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від температури підкладки  $T_s$  (а) та температури випарування  $T_v$  (б) (таблиця)

що при збільшенні температури випарування збільшується інтенсивність потоку атомів з парової фази на поверхню підкладки, а адатоми, маючи при цьому більшу енергію, спроможні створювати хімічні зв'язки із зародками нової фази та вже сформованими острівцями.

**Кінетика росту нанокристалітів.** Контрольоване вирощування плівкових структур з потрібними властивостями можна реалізувати керуючи 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 [26]. Важливим моментом будь-якої теорії є нелінійний зворотній зв'язок між перенасиченням і функцією розподілу острівців нової фази за розмірами, адже кластери, що ростуть, поглинають інші адатоми, тим самим зменшуючи перенасичення, від якого залежить швидкість їх формування і росту [27]. В роботі [28] досліджується кінетична модель росту тонкої плівки на твердій підкладці

за умови двовимірного утворення зародків. 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. Дані розв'язки виражають структурні характеристики плівки через фізичні константи системи та параметри росту, зокрема, температур випарування і підкладки, а також тривалості осадження. В роботі [28] отримано результат, згідно якого має місце закон, за яким середній розмір острівців росте пропорційно  $(\tau - \tau^*)^{1/2}$ , де  $\tau^*$  – час затримки нуклеації острівців.

У результаті апроксимації залежності середніх нормальних розмірів від часу осадження степеневою функцією  $h_m = a(\tau - \tau^*)^b$ , для зразків, осаджених на підкладках зі скла, одержали  $b = 0,09$ , а на підкладках із ситалу –  $0,54$ , при цьому  $\tau^* = 19$  с для обох підкладок. Для середніх латеральних розмірів  $D_m$  використана аналогічна залежність. Показник степеня  $b$  для зразків, отриманих на підкладках зі скла, становить  $0,14$ , а на підкладках із ситалу –  $0,46$ , при цьому для скла  $\tau^* = 19$  с, а для ситалу  $0$  с. Як бачимо, для обох розмірів кристалітів ситалу  $b \approx 1/2$ . Отже, ріст середніх нормальних  $h_m$  розмірів та середніх латеральних  $D_m$  розмірів наноструктур на ситалі для сполуки CdTe пропорційний  $(\tau - \tau^*)^{1/2}$ , що узгоджується з теоретичною залежністю [28]. Бачимо, що для латерального розміру острівців на ситалі відсутня затримка нуклеації. Експериментальні дані і апроксимаційні криві зображено на рис. 4. З кривих

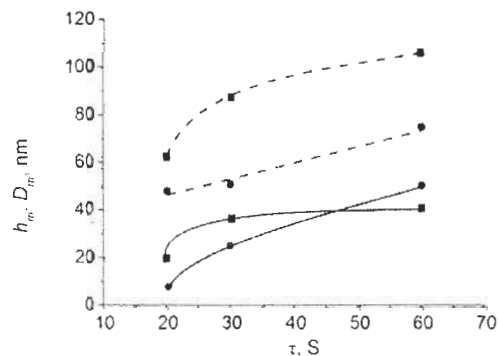


Рис. 4. Залежності середніх нормальних (суцільні криві) та латеральних (штриховані криві) розмірів нанокристалітів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від часу осадження  $\tau$  (таблиця)

видно, що при збільшенні часу осадження зменшується швидкість росту середніх діаметрів та висот об'єктів для обох підкладок.

**Фактор форми.** Для детальнішого аналізу зміни форми наноструктур на поверхні конденсатів CdTe в залежності від технологічних параметрів скористаємося фактором форми. Побудовано точки на площині у координатах латеральний, нормальний розмір кристаліта. Так, на рис. 5 наведено (характерний для всіх зразків) двовимірний розкид нормальних і латеральних розмірів кристалітів парофазного конденсату CdTe (зразок № 25, таблиця), отриманого на підкладці із ситалу. Спостерігаємо кореляцію нормального і латерального розмірів. Отримані точки апроксимовані прямою, кутовий коефіцієнт  $k$  якої визначає середню величину фактора форми і становить  $0,34 \pm 0,01$ , тобто в середньому відношення нормального до латерального розміру об'єктів на поверхні  $h/D$  складає 0,34. Аналогічні розподіли були побудовані і для всіх інших зразків, на основі чого представлено залежності фактора форми від різних технологічних параметрів (рис. 6).

