

Міжзеренні межі і електричні властивості тонких плівок твердих розчинів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$

Д.М. Фрейк^{1,*}, Б.С. Дзундза¹, Л.Й. Межиловська¹, І.Б. Гатала¹, С.І. Мудрий²

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57. 76018 Івано-Франківськ, Україна

² Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська 1, 79000 Львів, Україна

(Одержано 26.02.2014, у відредагованій формі – 24.03.2014, опубліковано online 20.06.2014)

Досліджено структуру та електричні властивості тонких плівок на основі твердих розчинів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$, осаджених у вакуумі на слюдяні підкладки та ситалові. Встановлено, що парофазний конденсат має мозаїчну структуру, сформовану за механізмом зародження Фольмера-Вебера і реалізації процесів нуклеації, агрегування та коалесценції нанокристалітів. На основі електротехнічної моделі визначено товщину h та питомий опір ρ , міжзеренних меж. Показано, що зі збільшенням вмісту Bi_2Te_3 мають місце зростання h і величини ρ , який більш чим на порядок перевищує опір зерна ρ_0 .

Ключові слова: Тонкі плівки, Провідність, Тверді розчини, Телурид свинцю, Термоелектричні властивості.

PACS numbers: 68.37.Hk, 78.66.Hf, 81.15.Ef

1. ВСТУП

Плюмбум халькогеніди мають широке застосування в напівпровідниковій електроніці. Зокрема плюмбум телурид – ефективний термоелектричний матеріал для середньотемпературної області (500-750) К [1, 2]. Як легований PbTe , та тверді розчини на його основі, так і тонкоплівковий матеріал у значній мірі розширюють межі практичного застосування [2, 3].

Властивості тонких плівок визначаються електронними процесами, які протікають на міжкристалітних межах і поверхні плівки. В зв'язку з цим виникає необхідність враховувати розсіювання на міжфазних і міжзеренних межах, дислокаціях невідповідності та інших дефектах росту [3-6]. Локалізація носіїв струму на приповерхневих станах і їх захоплення обірваними зв'язками на межах кристалітів призводять до утворення біля цих областей просторового заряду, концентрація і рухливість носіїв струму в яких можуть значно відрізнятися від відповідних параметрів в об'ємі.

У даній роботі, в рамках електротехнічної моделі опору, визначено вплив міжзеренних меж на провідність тонких плівок на основі твердих розчинів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$, осаджених на ситалові та слюдяні підкладки.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки для дослідження отримували осадженням пари синтезованого матеріалу із твердих розчинів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ складів 1,3 і 5 мол. % Bi_2Te_3 у вакуумі на підкладки із свіжих сколів (0001) слюди-мусковіт та ситалу. Температура випарника складала $T_s = 970$ К, а температура підкладок $T_n = 470$ К. Товщина плівок задавалася часом осадження в межах $\tau = (15-60)$ с та вимірювали мікроінтерферометром МІИ-4.

Отримані зразки досліджували методами атомно-силової мікроскопії [7]. За результатами атомно-

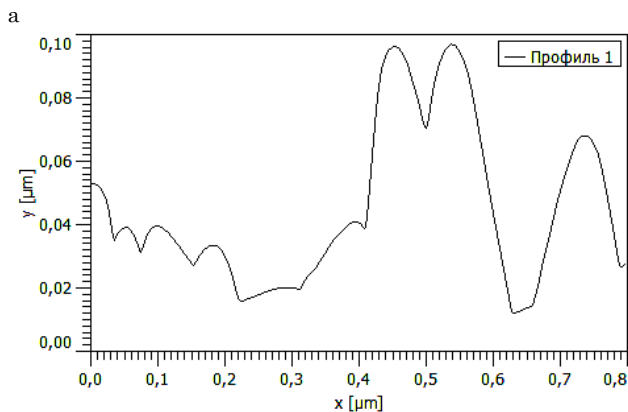
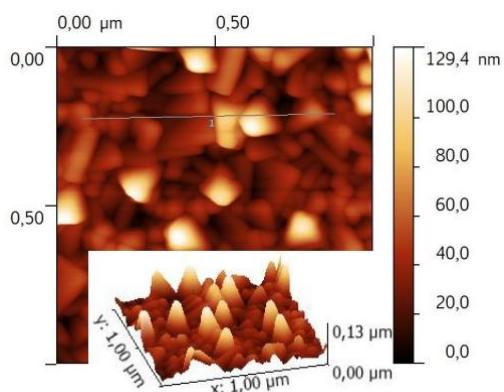
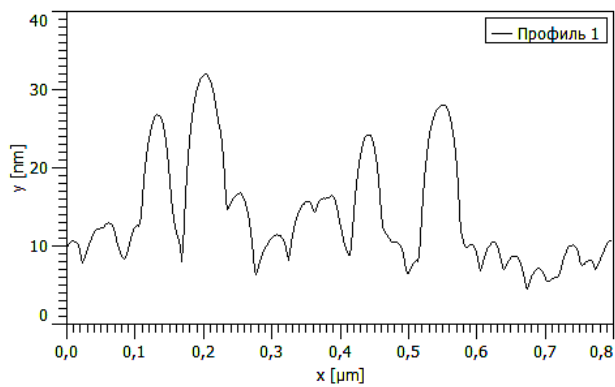
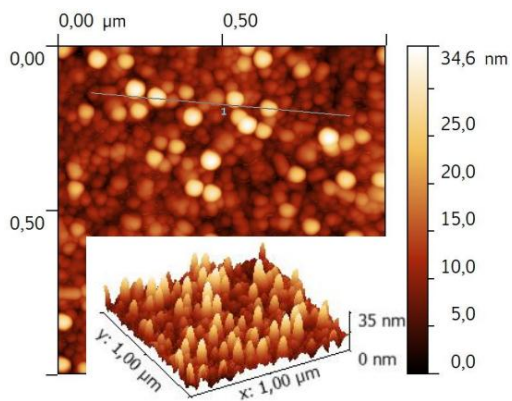
силових досліджень парофазних конденсатів визначали морфологію поверхні та її профілограми.

