

СТРУКТУРА, ОПТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАРОФАЗНИХ КОНДЕНСАТІВ PbTe:Bi НА СЛЮДІ

Д. М. Фреїк¹, І. С. Биліна¹, Г. Д. Матеїк², В. В. Бачук¹, Т. С. Люба³

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна

³Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
Кам'янець-Подільський, Україна

Надійшла до редакції 15. 01. 2014

Представлено результати дослідження процесів структуроутворення у парофазних конденсатах PbTe: 0,1 ат. % Bi, отриманих випаровуванням наважок із синтезованих сполук у відкритому вакуумі та осадженням їх пари на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт марки СТА. Встановлено особливості їх зародження і росту за різних температур $T_{\text{п}} = (420—470)$ К і часу $\tau = (240—1200)$ с осадження. Досліджено спектральні оптичні властивості у діапазоні частот $(225—6000)$ см⁻¹, а також електричні параметри структур. Вияснено механізми донорного впливу домішок вісмуту на електричні властивості конденсатів.

Ключові слова: парофазні конденсати, плумбум телурид, структура, фізичні властивості.

СТРУКТУРА, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРОФАЗНЫХ КОНДЕНСАТОВ PbTe:Bi НА СЛЮДЕ

Д. М. Фреїк, І. С. Былина, Г. Д. Матэйк, В. В. Бачук, Т. С. Люба

Представлены результаты исследования процессов структурообразования в парофазных конденсатах PbTe: 0,1 ат. % Bi, полученных испарением навесок из синтезированных соединений в открытом вакууме и осаднением их пары на свежие сколы (0001) слюды-мусковит марки СТА. Установлены особенности их зарождения и роста при различных температурах $T_{\text{п}} = (420—470)$ К и времени $\tau = (240—1200)$ с осаднения. Исследованы спектральные оптические свойства в диапазоне частот $(225—6000)$ см⁻¹, а также электрические параметры структур. Выяснено механизмы донорного влияния примесей висмута на электрические свойства конденсатов.

Ключевые слова: парофазные конденсаты, теллурид свинца, структура, физические свойства.

THE STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF VAPOR-PHASE CONDENSATES PbTe:Bi ON MICA

D. M. Freik, I. S. Bylina, G. D. Mateik, V. V. Bachuk, T. S. Luba

Presented by results of the study of structure formation processes in vapor-phase condensates PbTe: 0,1 ат. % Bi, obtained by evaporation sample of the synthesized compounds in open vacuum and deposition of vapor on fresh chips (0001) mica-muscovite brand STA. Established features their nucleation and growth at different temperatures $T_{\text{с}} = (420—470)$ K and time $\tau = (240—1200)$ s deposition. Investigated spectral optical properties in the frequency range $(225—6000)$ cm⁻¹ and the electrical parameters of the structure. Clarified the mechanisms of donor influence impurities of bismuth on the electrical properties of condensates.

Keywords: vapor-phase condensates, lead telluride, structure, physical properties.

ВСТУП

Плумбум телурид PbTe — перспективний термоелектричний матеріал для середньої області температур $(500—750)$ К та пристроїв, що функціонують в інфрачервоній області оптичного спектру [1, 2].

Легування PbTe гетеровалентними домішками п'ятої групи (Bi, Sb) Періодичної таблиці зумовлює модифікацію електронної та фононної підсистем кристалу, що впливає на цілий комплекс фізико-хімічних властивостей [2—5].

В останній час різко зріс інтерес до тонкоплівкового стану цих матеріалів, який значно розширює спектр практичного використання в мікро- та наноелектроніці [6—10].

Так, зокрема, малі ефективні маси носіїв заряду і високі значення діелектричної проникності забезпечують реалізацію умов локалізації носіїв і розмірного квантування.

Для отримання тонкоплівкових парофазних конденсатів на основі сполук IV—VI, до яких відноситься і PbTe, широко використовують вакуумні методи, які вигідно відрізняються своєю технологічністю [11, 12].

Однак, ще зараз залишаються до кінця не розв'язаними як особливості формування конденсатів, їх властивості, так і проблеми стабільності у часі їх електричних параметрів.

Так, зокрема, при контакті із киснем на поверхні конденсатів утворюється шар *p*-типу провідності, який впливає, у тому числі, і на інтегральні електричні характеристики.

У даній роботі досліджено процеси формування, оптичні та електричні властивості тонких плівок PbTe:Bi, осаджених у відкритому вакуумі на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки для дослідження отримували осадженням пари у вакуумі на свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт марки СТА із наперед синтезованої сполуки PbTe:Bi із 0,1 ат. % Bi. Температура випарника складала $T_{\text{в}} = 970$ К, а температура підкладок під час осадження $T_{\text{п}} = (420—470)$ К.

Товщину плівок задавали часом осадження в межах $\tau = (240—1200)$ с та вимірювали за допомогою мікроінтерферометра МІІ-4.

Отриманий конденсат досліджували на атомно-силовому мікроскопі (АСМ) марки Nanoscope 3a Dimension 3000 (Digital Instruments USA) у режимі періодичного контакту.

Вимірювання проведені в центральній частині взірців з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом закруглення вістря до 10 нм (NT0MDT, Росія).

За результатами АСМ-досліджень, крім морфології поверхні та профілограм, у програмі Gwyddion визначені розміри нанокристалів у латеральному напрямку, їх висоту та шорсткість поверхні, а також середні значення полярних (ρ) і азимутальних (φ) кутів окремих наноутворень (рис. 1).

Технологічні умови отримання та деякі морфологічні параметри парофазних конденсатів PbTe:Bi на слюді наведено у таблиці.