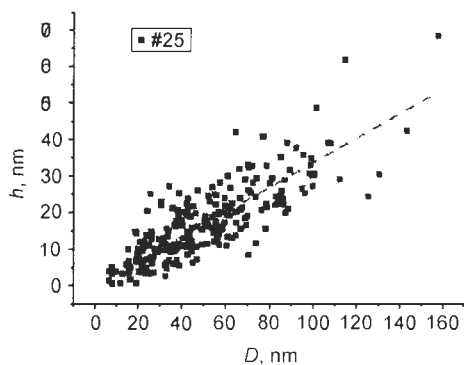
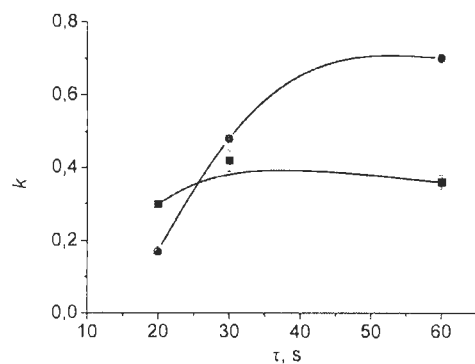
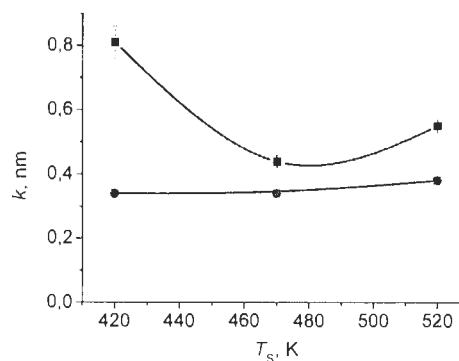


Рис. 5. Розкид нормального і латерального розмірів кристалітів у парофазному конденсаті CdTe (зразок № 25, таблиця), отриманого на підкладці із ситалу

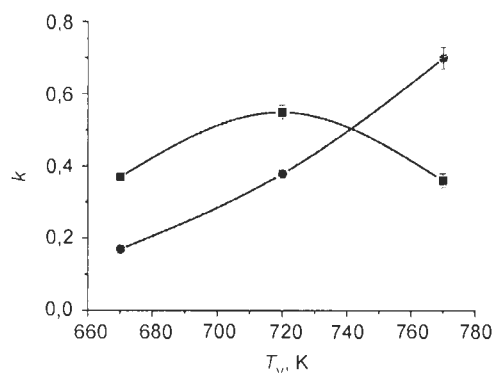
Так, аналізуючи рис. 6а бачимо, що при збільшенні тривалості осадження має місце збільшення фактора форми як для зразка на склі, так і для зразка на ситалі. Проте на ситалі це збільшення відбувається інтенсивніше. Такі зміни фактора форми означають, що на початкових етапах осадження перевагу має латеральний ріст об'єктів, а при подальшій конденсації перевага переходить до нормального росту. Це можна пояснити наступним чином.



а



б



в

Рис. 6. Залежність фактора форми нанокристалітів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від часу осадження  $\tau$  (а), температури підкладки  $T_s$  (б) та температури випарування  $T_v$  (в) (таблиця)

Так, згідно теорії, закладеної у роботах Оствальда [29], Ліфшица і Сльозова [30], Вагнера (ЛСВ) [31], Венгреневича [32] стосовно поверхневих дискретних систем і, зокрема, острівцевих плівок і напівпровідникових гетероструктур з квантовими точками, розрізняють дифузійний процес росту наноструктур і процес, контрольований швидкістю утворення хімічних зв'язків на їх поверхні (вагнерівський). Обидва процеси можуть реалізовуватися одночасно за умови, якщо електронні процеси утворення хімічних

зв'язків є активаційними і енергії активації обох процесів — електронного і дифузійного — порівняні між собою.

Тож бачимо, що на початкових етапах конденсації перевагу має дифузійний ріст, і острівці інтенсивніше розростаються в латеральному напрямку, зливаючись при цьому один з одним, тим самим ще більше збільшуючи середні латеральні значення. У подальшому, коли в латеральному напрямку плівка розвинулася вже достатньо, відбувається перехід до інтенсивнішого нормального росту, і в даному випадку вже має перевагу вагнерівський процес росту.

При збільшенні температури підкладки, за сталого значення всіх інших параметрів спостерігається тенденція до зменшення фактора форми структур на склі і незначного збільшення на ситалі (рис. 6б).

Зростання температури випарування (рис. 6в), за незмінних інших параметрів призводить до залежності, яка проходить через максимум для фактора форми у зразках на підкладці із скла, та збільшення фактора форми для зразків на підкладці із ситалу.