Вимірювання електричних параметрів плівок проводилося на повітрі при кімнатних температурах у постійних магнітних полях на розробленій автоматизованій установці, яка забезпечує як процеси вимірювання термоелектричних параметрів [8]. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти. В якості омичних контактів використовували плівки срібла. Струм через зразки складав ≈ 1 мА. Магнітне поле було напрямлене перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 1,5 Тл.

3. СТРУКТУРА ПЛІВОК

Результати досліджень топології поверхні конденсатів $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ наведено на рис. 1, 2 та таблицях 1, 2. Технологічні фактори отримання значною мірою визначають процеси зародження і росту нанокристалітів, які у свою чергу визначають морфологію поверхні конденсатів загалом. Так, за оптимальних значень технологічних факторів ($T_s = 970$ К, $T_n = 470$ К) для досліджуваних конденсатів на перших етапах осадження мають місце процеси, що включають зародження нової фази у вигляді окремих пірамідальних наноутворень незначних розмірів: висота (10-15) нм і діаметр (30-40) нм (рис. 1, 2; табл. 1, 2). У наступному режимі агрегування зародження нових острівців припиняється, а адсорбовані на поверхні молекули беруть участь у рості вже сформованих структур. У режимі коалесценції на пізніх стадіях зростання, що реалізуються при значних часах осадження ($\tau \approx 75$ с), має місце злиття окремих наноструктур. При цьому спостерігається зменшення їх щільності і формування окремих структурних «гігантів» та значне збільшення шорсткості поверхні (рис. 1б; табл. 1). Останнє особливо є характерним для конденсатів, отриманих на ситалі, структура яких є неоднорідною (рис. 1). Що стосується плівок на

* freik@pu.if.ua

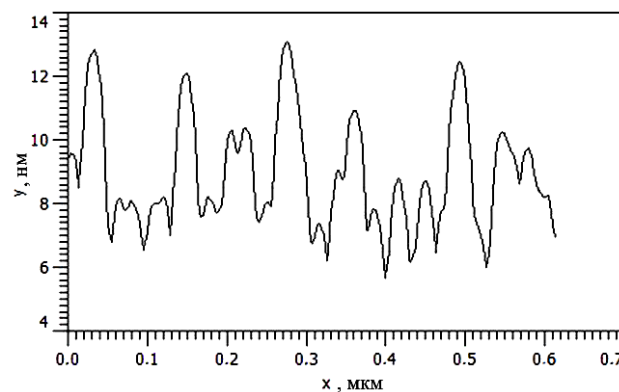
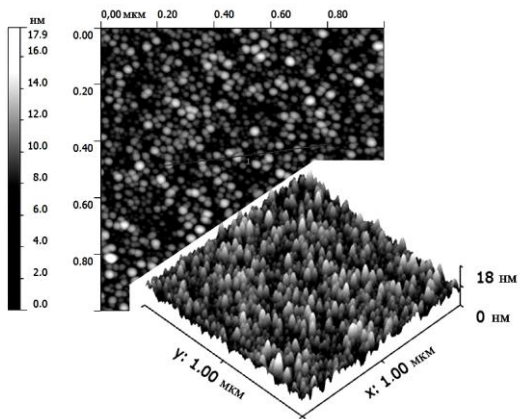


