

І.М. БОЛЕСТА,¹ І.М. РОВЕЦЬКИЙ,¹ З.М. ЯРЕМКО,² І.Д. КАРБОВНИК,¹
С.Р. ВЕЛЬГОШ,¹ М.В. ПАРТИКА,³ Н.В. ГЛОСКОВСЬКА,⁴ В.М. ЛЕСІВЦІВ¹

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка, факультет електроніки,
кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій
(Вул. генерала М. Тарнавського, 107, Львів 79017; e-mail: bolesta@electronics.lnu.edu.ua)

² Львівський національний університет ім. Івана Франка, кафедра безпеки життєдіяльності
(Вул. Дорошенка, 41, Львів 79000)

³ Львівський національний університет ім. Івана Франка, фізичний факультет,
кафедра фізики твердого тіла
(Вул. Драгоманова, 50, Львів 79005)

⁴ Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголобова НАН України
(Вул. Метрологічна, 14-б, Київ 03680)

ПРО МЕХАНІЗМ РОСТУ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНІ CdI₂

УДК 620.3, 53.05

Методами атомно-силової мікроскопії досліджено динаміку формування нанорозмірних структур на ван-дер-ваальсовій поверхні кристалів CdI₂ під час їхнього витримування в атмосфері повітря за термодинамічних умов, близьких до рівноважних. У формуванні поверхневих наноструктур виявлено три стадії: на першій утворюються нанопори через розчинення матриці у місцях виходу гвинтових дислокацій або інших структурних дефектів ґратки, на другій у цих нанопорах зароджуються конусоподібні нанокластери, які з часом збільшуються у розмірах, і на останній третій стадії вони коагулюють. Кінетика росту поверхневих конусоподібних нанокластерів описана дифузійною моделлю, яка ґрунтується на зустрічній дифузії компонентів, що входять до їхнього складу. Показано, що швидкість росту цих нанокластерів залежить від часової зміни градієнта концентрації іонів кадмію у приреакційній області.

Ключові слова: атомно-силова мікроскопія, поверхня Ван-дер-Ваальса, нанопори, нанокластери, дифузія.

1. Вступ

Актуальною задачею сучасної фізики напівпровідників та діелектриків є дослідження наноструктур з метою пошуку матеріалів з новими функціональними характеристиками для їхнього використання у сучасних приладах і системах мікро- та наноелектроніки.

У цьому плані перспективними є шаруваті кристали, для поверхні яких характерні протяжні атомарно-гладкі ділянки з низькою густиною обірваних зв'язків, які називають Ван-дер-Ваальсовими поверхнями (ВдВ-поверхнями). Ця особливість зумовлює їхнє застосування як підкладок для формування молекулярних, органічних і металічних наноструктур та для отримання гетероструктур

методом “некогерентної ВдВ-епітаксії”, як природних еталонів нанорельєфу в метрології нанооб'єктів [1–4].

Сьогодні інтенсивно досліджують формування та властивості нанорозмірних структур у шаруватих кристалах групи A^{III}B^{VI}: GaSe, InSe та сплавів In_xSe_{1-x} [5–8], однак подібні дослідження для широкозонних галогенідів типу MX₂ з шаруватою структурою практично відсутні.

Результати мікроскопічних досліджень поверхні шаруватих кристалів CdI₂, вирощених з водних розчинів, обговорені у ряді робіт [9–13]. Методами оптичної, тунельної (ТЕМ) та скануючої (СЕМ) електронної мікроскопії були виявлені нові елементи спіралей росту, що формуються на базисних поверхнях (0001) CdI₂, а саме: субсходинки з висотою, рівною або кратною до величини *c*-періоду кристалічної структури. Горизонтальна відстань між сходишками є кратною *a*-параметру ґратки [9–11]. Було виявлено також невідповідність між

© І.М. БОЛЕСТА, І.М. РОВЕЦЬКИЙ, З.М. ЯРЕМКО,
І.Д. КАРБОВНИК, С.Р. ВЕЛЬГОШ,
М.В. ПАРТИКА, Н.В. ГЛОСКОВСЬКА,
В.М. ЛЕСІВЦІВ, 2015

висотою спіралі росту та c -періодом ґратки, яка пов'язана із взаємодією некомпенсованих зв'язків на обірваних шарах (сходинках) I–Cd–I з поверхнею кристала, і приводить до зменшення товщини структурного шару I–Cd–I від 0,343 нм до 0,310 нм [12].

