

Ю.В. Тур¹, Ю.В. Павловський¹, І.С. Вірт^{1,2}

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ І МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ТОНКИХ ПЛІВОК PbTe ТА PbTe<Bi₂Te₃>

¹ Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка
вул. Стрийська, 3, Дрогобич, 82100, Україна, E-mail: tur2014@meta.ua

² Жешувський університет
вул. С. Пігонія, 1, Жешув, 35310, Польща

У роботі досліджено структурні характеристики та морфологію поверхні тонких плівок PbTe та плівкових композитів PbTe<Bi₂Te₃>, вироцих імпульсним лазерним осадженням при T_S = 200 °С, поверхня яких складається з дрібних зерен розмірами близько 100 нм. На основі аналізу результатів АСМ-зображень досліджено процеси структуроутворення конденсатів PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> на різних підкладках. Показано, що у процесах зародження зерен напівпровідника домінує механізм Фольмера-Вебера, при якому утворюються тривимірні нанорозмірні надструктури на поверхні підкладки. Характерною особливістю двох АСМ-зображень є те, що поверхня плівок є однорідною і дрібнозернистою. Морфологія поверхні свідчить, що велика кількість частинок рівномірно розподілена по всій поверхні. Визначені шорсткість поверхні, розміри нанокристалів у латеральному напрямку та їхню висоту.

Методами рентгенівської дифрактометрії визначено характеристики структури та параметри кристалічної ґратки вироцих тонких плівок. Представлено дифракційні залежності для плівки PbTe<Bi₂Te₃>. Встановлено, що наявність гострих піків у дифрактограмах чистого PbTe говорить про полікристалічну природу плівок. Вказано індекси визначених кристалічних площин на піках. Характер залежностей підтверджують структуру кам'яної солі (NaCl). Згідно досліджень структури, встановлено, що збільшення розміру зерен може розглядатися як стовпчастий приріст зерна в структурі.

Ключові слова: тонкі плівки, PbTe, імпульсно-лазерне осадження, атомно-силова мікроскопія

ВСТУП

Тенденції розвитку технологій виготовлення функціональних структур для сучасного приладобудування, які знаходять широке застосування як для наукових досліджень, так і в практиці виробництва, спрямовані на зменшення розмірів включно [1–5]. При цьому основною вимогою до застосування технологій залишається бік мініатюризації таких пристроїв, до нанометрових, дотримання високої ефективності і надійності виробів, що виготовляються. Проте реалізація цього завдання неможлива без сучасних засобів і методів дослідження мікрогеометрії, стану поверхні та фізико-механічних характеристик матеріалів, з яких виготовлені ці структури. Незважаючи на певні успіхи в розробці теоретичних основ сучасного приладобудування, загальні тенденції застосування реальних функціональних матеріалів на рівні, який забезпечував би мінімальні відхилення від прогнозованих

параметрів та робочих характеристик діючих структур, відсутні.

Тому на даний момент зусилля багатьох науковців спрямовані на розробку нових структур відомих та нових матеріалів для функціональних пристроїв із застосуванням нанотехнологій, зокрема наноструктурування матеріалу. Останнє пред'являє вимоги до розвитку та вдосконалення методів дослідження наноструктур і нанооб'єктів, які повинні дозволити отримувати достовірні кількісні їхні характеристики. Атомно-силова мікроскопія (АСМ) та електронна мікроскопія високої роздільної здатності реалізують можливості спостереження та аналізу стадій росту об'єктів та нанооб'єктів різного рівня.

Тонкі плівки і низькорозмірні конденсати халькогенідів свинцю є перспективними напівпровідниковими структурами для створення на їхній основі активних елементів мікро- і наноелектроніки [6–10]. Телурид свинцю і сполуки на його основі

зарекондували себе ефективними промисловими матеріалами для застосування в термоелектриці. Зокрема, PbTe – ефективний термоелектричний матеріал для середньотемпературної області (500–750 К) перетворення енергії, що пояснюється значною величиною відношення його електропровідності до ґраткової теплопровідності [11–12].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У роботі досліджено морфологію поверхні тонких плівок PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> методом аналізу зображення, одержаного при допомозі атомно-силового мікроскопа (АСМ). Для отримання плівок та структур на їхній основі використовували метод імпульсного лазерного осадження (ІЛО) [13–14].

