

Д.М. Фреїк¹, Я.С. Яворський¹, І.С. Биліна¹, П.М. Литвин²,
І.М. Ліщинський¹, В.Б. Марусяк¹

Топологія, механізми зародження і процеси росту наноструктур у парофазних конденсатах PbTe:Sb на сколах слюди

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, Київ, 03028,
Україна, E-mail: plyt@isp.kiev.ua

Представлено результати дослідження процесів структуроутворення у конденсатах PbTe:Sb/(0001) слюда-мусковіт, отриманих відкритим випаровуванням у вакуумі при температурах осадження $T_{\text{п}} = (150-250)^\circ\text{C}$ і часі осадження $\tau = (15-300)$ С. Показано, що домінуючим є механізм зародження Фольмера-Вебера при реалізації стадії нуклеації острівців, їх агрегування та коалесценції. Процес росту наноутворень пояснено у наближенні оствальдівського дозрівання, у якому переважає об'ємна дифузія. Сформовані наноструктури PbTe представляють собою тригональні піраміди із гранями $\{100\}$ і основою (111) , паралельною до поверхні підкладки.

Ключові слова: наноструктури, парофазні методи, тонкі плівки, плюмбум телурид, зародження, ріст.

Стаття постуила до редакції 11.08.2012; прийнята до друку 15.09.2012.

Вступ

Плюмбум халькогеніди Pb (S,Se,Te) – базові напівпровідникові матеріали для створення активних елементів інфрачервоної техніки і термоелектричних пристроїв [1,2]. В останні роки інтерес до них різко зріс у зв'язку із новими можливостями, які пов'язані з переходом матеріалу в область мікро- і нанорозмірів [3,4]. Малі ефективні маси носіїв заряду і високі значення діелектричної проникності у плюмбум халькогенідах забезпечують реалізацію добрих умов розмірного квантування і локалізації носіїв: квантово-розмірні ефекти мають місце вже у структурах розмірами (30-50) нм [4]. Зауважимо, що якщо розміри структур ~ 100 нм, то їх називають нанорозмірними. Якщо ж розміри для даного матеріалу менші за борівський радіус екситона, то їх відносять вже до квантово-розмірних структур: квантові точки (0D), квантові дроти (1D), квантові ями (2D) [4]. З цього погляду розробка методів отримання і дослідження умов формування нано- і квантово-розмірних структур є актуальною і вкрай потрібною задачею для сучасної наноелектроніки. Найбільш перспективним і технологічно оправданим методом отримання напівпровідникових квантових точок є самоорганізація парофазних конденсатів на

поверхні твердих підкладок із неузгодженими параметрами ґратки.

Для отримання тонких плівок сполук IV-VI широко використовуються парофазні вакуумні технології, серед яких особливу увагу привертає конденсація пари у квазізамкненому об'ємі

Що стосується квантово-розмірних структур плюмбум халькогенідів, отриманих відзначеними підходами, то вони підтверджені у роботах наукових груп Шпрінгхольца із університету Лінца [5], Абрамоф [6], Цога із Швейцарського національного технологічного інституту [7], Литвина із Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України [7]. У цих роботах показано, що формування квантових пірамідальних структур у методах молекулярно-променевої епітаксії [5] та «гарячої стінки» [8] реалізовані за механізмами Странскі-Крастанова та Фольмера-Фебера.

У наших роботах [9-13] показана можливість реалізації нано- і квантово-розмірних структур сполук IV-VI як у методі «гарячої стінки», так і відкритого випаровування у вакуумі.

Метою цієї роботи є подальше вивчення процесів структуроутворення у парофазних конденсатах легованого сурмою плюмбум телуриду PbTe:Sb на орієнтованих монокристалічних підкладках - свіжих

Таблиця 1

Технологічні фактори осадження парофазних наноструктур PbTe:Sb у відкритому вакуумі на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт. Температура випаровування $T_B = 700\text{ }^\circ\text{C}$

№ зразка	Температура підкладки, $T_{\text{п}},\text{ }^\circ\text{C}$	Час осадження $\tau,$ с.
26	200	15
27	200	30
28	200	40
29	200	50
30	200	60
31	200	90
33	200	180
34	200	240
35	200	300
36	150	15
37	200	15
38	250	15
39	150	60
40	200	60
41	250	60

сколах (0001) слюда-мусковіт марки СТА у методі відкритого випаровування у вакуумі.

I. Методика експерименту

Тонкі плівки і наноструктури отримували з парової фази методом відкритого випаровування у вакуумі наперед синтезованої сполуки PbTe:Sb із вмістом сурми 0,25 ат.% на підкладки із свіжих

сколів (0001) слюди-мусковіт. Температура випарника складала $T_B=(590-700)\text{ }^\circ\text{C}$, а конденсації $T_{\text{п}}=(150-250)\text{ }^\circ\text{C}$. Товщину конденсату задавали часом осадження пари від 15с до 5хв. та вимірювали за допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4. Значення технологічних факторів наведені у таблиці 1, а деякі характеристики конденсатів PbTe:Sb у таблиці 2 відповідно.

