

Д.М. Фреїк<sup>1</sup>, Г.Є. Малашкевич<sup>2</sup>, Р.І. Никируй<sup>1</sup>,  
А.М. Горбачева<sup>2</sup>, В.В. Бачук<sup>1</sup>

## Структура і оптичні властивості наноструктурованого плюмбум телуриду

<sup>1</sup>Фізико-хімічний інститут Прикарпатського університету імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Інститут фізики Національної академії наук Білорусі, Мінськ, Білорусь

У роботі приведені результати дослідження структури і оптичних властивостей наноструктурованих тонких плівок PbTe, вирощених із парової фази у методі гарячої стінки на сколах (0001) слюди-мусковіт. Встановлено залежність крутизни високочастотного краю фундаментального поглинання і області оптичного пропускання від топології наноструктур.

**Ключові слова:** плюмбум телурид, наноструктура, оптичні властивості, край поглинання.

Стаття постуила до редакції 20.01.2009; прийнята до друку 15.03.2009.

### Вступ

Наноструктури напівпровідникових матеріалів привертають увагу перш за все у зв'язку із можливостями широкого використання у наноелектроніці – одноелектронні ключі, тунельні діоди, транзисторні структури і квантові лазери [1].

Сучасний технологічний стан дає можливість отримати структури, у яких реалізується квантовий розмірний ефект, тому на перший план стають питання, пов'язані із дослідженням їх структури і властивостей [2].

Наноструктури халькогенідів свинцю і, особливо, PbTe є предметом детального вивчення в ряді робіт [3-5], серед яких слід відзначити і наш огляд [6]. Зокрема у роботах [7-8] проведені дослідження процесів росту і топології епітаксійних наноструктур PbTe на сколах слюди-мусковіт. Однак залишаються невивченими їх фізичні властивості.

У цій роботі представлені перші результати із дослідження оптичних властивостей наноструктур PbTe.

### I. Методика експерименту

Нанокристалічні епітаксійні структури PbTe отримували осадженням газодинамічного потоку пари на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт марки СТА. Технологічні умови і деякі характеристики плівок наведено у таблиці. Зауважимо, що проведено експерименти для різних температур росту

конденсату  $T_n=(353-633)$  К та його товщин (4,3-8,5) мкм. Температура стінок камери складала  $T_c=660$  К, а випаровування наважки  $T_v=820$  К.

Морфологія поверхні наноструктур досліджувалася на скануючому електронному мікроскопі LEO-1420REM, а також на атомно-силового мікроскопі (АСМ) Nanoscope 3a Dimention 3000 (Digital Instruments, США) в режимі періодичного контакту. Вимірювання проведені в центральній зоні зразка з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом закруглення вістря до 10нм (NT-MDT, Росія).

Оптичні властивості плівок PbTe досліджувалися на ІК-Фур'є спектрометрі FT-IR NEXUS.

**Таблиця**

Технологічні фактори осадження із парової фази методом гарячої стінки наноструктур PbTe

Номер зразка	Час осадження, хв	$T_n$ , °К	Товщина конденсату, мкм	Швидкість росту, мкм/хв
30-31	10	429	8,3	0,83
32-33	7	429	6,5	0,93
35-36	5	433	5,4	1,08
37-38	3	426	4,3	1,43
39-40	10	383	8,3	0,83
41-42	10	353	8,4	0,84
43-44	10	633	8,1	0,81
2-3	10	408	8,5	0,85

## II. Структура плівок

Деякі результати дослідження морфології поверхонь наноструктур методом АСМ та її розрахунки представлено на рис. 1. Аналіз цих результатів дає можливість встановити певні закономірності у формуванні епітаксійних наноструктур у залежності від температури росту та їх товщини. Так, зокрема, низькі температури осадження  $T_n=353$  К (рис. 1, а) сприяють формуванню нанокристалів із переважанням швидкості росту у тангенціальному напрямку до поверхні підкладки. На це вказує те, що їх лінійні розміри у площині підкладки по азимуту (0,2-1,4) мкм значно переважають розміри у нормальному напрямку – висота нанокристалів  $\sim 100$  нм (рис. 3,а). Підвищення температури росту до  $T_n=(380-408)$  К призводить до формування більш однорідних нанокристалів як по формі, так і за лінійними розмірами в азимутальному та нормальному напрямках до поверхні підкладки (рис. 1, б). Хоча лінійні розміри кристалів у площині підкладки (0,1-0,7) мкм для цих умов осадження значно перевищують їх висоту (100-350) нм (рис. 3, б,в).