Під час дослідження морфології поверхні вирошених з водного розчину кристалів CdI₂ методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) виявлено лінійні сходинки (тераси), впадини та острівці. Між цими елементами поверхня CdI₂ є атомарно плоскою: неоднорідність рельєфу становила 10,2 та 4,7 Å [13].

Методами електронної мікроскопії виявлено формування наноструктур, які виростають внаслідок перекристалізації матеріалу, який випаровується при опроміненні порошку CdI₂ електронним пучком. Ці частинки є переважно металевими, оскільки відношення Cd:I у них становить 2:1, тоді як у стехіометричних сполуках це відношення дорівнює 1,5:2 [14]. Металеві кластери виявлені також у нестехіометричних кристалах CdI₂–Cd [15], а в легованих кристалах CdI₂–BiI₃ виявлено формування мікротрубок в мікропорах кристала [16].

Практичне використання кристалів CdI₂ у сцинтиляційній техніці, як елементів оптичного запису інформації [17], зумовлює актуальність дослідження процесу формування та аналізу морфометричних характеристик наноструктур, які формуються на ВдВ-поверхні кристалів йодистого кадмію під час їхнього витримання в атмосфері повітря за звичайних умов ($T = 290$ К, відносна вологість повітря 80% та атмосферний тиск 10^5 Па).

2. Зразки і методика експерименту

Для досліджень використано шаруваті монокристали CdI₂, вирошені з розплаву методом Бріджмена–Стокбаргера з попередньо очищеної зонною плавкою сировини [18]. Одночасно, під час вирощування монокристала, на стінках, у верхній частині ампули утворювалися тонкі монокристалічні пластинки CdI₂ з газової фази. Свіжий скол кристалів отримано видаленням його верхніх шарів за допомогою плівки скотчу. Досліджувалися також кристали CdI₂, вирошені з газової фази, які мали форму пластин товщиною 1–3 мкм. Поверхня цих зразків не піддавалась попередній механічній обробці.

Для встановлення механізму росту наноструктур, які виникають на поверхні кристалів CdI₂, було детально досліджено часову еволюцію (динаміку) їхнього формування. З цією метою вимірювалася морфологія однієї і тієї ж ділянки поверхні свіжосколотого кристала під час його витримання в атмосфері повітря упродовж 10 діб.

Дослідження морфології ВдВ-поверхні кристала проводились методами напівконтактної атомно-силової мікроскопії з використанням атомно-силового мікроскопа Solver P47-PRO. Радіус вістря зонда становив 10 нм, а роздільна здатність приладу за висотою дорівнювала 1 Å.

Розміри зразків були не більше 5×5 мм, а їхня товщина – 0,5–1 мм. Для запобігання механічним пошкодженням і деформаціям зразки закріплювали на спеціальних підкладках за допомогою двостороннього скотчу.

Для аналізу морфометричних характеристик наноструктур було створено прикладну програму у середовищі Matlab. Аналіз статистичних характеристик здійснювався на основі алгоритму Хошена–Копельмана [19], який застосовується до бінаризованого цифрового АСМ-зображення. Усунення шуму на цифрових АСМ-зображеннях забезпечувалося за допомогою лінійного фільтра Гауса та нелінійного медіанного фільтра.

3. Результати дослідження

На рис. 1, *a* подано АСМ-зображення морфології ВдВ-поверхні вирошених з газової фази кристалів CdI₂, витриманих в атмосфері повітря за кімнатної температури ($T = 290$ К) упродовж 30 діб. Аналіз одержаних зображень дозволяє виділити, принаймні, три стадії формування поверхневих наноструктур.

Перша стадія формування поверхневих наноструктур пов'язана з утворенням нанопор, які виникають внаслідок розчинення матриці на виходах гвинтових дислокацій або інших структурних дефектах ґратки (точка *A* на рис. 1, *a*). Середні значення діаметрів та глибин пор становлять ~ 250 та $\sim 0,5$ нм, відповідно (точка *A* на рис. 1, *b*).