Топологічні особливості наноструктур у конденсатах досліджували методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimention 3000 (Digital Instruments USA) в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ України (м. Київ). Вимірювання проведені у центральній частині зразків із використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм (NT0MDT, Росія). За результатами АСМ-досліджень крім топології поверхні та її профілограм у програмі Gwyddion визначено вертикальні до поверхні розміри нанокристалів, шорсткість та інші характеристики конденсатів (табл. 2, рис. 1–рис. 8).

II. Результати дослідження

Важливими факторами, що визначають топологію наноструктур є температура $T_{\text{п}}$ та час осадження τ (рис. 1, рис. 2). Так, зокрема, із підвищенням температури осадження від $T_{\text{п}}=150\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_{\text{п}}=250\text{ }^\circ\text{C}$ має місце суттєве збільшення латеральних розмірів наноутворень від ~50 нм (рис.1, I - а) до ~200 нм (рис.1, I - б) відповідно.

Зауважимо, що якщо у першому випадку чітко формуються окремі наноструктури (рис.1, I - а), то у другому – має місце їх зрощення і утворення згладжених конгломератів (рис.1, I - б).

Таблиця 2

Основні топологічні параметри наноструктур PbTe:Sb, осаджених на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт

№ зразка	Середнє значення висоти $h_c,$ нм	Максимальне значення висоти $h_{\text{max}},$ нм	Середнє значення латеральних розмірів $D_c,$ нм	Максимальне значення латеральних розмірів $D_{\text{max}},$ нм	Середня шорсткість $R_a,$ нм
26	24	53	65	106	1,87
27	33	50	48	86	1,70
28	18	37	39	70	1,96
29	17	49	37	68	2,00
30	8	19	23	44	1,00
31	37	72	78	122	2,05
33	56	98	68	136	3,70
34	71	143	102	178	2,50
35	86	159	139	220	2,30
36	6	13	24	42	0,94
37	5	11	20	34	0,55
38	3	8	23	38	0,47
39	20	31	24	36	1,56
40	13	23	39	80	1,16
41	13	17	180	205	0,16