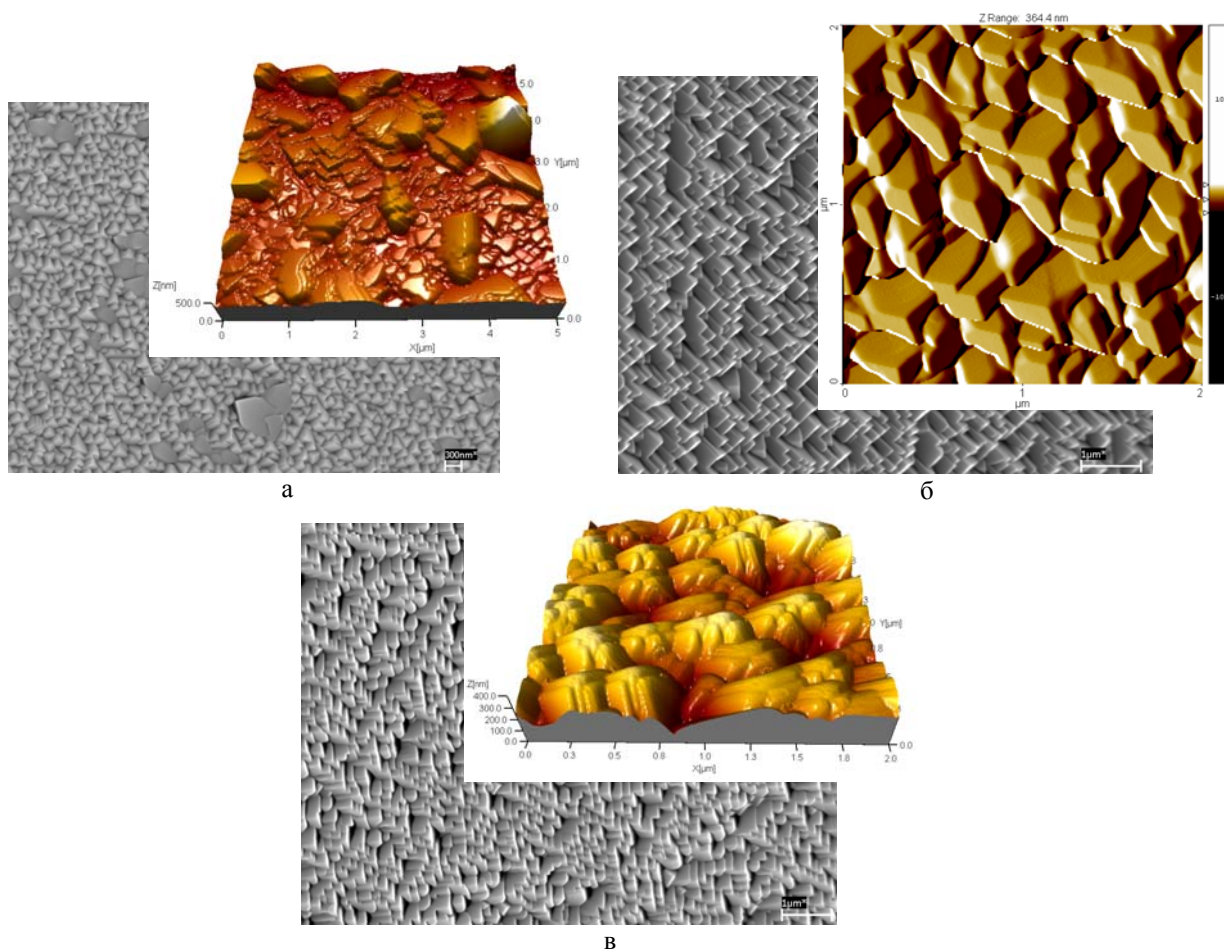
Подальше підвищення температури осадження до призводить до росту на фоні нанокристалів добре сформованих ступенів росту (рис. 1, в).

Зауважимо, що із підвищенням температури росту  $T_n$  шорсткість поверхні нанокристалічних структур зростає і складає  $\sim 33$  нм (353 К),  $\sim 49$  нм (383 К) і  $\sim 86$  нм (633 К) відповідно.