I

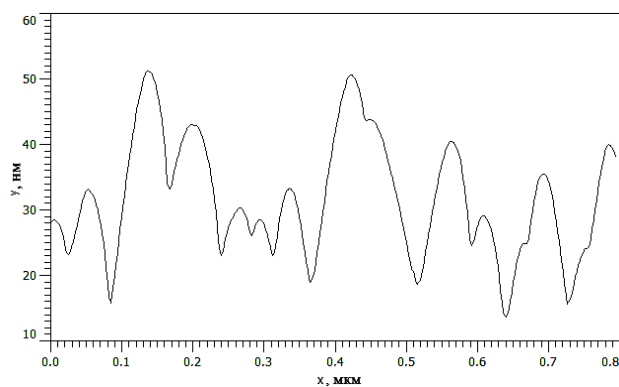
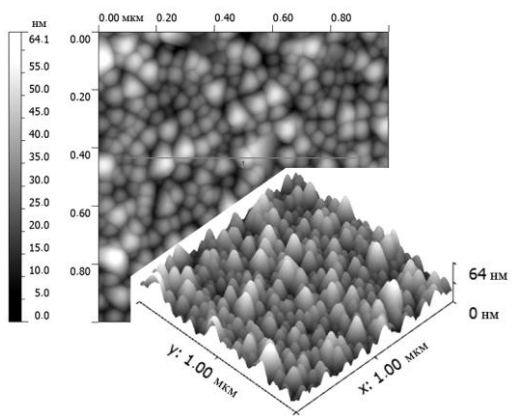
б

II

Рис. 1 – АСМ-зображення (I) та профілограми (II) плівок RbTe + 3 % Bi₂Te₃, осаджених на ситалових підкладках при часі осадження 15 с (а, № 16) та 75 с (б, № 13); температура випарування $T_s = 970$ К, температура підкладки $T_n = 470$ К



а



I

б

II

Рис. 2 – АСМ-зображення (I) та профілограми (II) плівок RbTe + 3 % Bi₂Te₃, отриманих на свіжих сколах (0001) слюди при часі осадження 15 с (а, № 2) та 75 с (б, № 9); температура випарування $T_s = 970$ К, температура підкладки $T_n = 470$ К

Таблиця 1 – Структурні параметри і технологічні фактори парофазних плівок PbTe-Bi₂Te₃ на ситалових підкладках. Температура випаровування $T_v = 970$ К, температура підкладки $T_n = 470$ К

№ зразка	Матеріал	Час наплення, τ , с	Товщина плівок d , нм	l , нм	l_1 , нм
4	PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃	15	270	13	31
5	PbTe + 5% Bi ₂ Te ₃	30	405	23	44
6	PbTe + 5% Bi ₂ Te ₃	45	540	34	43
7	PbTe + 5% Bi ₂ Te ₃	60	810	33	56
8	PbTe + 5% Bi ₂ Te ₃	75	1215	36	38
13	PbTe + 3% Bi ₂ Te ₃	75	1215	39	88
14	PbTe + 3% Bi ₂ Te ₃	60	1000	35	78
15	PbTe + 3% Bi ₂ Te ₃	30	270	21	45
16	PbTe + 3% Bi ₂ Te ₃	15	162	12	41
21	PbTe + 1% Bi ₂ Te ₃	75	2025	102	162
22	PbTe + 1% Bi ₂ Te ₃	60	918	34	100
23	PbTe + 1% Bi ₂ Te ₃	30	634	24	63
24	PbTe + 1% Bi ₂ Te ₃	15	405	14	39

Таблиця 2 – Структурні параметри і технологічні фактори парофазних плівок PbTe-Bi₂Te₃ на підкладках із слюди. Температура випаровування $T_v = 970$ К, температура підкладки $T_n = 470$ К

№ зразка	Матеріал	Час наплення, сек	Товщина плівок d , нм	l , нм	l_1 , нм
1	PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃	75	1080	28	41
2	PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃	60	810	15	40
3	PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃	30	540	9	53
9	PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃	75	1080	28	50
10	PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃	60	405	21	49
11	PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃	30	270	13	34
12	PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃	15	108	9	25
17	PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	75	1485	31	49
18	PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	60	675	20	39
19	PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	30	270	12	32
20	PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	15	135	7	30

Примітка: l, l_1 – середні нормальні та латеральні розміри наноструктур.

свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт, то їх структура більш гомогенна (рис. 2).

При парофазному осадженні можливі наступні механізми зародження: механізм Франкі-Ван-дер-Мерве (утворення суцільного шару конденсату), механізм Странскі-Крастанова (передбачає утворення на початкових етапах осадження так званого змочуючого шару із подальшим ростом пірамідальних наноструктур за рахунок зняття пружних деформацій) та Фольмера-Вебера (утворення зразу трьохвимірних окремих зародків наноструктур на поверхні субстрату) [9, 10]. У нашому випадку, за всіх умов осадження конденсатів PbTe-Bi₂Te₃ ми спостерігаємо утворення і ріст окремих структур пірамідальної форми (рис. 1, 2), що вказує на реалізацію механізму за Фольмером-Вебера.