Імпульсне лазерне осадження – контролюючий та управляючий процес осадження на поверхню підкладки матеріалів, утворених у ході взаємодії лазерного імпульсу з мішенню в вакуумній камері за участі плазмового абляційного факела.

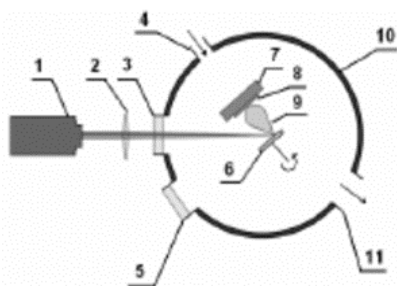


Рис. 1. Схема пристрою лазерно-вакуумної напиляючої установки. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – фокусуюча лінза; 3 – ілюмінатор оптичний; 4 – підведення технологічних газів; 5 – оглядове вікно; 6 – мішень; 7 – тримач підкладки; 8 – підкладка; 9 – плазмовий факел; 10 – вакуумна камера; 11 – вакуумний насос

Для приготування мішеней PbTe та PbTe<Bi₂Te₃>використовували елементи Pb, Te та Bi напівпровідникової чистоти 5N (99.999 %), які в стехіометричному співвідношенні поміщені у вакуумовані кварцові контейнери. Для абляції використовували зразки-мішені розмірами (площею) біля 1 см².

Матеріал мішеней осаджений на скляні та кремнієві підкладки, температура яких

становила 300–473 К. Таким чином, синтезовані тонкі плівки PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> використано як мішені для їхнього осадження імпульсним лазером YAG: Nd³⁺ ($\lambda = 1064$ нм, тривалість імпульсу $\Delta t = 10$ нс, частота повторення імпульсів $f = 0.5$ с⁻¹, $E_{\max} = 0.4$ Дж, питома густина енергії $q = 4 \cdot 10^8$ Вт/см²). Швидкість осадження та товщину плівок контролювали кількістю імпульсів лазера та визначали за допомогою індикатора товщини, встановленого в робочій камері.

Кристаліграфічні дослідження та дослідження структури проводили за допомогою рентгенівської дифрактометрії (дифрактометр D8-ADVANCE) з використанням довжини хвилі CuK α ($\lambda = 1.54059$ Å) і скануванням в діапазоні 2 θ від 10 до 70°.

Морфологію поверхонь тонких плівок PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> досліджували на атомно-силовому мікроскопі (АСМ) [15–16], робота якого ґрунтується на вимірюванні сил взаємодії між вістрям зонду та атомами поверхні.

Дослідження топографії поверхні проводили за допомогою атомно-силового мікроскопа (АСМ) CSM + Instruments, приладом, що дозволяє отримувати зображення поверхні зразків із роздільною здатністю порядку кількох нанометрів та маніпулювати наноскопічними об'єктами в атмосферних умовах при кімнатній температурі.

Ці системи дозволяють маніпуляції системами мікроскопа у режимі реального часу, а також аналіз та модифікацію даних вимірювань незалежно від основного обладнання.

Технічні характеристики:

Область переміщення – 120×100 мм².

Роздільна здатність – 2 мкм.

Максимальне переміщення сканера: по осі X – 100 мкм, по осі Y – 100 мкм, по осі Z – 4.5 мкм.

Електронна роздільна здатність – 16-bit (в усіх напрямках).

Точність – < 1 % – типова, 2 % – максимум, від вибраного поля сканування.

Перпендикулярність – < 2°.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження топографії поверхні. Зображення поверхні отримані за допомогою

атомно-силового мікроскопа (AFM) тонких плівок PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> різної товщини, нанесених на скляні підкладки, наведені на рис. 2 а, б). Характерною особливістю двох АСМ-зображень є те, що поверхня плівок є однорідною і дрібнозернистою.

У нашому випадку, за технологічних умов осадження PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> на склі

спостерігається утворення і зростання окремих структур пірамідальної форми (рис. 2 а, б), що вказує на домінування механізму Вольмера-Вебера (утворення тривимірних окремих зародків наноструктур на поверхні підкладки).