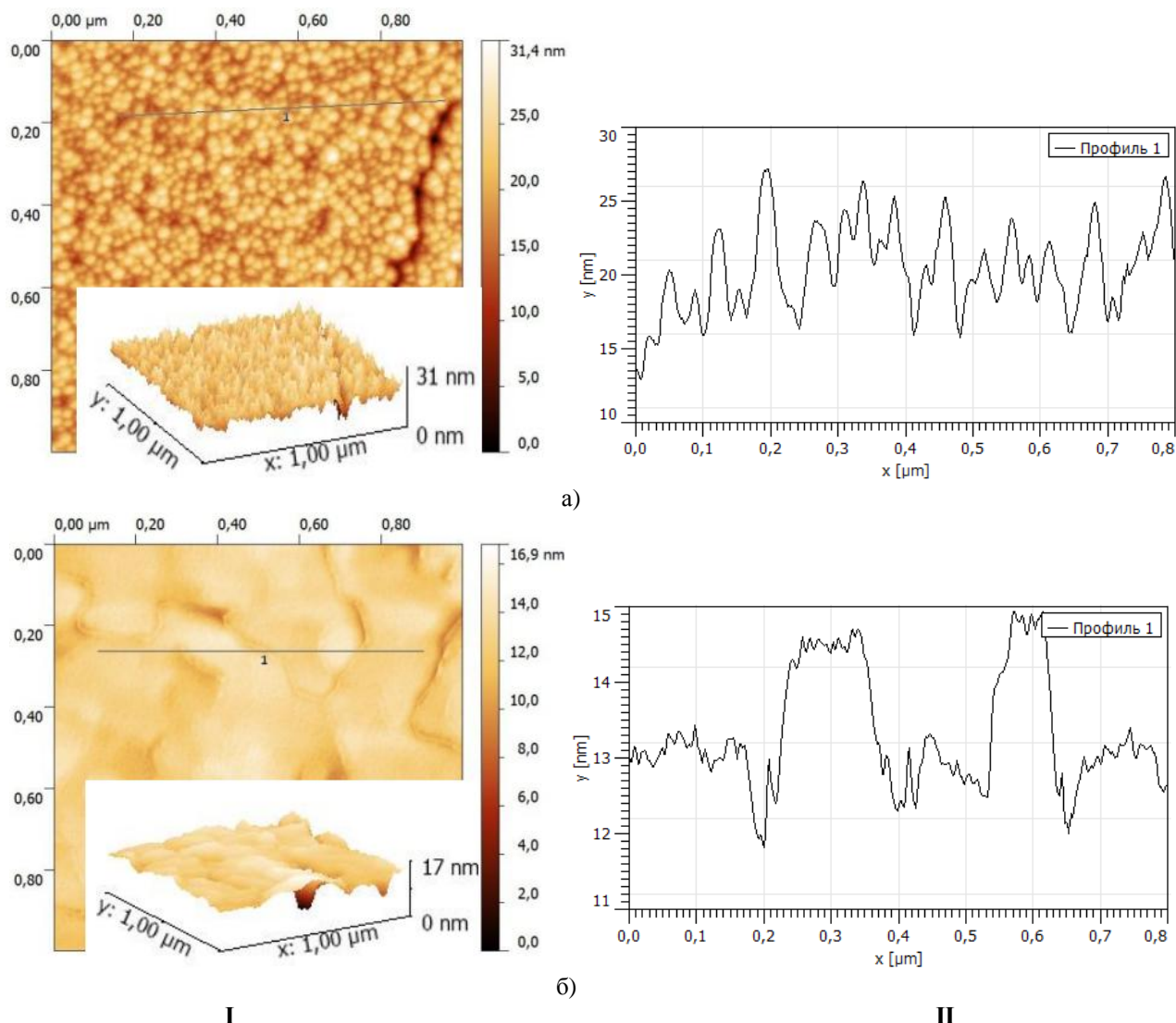


Рис.1. 3D і 2D АСМ-зображення (I) та профілограми (II) конденсатів PbTe:Sb, отриманих на підкладках із сколів (0001) слюди при температурі осадження $T_{\text{п}}$, °C: 150(№39)-а, 250(№41)-б; $\tau = 60$ с, $T_{\text{в}} = 700$ °C.

При цьому середня шорсткість поверхні значно зменшується: від 1,56 нм до 0,16 нм відповідно (рис. 3, в – крива 1). Останнє зумовлено зменшенням різниці у висотах наноструктур від ~ 30 нм при $T_{\text{п}} = 150$ °C до ~ 15 нм при $T_{\text{п}} = 250$ °C, що помітно із співставлення профілограм (рис 1, II) відповідно. Тобто має місце згладження вершин наноструктур (рис. 1, I – б).

Що стосується часу осадження τ , то він більш динамічно впливає на характер формування як топології окремих наноутворень, так і самого рельєфу поверхні (рис. 2). У досліджуваному часовому проміжку чітко проявляється три інтервали, що відповідають часу до 15 с (τ_1); $\tau_2 = (15-60)$ с і $\tau_3 = (60-300)$ с. Якщо на початкових етапах осадження (τ_1) формуються окремі наноутворення стовпчастої форми висотою від ~ 24 нм до ~ 53 нм і латеральними розмірами (65-106) нм (рис. 2 - а; табл.2), то при подальшому осадженні пари (τ_2) густина наночасток зростає, а їх розміри зменшуються (рис. 2, I – б; табл.2). У третьому часовому інтервалі осадження (τ_3) має місце формування окремих огранених пірамідальних

структур значних розмірів: висота до ~ 159 нм; латеральні розміри до ~ 220 нм (рис. 2 – в; табл. 2).

Тепер відносно інших характеристик отриманих наноструктур: середня шорсткість поверхні конденсату адекватно змінюється із розмірами наноутворень і знаходиться в межах (1,81-3,70) нм із тенденцією її збільшення при зростанні величини наноструктур (рис. 3 - а; табл. 2)

III. Обговорення результатів дослідження

3.1. Механізми росту. Кінетика і механізм утворення самоорганізованих структур – складний багатостадійний процес [14]. Можна стверджувати, що їх формування є наслідком самочинної адсорбції і випаровування часток адсорбату за контакту парової фази з поверхнею твердотілого субстрату. Важливою є стадія утворення двовимірних кластерів, їх зародження або нуклеація. Вона пов'язана із певною

