

І.І. Чав'як

## Наноструктури станум телуриду на сколах слюди-мусковіт

*Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)*

Методами атомно-силової мікроскопії та визначення електричних параметрів досліджено процеси росту наноструктур SnTe на сколах (0001) слюда-мусковіт, осаджених з парової фази відкритим випаровуванням у вакуумі при різних технологічних факторах. Показано, що експериментальні результати можна пояснити у рамках реалізації механізму росту Фолмера-Вебера та проявом квантово-розмірних ефектів.

**Ключові слова:** станум телурид, наноструктури, парофазні методи, механізми росту.

*Стаття постуила до редакції 01.10.2011; прийнята до друку 15.12.2011.*

### Вступ

У наноструктурних напівпровідникових матеріалах має місце заміна багатьох фізичних і хімічних властивостей, що розкриває нові перспективи їх практичного використання у квантових приладах і системах із широкими функціональними можливостями для опто- і наноелектроніки, вимірювальної техніки, інформаційних технологій нового покоління, засобів зв'язку і т.ін.[1,2]

Синтез наноструктур передбачає два підходи – мікроскопічний та термодинамічний. У першому випадку наноструктури утворюються із окремих атомів і молекул, а у другому – за рахунок дроблення речовини. Основними методами реалізації мікроскопічних технологій є металорганічна газова- і молекулярно-променева епітаксія [3,4].

До основних типів наноструктур відносяться квантові ями (КЯ), квантові дроти (КД), квантові точки (КТ) та структури з тунельно-прозорими бар'єрами і фотонні кристали. У цих структурах реалізується розмірне квантування руху носіїв заряду в одному (КЯ), двох (КД) або у трьох (КТ) напрямках відповідно.

Використовуючи методи “зонної інженерії” та “інженерії хвильових функцій” можна конструювати напівпровідникові наноструктури із заданими електронним спектром і необхідними для практики оптичними та електричними властивостями. Так, зокрема, на основі КТ створюються лазери і світлодіоди у ближньому інфрачервоному діапазоні, фотоприймачі для середнього інфрачервоного діапазону, одnofотонні приймачі, одnofотонні генератори, одноелектронні транзистори, які володіють суттєво кращими властивостями[5,6].

Виключні переваги гетероструктур із КТ можуть бути реалізовані тільки в такому випадку, якщо вони є однорідними за формою і розмірами, розміщені на поверхні із постійною щільністю, тобто є когерентними. Якісний прорив у цьому напрямку пов'язаний з використанням процесів самоорганізації. Явища спонтанного виникнення наноструктур створюють основу для нової технології отримання впорядкованих масивів КД і КТ – базу для опто- і мікроелектроніки нового покоління [3,4].

У роботі розглянуто можливості формування самоорганізованих наноструктур SnTe при парофазному осадженні у вакуумі на сколи (0001) слюди-мусковіт.

### I. Метод експерименту

Нанокристалічні структури станум телуриду отримували у вакуумі із парової фази на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіту марки СТА. Температура випаровування синтезованої сполуки SnTe складала  $T_B=700^\circ\text{C}$ , підкладок  $T_{II} = (150-300)^\circ\text{C}$  при часі осадження пари  $\tau = (0,5-30)\text{хв}$  (табл. 1).

Отримані наноструктури досліджувалися методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimentipon 3000(Digital Instruments USA) у режимі періодичного контакту. Вимірювання проведені в центральній частині зразків з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом закруглення вістря до 10 нм (NT0MDT, Росія). За результатами АСМ досліджень, крім топології поверхні та профілограм, у програмі WSxM 4.0 Develop 10.4 визначені розміри нанокристалів у латеральному напрямку, висоту та шорсткість поверхні. Інші розрахунки були проведені за допомогою програми Origin 6.1

Таблиця 1

Технологічні факти отримання наноструктур SnTe/(0001)слюда та їх електричні параметри

