

Явища переносу у парофазних конденсатах PbTe-Vi₂Te₃ на ситалі

Д.М. Фрейк^{1,*}, Б.С. Дзундза¹, Я.С. Яворський¹, І.С. Біліна¹, Т.С. Люба²

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, 76025 Івано-Франківськ, Україна

² Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
вул. Огієнка, 61, 32300 Кам'янець-Подільський, Україна

(Одержано 31.07.2013; опубліковано online 17.10.2013)

Проведено дослідження залежності структурних характеристик та електрофізичних властивостей тонких плівок твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ складів 1,3,5 мол. % Vi₂Te₃, осаджених у відкритому вакуумі на ситалових підкладках від їх товщини $d = (0,2-2)$ мкм. Визначено ефективну довжину вільного пробігу λ носіїв заряду і встановлено домінуючий механізм їх розсіювання. У рамках двошарової моделі Петріца зроблена оцінка величини термоелектричних параметрів приповерхневих шарів. Встановлено що конденсат характеризується стабільним n -типом провідності і має місце дифузне розсіювання носіїв на поверхні, що зумовлює значне зменшення по відношенню до об'єму плівок величини рухливості (μ_s), питомої електропровідності (σ_s), та зростання коефіцієнта Зеебека (S_s). Отримані результати пояснено акцепторним впливом атмосферного кисню та дроселюванням носіїв заряду на потенціальних бар'єрах міжзеренних меж.

Ключові слова: Плівки твердого розчину PbTe-Vi₂Te₃, Термоелектричні властивості, Механізми розсіювання.

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

1. ВСТУП

Плюмбум халькогеніди широко застосовуються в напівпровідниковій техніці. Зокрема PbTe – ефективний термоелектричний матеріал для середньотемпературної області (500-750) К [1, 2]. Тверді розчини на основі PbTe і телуридів елементів V групи Періодичної системи, зокрема Vi, дозволяють отримати матеріал із покращеними параметрами, необхідними для створення термоелектричних модулів [3].

Властивості тонких полікристалічних плівок залежать у значній мірі від електронних процесів, що відбуваються на поверхні і міжкристалітних межах. Тут, зокрема, необхідно враховувати розсіювання на міжфазних і міжзеренних межах, дислокаціях невідповідності та інших дефектах росту [4-6]. Локалізація носіїв струму на поверхневих станах і на межах кристалітів призводять до утворення біля них областей просторового заряду, концентрація і рухливість носіїв струму в яких можуть значно відрізнятися від відповідних параметрів в об'ємі.

У даній роботі досліджено особливості механізмів розсіювання носіїв струму та термоелектричні властивості тонких плівок твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ на основі плюмбум телуриду, осаджених на ситалові підкладки.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки для дослідження отримували осадженням у вакуумі на ситалові підкладки пари із наперед синтезованого твердого розчину складу PbTe-Vi₂Te₃. Температура випарника під час осадження складала $T_B = 970$ К, а температура підкладок $T_H = 470$ К. Товщину плівок задавали часом осадження в межах (15-75) с та вимірювали за допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4.

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.

Отримані зразки досліджувалися методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimension 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 (NTOMDT, Росія). За результатами АСМ досліджень крім морфології поверхні та профілограм у програмі WSxM 4.0 Develop 10.4 визначені розміри нанокристалів у латеральному напрямку, їх висоту та шорсткість поверхні.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Структура плівок

Деякі із результатів АСМ-досліджень поверхні конденсатів PbTe-Vi₂Te₃ наведено на рис. 1, 2 та таблиці 1. Технологічні фактори осадження у значній мірі визначають процеси зародження, росту і формування окремих нанокристалітів, які у свою чергу є відповідальними за морфологію поверхні конденсатів у цілому.

Так, зокрема, за оптимальних значень температур випаровування $T_B = 970$ К та підкладки $T_H = 470$ К для досліджуваних структур на перших етапах осадження мають місце процеси, які включають нуклеацію (зародження) нової фази у вигляді окремих стовпчастих пірамідальних наноутворень незначних розмірів висотою (10-15) нм і діаметром (30-40) нм (рис. 1, 2; табл. 1).