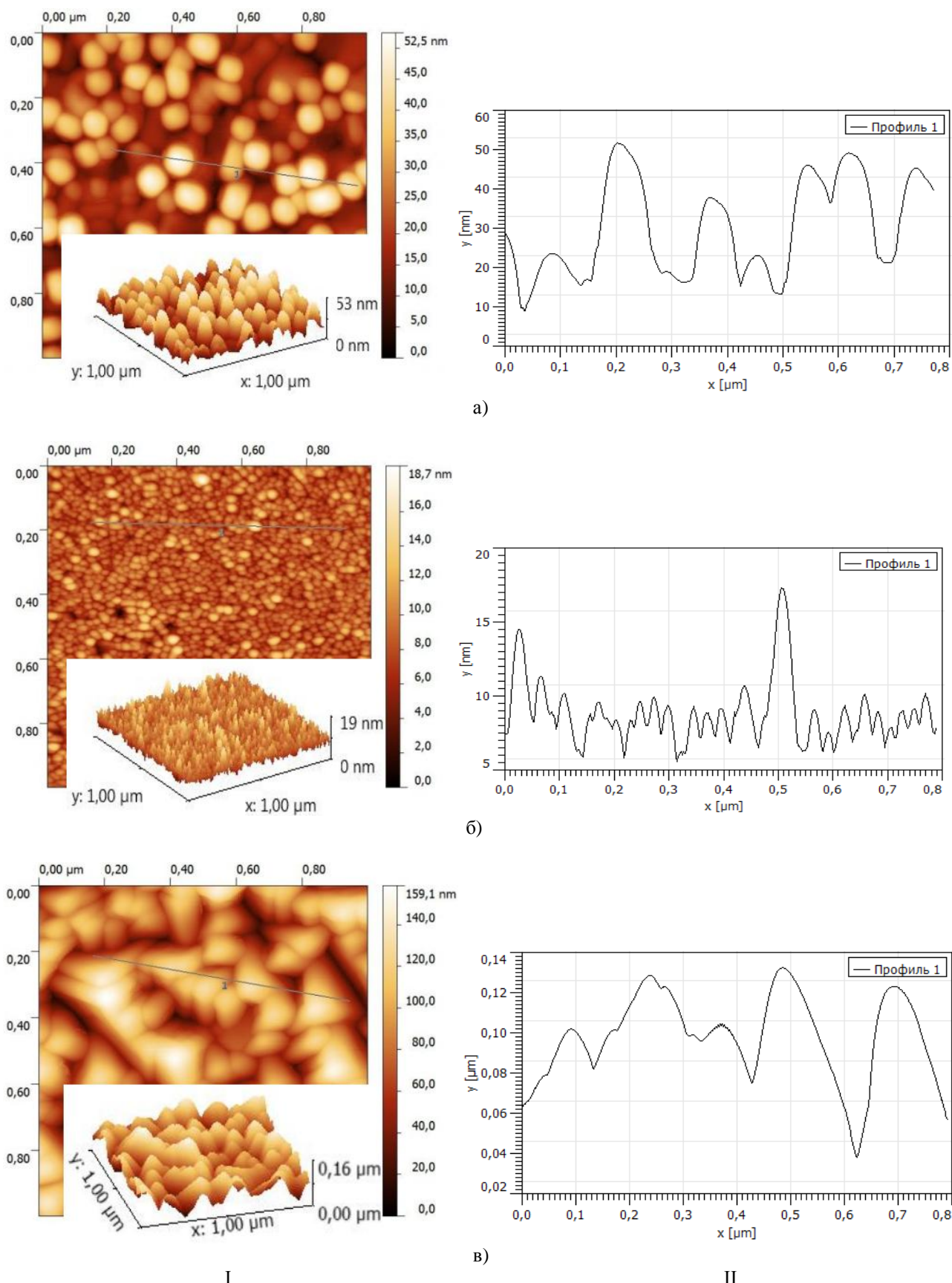


Рис. 2. 3D і 2D АСМ-зображення (I) та профілограми (II) структур PbTe:Sb, отриманих на підкладках із скелів (0001) слюди при різному часі осадження t , с: 15с.(№26)-а, 60с.(№30)-б, 300с.(№35)-в; $T_{\text{в}}=700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{п}}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

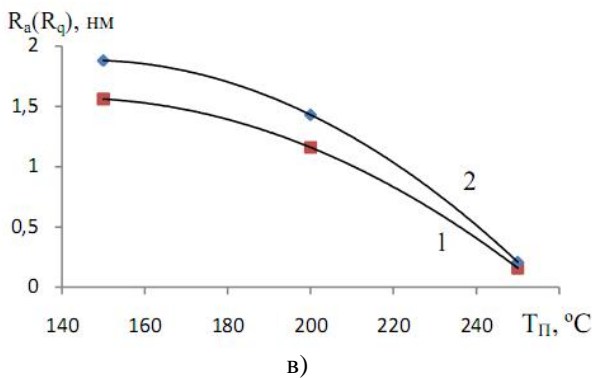
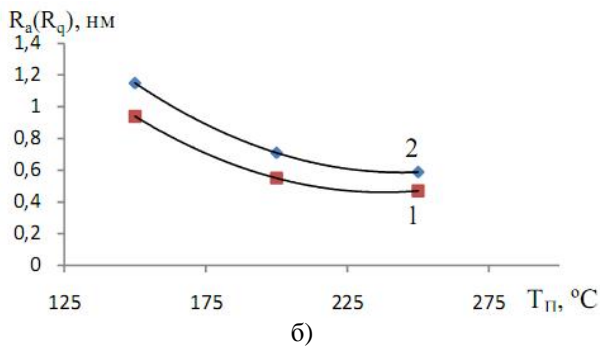
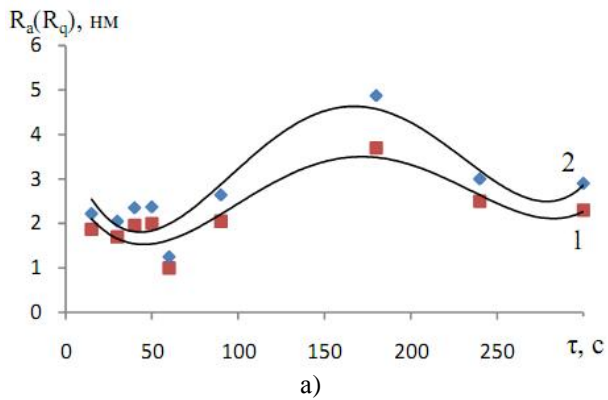


Рис 3. Залежність середньої R_a (1) та середньоквадратичної R_q (2) шорсткості від часу осадження τ (а) та від температури осадження T_{II} при часі осадження τ , с: 15-(б), 60 с-(в).

міграцією адатомів (незакріплені атоми) і їх коалесценцією. При реалізації пошарової гомоепітаксії за механізмом Франка-Ван-дер-Мерве утворені двовимірні кластери розростаються і зливаючись між собою утворюють суцільний моношар. Гетероепітаксія за механізмом Фольмера-Вебера пов'язана із утворенням зразу трьохвимірних окремих зародків наноструктури на поверхні підкладки. Проміжним, між відзначеними вище двома, є механізм зародження Странскі-Крастанова, який передбачає на початкових етапах осадження утворення так званого, змочуючого шару з подальшим ростом пірамідальних наноструктур за рахунок зняття пружних деформацій [4].