4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА МОДЕЛЬ ОПОРУ ПЛІВОК

Маючи на увазі, що досліджувані конденсати мають мозаїчну структуру (рис. 1, 2) і у першому наближенні для спрощення розрахунків їх можна представити у вигляді паралелепіпедів висотою l (розмір зерна у нормальному до поверхні напрямку)

і основою $l_1 \times l_1$ (розмір зерна у латеральному до поверхні напрямку), які мають міжзеренні межі товщиною h (рис. 2,а) [11]. Тоді лінійний розмір самого моноблочного зерна буде дорівнювати $b_i = l_i - 2h$, а його опір $R_0 = \rho_0 b_i^{-1}$, де ρ_0 – питомий опір кристалітів. Така електротехнічна комірка буде мати ще чотири опори $R_{h||}$ міжзеренних меж, які зеднані паралельно і два опори $R_{h\perp}$ включені послідовно до R_0 (рис. 2б):

$$R_{h21} = \frac{1}{2} R_{h\perp 1} = \rho_h \frac{l_1}{2lh}, \tag{1}$$

$$R_{h22} = \frac{1}{2} R_{h\perp 2} = \rho_h \frac{l_1}{2b_1h},$$

$$R_{h1} = 2R_{h\perp} = \rho_h \frac{2h}{bb_1}. \tag{2}$$

Тут ρ_g – питомий опір області міжзеренних меж.

Враховуючи еквівалентну схему (рис. 2в), загальний опір кристаліта з міжзеренними межами R_e буде визначатися співвідношенням:

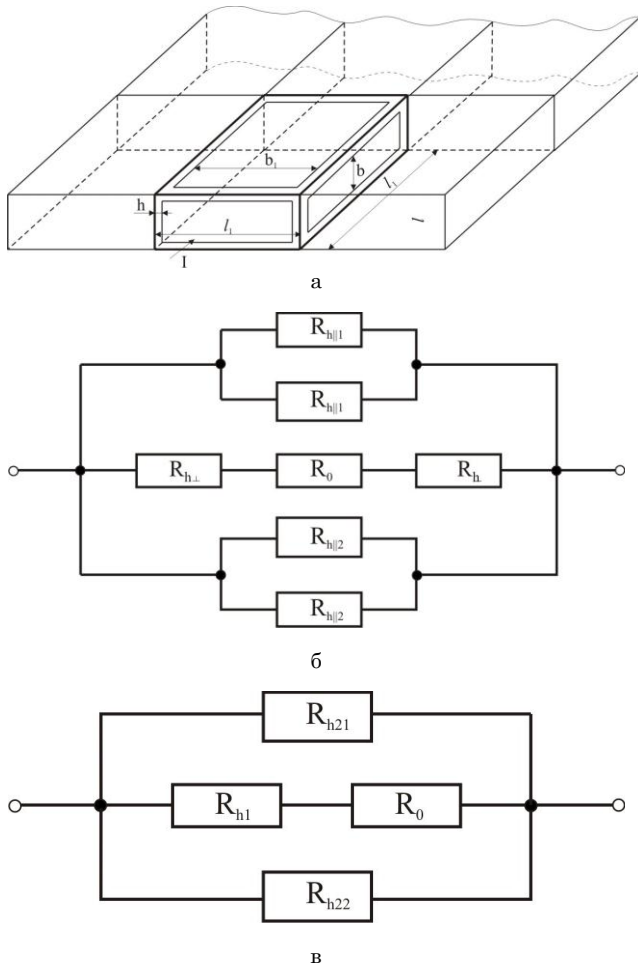


Рис. 2 – Модель мозаїчної структури плівок PbTe (а), та її еквівалентні електротехнічні схеми (б, в)

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_0 + R_{h1}} + \frac{1}{R_{h21}} + \frac{1}{R_{h22}},$$

$$R_e = \frac{(R_0 + R_{h1})R_{h21}R_{h22}}{R_{h21}R_{h22} + (R_0 + R_{h1})R_{h22} + (R_0 + R_{h1})R_{h21}}. \quad (3)$$

Знаючи опір електротехнічної комірки плівки R_e можна визначити її еквівалентний питомий опір

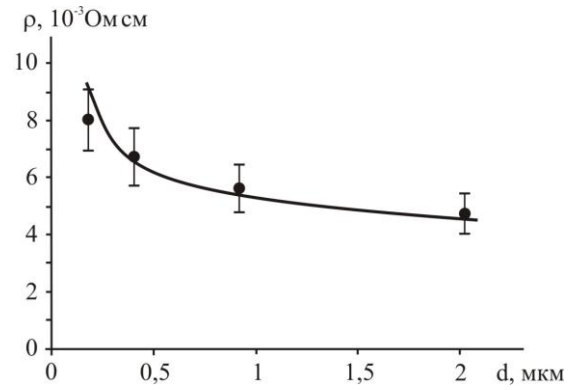
$$\rho_e = R_e l, \quad (4)$$

а також зробити оцінку величини міжзеренних меж ρ_h та її товщини h , відповідно визначивши з профілограм залежності середніх розмірів кристалітів у латеральному l_1 і нормальному l напрямках (табл. 1, 2).