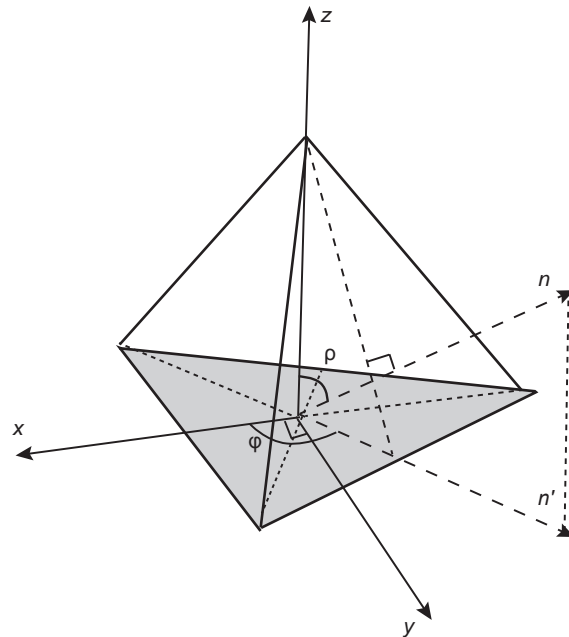


Рис. 1. Полярний (ρ) і азимутальний (φ) кути граней тригональної піраміди для нанокристалів у структурах PbTe:Bi/(0001) слюда

Інфрачервоні спектри реєструвалися ІЧ-Фур'є спектрометром Nexus (Thermo Nicolet, США) з приставкою дзеркального відображення під кутом 20 градусів в діапазоні частот (225—6000) см^{-1} , з роздільною здатністю 2 см^{-1} при числі сканувань 128.

Вимірювання електричних параметрів плівок проводилося на повітрі при кімнатних температурах у постійних магнітних полях. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти.

В якості омичних контактів використовувалися плівки срібла. Струм через зразки складав ~ 1 мА.

Магнітне поле було напрямлене перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 1,5 Тл.

Технологічні фактори та основні структурні параметри деяких конденсатів РbTe/(0001) слюда. Температура випаровування $T_B = 970$ К

№ зразка	Температура підкладки, $T_{\text{п}}$, К	Час напilenня, τ , с	h_c , нм	D_c , нм	R_a , нм
1	470	240	12	28	1,4
2	470	300	16	41	1,8
3	470	420	17	48	1,9
4	470	900	47	62	2,3
5	470	1200	60	68	3,1
6	420	300	18	55	1,0
7	420	900	35	63	1,2

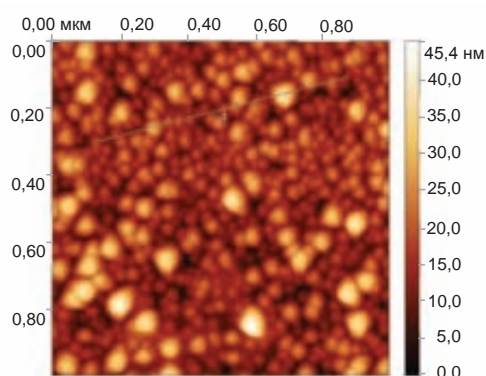
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Структура плівок

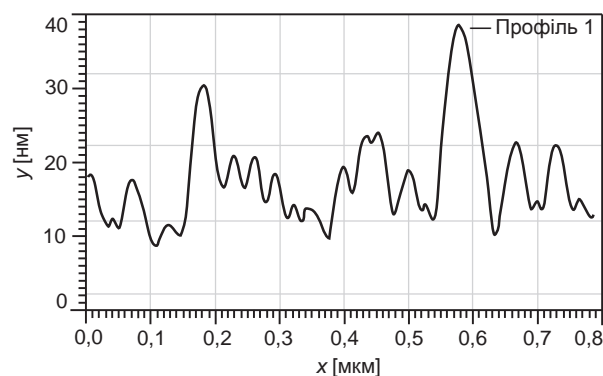
АСМ-зображення та профілограми конденсатів РbTe:Ві, а також результати їх аналізу наведено на рис. 1—5.

Видно (рис. 2, 3, 5), що одержані структури сформовані з нанорозмірних кристалітів

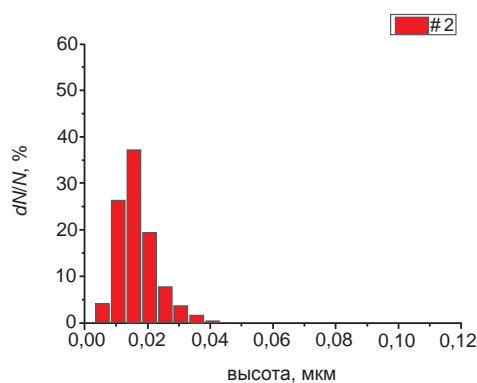
пірамідальної форми. Середні розміри кристалітів у нормальному до поверхні напрямку у залежності від технологічних факторів складають $h_c = (12—60)$ нм, а у латеральному $D_c = (28—68)$ нм (рис. 1, 2; табл. 1). Зауважимо, що при парофазному рості, як правило, мають місце морфологічні зміни поверхні шарів за рахунок механічних напружень, які