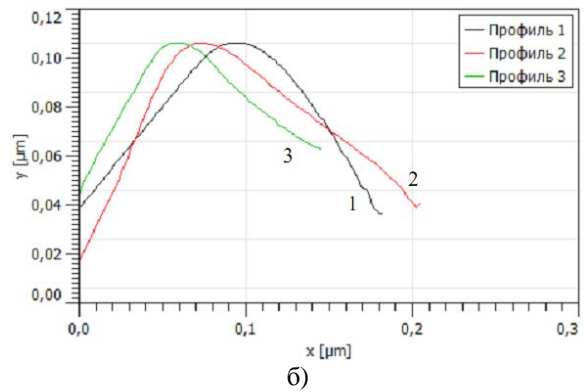
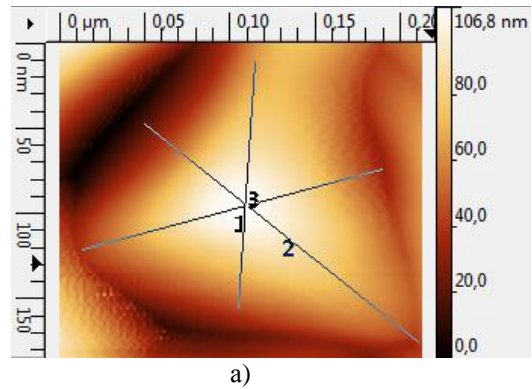


Рис. 4. 3D АСМ-зображення окремої квантової точки (а) у наноструктурі PbTe:Sb/(0001) слюда-мусковіт ($T_v=700^\circ\text{C}$, $T_{II}=200^\circ\text{C}$, $\tau=240$ с.) (а) та її профілограма (б).

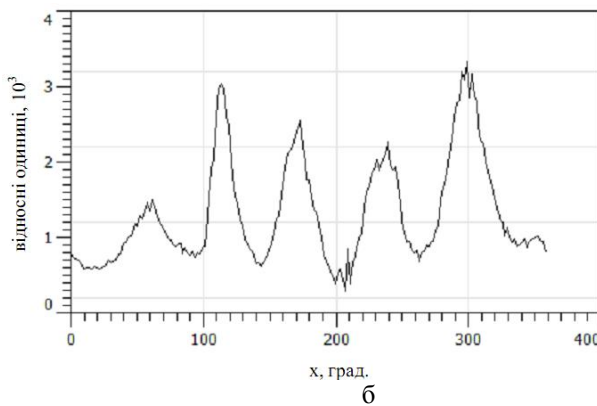
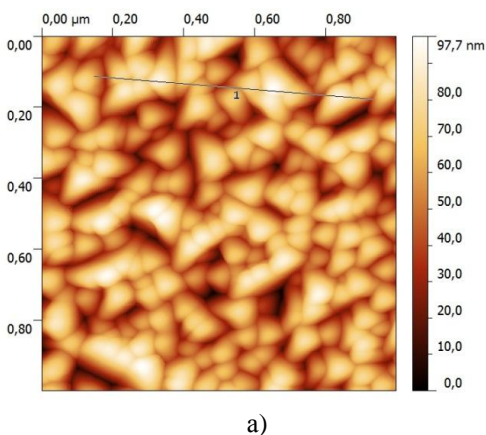


Рис. 5. 2D АСМ-зображення наноструктури PbTe:Sb/(0001) слюда ($T_v=700^\circ\text{C}$, $T_{II}=200^\circ\text{C}$, $\tau=180$ с.) (а) та її гистограма розподілу нахилів за кутами (б).