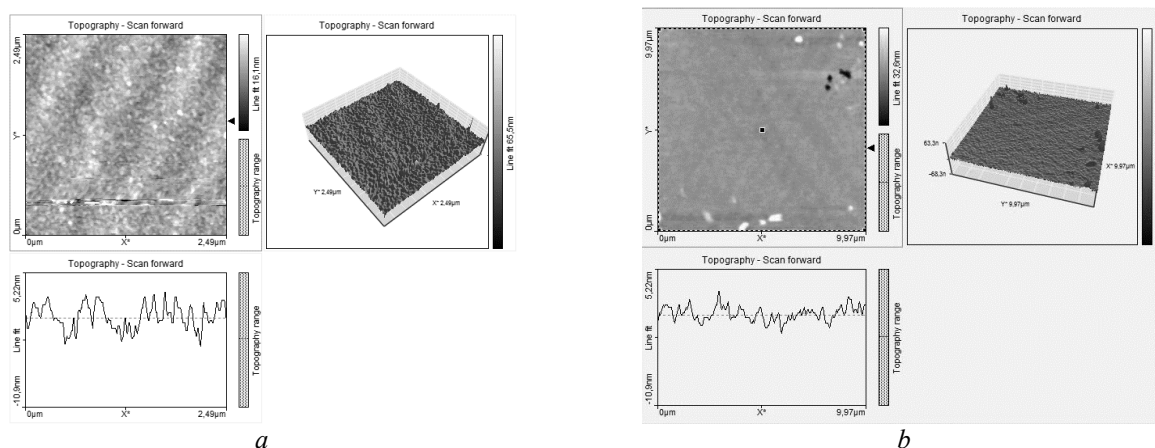


Рис. 2. Зображення поверхні AFM тонких плівок PbTe (а) та PbTe<Bi₂Te₃> (б) на скляних підкладках

Поверхня вихідних плівок, отриманих методом ІЛО при $T_s = 200$ °С, складається з дрібних зерен розмірами близько 100 нм (рис. 3 а). Додавання іншої структури приводить до того, що поверхня досить неоднорідна, можна виділити зерна з нечіткими межами розмірами від 200 до 400 нм, деякі з них досягають розмірів порядку 1000 нм, відрізняючись при цьому чіткими межами та гладенькою поверхнею (рис. 2 б). Рівень механічних напруг і розмір кристалітів у плівках залежить від осаджуваного матеріалу. Оскільки досліджувані поверхні не містять регулярних особливостей рельєфу, то для їхнього аналізу можна застосувати амплітудні і функціональні характеристики.

Слід відмітити, що плівка гладенька, однорідна, дрібнозерниста і добре покриває підкладку. Морфологія поверхні показує, що велика кількість частинок рівномірно розподілена по всій поверхні. Нанокристаліти мають зернисту форму. Середні розміри такої форми зерна – приблизно 100 нм. Для товщини плівки 500 нм утворення зерна є помітним і чітко визначеним кубічним кристалітом.

Рентгенівські дифрактограми некристалічних плівок PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> різного

складу показані на рис. 3. На вкладці окремо представлено дифракційні залежності для плівки Bi₂Te₃. Наявність гострих піків у дифрактограмах чистого PbTe говорить про полікристалічну природу плівок. Вказано індекси визначених кристалічних площин на піках. Характер залежностей підтверджують структуру кам'яної солі (NaCl). Спостережені і оцінені *d*-відстані площин та *hkl* (для найбільш інтенсивних піків [200], [220], [400] становлять відповідно 3.188, 2.278 і 1.594 Å) узгоджуються з даними рентгенівських табличних значень JCPDS (78-1905) кубічного PbTe [19]. З XRD можна зробити висновок, що чисті плівки PbTe ростуть з переважною орієнтацією вздовж (220) площини [21]. Відсутність будь-яких піків дифракції, пов'язаних з елементарними Te або Pb, є однією з ознак якості плівок [20]. Результати свідчать про ступінь кристалічності плівок. Дана монокристалічність, як правило, пояснюється підвищеною здатністю атомів у матриці рухатись до стабільних ділянок ґратки у процесі росту за даної температури підкладки.