| №  | T <sub>п</sub> , °C | T <sub>в</sub> , °C | t, хв | h, нм | $\sigma \cdot 10^3, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ | n $10^{20}, \text{см}^{-3}$ | $\mu, \text{см}^2/\text{Вс}$ | $\alpha, \text{мкВ/К}$ |
|----|---------------------|---------------------|-------|-------|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1  | 150                 | 700                 | 0,5   | 1,2   |   |                             |                              |                        |
| 2  | 150                 | 700                 | 2     | 1,1   | 3   | 1,8                         | 37,9                         | 27                     |
| 3  | 150                 | 700                 | 5     | 1,8   | 2,1   | 2,9                         | 38,6                         | 43                     |
| 4  | 150                 | 700                 | 10    | 2,1   | 2,2   | 2,8                         | 47,6                         |                        |
| 5  | 150                 | 700                 | 15    | 2,4   | 3,0   | 2,1                         | 72,7                         | 43                     |
| 6  | 150                 | 700                 | 30    | 1,7   | 2,4   | 2,5                         | 42,0                         | 27                     |
| 7  | 150                 | 700                 | 30    | 0,8   | 1,4   | 4,5                         | 10,9                         |                        |
| 8  | 200                 | 700                 | 0,5   | 2,8   | 1,3   | 4,7                         | 37                           | 49                     |
| 9  | 200                 | 700                 | 2     | 3,1   | 2,0   | 3,1                         | 63                           | 33                     |
| 10 | 200                 | 700                 | 5     | 3,3   | 1,8   | 3,5                         | 54                           | 33                     |
| 11 | 200                 | 700                 | 10    | 1,7   | 18,4  | 0,3                         | 316                          | 33                     |
| 12 | 200                 | 700                 | 15    | 2,2   | 4,9   | 1,4                         | 94                           | 33                     |
| 13 | 200                 | 700                 | 30    | 6,9   | 3,7   | 1,7                         | 24                           |                        |
| 14 | 250                 | 700                 | 0,5   | 3,5   | 1,6   | 4,0                         | 55                           | 54                     |
| 15 | 250                 | 700                 | 2     | 2,0   | 1,6   | 3,4                         | 32                           | 27                     |
| 16 | 250                 | 700                 | 5     | 1,8   | 2,3   | 2,7                         | 0,004                        | 43                     |
| 17 | 250                 | 700                 | 10    | 1,5   | 4,7   | 1,3                         | 72                           | 33                     |
| 18 | 250                 | 700                 | 15    | 1,4   | 0,2   | 3,3                         | 27                           | 25                     |
| 19 | 250                 | 700                 | 30    | 4,4   | 2,2   | 2,9                         | 9,5                          | 27                     |

Вимірювання електричних параметрів свіжо вирощених та витриманих на повітрі до 50 год плівок проводили при кімнатних температурах у постійних магнітних полях. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти. В якості омічних контактів використовували плівки срібла. Струм через зразки складав  $\approx 100 \text{ мкА}$ . Магнітне поле напрямлялося перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 2 Тл. Деякі результати досліджень топології наноструктур представлено на рис. 1,2.

## II. Експериментальні результати

Аналіз результатів АСМ досліджень (рис 1,2) вказує на те, що важливими технологічними факторами, які визначають механізми росту нонокристалів SnTe на сколах (0001) слюди-мусковіт при осадженні пари у відкритому вакуумі, їх топологію та розміри є температура і час осадження. Загальною ознакою є те, що має місце формування окремих наноутворень, форма і розміри яких визначаються технологічними факторами (рис.1,2). Так, зокрема, при  $T_v=700^\circ\text{C}$  і  $T_n=200^\circ\text{C}$  формуються окремі наноутворення із тенденцією до кубічних форм із латеральними розмірами від  $\sim 250 \text{ нм}$  ( $\tau = 5 \text{ хв.}$ ) до  $\sim 400 \text{ нм}$  при  $\tau = 10 \text{ хв}$  і  $\sim 700 \text{ нм}$  при  $\tau = 15 \text{ хв}$  відповідно (рис. 2). Висота нерівностей при цьому встановлюється від  $\sim 25 \text{ нм.}$  до 18 і 9 нм відповідно для  $\tau = 5, 10$  і 15 хв. відповідно (рис.2-II). Найбільш яскраво виражену кубічну форму наноструктури