На другій стадії в утворених нанопорах починається зародження поверхневого нанокластера у вигляді конуса (точка *B* на рис. 1, *a*), детальніше зображення якого наведено на рис. 1, *c*. Діаметр нанокластера у цей момент росту не переви-

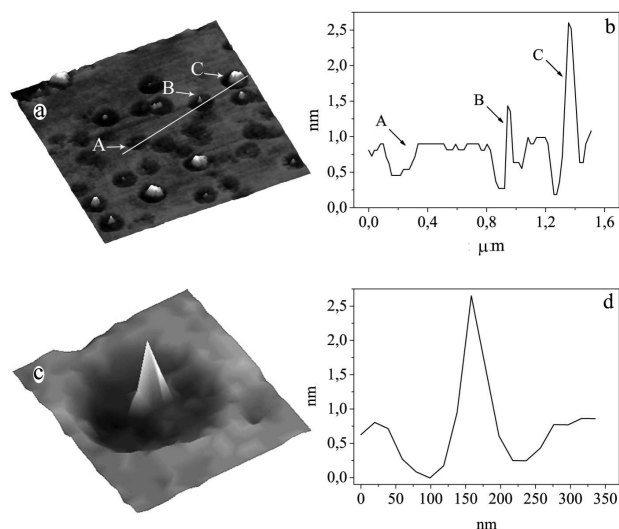


Рис. 1. АСМ-зображення морфології ВдВ-поверхні, вирощених з газової фази кристалів CdI_2 , витриманих в атмосфері повітря упродовж тривалого часу (30 днів і більше): наноструктури *a* (*A* – нанопора; *B*, *C* – нанокластери) та їхні профілі (*b*); нанокластер, сформований в нанопорі (*c*), та його профіль (*d*); (розмір зображень: *a* – 2×2 мкм; *c* – 320×350 нм; діапазон висот: *a*, *c* – 3 нм)

ще ~ 150 нм, а висота – $\sim 1,5$ нм (рис. 1, *d*). На третій стадії спостерігається коагуляція наноструктур (точка *C* на рис. 1, *a*).

Для вивчення механізму формування поверхневих конусоподібних наноструктур проведено дослідження кінетики їхнього росту протягом 168 годин.

На рис. 2, *a* подано АСМ-зображення морфології свіжосколотої ВдВ-поверхні CdI_2 , після витримання кристалів у атмосфері повітря упродовж 1 години – часу від моменту утворення сколу до початку вимірювання. За цей час на поверхні CdI_2 сформувалися наноструктури конусоподібної (ділянка *A* на рис. 2, *a*) та острівкової форми (ділянки *B*₁, *B*₂, *B*₃ на рис. 2, *a*). Ці наноструктури відрізняються не тільки за формою, а й за розмірами. Значення діаметрів та висот наноструктур, сформованих на ділянці *A* (рис. 2, *a*), лежать у межах 200–300 та 10–20 нм, відповідно. Водночас, острівці *B*₁, *B*₂, *B*₃ (рис. 2, *a*) характеризуються майже вдвічі більшим діаметром ~ 600 нм та висотою ~ 10 нм. Біля наноструктур острівкового типу спостерігається формування іншого типу наноструктур – впадин *C*₁, *C*₂ (рис. 2, *a*) округлої форми, характерної для гексагонального пакува-