Це говорить про те, що вирощена плівка більшої товщини, повністю перекристалізована. Крім того, є тенденція збільшення

розміру зерна, яка може розглядатися як стовпчастий приріст зерна та формування текстури. Широкий пік (200), що спостерігається на дифрактограмі плівки, свідчить про значні механічні деформації. Так, для товщини плівки близько 500 нм розрахований спостережуваний розмір ґратки 6.377 Å, що дещо менше від значення JCPDS для табличного PbTe ($a = 6.454 \text{ \AA}$).

Для плівки сплаву PbTe-Bi₂Te₃ переважна орієнтація росту майже не спостерігається, а кристаліти ростуть переважно уздовж (200)

площини. З залежностей дифракційних піків для сплаву видно, що присутність Bi₂Te₃ у сплаві дає окремі піки характерні другої фази, а також зміщує піки до більших кутів дифракції у порівнянні з чистою плівкою Bi₂Te₃. Це свідчить про стискання кристалічної ґратки фази (Bi₂Te₃) у матриці PbTe. Погіршення кристалічності сплаву PbTe-Bi₂Te₃ спричинене утрудненням атомів у зернах дифундувати при даній температурі до утворення квазімонокристалічних ділянок.

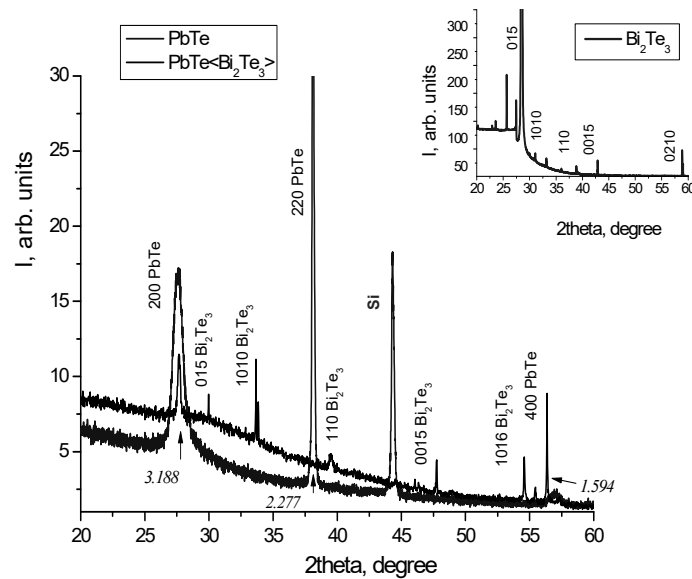


Рис. 3. Рентгенограми тонких плівок PbTe (стрілками вказані величини міжплощинних відстаней) та сплаву PbTe -Bi₂Te₃ на кремнієвих підкладках (на вкладці рентгенограми для плівки Bi₂Te₃)

ВИСНОВКИ

Методом імпульсного лазерного осадження отримані тонкі плівки PbTe та PbTe<Bi₂Te₃> з включеннями. Фазовий аналіз та дослідження структури показали задовільне узгодження експериментальних значень міжплощинних віддалей з їхніми стандартними значеннями.

Проведено дослідження топографії поверхні тонких плівок PbTe та

PbTe<Bi₂Te₃>. АСМ зображення вказують на те, що поверхня плівки є однорідною і дрібнозернистою. Визначені шорсткість поверхні, розміри нанокристалів у латеральному напрямку та їхня висота.

Утворення і зростання окремих структур пірамідальної форми, зокрема і у гетерогенній системі PbTe<Bi₂Te₃>, вказує на домінування механізму росту типу Вольмера-Вебера.