Цікавою є залежність топології епітаксійних структур від їх товщини. Для тонких плівок характерним є формування наноструктур із округленими гранями і без чіткої огранки. Із збільшення часу осадження і товщини конденсату до (5,4-6,5) мкм має місце ріст добре сформованих нанокристалів різної висоти (50-400) нм (рис. 6, б,в) з лінійними розмірами в основі до 1 мкм.

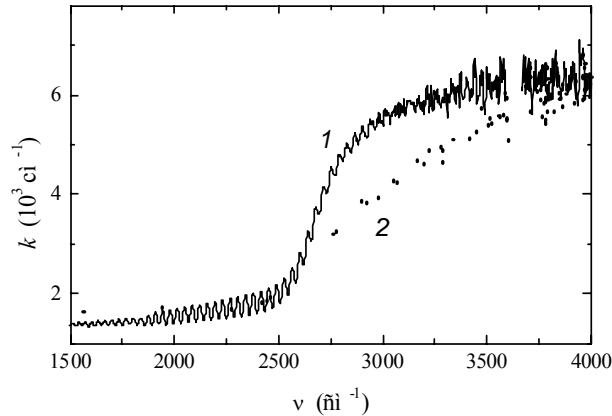
## III. Оптичні властивості

На рис. 2 зображені спектри поглинання плівок в області високочастотного краю фундаментального поглинання. Розривши при  $\nu \approx 3650$   $\text{cm}^{-1}$  на спектральних кривих пов'язаний з неможливістю коректного вимірювання оптичної густини із-за інтенсивної смуги поглинання іонів гідроксилу в слюді. Видно (рис. 2), що крутизна смуги оптичного поглинання плівки із сформованими нанокристалітами (рис. 1,в) набагато більша, ніж плівок, для яких частина цих мікрокристалів розташована паралельно поверхні і топологія не є



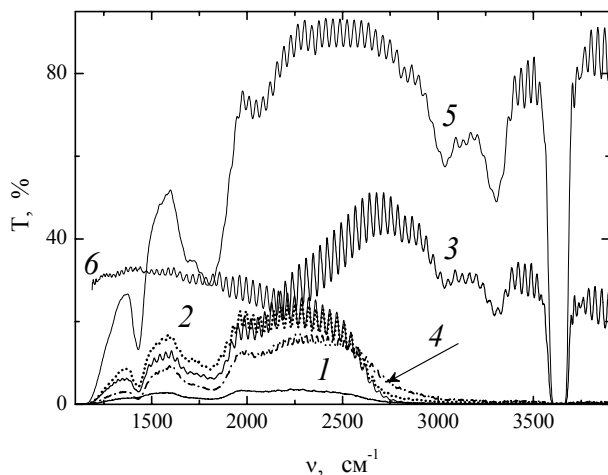
**Рис. 1.** Електронно-мікроскопічні і атомно-силові (АСМ) зображення (вставки) поверхні наноструктур PbTe, осаджених на сколи (0001) слюди при температурах  $T_n$ , К: 353 (а – №41-42); 408 (б – №2-3); 429 (в – №30-31) (таблиця)

періодичною (рис. 1, а).



**Рис. 2.** Спектри оптичного поглинання наноструктур PbTe на підкладках слюди: 1 – зразки №30-31; 2 – зразки № 41-42 (таблиця).

Значна зміна крутизни високочастотного краю фундаментального поглинання залежно від орієнтації мікрочисталів зростання можна пояснити головним чином анізотропією коефіцієнта поглинання останніх. Не виключено, що структура власних дефектів цих мікрочисталів також різна.



**Рис. 3.** Спектри оптичного пропускання наноструктур PbTe на підкладках слюди: 1-4 – зразки №2-3, №30-31, №37-38 і №41-42 відповідно (таблиця). 5 – слюдяна підкладка. 6 – спектр зразка №30-31 за вирахуванням спектру підкладки.

На рис. 3 зображені спектри оптичного пропускання наноструктур №2-3 (крива 1), №30-31 (крива 2), №37-38 (крива 3) і №41-42 (крива 4) на слюдяній підкладці. Тут же приведений спектр

пропускання цієї підкладки (крива 5) і фрагмент спектру пропускання зразка №30-31 за вирахуванням однойменного спектру підкладки (крива 6).