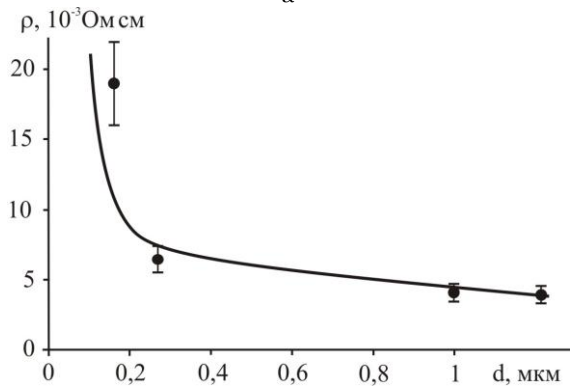
5. ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ ПЛІВОК

Товщинні залежності питомого опору плівок наведено на рис 3, 4. Видно, що зі збільшенням товщини питомий опір зменшується з виходом на насичення при товщинах більше 1 мкм.

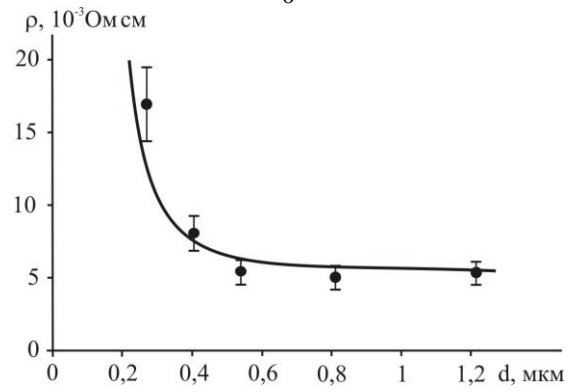
Така поведінка провідності (рис. 3, 4) добре корелює з товщинною залежністю розмірів кристалітів (рис. 1, 2; табл. 1, 2), що дає змогу припустити домінування впливу міжзеренних меж. Враховуючи вихід товщинної залежності провідності на насичення



а



б

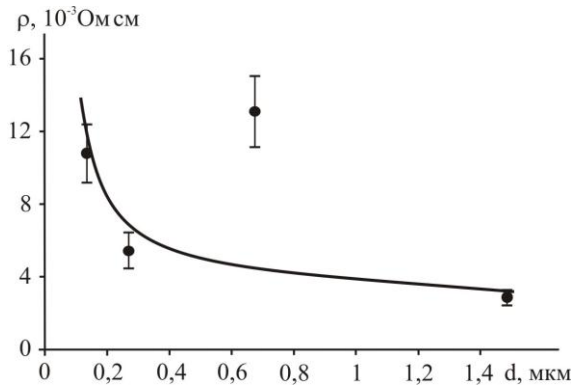


в

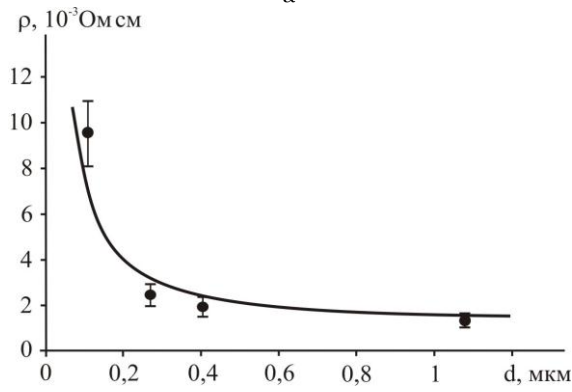
Рис. 3 – Залежність питомого опору від товщини для плівок PbTe-(1 мол.%)Bi₂Te₃ (а), PbTe-(3 мол.%)Bi₂Te₃ (б), PbTe-(5 мол.%)Bi₂Te₃ (в) на ситалових підкладках. Точки – експеримент, суцільні лінії – розрахунок згідно електротехнічної моделі

можна визначити питомий опір зерна ρ . Апроксимуючи експериментальні дані електротехнічною моделлю визначено середню товщину h та питомий опір ρ_h міжзеренної межі. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.