а



б



в

Г

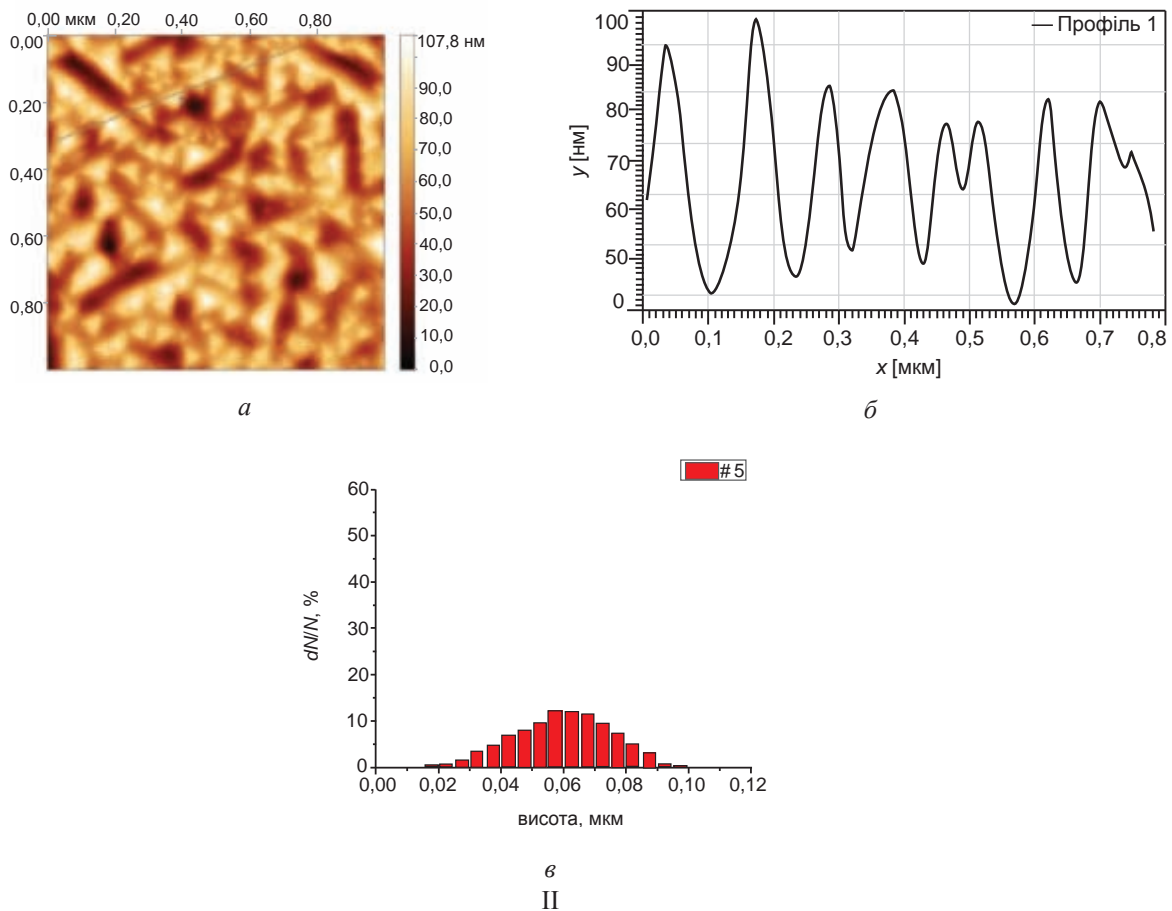


Рис. 2. 2D АСМ-зображення (а) і профілограми (б) поверхні та гістограми розподілу нанокристалітів за висотою (в) у конденсатах РЬТЕ:ВІ/(0001) слюда, одержаних при часі осадження τ , с: 300 — I (зразок № 2), 1200 — II (зразок № 5); температура випарування $T_B = 970$ К, температура підкладки $T_{II} = 470$ К (табл.)

зумовлені невідповідностями у сталих гра-ток, коефіцієнтів лінійного розширення кон-денсатів та підкладок, на які вони нанося-ться. При цьому фронт росту залишається плоским лише до досягнення деякої критич-ної товщини шару (приблизно в декілька мо-ношарів (ML)).

Після чого настають умови, за яких відбувається поява хвилястого фронту або навіть деяких виступів (у вигляді пірамід, що мають нанорозміри (рис. 2, 3, 5)).

Вони забезпечують зменшення пружної енергії системи «конденсат-підкладка» і по-являється можливість процесів самоорганіза-ції. Саме цими обставинами забезпечується перехід від 2D- до 3D-наноутворень у меха-нізмі росту за Странскі- Крастанова [13].

Розмір, форма і густина пірамід на повер-хні залежать від температури підкладки й умов, що забезпечують формування тільки 2 D-(Франка-Ван дер Мерве) або 3 D-(Фоль-мера—Вебера) структур відповідно [13]. За-гальною характерною рисою формування

наноструктур із збільшенням часу осаджен-ня τ (рис. 2, 4; табл. 1) та температури оса-дження T_{II} (рис. 3; табл. 1) є зростання як нормальних до поверхні, так і латеральних розмірів окремих нанокристалітів. Середня шорсткість R_a поверхонь конденсату адекватно змінюється із розмірами наноутворень і знаходиться у межах $R_a = (1,0—3,1)$ нм (рис. 4; табл. 1).

Слід зауважити, що найбільш сформовану кристалічну структуру мають окремі нано-кристаліти, осаджені за високих температур підкладок $T_{II} = 470$ К на пізніх етапах оса-дження пари $\tau = (900—1200)$ с (рис. 2 — II; рис. 3 — II). При цьому окремі нанокриста-літи мають класичну пірамідальну форму із бічними гранями $\{100\}$ і основою $\{111\}$ па-ралельною до поверхні підкладки — сколів (0001) монокристалів слюди.

Зауважимо, що взаємне розміщення три-гранних пірамід наноутворень РЬТЕ:ВІ на поверхні підкладки визначається орієнтацій-ним впливом трьох симетричних напрямків