## ВИСНОВКИ

1. Представлено комплексне дослідження процесів структуроутворення у парофазних конденсатах CdTe, вирощених на підкладках із скла та ситалу.
2. Виявлено, що збільшення температури підкладки призводить до зменшення середніх нормальних  $h_m$  та латеральних  $D_m$  розмірів наноструктур, а збільшення температури випарування навпаки зумовлює їхній ріст.
3. Підтверджено, що значення середніх розмірів наноструктур на ситалі, в типовому для молекулярно-променевої епітаксії режимі повної конденсації, переважну частину часу ростуть пропорційно  $(\tau - \tau^*)^{1/2}$ , показник степеня у випадку підкладок зі скла становить  $\sim 0,1$ .
4. Встановлено, що при збільшенні тривалості осадження має місце збільшення фактора форми наноструктур як для зразків на склі, так і для зразків на ситалі, а збільшення температури підкладки, за сталого значення інших параметрів

призводить до його зменшення на склі і деякого збільшення на ситалі.

5. Показано, що на початкових етапах конденсації перевагу має дифузійний ріст, а при більшій тривалості осадження відбувається перехід до вагнерівського процесу росту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Медведева С. А. Физика и химия соединений  $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ . — М: Мир, 1970. — 624 с.
2. Георгобнани А. Н., Шейнкман М. К. Физика соединений  $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ . — М: Наука, 1986. — 319 с.
3. Брус В. В., Илащук М. И., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д., Ульяницкий К. С., Грицюк Б. Н. Механизмы токопереноса в анизотипных гетеропереходах  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$ . // ФТП. — 2011. — Т. 45, № 8. — С. 1109–1113.
4. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут Є. В., Борисик М. М. Телурид кадмію і домішково-дефектні стани та детекторні властивості. — К: Іван Федоров, 2000. — 198 с.
5. Бубнов Ю. З., Лур'є М. С., Старос Ф. Г., Филаретов Г. А. Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме. — Л: Энергия, 1975. — 161 с.
6. Калинин И. Н., Алесковский В. Б., Симашкевич А. В. Эпитаксиальные слои соединений  $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ . — Л: Изд-во ЛГУ, 1978. — 235 с.
7. Фрейк Д. М., Горічок І. В., Соколов О. Л., Потяк В. Ю. Технологічні аспекти осадження плівок CdTe методом гарячої стінки // ФХТТ. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 89–94.
8. Bilevych Ye. O., Voka A. I., Darchuk L. O., Gumenjuk-Sichevska J. V. et al. Properties of CdTe thin films prepared by hot wall epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2004. — Vol. 7, No. 2. — P. 129–132.
9. Косяк В., Опанасюк А. Явища перенесення та осадження у разі одержання плівок CdTe методом квазізамкнутого об'єму // Вісник Львів. ун-ту. Серія фізична. — 2008. — Т. 41. — С. 117–124.
10. Major J. D., Treharne, R. E., Phillips, L. J., & Durose, K. A low-cost non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells // Nature. — 2014. — Vol. 511, No. 7509. — P. 334–337.
11. Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D.

- Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2012. — Vol. 105. — P. 109–112.
12. Lin T., Huang F., Liang J., Wang Y. A facile preparation route for boron-doped graphene and its CdTe solar cell application // *Energy & Environmental Science*. — 2011. — Vol. 4, No. 3. — P. 862–865.
  13. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe solar cells at the threshold to 20 % efficiency // *Photovoltaics, IEEE Journal of*. — 2013. — Vol. 3, No. 4. — P. 1389–1393.
  14. Colletti L. P., Stickney J. L. Optimization of the growth of CdTe thin films formed by electrochemical atomic layer epitaxy in an automated deposition system // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1998. — Vol. 145, No. 10. — P. 3594–3602.
  15. Moutinho H. R., Moutinho H. R., Hasoon F. S., et al. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. — 1995. — Vol. 13, No. 6. — P. 2877–2883.
  16. Pandey S. K., Tiwari, U., Raman, R. et al. Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. — 2005. — Vol. 473, No. 1. — P. 54–57.
  17. Luschitz J., Siepchen B., Schaffner J., et al. CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance // *Thin Solid Films*. — 2009. — Vol. 517, No. 7. — P. 2125–2131.
  18. Fthenakis V. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2009. — Vol. 13, No. 9. — P. 2746–2750.
  19. Singh R. R., Painuly D., Pandey R. K. Synthesis and characterization of electrochemically deposited nanocrystalline CdTe thin films // *Materials Chemistry and Physics*. — 2009. — Vol. 116, No. 1. — P. 261–268.
  20. Shaaban E. R., Afify N., El-Taher A. Effect of film thickness on microstructure parameters and optical constants of CdTe thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2009. — Vol. 482, No. 1. — P. 400–404.
  21. Салій Я. П., Фреїк Д. М., Біліна І. С., Галушак М. О. Кристаліграфічний та орієнтаційний характер нанокристалітів у тонкоплівкових конденсатах PbTe–Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> на ситалі // *Ж. нано-електрон. фіз.* — 2015. — Т. 7, № 2. — С. 02020-1–02020-8.
  22. Біліна І. С. Механізми структуроутворення та термоелектричні властивості парофазних конденсатів твердого розчину PbTe–Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> на ситалі // *ФХТТ* — 2015. — Т. 16, № 1. — С. 83–92.
  23. Ferreira S. O., Leal F. F., Faria T. E., Oliveira J. E., Motisuke P. and Abramof E. Characterization of CdTe Thin Films Grown on Glass by Hot Wall Epitaxy // *Brazilian Journal of Physics*. — 2006. — Vol. 36, No. 2A. — P. 317–319.
  24. Волков С. В., Ковальчук Є. П., Огенко В. М., Решетняк О. В. Нанохімія, наносистеми, наноматеріали. — Київ: Наукова думка, 2008. — 423 с.
  25. Зимин С. П., Горлачев Е. С. Наноструктурированные халькогениды свинца: монография. — Ярославль: ЯрГУ, 2011. — 232 с.
  26. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких пленок // *УФН*. — 1998. — Т. 168, № 10. — С. 1083–1116.
  27. Osipov A. V. Kinetic model of vapour-deposited thin film condensation: nucleation stage // *Thin Solid Films*. — 1993. — Vol. 227, No. 2. — P. 111–118.
  28. Дубровский В. Г., Цырлин Г. Э. Кинетика роста тонких пленок при зародышевом механизме формирования слоев // *ФТП*. — 2005. — Т. 39, № 11. — С. 1312–1319.
  29. Ostwald W. «Über die Vermeintliche isometrie das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflächenspannung fester Körper» // *Js. Physics Chemistry*. — 1900. — Vol. 34. — P. 495–503.
  30. Лифшиц И. М., Слезов В. В. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // *ЖЭТФ*. — 1958. — Т. 35, № 2. — С. 479–487.
  31. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung) // *Zs. Electrochem*. — 1961. — В. 65, М. 7/8. — P. 581–591.
  32. Венгреневич Р. Д., Іванський Б. В., Москалюк А. В. До теорії Ліфшица-Сльозова-Вagnera. // *ФХТТ*. — 2009. — Т. 10, № 1. — С. 19–30.

