

УДК 621.315.592

Дмитро Фреїк, Василь Бачук, Ярослав Салій, Алла Лисак
*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
м. Івано-Франківськ, Україна*

ПРОЦЕСИ ОСВАЛЬДІВСЬКОГО ДОЗРІВАННЯ У НАНОСТРУКТУРАХ ПЛЮМБУМ ТЕЛУРИДУ, ВИРОЩЕНИХ ІЗ ПАРОВОЇ ФАЗИ

Плюмбум телурид відноситься до вузькощілинних напівпровідників із двосторонньою областю гомогенності, тому є перспективним матеріалом для створення на його основі активних елементів, що функціонують в інфрачервоній області оптичного спектру і вже давно та інтенсивно вивчається. Крім того, велика величина відношення електропровідності до ґраткової теплопровідності у плюмбум телуриді робить його ефективним термоелектричним матеріалом для середньої області температур. Зараз відкриваються нові можливості їх застосування у зв'язку із інтенсивним розвитком тонко плівкової технології та нанотехнологій.

Зауважимо, що одним із ефективним способом створення дискретних наноструктур є вакуумна конденсація на поверхню твердого тіла. Дослідження механізмів росту, процесів формування рельєфу, структури та електричних властивостей плівки, осадженої парофазними методами, надзвичайно важливі для подальшого розвитку технологій напівпровідникових епітаксіальних структур, що застосовуються в мікро- і наноелектроніці.

Часто еволюцію нанокструктур на поверхні підкладки аналізують виходячи з розподілу латеральних і нормальних розмірів нанооб'єктів. Однак виокремлення кластера в оточенні сусідів з метою вимірювання його розмірів є надзвичайно складним завданням. Видається простішим розглядати еволюцію розподілу висот всієї системи кластерів, що визначають статистичні закономірності.

АСМ зображення поверхонь плівок PbTe різної товщини, вирощених нами на сколах (0001) слюди – мусковіт за температур осадження $T_p=(350 - 630)$ К демонструє наявність великої кількості правильних тригональних пірамід різної висоти, що перекриваються. У залежності від температури і часу осадження спостерігаються зміни концентрації пірамід так їх висот.

Гістограми розподілу висот наноструктур PbTe, отриманих за даними АСМ-досліджень при різних часах та температурах осадження, вказують на те, що при збільшенні часу осадження зростає ймовірність формування великих за розмірами наноострівців. Так, зокрема, при збільшенні часу осадження від 3 хв. до 10 хв. висота наноструктур зростає від 178 нм до 436 нм.

Визначити механізми росту наноутворень в освальдівському представленні ми пропонуємо, використовуючи апроксимацію розподілу за висотами гаусіанами. Через асиметричність гістограм розподілу наночастинок за висотою, їх було реконструйовано суперпозицією функцій Гауса:

$$y = A_1 \exp^{-0,5\left(\frac{x-x_1}{w_1}\right)^2} + A_2 \exp^{-0,5\left(\frac{x-x_2}{w_2}\right)^2} + A_3 \exp^{-0,5\left(\frac{x-x_3}{w_3}\right)^2}, \quad (1)$$

де x_i – положення максимумів за розмірами; w_i – півширини і A_i – амплітуди розподілів. Тут перша гаусіана із параметрами A_1 , x_1 , w_1 є основною, фоновною у гістограмах розподілу висот і відображає загальні тенденції у формуванні наноструктур, то друга – характеризує ріст найбільш ймовірних за розмірами структур. Що стосується третьої гаусіани, то вона є відповідальною за найбільші за висотою трьохвимірні утворення (таблиця 1).

Таблиця 1 - Значення відношень h_{max}/x_i та h_{max}/\bar{x} для гаусіан розподілу висот у наноструктурах PbTe/(0001) слюда-мусковіт.

№ зразка	$\frac{h_{max}}{x_1}$	$\frac{h_{max}}{x_2}$	$\frac{h_{max}}{x_3}$	$\frac{h_{max}}{\bar{x}}$
37-38	1,8	1,4	4	2,0
35-36	1,9	1,9	1,4	1,7
32-33	3,4	3,6	2,4	3,0
30-31	1,5	2,3	2	1,9
41-42	1,9	1,5	1,5	1,6
39-40	2	1,5	2,8	2,0
2-3	1,9	1,4	3,4	1,9
30-31	1,5	2,3	2	1,9
43-44	1,3	1,3	1,9	1,5

Згідно даних (таблиця 1) відношення величин максимальних висот (h_{max}) до найбільш ймовірних (x_1 , x_2 , x_3) та середньої (\bar{x}), що визначається гаусіанами (1) перевищує розраховане теоретично за умови реалізації тільки дифузійного механізму росту наноструктур (таблиця 1). Останнє може відповідати тому факту, що при вибраних технологічних умовах (час осадження, температура підкладки) домінуючим механізмом росту наноструктур PbTe на сколах (0001) слюда-мусковіт є електронний вагнерівський. Особливо він яскраво виражений при формуванні найбільших за розмірами наноструктур, відповідальними за яких є третя гаусіана (1).