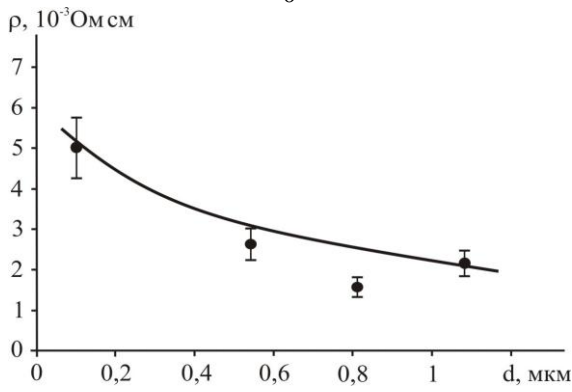
Варто відзначити, що товщина h та провідність $\sigma_h = 1 / \rho_h$ міжзеренних меж зростає зі збільшенням вмісту Bi₂Te₃ у твердому розчині (табл. 3). Зростання товщини міжзеренних меж можна пояснити зменшенням середнього розміру кристалітів із збільшенням вмісту Bi₂Te₃ тобто наявністю більшої кількості дрібних кристалітів що призводить до зростання вкладу меж зерен в питому електропровідність.



а



б



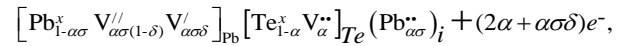
в

Рис. 4 – Залежність питомого опору від товщини для плівок PbTe-(1 мол.%)Bi₂Te₃ (а), PbTe-(3 мол.%)Bi₂Te₃ (б), PbTe-(5 мол.%)Bi₂Te₃ (в) на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт. Точки – експеримент, суцільні лінії – розрахунок згідно електротехнічної моделі

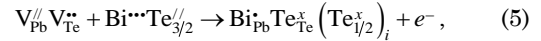
Розрахований питомий опір міжзеренних меж ρ_h на порядок більший ніж опір кристалітів ρ (табл. 3), що пов'язано із розсіювання носіїв струму та дифузією кисню вздовж меж зерен, якій завдяки своїй акцепторній дії призводить до зменшення концентрації основних носіїв у плівках PbTe-Bi₂Te₃ n-типу, а отже і зменшення їх електропровідності.

Зменшення питомого опору при збільшенні вмісту Bi₂Te₃ пов'язане зі зростанням холлівської концентрації основних носіїв струму у твердому розчині PbTe-Bi₂Te₃, що підтверджується кристалохімічними розрахунками [12]. Так, зокрема, маючи на увазі, що кристалохімічна формула нестехіометричного n-

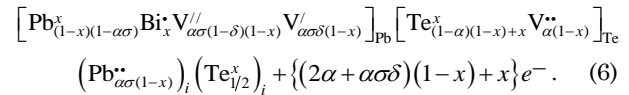
PbTe має вигляд [12]:



а кластер легуючої сполуки Bi₂Te₃ із розрахунку на один атом вісмуту Bi³⁺Te_{3/2}²⁻ буде:



кристалохімічна формула n-PbTe-Bi₂Te₃ буде представлена як:



Тут V_{Pb}, V_{Te} – вакансії плумбум і телуру; Bi_{Pb}, Te_{Te} – йони атомів у відповідних підгратках; Pb_i, Te_i – йони у міжвузлях; α – відхилення від стехіометричного складу у базовій сполуці; δ – коефіцієнт диспропорціювання зарядового стану; σ – частка міжвузлових йонів Pb_i; x – склад твердого розчину.

Таблиця 3. – Розраховані параметри міжзеренних меж для плівок твердих розчинів PbTe-Bi₂Te₃

Матеріал	Підкладка	Товщина міжзеренної межі h, нм	Питомий опір зерна ρ, 10 ⁻³ Ом см	Питомий опір міжзеренної межі ρ _h , 10 ⁻² Ом см
PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	Ситал	2,8	3,6	2,0
PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃		4,2	1,5	1,8
PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃		5,2	1,0	1,5
PbTe + 1%Bi ₂ Te ₃	Слюда	2,8	1,0	1,5
PbTe + 3%Bi ₂ Te ₃		4,2	0,5	0,6
PbTe + 5%Bi ₂ Te ₃		4,3	0,4	0,5

Так, зокрема, для n-PbTe-Bi₂Te₃ згідно (6) рівняння повної електронейтральності буде визначатися співвідношенням:

$$n + |q_{V_{Pb}^{//}}| [V_{Pb}^{//}] + |q_{V_{Pb}^{\bullet\bullet}}| [V_{Pb}^{\bullet\bullet}] = p + |q_{V_{Te}^{\bullet\bullet}}| [V_{Te}^{\bullet\bullet}] + |q_{Pb_i^{\bullet}}| [Pb_i^{\bullet}] + |q_{Bi_{Pb}^{\bullet}}| [Bi_{Pb}^{\bullet}], \quad (11)$$