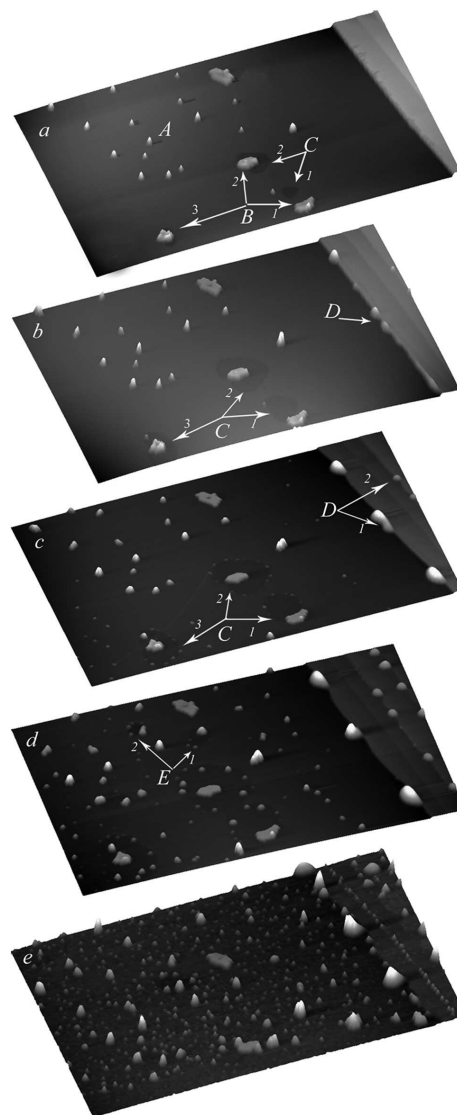


Рис. 2. Часова еволюція формування наноструктур на ВдВ-поверхні кристалів CdI_2 , вирощених з розплаву, після витримання останніх в атмосфері повітря упродовж 1 (*a*), 8 (*b*), 24 (*c*), 32 (*d*) та 168 год (*e*); (розмір ділянок: 6×10 мкм; діапазон висот: *a* – 34 нм, *b* – 51 нм, *c* – 55 нм, *d* – 74 нм, *e* – 98 нм). *A*, *B*₁, *B*₂, *B*₃ – нанокластери, які формуються на гладкій ділянці поверхні. *D*, *D*₁, *D*₂ – нанокластери, які формуються вздовж сходинок. *C*₁, *C*₂, *C*₃, *E*₁, *E*₂ – впадини (нанопори), на межах яких формуються нанокластери

ння атомів CdI_2 . Латеральний розмір впадини *C*₁ (рис. 2, *a*) становить ~ 473 нм, а глибина – $\sim 0,7$ нм.

Подальше витримання кристала в атмосфері повітря упродовж 8 год супроводжується збіль-

шенням латерального розміру впадин C_1 та C_2 і появою нової впадини C_3 навколо острівка B_3 (рис. 2, *b*). Для прикладу, діаметр впадини C_2 збільшився майже двічі і становить 855 нм. Окрім цього, вздовж однієї із сходинок з'явилися нові наноструктури (ділянка D на рис. 2, *b*) висотою ~23 нм та діаметром ~470 нм.

Після витримування CdI₂ на повітрі упродовж 24 год (рис. 2, *c*) на межах впадин (ділянки C_1 , C_2 , C_3 на рис. 2, *c*) та на сходинках (ділянка D_2 на рис. 2, *c*) з'явилися нові наноутворення. Висота та діаметр новоутворених наноструктур, сформованих на межах впадин, лежать у межах 3–5 та 100–120 нм. Окрім того, на цій стадії зафіксовано взаємодію наноутворень (ділянка D_1 на рис. 2, *c*), що приводить до їхнього злиття між собою, з утворенням більших кластерних агрегатів висотою ~40 нм та діаметром ~700 нм.

На рис. 2, *d* подано АСМ-зображення морфології цієї ж ділянки ВдВ-поверхні CdI₂, після витримування її на повітрі упродовж 32 годин. На сходинках з'явилися нові нанокластери, а на гладкій поверхні – нові впадини E_1 , E_2 (рис. 2, *d*) з новими наноутвореннями, сформованими на їхніх межах. Водночас продовжується ріст наноутворень, сформованих раніше.

Після витримування CdI₂ на повітрі упродовж 7 діб на його ВдВ-поверхні формується ансамбль наноструктур (рис. 2, *e*).

Часові залежності розмірів нанокластерів, які формуються на поверхні CdI₂ під час його витримування у атмосфері повітря упродовж 168 годин (7 діб) подано у табл. 1.

Аналіз результатів, приведених у табл. 1, показує, що упродовж часу спостережень швидкість появи нових наноутворень перевищує швидкість їхнього подальшого росту. Це підтверджують часові зміни співвідношень між мінімальними, максимальними та середніми розмірами наноструктур. Якщо мінімальний радіус наноутворень в часі майже не змінюється, максимальний радіус дещо коливається навколо деякого значення, а середній радіус демонструє чітку тенденцію до зменшення, то це можна пояснити тільки тим, що кількість нових наноутворень різко зростає. Якщо мінімальна висота демонструє часову тенденцію до зменшення, максимальна висота – до зростання, а середня висота залишається майже незмінною, то це також може свідчити про те, що швидкість

появи нових наноутворень перевищує швидкість їхнього подальшого росту.