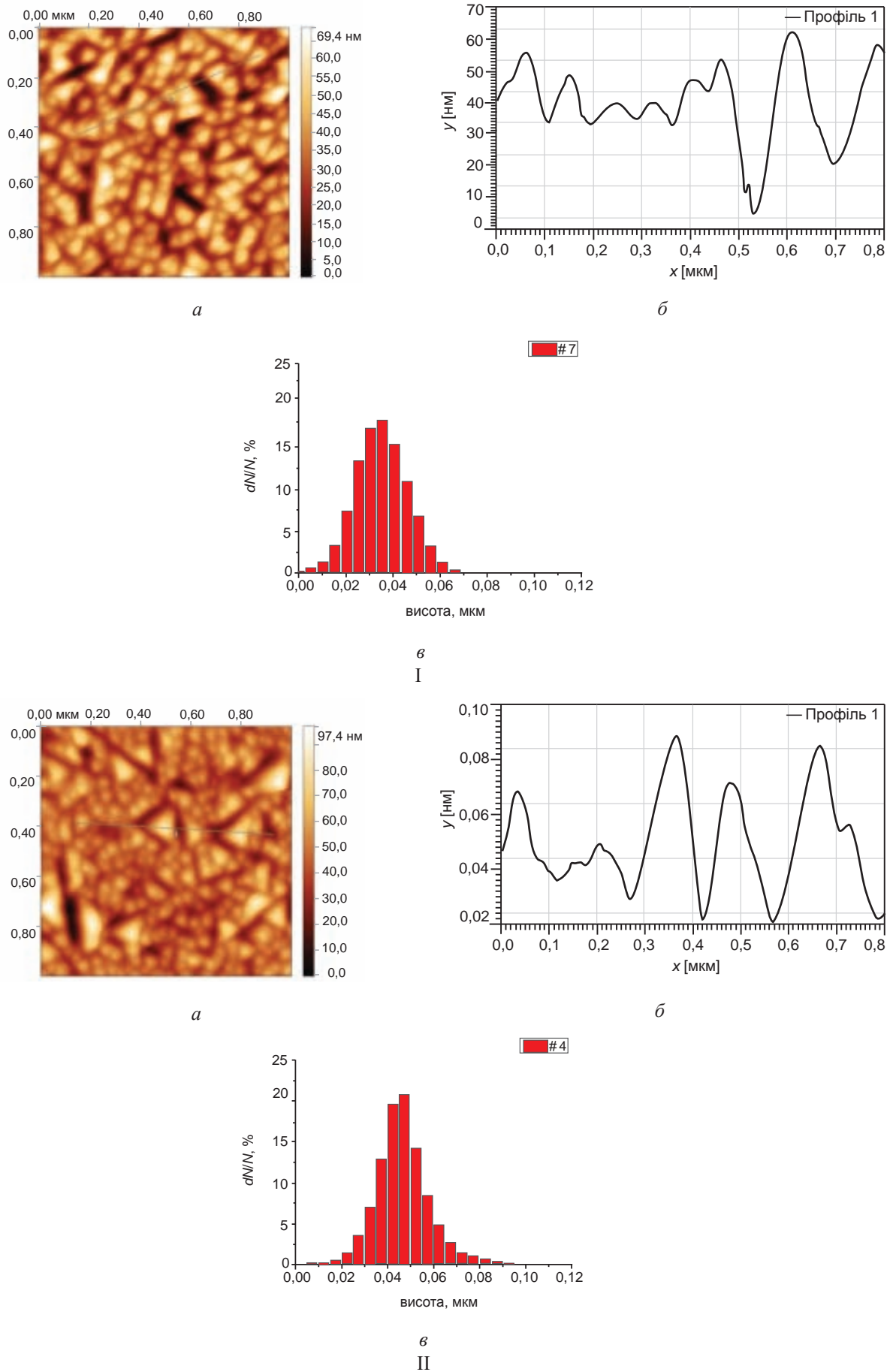


Рис. 3. 2D АСМ-зображення (а) і профілограми (б) поверхні та гістограми розподілу нанокристалітів за висотою (в) у конденсатах РbТе:Vi/(0001) слюда, одержаних при температурах підкладки T_{II} , К: 420 — I (зразок № 7), 470 — II (зразок № 4); температура випарування $T_B = 970$ К, час осадження $\tau = 900$ с (табл. 1)

у площині сколу (0001) слюди—мусковіт — $[2\bar{1}\bar{1}0]$, $[\bar{1}2\bar{1}0]$, $[\bar{1}\bar{1}20]$.

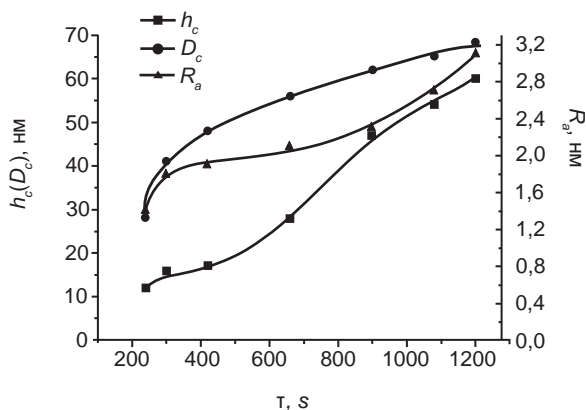
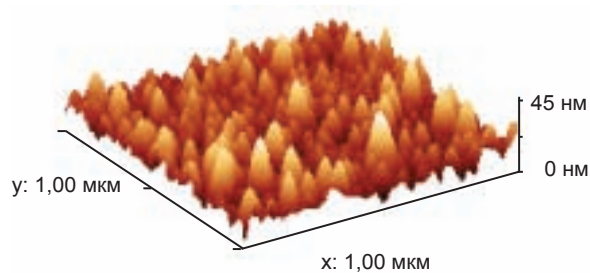


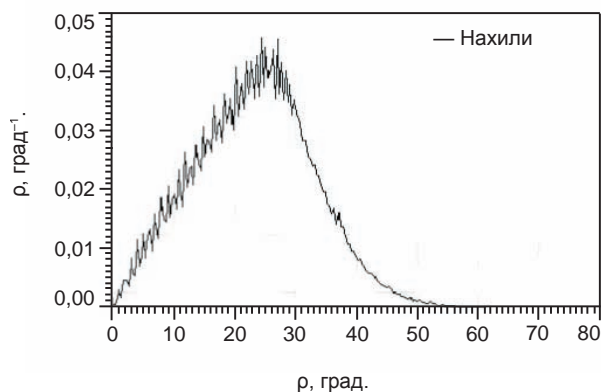
Рис. 4. Залежності середніх висот (h_c), латеральних розмірів (D_c) та шорсткості (R_a) парофазних конденсатів РbTe:Bi/(0001) слюда від часу осадження τ , за температури випаровування $T_B = 970$ К, температури осадження $T_{II} = 470$ К (табл.)

Відзначений орієнтаційний характер розміщення нанокристалітів підтверджується як АСМ-зображенням (рис. 2; 3 — *a*), так і розподілом азимутальних кутів нахилу ρ (рис. 5: I, II — *b*, *z*).