Видно (рис. 5.), що наноструктури телуриду свинцю з товщиною 8,3–8,5 мкм характеризуються вікном прозорості при  $\nu \leq 2750 \text{ cm}^{-1}$ , а максимум їх пропускання лежить при  $\nu \approx 1500 \text{ cm}^{-1}$ . Причому, у міру погіршення якості упаковки наночисталітів крутизна кривої пропускання з високочастотної сторони спектру помітно ослаблюється, знижується і інтегральне пропускання. Для плівки з товщиною 4,3 мкм високочастотна межа пропускання значно зсувається у бік великих  $\nu$  (рис. 3 – крива 3).

Одержані результати допомагають більш цілеспрямовано підходити до вирощування наноструктур із заданою топологією і необхідними оптичними властивостями, а також корисні для вибору активаторів із смугою люмінесценції в області прозорості.

## Висновки

1. Досліджено топологічні особливості наноструктур PbTe різної товщини, вирощених на сколах слюди при різних температурах осадження.
2. Встановлена кореляція оптичних спектрів наноструктур PbTe і їх топологічної впорядкованості.
3. Показано, що крутизна високочастотного краю поглинання і величина смуги пропускання більша для впорядкованих наноструктур ZnTe, осаджених при температурах  $T_{\text{п}} = (429-633) \text{ K}$ .

Робота частково фінансується МОН України (державний реєстраційний номер 0109U001414) та ДФФД МОН України (державний реєстраційний номер 0109U004505)

**Фреїк Д.М.** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;  
**Малашкевич Г.Е.** – доктор фізико-математичних наук, професор;  
**Никируй Р.І.** – аспірант;  
**Горбачева А.М.** –  
**Бачук В.В.** – аспірант.

- [1] В.Н. Белявский. Физические основы полупроводниковой нанотехнологии // *Соровский образовательный журнал. Физика*. 10, сс.92-98 (1998).
- [2] Д.М. Фреїк Напівпровідникові наноматеріали, нанотехнології та наноелектроніка // *Прикарпатський вісник НТШ*. 1(1), сс. 74-111 (2008).
- [3] E. Rodriguez, E. Jimenez, G.J. Jacob, A.A.R. Neves, C.L. Cesar, L.C. Barbosa. Fabrication and characterization of a PbTe quantum dots multilayer structure // *Physica E* 26 pp. 361-365(2005)
- [4] S.O. Ferreira, B.R.A. Neves, R. Magalhaes-Paniago, A. Malachias, P.H.O. Rappl, A.Y. Ueta, E. Abramof, M.S. Andrade. AFM characterization of PbTe quantum dots grown by molecular beam epitaxy under Volmer–Weber mode // *Journal of Crystal Growth*, 231, pp. 121-128 (2001).

- [5] T.I.Sheremeta, I.V. Prokopenko, P.M.Lytvyn, O.S. Lytvyn, V.M. Vodop'yanov, A.P.Bakhtinov, E.I.Slyn'ko. Peculiarities of the PbTe nanoislet formation on BaF<sub>2</sub> substrate at "hot wall" epitaxy method investigated by atomic force microscopy // *Functional materials*, **14**(1), (2007).
- [6] Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, О.Л. Соколов, М.А. Лоп'яно Дислокації невідповідностей та електронні процеси у двошарових епітаксціальних структурах халькогенідів свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*, 2009, Т. 10, № 1, С. 9-18.
- [7] Д.М. Фреїк, Л.Й. Межиловська, Б.С. Дзундза, Г.Д. Матеїк. Патент України №18236. *Спосіб отримання орієнтованих нанокристалів A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup> на слюді: С30В25/18*; Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника. № у 2005 12235. Заява. 19.12.05. Опубл. 15.11.06. Бюл. №11.
- [8] Д.М. Фреїк, І.М. Ліщинський, П.М. Литвин, В.В. Бачук, Р.І. Никируй, М.Я. Гриджук Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур PbTe на сколах слюди-мусковіт // *Фізика і хімія твердого тіла*, 2008, Т. 9, № 4, С. 739-743.

D.M. Freik<sup>1</sup>, G.E. Malashkevich<sup>2</sup>, R.I. Nykyruy<sup>1</sup>, A.M. Gorbachova<sup>2</sup>, V.V. Bachuk<sup>1</sup>  
**Structure and Optical Properties of Nanostructure PbTe**

<sup>1</sup>Physical-chemical institute at the Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University

57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarusj, Minsk, Belarusj

The results of research of structure and optical properties of the nanostructure thin films of PbTe are in-process resulted, reared from a steam phase in the method of hot wall on split (0001) mica-muscovite. Dependence of steepness of high-frequency edge of fundamental absorption and area of optical key in is set on the topology of nanostructure.