Для встановлення механізму росту наноутворень досліджені часові зміни розмірів одного і того самого нанокластера упродовж 216 годин (табл. 2).

Якщо висота нанокластера постійно зростає від 15 нм за 1 годину до 50 нм за час 216 годин із незначним пригальмовуванням росту в околі 30 годин, то часова залежність зміни радіуса нанокластера має складніший характер, а саме: спочатку зростає від 66 нм за 1 годину до 117 нм за час 32 години, досягаючи максимуму, а потім зменшується до 76 нм за час 120 годин, досягаючи мінімуму, і знову продовжує подальше зростання до 103 нм за час 216 годин. На рис. 3, *a* подано зміну об'єму конусоподібного нанокластера з часом, а на рис. 3, *b* – часову залежність зміни його швидкості росту.

На проміжку часу від 0 до 35 годин (ділянка I на рис. 3, *a*) спостерігається поступове збільшення об'єму нанокластера із досягненням максимального значення $V \sim 12 \cdot 10^{-24}$ м³ за 35 годин. Проте швидкість його росту на цій ділянці має складнішу часову залежність, а саме: на початковому етапі від 0 до 10 годин вона дещо зменшується, а потім зростає до максимуму за час 25 годин і нарешті, стрімко зменшується до нуля за час 35 годин. На

Таблиця 1. Часова залежність розмірів конусоподібних наноструктур, які формуються на поверхні CdI₂ під час його витримування на повітрі упродовж 168 годин

№ з/п	Характеристика кластерів	Час витримування, год							
		8	24	32	48	54	120	144	168
1	Кількість	20	37	82	81	109	143	175	344
2	Мінімальний радіус, нм	38	31	31	31	31	31	31	31
3	Максимальний радіус, нм	238	253	275	240	241	234	236	258
4	Середній радіус, нм	92	81	79	66	58	51	49	48
5	Мінімальна висота, нм	12	4	4	9	8	8	6	6
6	Максимальна висота, нм	34	45	57	64	62	78	77	82
7	Середня висота, нм	23	20	18	23	21	23	20	18
8	Середня відстань між сусідніми кластерами, нм	922	721	474	507	434	342	309	242

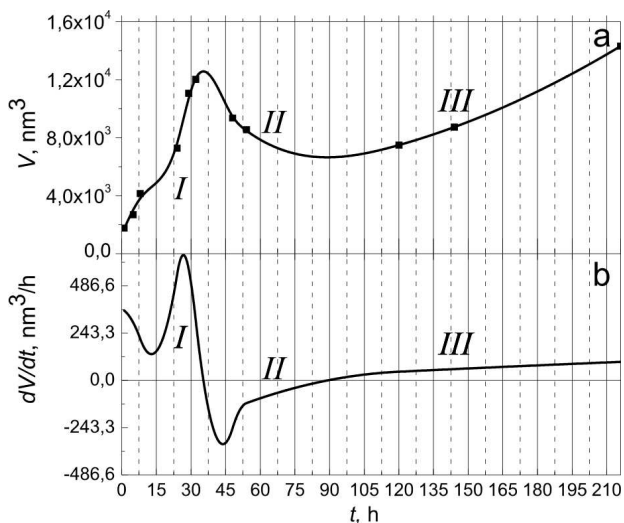


Рис. 3. Залежність об'єму конусоподібного нанокластера від часу витримання CdI₂ в атмосфері повітря (а) та часова залежність швидкості його росту (b)

проміжку часу від 35 до 90 годин (ділянка II на рис. 3, а) спостерігається наступна стадія процесу формування наноструктури: поступове зменшення її об'єму до мінімального значення $V \sim 8 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$. Це відповідає ділянці з від'ємним значенням швидкості росту. Починаючи з моменту часу 90 годин (ділянка III на рис. 3, а) повторюється початкова

Таблиця 2. Часова залежність розмірів одного конусоподібного нанокластера під час його формування упродовж 216 годин