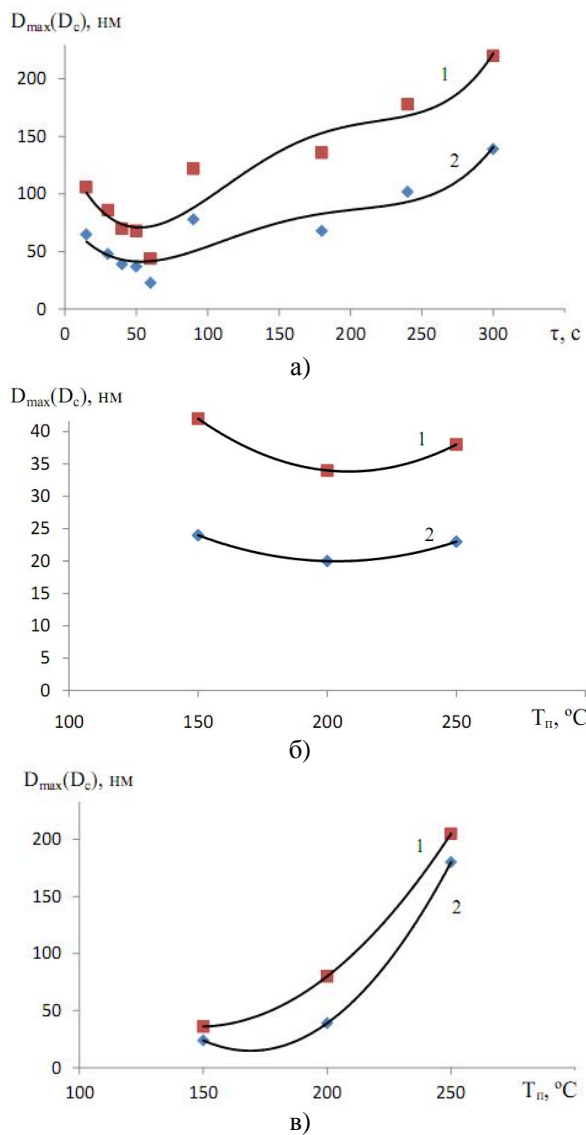


Рис. 6. Залежність максимального D_{max} (1) та середнього D_c (2) значення латеральних розмірів наноструктур PbTe:Sb, осаджених на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт від часу осадження τ (а) та від температури осадження $T_{\text{П}}$ (б,в) при часі осадження τ ,с: 15-б, 60-в.

У нашому випадку PbTe:Sb/(0001) слюда-мусковіт за всіх технологічних умов зародження наноструктур реалізується за механізмом Фольмера-Вебера, що підтверджується результатами АСМ-зображень (рис. 1,рис 2). При цьому, у більшості випадків, формуються стовпчасті пірамідальні структури, розміри і структурні форми яких визначаються температурою і часом осадження (рис. 1,рис. 2)

За низьких ступенів покриття (на початкових стадіях осадження пари) має місце зародження (нуклеація) нової фази значних розмірів (рис. 2, I – а). Із збільшенням часу осадження процес нуклеації є головним джерелом збільшення ступеня покриття поверхні субстрату. Тут з'являються нові зародки і ступінь покриття збільшується, що веде до деякого

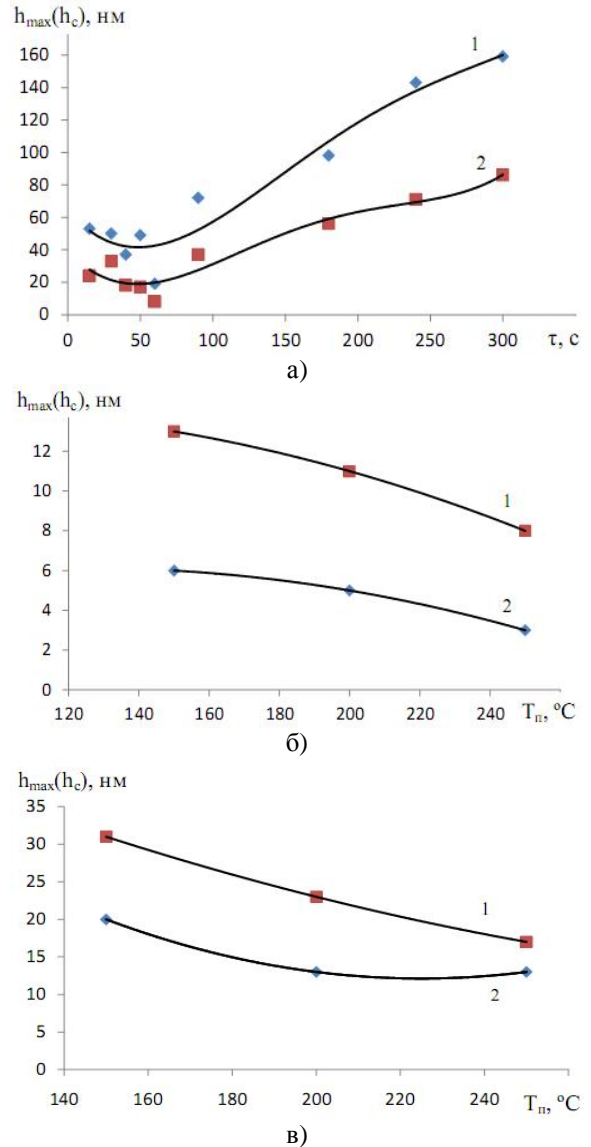


Рис. 7. Залежність максимального h_{max} (1) та середнього h_c (2) значення висот наноструктур PbTe:Sb, осаджених на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт від часу осадження τ (а) та від температури осадження $T_{\text{П}}$ (б,в) при часі осадження τ ,с: 15-б, 60-в.

зменшення розмірів окремих наночасток (рис. 2, I – б). У режимі агрегування нуклеація нових острівців припиняється, а адсорбовані на поверхні молекули будуть брати участь у рості вже сформованих структур. У режимі коалесценції (рис. 2, I – в) можна спостерігати злиття і внаслідок цього – зменшення щільності наноутворень: остаточно наноструктури стикаються і утворюється суцільний конденсат.