Відзначена кристалічна форма нанокристалітів відповідає мінімальній вільній поверхневій енергії, яка є характерною для кристалів із структурою NaCl, у якій кристалізується п्लумбум телурид.



a



b

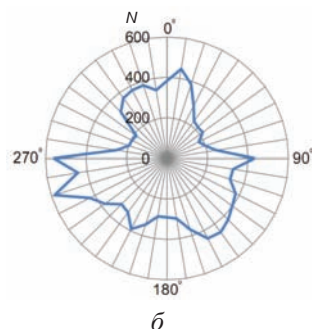
Для аналізу азимутального кута ϕ (рис. 1) використано як колові діаграми (рис. 5: I, II — *b*), так і зображення їх розподілу за кутами (рис. 5: I, II — *z*). Видно, що при температурі підкладки $T_{II} = 470$ К та значному часі осадження $\tau = 1200$ с характерними є кути кратні $\phi \approx 60^\circ$ (рис. 5: II — *b*, *z*).

Що стосується початкових етапів осадження, за сталої температури осадження T_{II} , то тут не спостерігається такої залежності (рис. 5: I — *b*, *z*). Дещо аналогічна залежність має місце за середніх часів осадження ($\tau = 900$ с) при підвищенні температури осадження T_{II} .

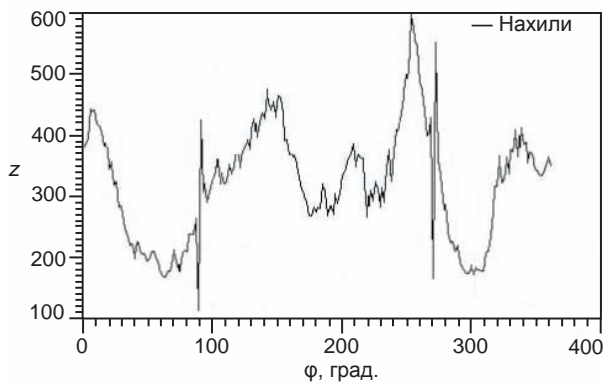
Таким чином, за відзначених умов формуються нанокристали з тригональною симетрією у перерізі, паралельному до підкладки, що є характерним для структур кубічної сингонії.

Із представлених розподілів полярних кутів ρ (рис. 1) поверхонь нанокристалів (рис. 5: I, II — *b*), видно, що із збільшенням часу осадження максимум розподілу для $T_{II} = 470$ К, зміщується в область більших значень кутів.

Така ж сама поведінка у зміні полярного кута ρ має місце і при підвищенні температури осадження T_{II} за сталого часу τ осадження, що вказує на зростання стрімкості граней

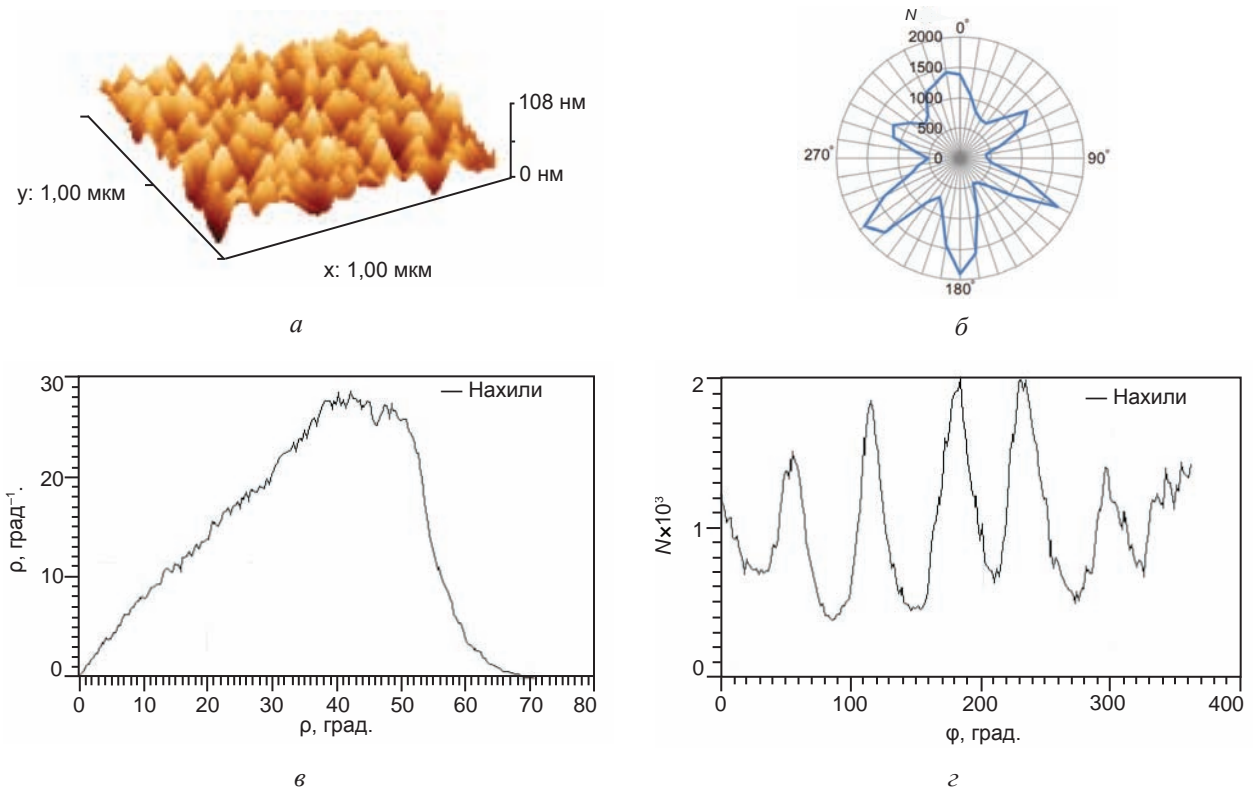


b



z

I



II

Рис. 5. 3D АСМ-зображення (а), колові діаграми (б) та розподіли азимутального φ (с) і полярного ρ (д) кутів структур PbTe:Bi/(0001) слюда, одержаних при часі осадження τ , с: 300 — I (зразок № 2), 1200 — II (зразок № 5); температура випарування $T_B = 970$ К, температура підкладки $T_{II} = 470$ К (табл.)

нанокристалітів відносно поверхні підкладок. Останнє є характерним для огранених кристалічних структур із тригональною симетрією, що, між іншим, підтверджується збільшенням величини шорсткості поверхонь (рис. 4, табл. 1), яка адекватно зростає із ростом величини нанокристалітів.