№ з/п	Час формування, год	Характеристики конусоподібного нанокластера			
		радіус, нм	площа, нм ²	висота, нм	об'єм, нм ³
1	1	66	353	15	$1,77 \times 10^3$
2	5	66	351	23	$2,69 \times 10^3$
3	8	73	429	29	$4,15 \times 10^3$
4	24	88	624	35	$7,28 \times 10^3$
5	29	110	976	34	$11,06 \times 10^3$
6	32	117	1093	33	$12,02 \times 10^3$
7	48	88	624	45	$9,36 \times 10^3$
8	54	82	546	47	$8,55 \times 10^3$
9	120	76	468	48	$7,49 \times 10^3$
10	144	82	546	48	$8,74 \times 10^3$
11	168	85	585	49	$9,56 \times 10^3$
12	216	103	859	50	$14,32 \times 10^3$

стадія процесу, яка спостерігається на проміжку часу від 0 до 35 годин, проте швидкість росту тут є значно меншою.

Розглянемо детальніше можливий механізм росту нанокластерів. Вище було зафіксовано, що зародки нанокластерів на новосколеній поверхні кристала з'являються у місцях найбільшої дефектності поверхні – нанопорах (рис. 1, а, с). Вони продовжують свій подальший ріст за механізмом зустрічної дифузії компонентів до реакційної зони: зі сторони газової фази (повітря) надходять молекули кисню, води та вуглекислого газу (подані у порядку зменшення їхнього вмісту в повітрі та ймовірної участі в утворенні нанокластерів), а із сторони твердої фази (об'єму кристала) – іони кадмію.

Дифузійний потік кожного із перерахованих компонентів до реакційної зони описує закон Фіка:

$$I_i = D_i S \frac{dc_i}{dr}, \quad (1)$$

де D_i – коефіцієнт дифузії i -го компонента, S – площа реакційної зони, dc_i/dr – градієнт концентрації i -го компонента.

Оскільки коефіцієнти дифузії компонентів у газовій фазі значно перевищують коефіцієнт дифузії іонів кадмію у твердій фазі, то процесом, що лімітує (обмежує) ріст нанокластерів, буде дифузія іонів кадмію в об'ємі кристала. Особливості цієї дифузії будуть зумовлювати загальні закономірності подальшого росту нанокластерів.

Таким чином, швидкість росту нанокластера буде визначати величина дифузійного потоку іонів кадмію у приреакційній зоні:

$$\frac{dV}{dt} = I_{Cd} = D_{Cd} S \frac{dc_{Cd}}{dr}, \quad (2)$$

де V – об'єм нанокластера, t – час його росту.

Якщо прийняти, що під час росту нанокластерів коефіцієнт дифузії іонів кадмію та площа реакційної зони мало змінюються, то швидкість їхнього росту, головню, буде визначатися часовою зміною градієнта концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні:

$$\frac{dV}{dt} \approx \frac{dc_{Cd}}{dr}. \quad (3)$$

Як видно з рис. 3, b, швидкість росту нанокластерів має складний часовий характер, який можна пояснити можливими часовими змінами градієнта концентрації іонів кадмію у приреакційній

зоні (рис. 4). Прийнемо умовно, що між нанокластером та об'ємом кристала існує приреакційна зона і концентрація іонів кадмію на межі цієї зони зі сторони поверхні кластера завжди рівна нулеві, оскільки іони кадмію знаходяться у складі нанокластера, а на межі приреакційної зони зі сторони кристала вона може змінюватися від найбільшого значення до нуля.

У початковий момент часу, що відповідає першій ділянці на рис. 3, *a*, градієнт концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні є найбільшим, оскільки ця концентрація у приреакційній зоні зі сторони кристала може перевищувати концентрацію іонів кадмію у об'ємі (в утворених ямках на новосколеній поверхні відбувається випаровування молекул йоду в газову фазу, що зумовлює збільшення поверхневої концентрації іонів кадмію (рис. 4, *a*). Відповідно, швидкість росту нанокластера є високою, проте може дещо коливатися у цей невеликий проміжок часу поки не встановиться рівноважний дифузійний потік іонів кадмію із об'єму кристала, що підтверджується експериментально (рис. 3, *b*).

У наступний період часу, що відповідає першій ділянці на рис. 3, *b*, градієнт концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні зменшується, оскільки іони кадмію, які знаходилися у приреакційній зоні із сторони кристала, перейшли до складу нанокластера, а інші іони кадмію з об'єму кристала ще не заповнили їхні місця (рис. 4, *b*). У цей період швидкість зменшується від максимального значення до нуля (рис. 3, *b*).