$$\text{де } n = A((2\alpha + \alpha\sigma\delta)(1-x) + x),$$

$$[V_{Pb}^{//}] = A(\alpha\sigma(1-\delta)(1-x) + x/3), \quad [V_{Pb}^{\bullet\bullet}] = A\alpha\sigma\delta(1-x),$$

$$[Bi_{Pb}^{\bullet}] = Ax, \quad [V_{Te}^{\bullet\bullet}] = A\alpha(1-x), \quad [Pb_i^{\bullet}] = A\alpha\sigma(1-x),$$

$$|q_{V_{Pb}^{//}}| = |q_{Bi_{Pb}^{\bullet}}| = 1, \quad |q_{V_{Pb}^{\bullet\bullet}}| = |q_{V_{Te}^{\bullet\bullet}}| = |q_{Pb_i^{\bullet}}| = 2.$$

Тут A = 2z/a³, z – число структурних одиниць в елементарній комірці кристалу, a – параметр ґратки.

Холлівська концентрація носіїв струму n_H матиме вигляд:

$$n_H = A((2\alpha + \alpha\sigma\delta)(1-x) + x). \quad (12)$$

При реалізації механізму заміщення позицій плюмбуму бісмутом (Bi_{Pb}^+) і утворення міжвузлового телуру (Te_i^0) у n -PbTe- Bi_2Te_3 холлівська концентрація носіїв струму n_H помітно зростає зі збільшенням вмісту Bi_2Te_3 (рис. 5 – крива 1).

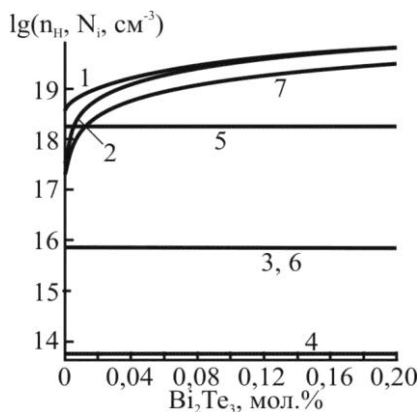


Рис. 5 – Залежність концентрації домінуючих точкових дефектів (2-7 - Ni) та холлівської концентрації носіїв струму (1 – n_H) у n -PbTe- Bi_2Te_3 від вмісту Bi_2Te_3 : 2 – $[Bi_{Pb}^+]$; 3 – $[V_{Pb}^{2-}]$; 4 – $[V_{Pb}^-]$; 5 – $[Te_i^{2+}]$; 6 – $[Pb_i^{2+}]$; 7 – $[Te_i^0]$

Згідно наведених розрахунків (рис. 4) встановлено, що йонізовані атоми бісмуту у катіонній підгратці плюмбум телуриду Bi_{Pb}^+ (рис. 5 – крива 2), а також вакансії телуру V_{Pb}^{2-} (рис. 5 – крива 5) дають найбільший внесок у формування основних носіїв. При цьому, слід звернути увагу на значний ріст концентрації Bi_{Pb}^+ при збільшенні вмісту легуючої домішки Bi_2Te_3 у твердому розчині n -PbTe- Bi_2Te_3 (рис. 5 – крива 2). Що стосується інших точкових дефектів $[V_{Pb}^{2-}]$, $[V_{Pb}^-]$, $[Pb_i^{2+}]$ то їх концентрація у твердому розчині є значно меншою (рис. 5 – криві 3, 4, 6). Нейтрально заряджений міжвузловий телур Te_i^0 , незважаючи на його значну концентрацію (рис. 5 – крива 7) не змінює холлівську концентрацію носіїв.

Залежність холлівської концентрації від початкового відхилення від стехіометрії (α) в основній матриці і вмісту домішки Bi_2Te_3 (x), добре ілюструють просторові діаграма n_H - α - x (рис. 6).

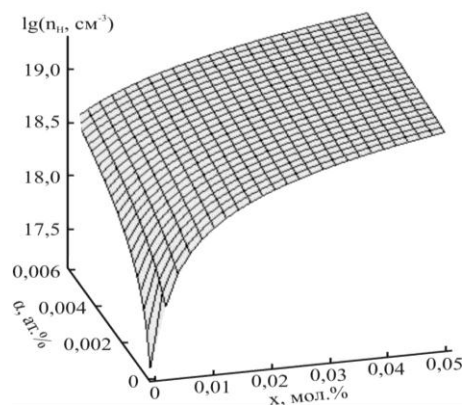


Рис. 6 – Просторова діаграма залежності холлівської концентрації носіїв струму (n_H) від величини настехіометрії (α) PbTe та вмісту Bi_2Te_3 (x) у твердих розчинах n -PbTe- Bi_2Te_3

6. ВИСНОВКИ

1. Досліджено структуру та термоелектричні властивості парофазних тонких плівок на основі твердих розчинів n -PbTe- Bi_2Te_3 різного складу, отриманих на підкладках ситалу та слюди.
2. У межах електротехнічної моделі опору полікристалічних плівок, визначено середню товщину та питомий опір міжзеренних меж.
3. Показано, що збільшення вмісту Bi_2Te_3 у твердому розчині товщина та провідність міжзеренних меж зростають.
4. Стабільні n -тип провідності та високу концентрацію носіїв (10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) пояснено заміщенням у твердих розчинах n -PbTe- Bi_2Te_3 плюмбуму основної матриці йонами бісмуту ($Bi^{3+} \rightarrow Bi_{Pb}^+$).