Спектральні характеристики

Оптичні спектри ряду досліджуваних конденсатів, як видно із рис. 6, а, мають інтенсивні інтерференційні смуги. Для конденсатів найменшої товщини $d = (0,08—0,90)$ мкм, крім сигналу безпосередньо від плівок, у спектрі також спостерігаються лінії

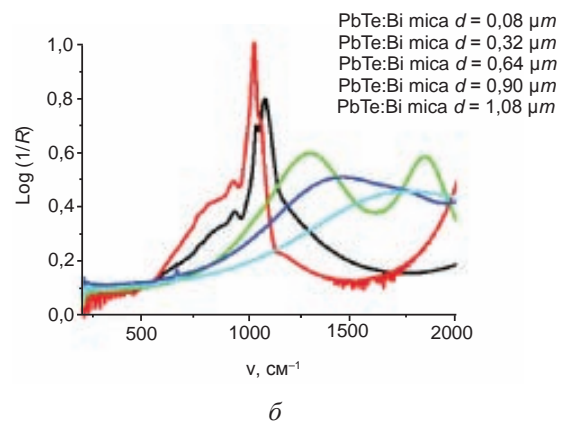
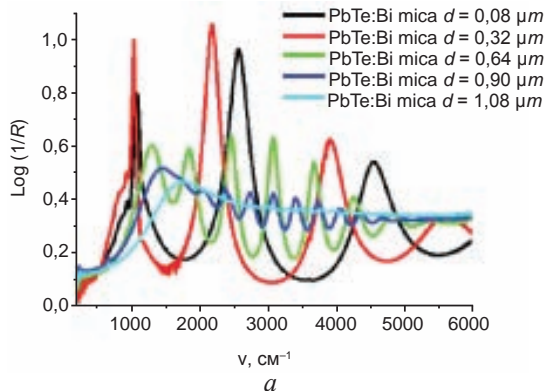


Рис. 6. ІЧ спектри «поглинання—відбивання» конденсатів PbTe:Bi/(0001) слюда різної товщини у всьому (а) та обмеженому (б) діапазоні частот



відбивання слюди ($\nu \approx 1030$ cm^{-1}), що відповідає коливанням зв'язків Si-O [14]. З ростом товщини конденсату інтенсивність цієї лінії зменшується і при товщині $d \approx 1,08$ мкм вона спостерігається тільки у вигляді слабого плеча (рис. 6, б).

У зв'язку із вище відзначеним для таких конденсатів оптичні спектри слід кваліфікувати, як «поглинання-відбивання». Ширина забороненої зони визначена із таких спектрів

«поглинання-відбивання» у залежності від товщини конденсатів складає $E_g = (0,11—0,14)$ eV (рис. 7). В якості закономірності можна відзначити, що значення E_g , отримані для конденсатів PbTe:Bi на слюді, виявилися більшими, ніж для аналогічних плівок на підкладках зі скла.

Цей факт може бути пояснений впливом теплопровідності підкладок на процес формування конденсатів, а також взаємозв'язком досконалості їх структури і крутизни краю власного поглинання.

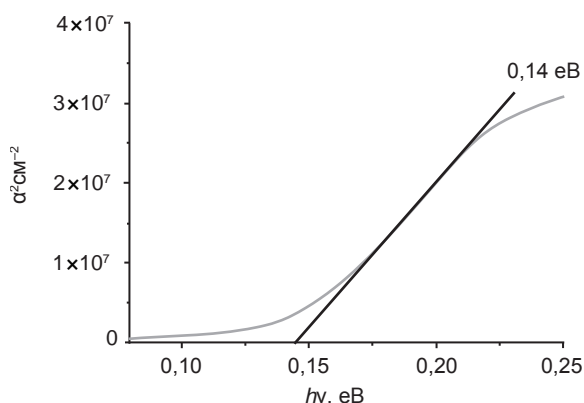


Рис. 7. Залежність квадрата коефіцієнта поглинання (α^2) від енергії падаючого випромінювання ($h\nu$) для конденсатів PbTe:Bi/(0001) слюда товщиною 2,43 мкм

Чим вища теплопровідність підкладки, тим більша швидкість охолодження на ній осадженого конденсату, і, як наслідок, тим гірші умови для утворення нанокристалів — структура буде менш досконалою [12], а край довгохвильового поглинання більш пологим, і значення ширини забороненої зони менше (за інших рівних умов) відповідно.

Це узгоджується з меншим значенням теплопровідності для слюди ($\chi = 0,24$ Вт/м К) у порівнянні із скляними підкладками ($\chi = 0,92$ Вт/м К) [10]. Зауважимо, що отримані значення ширини забороненої зони досліджуваних структур у 2—3 рази менші, ніж значення E_g нелегованих кристалів пльомбум телуриду (0,32 eV [1]).

Електричні властивості

Залежності питомої провідності (σ), коефіцієнта Холла (R_n) і рухливості (μ) носіїв струму структур PbTe:Bi різної товщини від часу витримки на повітрі зображено на рис. 8.

Видно, що питома електропровідність σ тонких структур (0,08 — 0,64) мкм (рис. 8, а

— криві 1—3) на два порядки вища ніж товстих (0,9—1,75) мкм (рис. 8, а — криві 4—7).

При цьому з часом витримки провідність перших дещо зменшується, а других — практично не змінюється.

Холлівська концентрація носіїв струму, навпаки, для тонких структур практично не змінюється, а для товстих дещо зменшується з часом (рис. 8, б).

Рухливість носіїв при цьому для тонких структур на початкових етапах витримки більша ніж для товстих і дещо зменшується з часом (рис. 8, в). Коефіцієнт Зеебека для більшості структур є сталим у часі, і для структур товщиною $\sim 0,32$ мкм досягає максимальних значень ~ 200 мкВ/К (рис. 8, г — крива 2). Аналізуючи отримані результати досліджень електричних властивостей конденсатів PbTe:Bi (рис. 8) слід відзначити наступні особливості.