Research on crystal structure and morphology of the surfaces of thin films of PbTe and PbTe<Bi₂Te₃>

Y.V. Tur, Y.V. Pavlovskiy, I.S. Virt

Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University
3 Stryiska Str., Drohobych, 82100, Ukraine, tur2014@meta.ua
Rzeszów University
I S. Pigionia Str., Rzeszów, 35310, Poland

The structural characteristics and surface morphology of PbTe thin films and PbTe<Bi₂Te₃> film composites grown by pulsed laser deposition at $T_S = 200$ °C, with surface consisting of small grains of about 100 nm in size, are examined. On the basis of the analysis of the results of AFM images, the processes of structure formation of PbTe and PbTe<Bi₂Te₃> condensates on different substrates were studied. It is shown that the processes of nucleation of semiconductor grains are dominated by the Volmer-Weber mechanism, in which three-dimensional nanoscale superstructures are formed on the surface of the substrate. A feature of the two AFM images is that the surface of the films is uniform and fine-grained. The surface morphology shows that a large number of particles are uniformly distributed throughout the surface. The surface roughness, the size of the nanocrystals in the lateral direction and their height are determined.

The structure characteristics and parameters of the crystal lattice of thin films grown by X-ray diffractometry were determined. The diffraction dependences for the PbTe<Bi₂Te₃> film are presented. It is found that the presence of sharp peaks in the diffraction patterns of pure PbTe indicates the polycrystalline nature of the films. Indices of defined crystalline planes at the peaks are indicated. The nature of the dependences is confirmed by the rock salt structure (NaCl). According to the structure studies, it has been found that increasing grain size can be seen as a columnar increase in grain in the structure.

Keywords: atomic force microscopy, pulsed laser deposition, PbTe, thin films

Исследование кристаллической структуры и морфологии поверхности тонких пленок PbTe и PbTe<Bi₂Te₃>

Ю.В. Тур, Ю.В. Павловский, И.С. Вирт

Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко
ул. Стрыйская, 3, Дрогобыч, 82100, Украина, tur2014@meta.ua
Жешувский университет
ул. С. Пигония, 1, Жешув, 35310, Польша

В работе исследованы структурные характеристики и морфология поверхности тонких пленок PbTe и пленочных композитов PbTe<Bi₂Te₃>, выращенных импульсным лазерным осаждением при $T_S = 200$ °C, поверхность которых состоит из мелких зерен размерами около 100 нм. На основе анализа результатов АСМ-изображений исследованы процессы структурообразования конденсатов PbTe и PbTe<Bi₂Te₃> на различных подложках. Показано, что в процессах зарождения зерен полупроводника доминирует механизм Фольмера-Вебера, при котором образуются трехмерные наноразмерные сверхструктуры на поверхности подложки. Характерной особенностью двух АСМ-изображений является то, что поверхность пленок является однородной и мелкозернистой. Морфология поверхности показывает, что большое количество частиц равномерно распределено по всей поверхности. Определены шероховатость поверхности, размеры нанокристаллов в латеральном направлении и их высота.

Методами рентгеновской дифрактометрии определены характеристики структуры и параметры кристаллической решетки выращенных тонких пленок. Представлены дифракционные зависимости для пленки PbTe<Bi₂Te₃>. Наличие острых пиков в дифрактограммах чистого PbTe говорит о поликристаллической природе пленок. Указаны индексы определенных кристаллических плоскостей на пиках. Характер зависимостей подтверждает структуру каменной соли (NaCl). Согласно исследованиям структуры, установлено, что увеличение размера зерен может рассматриваться как столбчатый прирост зерна в структуре.

Ключевые слова: тонкие пленки, PbTe, импульсно-лазерное осаждение, атомно-силовая микроскопия