У подальшому цей процес продовжується і концентрація іонів кадмію на межі приреакційної зони зі сторони кристала поступово зменшується до нульового значення в певний момент часу (рис. 4, *c*). Тоді, градієнт концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні стає рівний нулеві і, відповідно, швидкість росту нанокластера також стає нульовою (рис. 3, *b*).

У наступний проміжок часу, що відповідає другій ділянці на рис. 3, *a* дифузія іонів кадмію із об'єму кристала не забезпечує наявності іонів кадмію в приреакційній зоні зі сторони кристала і, тоді, переважає дифузія іонів кадмію зі сторони нанокластера до межі приреакційної зони зі сторони кристала (рис. 4, *d*). Така дифузія повинна зумовити зменшення об'єму нанокластера (що відповідає ділянці від'ємної швидкості росту на-

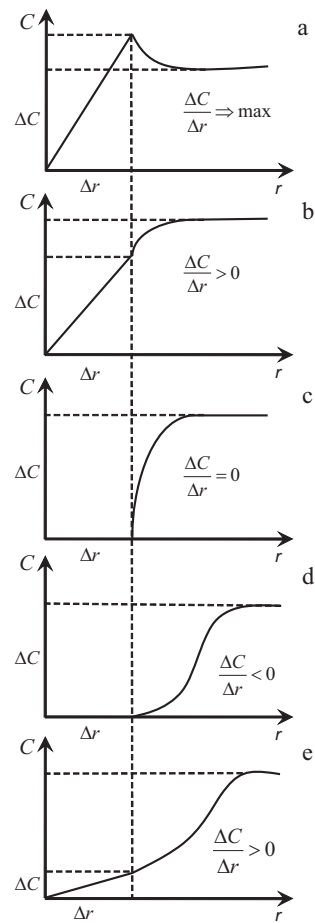


Рис. 4. Зміна градієнта концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні

нокластера на рис. 3, *b*), зокрема, зменшення його площі. Цей факт добре узгоджується із експериментальними результатами, згідно з якими у часовому діапазоні від 32 до 120 годин радіус нанокластерів поступово зменшується від 117 до 76 нм за одночасного збільшення висоти нанокластера від 33 до 48 нм.

За більший час формування нанокластерів, що відповідає третій ділянці рис. 3, *a*, поступово дифузія іонів кадмію в об'ємі кристала вирівнює градієнт його концентрації і, в приреакційній зоні зі сторони кристала встановлюється певна рівноважна концентрація іонів кадмію, що забезпечує подальший ріст нанокластера за дифузійним механізмом (рис. 4, *e*). Швидкість росту нанокластера поступово зростає, проте є значно меншою у порівнянні з першою ділянкою (рис. 3, *b*).

4. Висновки

Таким чином, на основі результатів атомно-силової мікроскопії встановлено механізм формування нанорозмірних структур на ван-дер-ваальсовій поверхні кристалів CdI₂ під час їхнього витримування в атмосфері повітря за термодинамічних умов, близьких до рівноважних.

У процесі формування поверхневих наноструктур можна виділити три стадії: на першій утворюються нанопори внаслідок розчинення матриці у місцях виходу гвинтових дислокацій або інших структурних дефектів ґратки, на другій, у цих нанопорах зароджуються конусоподібні нанокластери, які з часом збільшуються у розмірах, і на останній, третій стадії, вони коагулюють.

Експериментальні результати з кінетики росту конусоподібних нанокластерів описані в рамках запропонованої моделі, яка ґрунтується на зустрічній дифузії компонентів, а складний характер швидкості їхнього росту пояснений змінами градієнта концентрації іонів кадмію у приреакційній зоні.