Легування вісмутом зумовлює активну донорну дію у пльомбум телуриді, яка виявляється у значному зростанні концентрації електронів, аж до значень $6 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$. Зауважимо, що у плівках чистого PbTe вона, як правило, лежить у межах (10^{17} — 10^{18}) см $^{-3}$ [4]. Витримка і відпал на повітрі легованих *n*-PbTe:Bi конденсатів суттєво не впливає на зміну концентрації носіїв і не веде до зміни типу провідності з *n*- на *p*-тип, як це має місце для нелегованого тонкоплівкового матеріалу PbTe [4].

Крім того холлівська рухливість носіїв заряду тонких наноструктур у декілька разів вища ніж у товстих, а кисень призводить до змін у електричних параметрах тільки у при поверхневих шарах товщиною $\sim 0,01$ мкм.

Відзначені факти можна пояснити тим, що трьохвалентна домішка атома бісмуту (конфігурація валентних електронів $6s^2 6p^3$), заміщуючи йони Pb $^{2+}$ у кристалічній ґратці пльомбум телуриду ($\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Bi}_{\text{Pb}}^+$) віддає вільний від хімічного зв'язку електрон у зону провідності, що є причиною її донорної дії та великої концентрації носіїв, яку важко компенсувати акцепторним впливом кисню.

Високі значення коефіцієнта Зеебека у поєднанні із значною електропровідністю і їх стабільність у часі роблять тонкоплівковий матеріал *n*-PbTe:Bi перспективним для

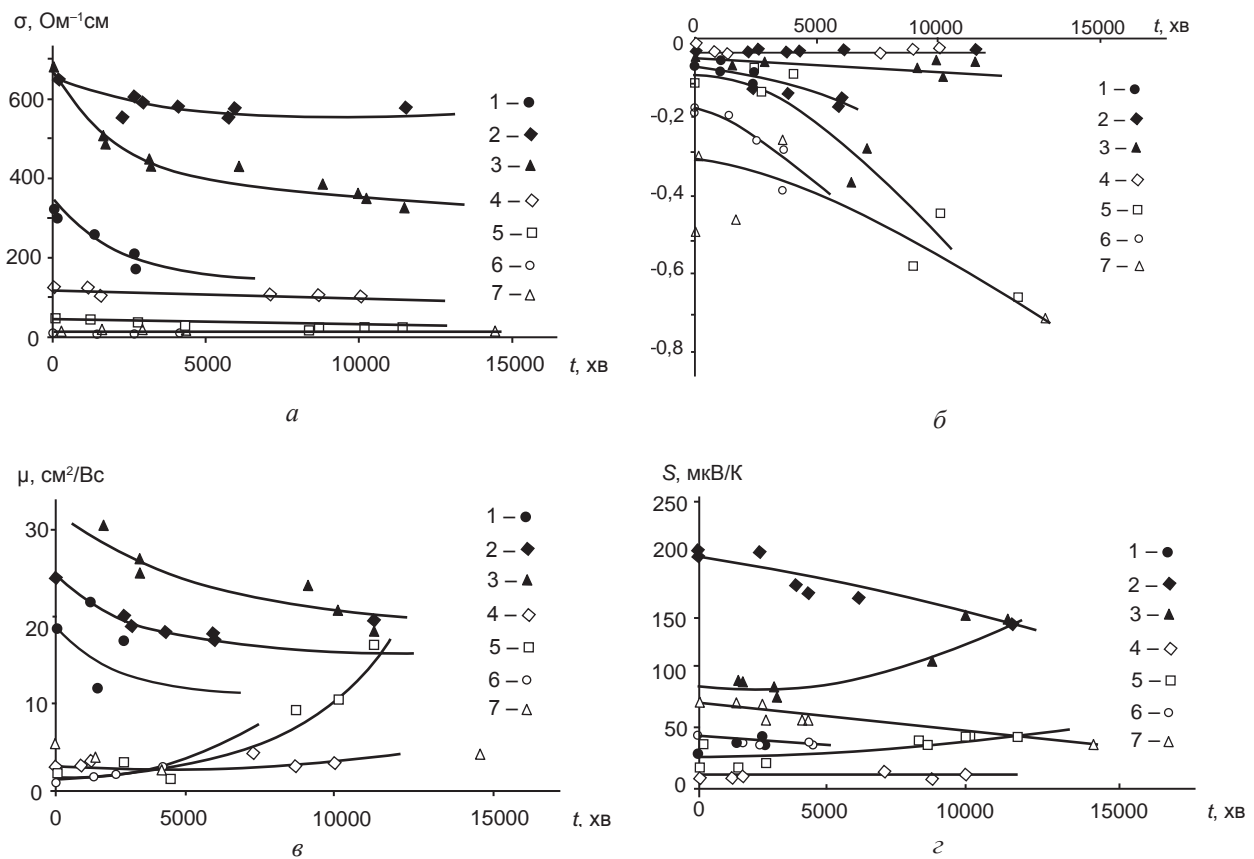


Рис. 8. Залежність питомої провідності σ (а), коефіцієнта Холла (δ), рухливості носіїв струму μ (в), коефіцієнт Зеебека S (г) від часу витримки на повітрі конденсатів PbTe:Bi/(0001) слюда-мусковіт різної товщини d , мкм: 1—0,08; 2—0,32; 3—0,64; 4—0,9; 5—1,08; 6—1,62; 7—1,75

використання у пристроях термоелектричного перетворення енергії.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено процеси формування, структура та оптичні і електричні властивості парофазних конденсатів PbTe: 0,1 ат. % Bi на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт.
2. Показано, що конденсат представлений нанокристалітами пірамідальної форми із переважною орієнтацією, яка визначається кристалографічною симетрією площини (0001) сколів підкладки із монокристалів слюди.
3. Представлено ІЧ-спектри «поглинання-відбивання» і визначена ширина забороненої зони та встановлено зміни у електричних параметрах конденсатів різної товщини при їх витримці на повітрі.
4. Показано, що n -тип провідності і висока концентрація електронів конденсатів зумовлена донорним впливом домішки вісмуту, яка заміщає атоми плумбуму основної сполуки PbTe ($\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Bi}^+_{\text{Pb}}$).