ЛІТЕРАТУРА

1. Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectrics // *Mater. Sci. Eng. R.* – 2010. – V. 67. – P. 19–63.
2. Samavat F., Fereidouni Z., Ghaderi F. Study of the Structural Properties and Morphologies of Gold Thin Films Deposition by Annealing // *J. Biotechnol. Res.* – 2018. – V. 4, N 11. – P. 83–88.
3. Han C., Tan G., Varghese T. et al. High-Performance PbTe Thermoelectric Films by Scalable and Low-Cost Printing // *ACS Energy Lett.* – 2018. – V. 3, N 4. – P. 818–822.
4. Samoylov M., Kuzminykh O.G., Synorov Yu.V. et al. Growth Kinetics and Microstructure of PbTe Films Produced on Si and BaF₂ Substrates by a Modified Hot-Wall Method // *Inorg. Mater.* – 2018. – V. 54, N 4. – P. 338–348.
5. Zheng J.-C. Recent advances on thermoelectric materials // *Front. Phys. China.* – 2008. – V. 3, N 3. – P. 269–279.
6. Ivanova L.D. Thermoelectric materials for different temperature levels // *Semiconductors.* – 2017. – V. 51. – P. 909–912.
7. Pei Y., Wang H., Snyder G.J. Band Engineering of Thermoelectric Materials // *Adv. Mater.* – 2012. – V. 24, N 46. – P. 6125–6135.
8. Xianli Su, Ping Wei, Han Li et al. Multi-Scale Microstructural Thermoelectric Materials: Transport Behavior, Non-Equilibrium Preparation, and Applications // *Adv. Mater.* – 2017. – V. 29, N 20. – P. 160213.
9. Zhang D., Wang Y., Yang Y. Design, Performance, and Application of Thermoelectric Nanogenerators // *Small.* – 2019. – V. 15, N 32. – P. 1805241.
10. Фреїк Д.М., Ліщинський І.М., Литвин П.М. та ін. Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур PbTe на сколах слюди-мусковіт // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2008. – Т. 9, № 4. – С. 736–743.
11. Фреїк Д.М., Литвин П.М., Чав'як І.І. та ін. Процеси росту нанорозмірних структур PbTe і оствальдівське дозрівання // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2009. – Т.10, № 4. – С. 789–799.
12. Jacquot A., Lenoir B., Boffou M.O., Dauscher A. Pulsed laser deposition of PbTe films on glass substrates // *Appl. Phys. A.* – 2009. – V. 69. – P. 613–615.
13. Belouet C. Thin film growth by the pulsed laser assisted deposition technique // *Appl. Surf. Sci.* – 1996. – V. 96–98. – P. 630–642.
14. Dobson J.F., Gould T. Calculation of dispersion energies // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2012. – V. 24, N 7. – P. 073201.
15. Denisyuk A.I., Krasavin A.V., Komissarenko F.E., Mukhin I.S. Mechanical, Electrostatic, and Electromagnetic Manipulation of Microobjects and Nanoobjects in Electron Microscopes // *Advances in Imaging and Electron Physics.* – 2014. – V. 186. – P. 101–140.
16. Ponchet A., Patriarche G., Rodriguez J.B. et al. Interface energy analysis of III–V islands on Si (001) in the Volmer-Weber growth mode // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. – V. 113, N 19. – P. 191601-1.
17. Sarkar R., Rajagopalan J. Synthesis of thin films with highly tailored microstructures // *Mater. Res. Lett.* – 2018. – V. 6, N 7. – P. 398–405.
18. Manonmani Parvathi M., Arivazhagan V., Rajesh S. Quantum size effect on cubic PbTe nanocrystals embedded in amorphous InSe thin film matrix // *Superlattices Microstruct.* – 2014. – V. 75. – P. 901–907.
19. Mahalingam T., Thanikaikarasan S., Sundaram K. et al. Electrochemical Deposition and Characterization of Lead Telluride Thin Film // *J. New Mater. Electrochem. Syst.* – 2010. – V. 13, N 1. – P. 35–39.
20. Jacquot A., Lenoir B., Boffou'e M.O., Dauscher A. Pulsed laser deposition of PbTe films on glass substrates // *Appl. Phys. A.* – 1999. – V. 69. – P. 613–615.
21. Mei D., Li Y., Yao Z., Wang H. et al. Enhanced thermoelectric performance of n-type PbTe bulk materials fabricated by semisolid powder processing // *J. Alloys Compd.* – 2014. – V. 609. – P. 201–205.

REFERENCES

1. Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectrics. *Mater. Sci. Eng. R.* 2010. **67**: 19.
2. Samavat F., Fereidouni Z., Ghaderi F. Study of the Structural Properties and Morphologies of Gold Thin Films Deposition by Annealing. *J. Biotechnol. Res.* 2018. **4**(11): 83.
3. Han C., Tan G., Varghese T., Kanatzidis M.G., Zhang Y. High-Performance PbTe Thermoelectric Films by Scalable and Low-Cost Printing. *ACS Energy Lett.* 2018. **3**(4): 818.
4. Samoylov M., Kuzminykh O.G., Synorov Yu.V., Belonogov E.K., Belenko S.V., Agapov B.L. Growth Kinetics and Microstructure of PbTe Films Produced on Si and BaF₂ Substrates by a Modified Hot-Wall Method. *Inorg. Mater.* 2018. **54**(4): 338.