Робота виконана в рамках комплексного наукового проекту МОН України (0113U000185), та ДФФД України (0113U003689), а також у рамках програми «Наука заради миру» відділення Публічної Дипломатії НАТО (NUKR SFPP984536).

Межзеренные границы и электрические свойства тонких пленок твердых растворов PbTe- Bi_2Te_3

Д.М. Фрейк¹, Б.С. Дзундза¹, Л.И. Межиловська¹, И.Б. Гатала¹, С.И. Мудрий²

¹ Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника, ул. Шевченка, 57. 76018 г. Ивано-Франковск, Украина

² Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Университетская 1, 79000 г. Львов, Украина

Исследована структура и электрические свойства тонких пленок на основе твердых растворов PbTe- Bi_2Te_3 , осажденных в вакууме на подложки слюды и ситалла. Установлено, что парофазный конденсат имеет мозаичную структуру, сформированную по механизму зарождения Фольмера-Вебера и реализации процессов нуклеации, агрегации и коалесценции нанокристаллитов. На основе электротехнической модели определены толщина h и удельное сопротивление ρ_H межзеренных границ. Показано, что с увеличением содержания Bi_2Te_3 имеют место рост h и величины ρ_H , который более чем на порядок превышает сопротивление зерна ρ_0 .

Ключевые слова: Тонкие пленки, Теллурида свинца, Твердые растворы, Термоэлектрические свойства.

Grain Boundaries and Electrical Properties of Thin Films of PbTe-Bi₂Te₃ Solid Solutions

D.M. Freik¹, B.S. Dzundza¹, L.Yo. Mezhylovska¹, I.B. Gatala¹, S.I. Mudryy²

¹ *Vasyl Stefanyk Precarpathian National University 57, Shevchenko Str., 76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

² *Ivan Franko Lviv National University 1, University Str., 79000 Lviv, Ukraine*

The structure and electrical properties of thin films based on PbTe-Bi₂Te₃ solid solutions with different composition deposited in vacuum on glass ceramic and mica substrates are studied. It is established that vapor-phase condensate has a mosaic structure formed by the Volmer-Weber mechanism of nucleation and implementation of the processes of nucleation, aggregation and coalescence of nanocrystallites. Based on the electrical model, the thickness h and resistivity ρ_H of grain boundaries are determined. It is shown that with increasing content of Bi₂Te₃ increase in the values of h and ρ_H takes place and the latter is one order of magnitude more than the grain resistance ρ_0 .

Key words: Thin films, Lead Telluride, Solid solutions, Thermoelectric properties.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.М. Шперун, Д.М. Фреїк, Р.І. Запужляк. *Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів* (Плай: Івано-Франківськ: 2000).
2. Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.Й. Межиловская. *Фізика и технология тонких пленок* (Вища школа: Львов: 1988).
3. Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Я.С. Яворський, Л.Й. Межиловська, *ФХТТ 14 №1, 82* (2013).
4. J.N. Zemel, *J. Lumin.* **7**, 524 (1973).
5. *Поверхностные свойства твердых тел* (Под. ред. М. Грина) (Москва: Мир: 1972).
6. P.R. Vaia, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan, *phys. status solidi a* **87**, 341(1985).
7. Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Я.С. Яворський, *Журнал наноелектрон. фіз.* **5** №3, 03054-1 (2013) (D.M. Freik, B.S. Dzundza, J.S. Yavorskyu, et al., *J. Nano- Electron. Phys.* **5** No 3, 03054 (2013)).
8. М.О. Галушак, Б.С. Дзундза, А.І. Ткачук, *Методи та прилади контролю якості* **30** №1, 79 (2013).
9. *Наноструктурирование халькогениды свинца: монография* (С.П. Зимин, Е.С. Горлачев) (Ярославль: ЯрГУ: 2011).
10. С.В. Волков, Є.П. Ковальчук, В.М. Огенко, О.В. Решетняк, *Нанохімія, наносистеми, наноматеріали* (Київ: Наукова думка: 2008).
11. Я.П. Салій, І.М. Фреїк, *ФХТТ 5 №1, 94* (2004).
12. D.M. Freik, L.V. Turov, V.V. Boychuk, *Chem. Met. Alloy.* **5**, 77 (2012).