Робота виконана згідно комплексного наукового проекту МОН України (державний реєстраційний номер 0113U000185), та ДФФД України (державний реєстраційний номер 0113U003689) та у рамках програми «Наука заради миру» Відділу Публічної Дипломатії НАТО (NUKR.SFPP984536).

ЛІТЕРАТУРА

1. Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS. — М.: «Наука», 1968. — 384 с.
2. Абрикосов Н. Х., Шелимова Л. Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений A^4B^6 . — М.: «Наука», 1975. — 195 с.
3. Шперун В. М., Фрейк Д. М., Запужляк Р. І. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів. — Івано-Франківськ: «Плай», 2000. — 202 с.
4. Рогачева Е. И., Лаптев С. А., Плоская В. С. Твердые растворы на основе PbTe в системе Pb-Bi-Te // Изв. АН СССР. Неорг. Матер. — 1984. — Т. 20, № 8. — С. 1350—1353.
5. Фрейк Д. М., Дзундза Б. С., Яворський Я. С.,

- Межиловська Л. Й. Вплив поверхні та міжзеренних меж на розсіювання носіїв струму у парофазних конденсатах твердих розчинів PbTe-Sb₂(Bi₂)Te₃ // ФХТТ. — 2013. — Т. 14, № 1. — С. 82—85.
6. Атакулов Ш. Б., Отажонов С. М., Расулов Р. Т., Розіохунова Н., Илхомжуаева Х. Термоэлектрическая эффективность пленок теллурида свинца при легировании элементами V группы. // ФИП. — 2009. — Т. 7, № 1—2. — С. 119—122.
 7. Шик А. Я., Бакуева Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С. А. Физика низкоразмерных систем. — М.: «Наука», 2001. — 156 с.
 8. Zemel J. N. Recent developments in epitaxial IV—VI films // J. Luminescence. — 1973. — No. 7. — P. 524—534.
 9. Зимин С. П., Горлачев Е. С. Наноструктурированные халькогениды свинца. — Я.: «ЯрГУ», 2011. — 230 с.
 10. Андриевский Р. А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы. — М.: «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2012. — 256 с.
 11. Бубнов Ю. З., Лур'є М. С., Старос Ф. Г., Филаретов Г. А. Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме. — Л.: «Энергия», 1975. — 161 с.
 12. Фреик Д. М., Галушак М. А., Межиловская Л. И. Физика и технология полупроводниковых пленок. — Л.: «Вища школа», 1988. — 152 с.
 13. Волков С. В., Ковальчук Є. П., Огенко В. М., Решетняк О. В. Нанохімія, наносистеми, наноматеріали. — К.: «Наукова думка», 2008. — 672 с.
 14. Шишелова Т. И., Созинова Т. В. Практикум по спектроскопии. Вода в минералах: учебное пособие. — М.: «Академия естествознания», 2010. — 210 с.
 3. Shperun V. M., Freik D. M., Zapuhlyak R. I. Termoelektrika teluridu svincyu ta jogo analogiv. — Ivano-Frankivs'k: «Plaj», 2000. — 202 p.
 4. Rogacheva E. I., Laptev S. A., Ploskaya V. S. Tverdye rastvory na osnove PbTe v sisteme Pb-Bi-Te // Izv. AN SSSR. Neorg. Mater. — 1984. — Vol. 20, No. 8. — P. 1350—1353.
 5. Freik D. M., Dzundza B. S., Yavors'kij Ya. S., Mezhilovs'ka L. J. Vpliv poverhni ta mizhzerennih mezh na rozsiyuvannya nosiiv strumu u parofaznih kondensatah tverdih rozchiniv PbTe-Sb₂(Bi₂)Te₃ // FHTT. — 2013. — Vol. 14, No. 1. — P. 82—85.
 6. Atakulov Sh. B., Otazhonov S. M., Rasulov R. T., Roziohunova N., Ilhomhuzhaeva H. Termoelektricheskaya effektivnost' plenok tellurida svinca pri legirovanii elementami V gruppy. // FIP. — 2009. — Vol. 7, No. 1—2. — P. 119—122.
 7. Shik A. Ya., Bakueva L. G., Musihin S. F., Rykov S. A. Fizika nizkorazmernih sistem. — М.: «Nauka», 2001. — 156 p.
 8. Zemel J. N. Recent developments in epitaxial IV—VI films // J. Luminescence. — 1973. — No. 7. — P. 524—534.
 9. Zimin S. P., Gorlachev E. S. Nanostrukturirovanye hal'kogenidy svinca. — Ya.: «YarGU», 2011. — 230 p.
 10. Andrievskij R. A. Osnovy nanostrukturnogo materialovedeniya. Vozmozhnosti i problemy. — М.: «BINOM. Laboratoriya znaniy», 2012. — 256 p.
 11. Bubnov Yu. Z., Lur'є M. S., Staros F. G., Filaretov G. A. Vakuumnoe nanesenie plenok v kvazizamknutom obeme. — L.: «Energiya», 1975. — 161 p.
 12. Freik D. M., Galuschak M. A., Mezhilovskaya L. I. Fizika i tehnologiya poluprovodnikovyh plenok. — L.: «Vischa shkola», 1988. — 152 p.
 13. Volkov S. V., Koval'chuk Є. P., Ogenko V. M., Reshetnyak O. V. Nanohimiya, nanosistemi, nanomateriali. — К.: «Naukova dumka», 2008. — 672 p.
 14. Shishelova T. I., Sozinova T. V. Praktikum po spektroskopii. Voda v mineralah: uchebnoe posobie. — М.: «Akademiya estestvoznaniya», 2010. — 210 p.

LITERATURA

1. Ravich Yu. I., Efimova B. A., Smirnov I. A. Metody issledovaniya poluprovodnikov v primeneni k hal'kogenidam svinca PbTe, PbSe i PbS. — М.: «Наука», 1968. — 384 p.
2. Abrikosov N. H., Shelimova L. E. Poluprovodnikovye materialy na osnove soedinenij A⁴B⁶. — М.: «Наука», 1975. — 195 p.