Це не стосується високих температур осадження (зразок № 43-44, таблиця 1) для якого $h_{max}/\bar{x} = 1,5$ (таблиця 1). У цьому випадку атоми мають значну кінетичну енергію поверхневої міграції, що і зумовлює зростання ймовірності дифузійних матричних процесів.

Відносно наноструктур PbTe/(111) BaF₂, то спостережувані зміни у розмірах наноструктур від температури T_n і часу осадження τ та температури випаровування T_v , то їх також можна обґрунтувати процесами оствальдівського дозрівання.

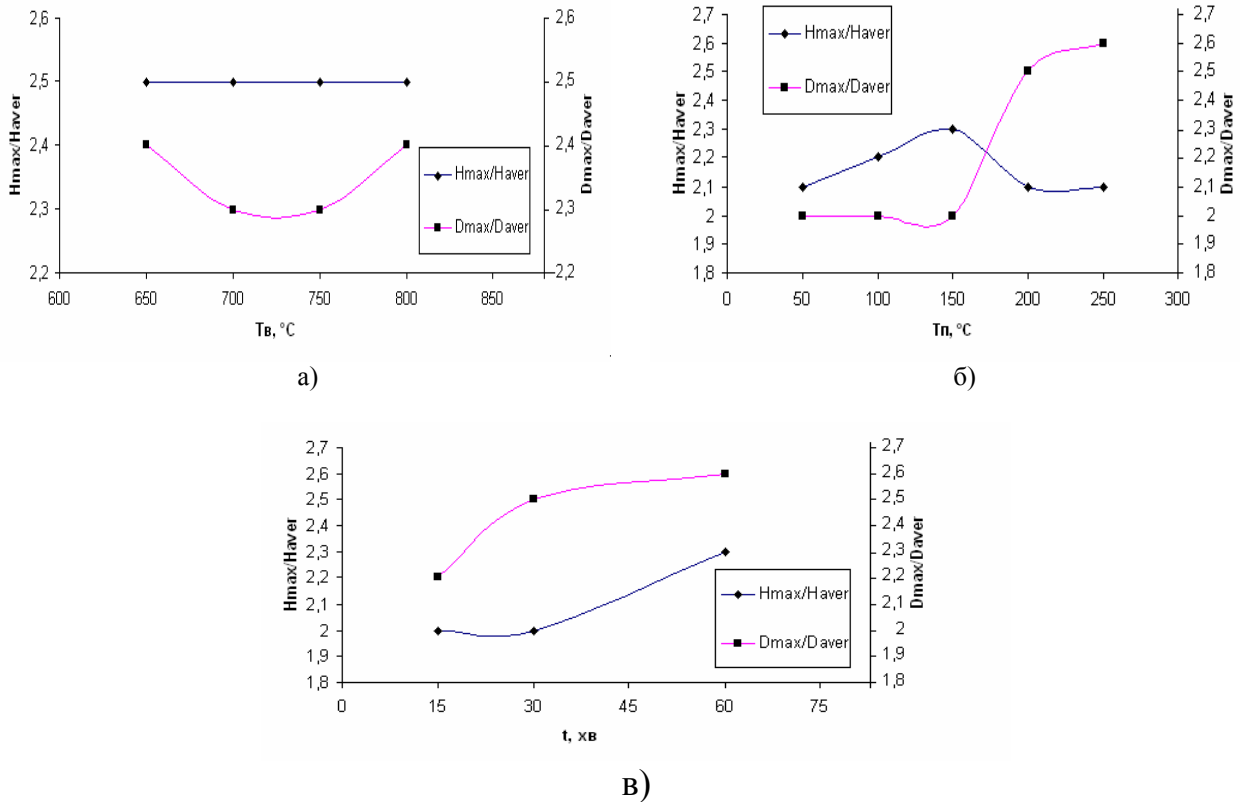


Рисунок 1 - Залежність відношень максимальних до середніх значень висот (H_{max}/H_{aver}) і діаметрів (D_{max}/D_{aver}) нанокристалів PbTe на (111) BaF₂ від температури випаровування T_v (а), температури підкладки T_p (б), та часу осадження τ (в) при сталих – а: $T_p=50^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ хв; б: $T_v=700^\circ\text{C}$, $\tau = 60$ хв; в: $T_v=700^\circ\text{C}$, $T_p=200^\circ\text{C}$.

Проведені розрахунки залежності відношення максимальних значень висоти (H_{max}) і діаметра (D_{max}) до їх середніх значень (H_{aver} , D_{aver}) H_{max}/H_{aver} ; D_{max}/D_{aver} відповідно від температури T_p (рисунок - б) та часу (рисунок - в) осадження вказують, що вони знаходяться в інтервалі від 2 до 2.5. При цьому із підвищенням температури T_p і часу τ осадження має місце тенденція до їх зростання (рисунок - б,в). Порівнюючи отримані результати із даними теорії, слід віддати перевагу електронним процесам, пов'язаних із швидкістю утворення хімічних зв'язків. Особливо такий характер оствальдівського дозрівання чітко проявляється при підвищенні температури T_p (рисунок - б) та часу осадження (рисунок - в) за яких спостерігається значний ріст окремих нанокристалів.