## LITERATURA

1. Medvedeva S. A. *Fizika i himiya soedinenij AIBVI*. — М: Mir, 1970. — 624 p.



2. Georgobiani A. N., Shejnkman M. K. Fizika soedinenij AIBVI. — M: Nauka, 1986. — 319 p.
3. Brus V. V., Ilaschuk M. I., Kovalyuk Z. D., Mar'yanchuk P. D., Ul'yanickij K. S., Gri-cyuk B. N. Mehanizmy tokoperenosa v anizotipnyh geteroperehodah  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$ . // FTP. — 2011. — Vol. 45, No. 8. — P. 1109–1113.
4. Korbutyak D. V., Mel'nichuk S. V., Korbut E. V., Borisik M. M. Telurid kadmiyu i domishkovo-defektni stani ta detektorni vlastivosti. — K: Ivan Fedorov, 2000. — 198 p.
5. Bubnov Yu. Z., Lur'c M. S., Staros F. G., Filaretov G. A. Vakuumnoe nanesenie plenok v kvazizamknutom obeme. — L: Energiya, 1975. — 161 p.
6. Kalinkin I. N., Aleskovskij V. B., Simashkevich A. V. Epitaksial'nye sloi soedinenij AIBVI. — L: Izd-vo LGU, 1978. — 235 p.
7. Freik D. M., Gorichok I. V., Sokolov O. L., Potyak V. Yu. Tehnologichni aspekti osadzhennya plivok CdTe metodom garyachoi stinki // FHTT. — 2011. — Vol. 12, No. 1. — P. 89–94.
8. Bilevykh Ye. O., Boka A. I., Darchuk L. O., Gumenjuk-Sichevska J. V. et al. Properties of CdTe thin films prepared by hot wall epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2004. — Vol. 7, No. 2. — P. 129–132.
9. Kosyak V., Opanasyuk A. Yavischa perenesennya ta osadzhennya u razi oderzhannya plivok CdTe metodom kvazizamknenogo ob'emmu // Visnik L'viv. un-tu. Seriya fizichna. — 2008. — Vol. 41. — P. 117–124.
10. Major J. D., Treharne, R. E., Phillips, L. J., & Durose, K. A low-cost non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells // Nature. — 2014. — Vol. 511, No. 7509. — P. 334–337.
11. Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2012. — Vol. 105. — P. 109–112.
12. Lin T., Huang F., Liang J., Wang Y. A facile preparation route for boron-doped graphene, and its CdTe solar cell application // Energy & Environmental Science. — 2011. — Vol. 4, No. 3. — P. 862–865.
13. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe solar cells at the threshold to 20 % efficiency // Photovoltaics, IEEE Journal of. — 2013. — Vol. 3, No. 4. — P. 1389–1393.
14. Colletti L. P., Stickney J. L. Optimization of the growth of CdTe thin films formed by electrochemical atomic layer epitaxy in an automated deposition system // Journal of the Electrochemical Society. — 1998. — Vol. 145, No. 10. — P. 3594–3602.
15. Moutinho H. R., Moutinho H. R., Hasoon F. S., et al. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering // Journal of Vacuum Science & Technology A. — 1995. — Vol. 13, No. 6. — P. 2877–2883.
16. Pandey S. K., Tiwari, U., Raman, R. et al. Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 473, No. 1. — P. 54–57.
17. Lushtiz J., Siepchen B., Schaffner J., et al. CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 517, No. 7. — P. 2125–2131.
18. Fthenakis V. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2009. — Vol. 13, No. 9. — P. 2746–2750.
19. Singh R. R., Painuly D., Pandey R. K. Synthesis and characterization of electrochemically deposited nanocrystalline CdTe thin films // Materials Chemistry and Physics. — 2009. — Vol. 116, No. 1. — P. 261–268.
20. Shaaban E. R., Afify N., El-Taher A. Effect of film thickness on microstructure parameters and optical constants of CdTe thin films // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Vol. 482, No. 1. — P. 400–404.
21. Salij Ya. P., Freik D. M., Bilina I. S., Galuschak M. O. Kristalografichnij ta orientacijnij karakter nanokristalitiv u tonkoplivkovih kondensatah  $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$  na sitali // Zh. nanoelektron. fiz. — 2015. — Vol. 7, No. 2. — P. 02020-1–02020-8.
22. Bilina I. S. Mehanizmi strukturoutvorennja ta termoelektrichni vlastivosti parofaznih kondensativ tverdogo rozchinu  $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$  na sitali // FHTT — 2015. — Vol. 16, No. 1. — P. 83–92.
23. Ferreira S. O., Leal F. F., Faria T. E., Oliveira J. E., Motisuke P. and Abramof E. Characterization of CdTe Thin Films Grown on Glass by Hot Wall Epitaxy // Brazilian Journal

- of Physics. — 2006. — Vol. 36, No. 2A. — P. 317–319.
24. Volkov S. V., Koval'chuk Є. P., Ogenko V. M., Reshetnyak O. V. Nanohimiya, nanosistemi, nanomateriali. — Kiïv: Naukova dumka, 2008. — 423 p.
25. Zimin. S. P., Gorlachev E. S. Nanostrukturovaniye hal'kogenidy svinca: monografiya. — Yaroslavl': YarGU, 2011. — 232 p.
26. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Processy kondensacii tonkih plenok // UFN. — 1998. — Vol. 168, No. 10. — P. 1083–1116.
27. Osipov A. V. Kinetic model of vapour-deposited thin film condensation: nucleation stage // Thin Solid Films. — 1993. — Vol. 227, No. 2. — P. 111–118.
28. Dubrovskij V. G., Cyrilin G. E. Kinetika rosta tonkih plenok pri zarodyshevom mehanizme formirovaniya sloev // FTP. — 2005. — Vol. 39, No. 11. — P. 1312–1319.
29. Ostwald W. «Über die Vermeintliche isometric das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflachenspannung fester Korper» // Js. Physics Chemistry. — 1900. — Vol. 34. — P. 495–503.
30. Lifshic I. M., Slezov V. V. O kinetike diffuzionnogo raspada peresyschennyh tverdyh rastvorov // ZhETF. — 1958. — Vol. 35, No. 2. — P. 479–487.
31. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung) // Zs. Electrochem. — 1961. — B. 65, M. 7/8. — P. 581–591.
32. Vengrenovich R. D., Ivans'kij B. V., Moskalyuk A. V. Do teorii Lifshica-Sl'ozova-Vagnera. // FHIT. — 2009. — Vol. 10, No. 1. — P. 19–30.