5. Zheng J.-C. Recent advances on thermoelectric materials. *Front. Phys. China*. 2008. **3**(3): 269.
6. Ivanova L.D. Thermoelectric materials for different temperature levels. *Semiconductors*. 2017. **51**: 909.
7. Pei Y., Wang H., Snyder G.J. Band Engineering of Thermoelectric Materials. *Adv. Mater.* 2012. **24**(46): 6125.
8. Xianli Su, Ping Wei, Han Li, Wei Liu, Yonggao Yan, Peng Li, Chuqi Su, Changjun Xie, Wenyu Zhao, Pengcheng Zhai, Qingjie Zhang, Xinfeng Tang, Ctirad Uher. Multi-Scale Microstructural Thermoelectric Materials: Transport Behavior, Non-Equilibrium Preparation, and Applications. *Adv. Mater.* 2017. **29**(20): 1602013.
9. Zhang D., Wang Y., Yang Y. Design, Performance, and Application of Thermoelectric Nanogenerators. *Small*. 2019. **15**(32): 1805241.
10. Freik D.M., Lishchynskyi I.M., Lytvyn P.M., Bachuk V.V. Surface, Topology and Growth Processes of PbTe Nanocrystalline. Structures on Mica-Muscovite Cleavages Substrate. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2008. **9**: 736. [in Ukrainian].
11. Freik D.M., Litvin P.M., Chav'jak I.I., Lishhins'kij I.M., Bachuk V.V. The processes of growth of nanoscale structures PbTe and ripening ostwald. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2009. **10**(4): 789. [in Ukrainian].
12. Jacquot A., Lenoir B., Boffou M.O., Dauscher A. Pulsed laser deposition of PbTe films on glass substrates. *Appl. Phys. A*. 2009. **69**: 613.
13. Belouet C. Thin film growth by the pulsed laser assisted deposition technique. *Appl. Surf. Sci.* 1996. **96–98**: 630.
14. Dobson J.F., Gould T. Calculation of dispersion energies. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2012. **24**(7): 073201.
15. Denisyuk A.I., Krasavin A.V., Komissarenko F.E., Mukhin I.S. Mechanical, Electrostatic, and Electromagnetic Manipulation of Microobjects and Nanoobjects in Electron Microscopes. *Advances in Imaging and Electron Physics*. 2014. **186**: 101.
16. Ponchet A., Patriarche G., Rodriguez J.B., Cerutti L., Tourni E. Interface energy analysis of III–V islands on Si (001) in the Volmer-Weber growth mode. *Appl. Phys. Lett.* 2018. **113**(19): 191601-1.
17. Sarkar R., Rajagopalan J. Synthesis of thin films with highly tailored microstructures. *Mater. Res. Lett.* 2018. **6**(7): 398.
18. Manonmani Parvathi M., Arivazhagan V., Rajesh S. Quantum size effect on cubic PbTe nanocrystals embedded in amorphous InSe thin film matrix. *Superlattices Microstruct.* 2014. **75**: 901.
19. Mahalingam T., Thanikaikarasan S., Sundaram K., Raja M., Rhee J.-K. Electrochemical Deposition and Characterization of Lead Telluride Thin Film. *J. New Mater. Electrochem. Syst.* 2010. **13**(1): 35.
20. Jacquot A., Lenoir B., Boffou'e M.O., Dauscher A. Pulsed laser deposition of PbTe films on glass substrates. *Appl. Phys. A*. 1999. **69**: 613.
21. Mei D., Li Y., Yao Z., Wang H., Zhu T., Chen S. Enhanced thermoelectric performance of n-type PbTe bulk materials fabricated by semisolid powder processing. *J. Alloys Compd.* 2014. **609**: 201.

Надійшла 08.12.2019, прийнята 25.05.2020