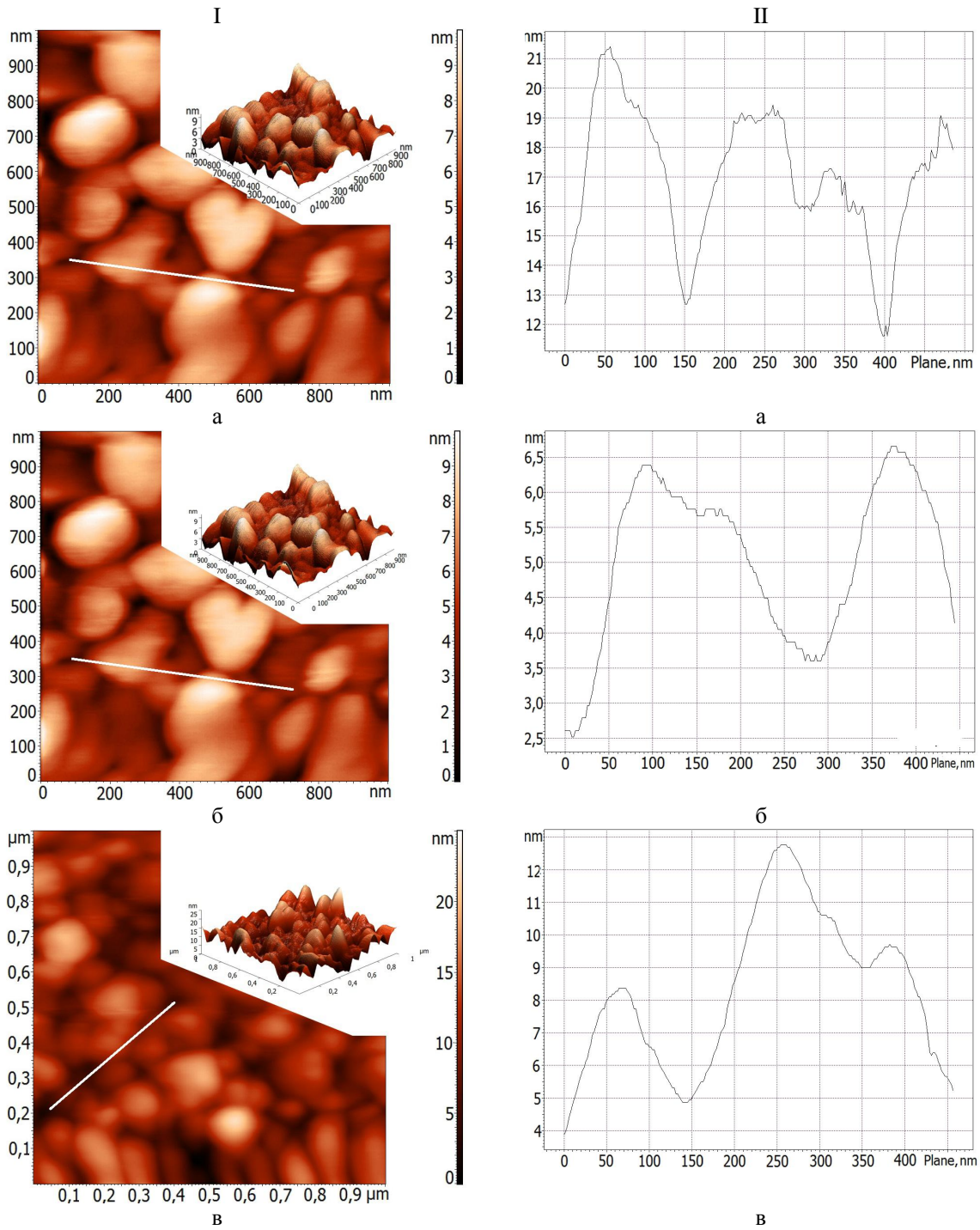
мають при часі осадження  $\phi = 15 \text{ хв}$  (рис. 2-I-б). При цьому домінуючими є орієнтація нанокристалів гранями куба {100} паралельно до поверхні підкладки із значною їх взаємною розорієнтацією (рис. 2-I,б). Температура підкладки у меншій мірі впливає на розміри наноструктур. Вони складають біля 210 нм, у латеральному напрямку і (4-10) нм за висотою (рис. 1).

Відносно електричних параметрів конденсатів можна відзначити наступне. Конденсати за всіх умов осадження характеризуються р-типом провідності із загальною концентрацією дірок  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (табл.1). При цьому коефіцієнт Зеебека змінюється в межах (25-54) мкВ/К, а рухливість носіїв є незначною і складає десятки одиниць (табл.1). Певних закономірностей у зміні від часу та температури осадження електричних параметрів наноструктур не встановлено (табл. 1).

## III. Обговорення результатів

При розгляді фізичних механізмів спонтанного виникнення впорядкованих наноструктур прийнято розрізняти дві принципові можливості: у замкнутих та відкритих системах. Наш випадок стосується саме останніх, оскільки він представляє гетероепітаксціальний ріст. Такі структури не є рівноважними, тому для їх описання використовують кінетичний підхід.