У ряді випадків окремі нанокристаліти мають класичну пірамідальну форму із бічними гранями {100} і основою {111} із терасами росту (рис. 4). Відзначений орієнтаційний характер наноструктур PbTe:Sb/(0001) слюда підтверджується гістограмами розподілу нахилів кутів (рис. 5). Така форма нанокристалів відповідає мінімальній вільній поверхневій енергії, яка є характерною для кристалів

слюди IV-VI. Зауважимо, що якщо стадії нуклеації зародків структури відповідає мала шорсткість поверхні (1-2,5) нм, то для стадії агрегування вона зростає (3-4,5) нм і набуває максимальних значень (рис. 3-а). Для сформованого суцільного

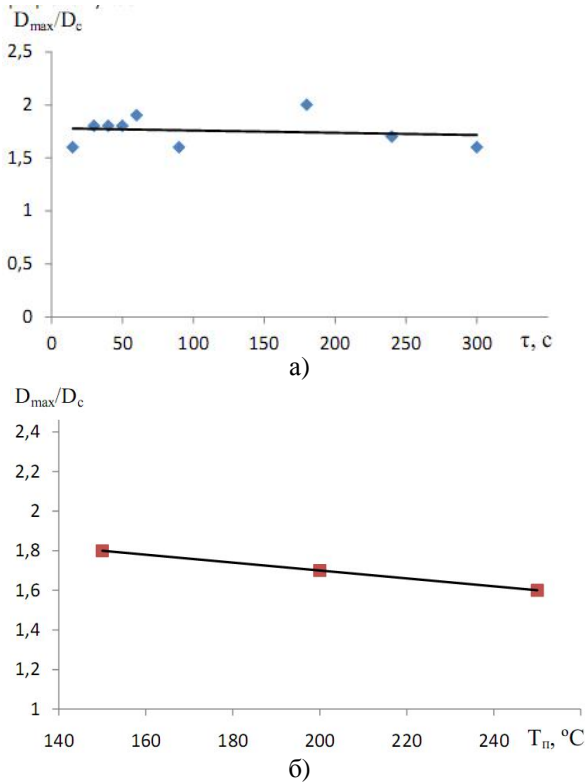


Рис. 8. Залежність відношення максимального D_{max} до середнього D_c значення латеральних розмірів D_{max}/D_c наноструктур PbTe:Sb, осаджених на свіжій сколи (0001) слюди-мусковіт від часу осадження τ , с (а) та від температури осадження T_{II} , °C (б).

конденсату, що характерно для пізніх стадій осадження, шорсткість знову зменшується (рис. 3-а). Відзначені особливості характерні для наноструктур при значних часах їх осадження (рис. 3-а).

3.2. Процеси росту. Закономірності процесів формування структур PbTe:Sb/(0001) слюда простежимо за зміною латеральних і нормальних розмірів нанокристалів при збільшенні часу τ осадження (рис. 6-а; рис. 7-а) та підвищенні температури осадження T_{II} (рис. 6-б, в; рис. 7-б, в).

Отримані результати можна проінтерпретувати з позицій реалізації оствальдівського дозрівання [15]. Так, згідно теорії закладені у роботах Оствальда [15], Ліфшица і Сльозова [16], Вагнера [17], Венгреневича [18] стосовно поверхневих дискретних систем і, зокрема, острівцевих плівок і напівпровідникових гетероструктур з квантовими точками, розрізняють дифузійний механізм росту кластерів і механізм, 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 порівняльні між собою. При цьому загальний потік j адатомів буде дорівнювати сумі дифузійного j_o і вагнерівського (електронного) j_v потоків ($j = j_o + j_v$) за умови, що

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

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

Згідно [19] відношення критичного радіусу 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 розділу кластер-матриця і

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

Із часових (τ) і температурних (T_{II}) залежностей розмірів наноструктур (рис. 6, рис. 7) видно, що якщо із збільшенням часу осадження зберігається тенденція до їх зростання (рис. 6-а, рис. 7-а), то підвищення температури осадження зумовлює однозначне зменшення їх нормальних розмірів $h_{max}(h_c)$ (рис. 7-б, в) за всіх експериментально досліджуваних значень часу осадження. Що стосується латеральних розмірів, то із підвищенням температури, характер їх зміни різний за різних часів осадження: незначна зміна при малих часах осадження (рис. 6-б) та їх значний ріст на пізніх етапах росту наноструктур (рис. 6-в). При цьому за всіх технологічних умов осадження парофазних конденсатів PbTe:Sb/(0001) слюда відношення максимальних латеральних D_{max} до їх середніх D_c значень знаходиться в межах $1,5 \leq D_{max}/D_c < 2$ наближення до значень $D_{max}/D_c \approx 1,5$ при зростанні часу осадження (рис. 8-а). Дещо аналогічна тенденція характерна і при підвищенні температури осадження T_{II} : $1,5 \leq D_{max}/D_c < 1,8$ (рис. 8-б). Отримані значення відношень латеральних розмірів нанокристалів у структурі PbTe:Sb/(0001) слюда-мусковіт (рис. 8) вказують на домінування дифузійних механізмів формування нанокристалів. Зауважимо, що утворення огранених зародків можливе при їх рості і коли лімітуючими є поверхнева дифузія адатомів, або ж дифузія у паровій фазі, які є можливими саме при парофазному осадженні плумбум телуриду.