1. K. Ueno, K. Sasaki, K. Saiki, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 511 (1999).
2. С.И. Драпак, А.П. Бахтинов, С.В. Гаврилук *и др.*, ФТТ **48**, 1515 (2006).
3. O. Lang, R. Schlaf, Y. Tomm *et al.*, J. Appl. Phys. **75**, 7805 (1994).
4. А.И. Дмитриев, ЖТФ **82**, 114 (2012).
5. А.И. Дмитриев, В.В. Вишняк, Г.В. Лашкарев *и др.*, ФТТ **53**, 579 (2011).
6. А.П. Бахтинов, З.Р. Кудринский, О.С. Литвин, ФТТ **53**, 2045 (2011).
7. O.A. Balitskii, Mater. Lett. **60**, 594 (2006).
8. O.A. Balitskii and J. Electr. Microsc. **55**, 261 (2006).
9. R. Singh, S. Samanta, A. Narlikar *et al.*, J. Cryst. Growth **204**, 233 (1999).
10. R. Singh, S. Samanta, A. Narlikar *et al.*, Bull. Mater. Sci. **23**, 131 (2000).
11. B. Kumar and N. Sinha, Cryst. Res. Technol. **40**, 887 (2005).
12. R. Singh, S. Samanta, A. Narlikar *et al.*, Surf. Sci. **422**, 188 (1999).
13. N.-Y. Cui, N.M.D. Brown, and A. McKinley, Appl. Surf. Sci. **152**, 266 (1999).
14. N. Sallacan, R. Popovitz-Biro, and R. Tenne, Sol. State Sci. **5**, 905 (2003).
15. І.М. Болеста, Р.І. Грицьків, Ю.Р. Дацюк *та ін.*, УФЖ **48**, 1 (2003).
16. I.M. Bolesta, I.N. Rovetskyj, I.D. Karbovnyk *et al.*, Techn. Phys. Lett. **39**, 463 (2013).
17. Q.-J. Liu, Z.-T. Liu, and L.-P. Feng, Phys. Stat. Sol. B **248**, 1629 (2011).

18. Широкозонные слоистые кристаллы и их физические свойства, под. ред. А.Б. Лысковича (Вища школа, Львов, 1982).

19. А.Л. Эфрос, Физика и геометрия беспорядка (Наука, Москва, 1982).

Одержано 27.04.15

І.М. Болеста, І.Н. Ровецький, З.М. Яремко,
І.Д. Карбовник, С.Р. Вельгош, М.В. Партыка,
Н.В. Глоковская, В.Н. Лесивцев

ПРО МЕХАНІЗМ РОСТА НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТІ CdI₂

Р е з ю м е

Методами атомно-силової мікроскопії досліджена динаміка формування нанорозмірних структур на ван-дер-ваальсовій поверхні кристалів CdI₂ во время их выдерживания в атмосфере воздуха при термодинамических условиях, близких к равновесным. Выявлено три стадии формирования поверхностных наноструктур: на первой стадии создаются нанопоры посредством растворения матрицы в местах выхода винтовых дислокаций или других структурных дефектов решетки, на второй стадии в этих нанопорах зарождаются конусообразные нанокластеры, которые со временем увеличиваются в размерах и на третьей стадии последние коагулируют. Кинетика роста поверхностных конусообразных нанокластеров описывается диффузионной моделью, основанной на встречной диффузии компонентов, которые входят в их состав. Показано, что скорость роста этих нанокластеров зависит от временного изменения градиента концентрации ионов кадмия в приреакционной зоне.

I.M. Bolesta, I.N. Rovetskyj, Z.M. Yaremko,
I.D. Karbovnyk, S.R. Velgosh, M.V. Partyka,
N.V. Gloskovskaya, V.M. Lesivtsiv

ON THE MECHANISM OF NANOSTRUCTURE GROWTH ON THE SURFACE OF CdI₂ CRYSTALS

S u m m a r y

Atomic force microscopy studies of the dynamics of the nanostucture formation on a van der Waals surface of CdI₂ crystals during aging in air environment under near-equilibrium thermodynamic conditions have been carried out. The nanostucture growth process is found to consist of three stages. At the first stage, there appear nano-sized pores due to the lattice dissolution at the outcrops of screw dislocations or other structural defects. At the second stage, the cone-shaped nanoclusters arise and grow in those nano-sized pores. At the third stage, the nanoclusters coagulate. The growth kinetics of cone-shaped nanoclusters is described by a diffusion model based on the interdiffusion approximation for the components. The growth rate of nanoclusters is shown to depend on the time evolution of the concentration gradient of Cd²⁺ ions in the near-reaction zone.