У гетероепітаксціальному рості розрізняють три

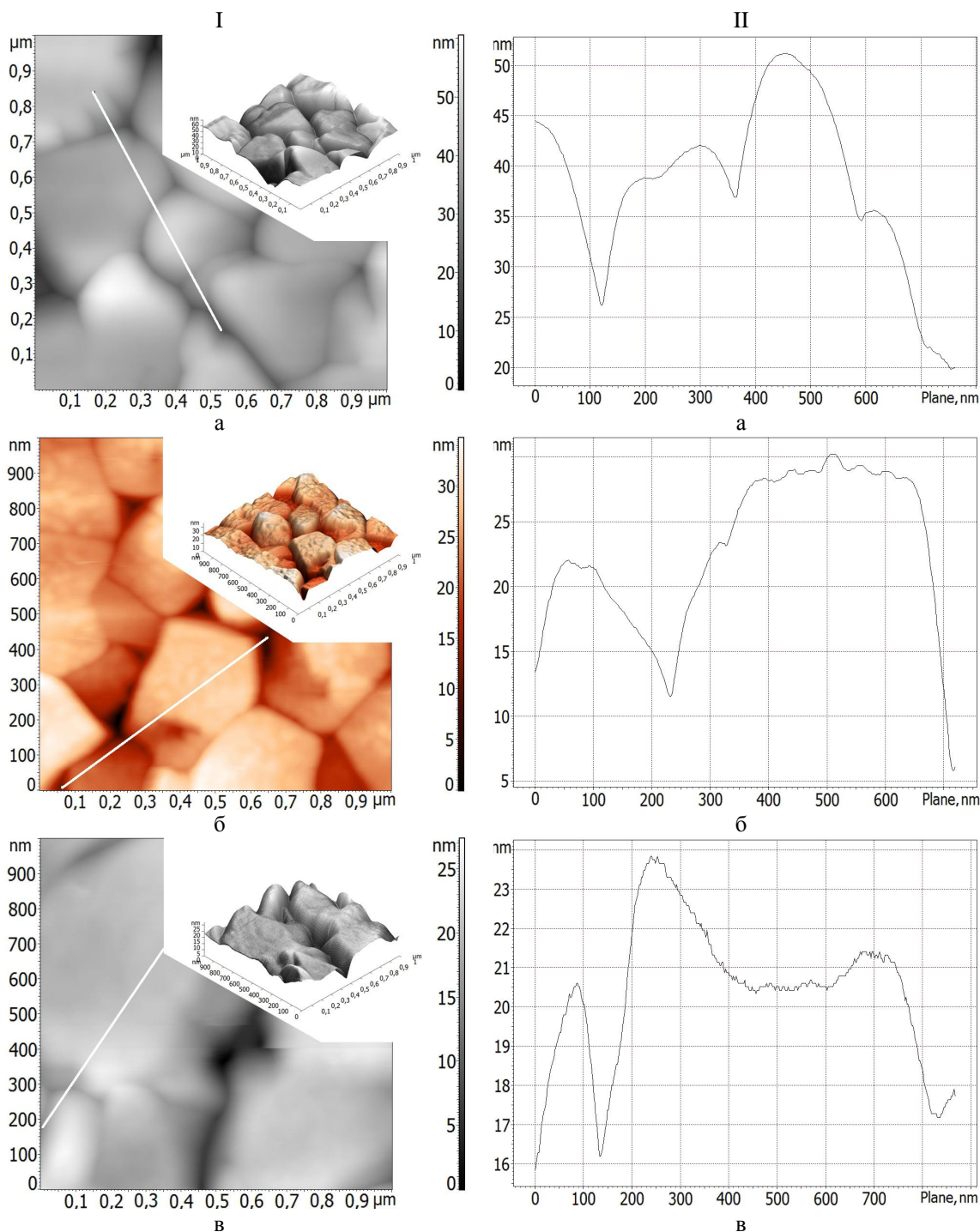


**Рис. 1.** АСМ-зображення(I) і профілографи(II) наноструктур SnTe/(0001) слюда для температури осадження  $T_p, ^\circ\text{C}$ : а-150; б-200; в-250. Температура випарника  $T_v=700^\circ\text{C}$ , час осадження  $t = 2\text{хв}$ .