Висновки

1. Представлено результати АСМ-дослідження топологічних особливостей наноструктур PbTe:Sb/(0001) шлюда-мусковіт, отриманих відкритим випаровуванням наважки синтезованої сполуки у відкритому вакуумі за різних технологічних факторів.
2. Показано, що кінетика утворення самоорганізованих парофазних структур – складний багатостадійний процес, який включає стадії нуклеації, агрегування та коалесценцію наноструктур.
3. Виявлено, що окремі сформовані нанокристаліти PbTe:Sb на (0001) шлюда-мусковіт мають пірамідальну форму із бічними гранями {100} і основою (111) яка орієнтована паралельно до поверхні підкладки.
4. Встановлено, що мінімальну шорсткість структури PbTe:Sb/(0001) шлюда, мають сформовані на пізніх стадіях осадження.
5. Показано, що домінуючим процесом росту нанокристалів у структурах PbTe:Sb/(0001) шлюда-мусковіт у оствальдівському наближенні є дифузійний.

Фреїк Д.М. – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;
Яворський Я.С. – аспірант;
Біліна І.С. – аспірант;
Литвин П.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Ліщинський І.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Марусяк В.Б. – студент.

- [1] Ju.I. Ravich, B.A. Efimova, I.A. Smirnov. Metody issledovaniya poluprovodnikov v primeneniі k hal'kogenidam svinca PbTe, PbSe і PbS (Nauka, Moskva, 1968).
- [2] N.H. Abrikosov, L.E. Shelimova. Poluprovodnikovye materialy na osnove soedinenij A4B6 (Nauka, Moskva, 1975).
- [3] D.M. Freik, M.A. Galushhak, L.I. Mezhilovskaja. Fizika і tehnologija poluprovodnikovyh plenok (Vishha shkola, L'viv, 1988).
- [4] S.P. Zimin, E.S. Gorlachev. Nanostrukturirovanye hal'kogenidy svinca: monografija (Jarosl. gos. un-t im. P. G. Demidova, JarGU, Jaroslavl', 2011).
- [5] G. Springholz, V. Holy, M. Pinczoliths, G. Bauer. Science 282, 734 (1998).
- [6] S.O. Ferreira, B.R.A. Neves, R. Magalhaes-Paniago, A. Malachias, P.H.O. Rappl, A.Y. Ueta, E. Abramof, M. S. Andrade. J. Cryst. Growth 231(1–2), 121 (2001).
- [7] K. Alchalabi, D. Zimin, G. Kostorz, H. Zogg. Phys. Rev. Lett. 90(2), 026104 (2003).
- [8] V.N. Vodop'janov, A.P. Bahtinov, E.I. Slyn'ko, G.V. Lashkarev, V.M. Radchenko, P.M. Litvin, O.S. Litvin. Pis'ma v ZhTF 31(16), 88 (2005).
- [9] D.M. Freik, I.M. Lishhins'kij, P.M. Litvin, V.V. Bachuk. Physics and Chemistry of Solid State 9(4), 529 (2008).
- [10] D.M. Freik, P.M. Litvin, I.I. Chav'jak, I.M. Lishhins'kij, V.V. Bachuk. Physics and Chemistry of Solid State, 10(4), 789 (2009).
- [11] V.V. Bachuk. Physics and Chemistry of Solid State 13(1), 88 (2012).
- [12] D.M. Freik, Ja. P. Salij, I.M. Lishhins'kij, V.V. Bachuk, N.Ja. Stefaniv. Zhurnal Nano- ta Elektronnoї Fiziki 4(2), 02012-1 (2012).
- [13] Ja.P. Salij, V.V. Bachuk, D.M. Freik, I.M. Lishhins'kij. Fizika і himija tverdogo tila 13(2), 379 (2012).
- [14] S.V. Volkov, Є.P. Koval'chuk, V.M. Ogenko, O.V. Reshethjak. Nanohimija, nanosistemi, nanomateriali (Naukova dumka, Kii'v, 2008).
- [15] W. Ostwald. Js. Physics Chemistry 34, 495 (1900).
- [16] .M. Lifshic, V.V. Sljovov. ZhJeTF 35(2), 479 (1958).
- [17] C. Wagner. Zs. Electrochem 65(7/8), 581 (1961).
- [18] R.D. Vengrenovich, B.V. Ivans'kij, A.V. Moskaljuk. Physics and Chemistry of Solid State, 10(1), 19 (2009).

D.M. Freik¹, Ya.S. Yavorskiy¹, I.S. Bylina¹, P.M. Lytvyn²,
I.M. Lishchynskiy¹, V.B. Marusyak¹

Topology, the Mechanisms of Nucleation and Growth Processes of Nanostructures in Vapor-Phase Condensates PbTe: Sb on Chipped Mica

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua

²*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
prospect Nauki, 41, Kyiv, 03028, Ukraine, E-mail: plyt@isp.kiev.ua*

The results of investigations of the structure formation processes in condensates PbTe:Sb/(0001) mica-muscovite obtained by open evaporation in vacuum at temperatures of deposition $T_S=(150-250)$ °C and deposition time $\tau = (15-300)$ s. It is shown that the dominant mechanism is the origin Folmer-Weber in the implementation stage of nucleation islands, their aggregation and coalescence. The process of growth nanoformations explained in approaching Ostwald maturation, which is dominated by volume diffusion. Formed nanostructures of PbTe represent trigonal pyramids facets {100} and the foundation (111) parallel to the substrate surface.

Keywords: nanostructures, vapor-phase techniques, thin films, lead telluride, emergence, growth.