механізми [7]: Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merve) реалізується пошаровий (двомірний) ріст матеріалу В на підкладці А; Фолмера-Вебера (Volmer-Wueber) – має місце острівцевий (трьохмірний) ріст В на відкритій поверхні підкладки А; Странські-Краснова (Stransky-Krasnow) – спочатку реалізується пошаровий ріст В на А з подальшим утворенням трьохмірних острівців В на покритій підкладці. Реалізація перших двох механізмів у гетероепітаксціальних системах «підкладка-конденсат» визначається тільки створенням енергії

двох поверхонь ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) і енергії межі розділу ( $\gamma_{12}$ ) [8]. Якщо сума поверхневої енергії епітексціального шару  $\gamma_2$  і енергії межі розділу  $\gamma_{12}$  менша за енергію поверхні підкладки  $\gamma_1$ , тобто коли конденсат змочує підкладку, то виникає механізм Франка-ван дер Мерве. Зміна величини  $\gamma_2 + \gamma_{12}$  може призвести до переходу від режиму Франка-ван дер Мерве до режиму Фолмера-Вебера. У гетероепітаксціальній системі при наявності неузгодженості за сталою ґратки між конденсатом і підкладкою першопричинний ріст змінюється утворенням

## Наноструктури станум телуриду на сколах слюди-мусковіт



**Рис. 2.** АСМ-зображення(I) і профілографи(II) наноструктур SnTe/(0001) слюда для часу осадження  $t$ , хв: а-5; б-10; в-15. Температура випарника  $T_B=700^\circ\text{C}$ , температура  $T_H=200^\circ\text{C}$ .

ізолюваних острівців через релаксацію пружних напружень, що характерно для режиму Странскі-Краснова.

У нашому випадку гетероепітаксціальний ріст наноструктур SnTe/(0001) слюда-мусковіт реалізується за механізмом Фолмера-Вебера згідно якого формуються окремі нанокристали із певною топологічною архітектурою (рис. 1,2).

Відсутність певної закономірності у зміні електричних параметрів від часу осадження наноструктур SnTe/(0001) слюда, який визначає

товщину конденсату (табл.) пов'язаний із проявом квантово-розмірних ефектів, які зумовлюють осциляційний характер їх профілів [9].

## Висновки

1. Парафазними методами у відкритому вакуумі отримано наноструктури SnTe/(0001) слюда при температурі випаровування  $T_B = 700^\circ\text{C}$ , температурах підкладок  $T_H = (150-300)^\circ\text{C}$  та часу осадження  $\tau = (0,5-30)$  хв.

2. Методами АСМ досліджено топологію поверхні наноструктур та визначено їх електричні параметри, за різних технологічних факторів їх випаровування.
3. Показано, що наноструктури формуються за механізмом Фолмера-Вебера із домінуванням кубічних форм.
4. Встановлено, що конденсат характеризується р-типом провідності із значною концентрацією дірок  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

*Автор висловлює вдячність науковому керівнику проф. Фрейку Д.М. за постановку задач дослідження та обговорення їх результатів.*

Робота виконана у рамках наукових проектів МОН України (реєстраційний номер 0111001766), НАН України (реєстраційний номер 0110006281) та ДФФД МОН України (реєстраційний номер 0111004951).

**Чав'як І.І.** – аспірант.

- [1] I.N. Kalinkin, V.B. Aleskovskij, A.V. Simashkevich. Jepitaksial'nye sloi soedinenij АПВVI (Izdatel'stvo LGU, Leningrad, 1978).
- [2] U. Hartman .Ocharovanie nanotehnologii. Per. s nim. (Laboratorija znaniy, Moskva, 2008).
- [3] P.P. Mal'cev. Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Mirovye dostizhenija (Tehnosfera, Moskva, 2008).
- [4] V.N. Balanov. Nanotehnologii. Tehnologii budushhego (Jeskimo, Moskva, 2009).
- [5] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Left. 30, 939 (1982).
- [6] M. Asada, M. Miyamoto, Y. Suematsu. IEEE J. Quant. Electron. QE-22, 1915 (1986).
- [7] B.V. Ivans'kij. Osva'liv's'ke dozrivannja nanostruktur v umovah difuzijno-vagnerivs'kogo mehanizmu masoprenosu. Dis. k.f.-ja.n. (Chernivci, 2011).

I.I. Chaviak

## Nanostructures Tin Telluride on Cleaved Facet of Mica-Muscovite

*Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)*

By atomic force microscopy (ATM) and determination of electrical parameters investigated processes of growth on SnTe nanostructures muscovite mica (0001), deposited from the vapor phase of open evaporation in vacuum at different technological factors. It is shown that experimental results can be explained within the framework of the mechanism of growth Volmera-Weber and manifestation of quantum size effects.

**Keywords:** Tin telluride, nanostructures, vapor-phase methods, mechanisms of growth.