* freik@pu.if.ua

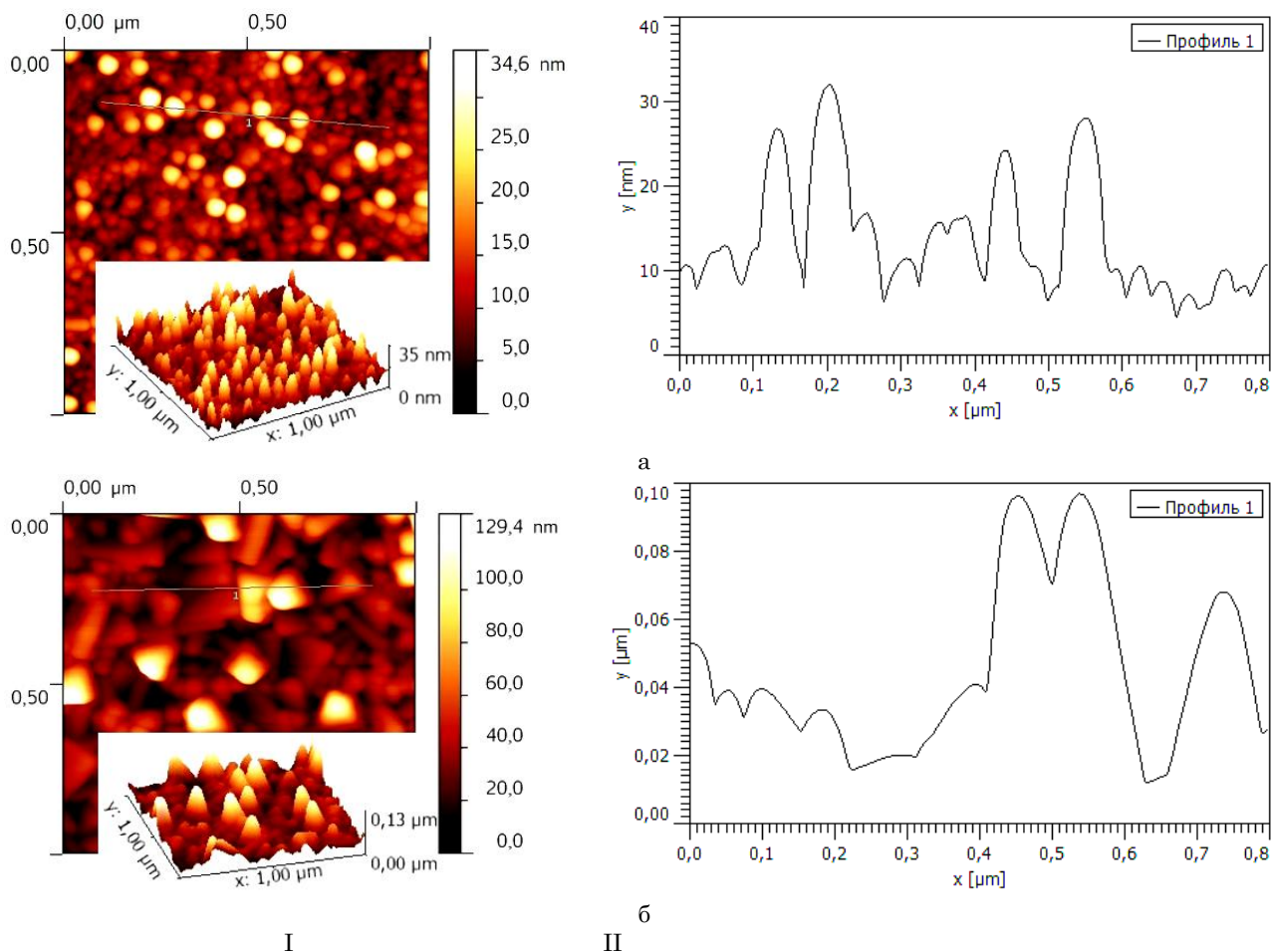


Рис. 1 – 3D і 2D АСМ-зображення (I) та профілограми (II) конденсатів PbTe + 3 %Bi₂Te₃, отриманих на підкладках із ситалу при часі осадження 15 с (а, № 16) та 75 с (б, № 13); температура випарування $T_B = 970$ К, температура підкладки $T_{II} = 470$ К

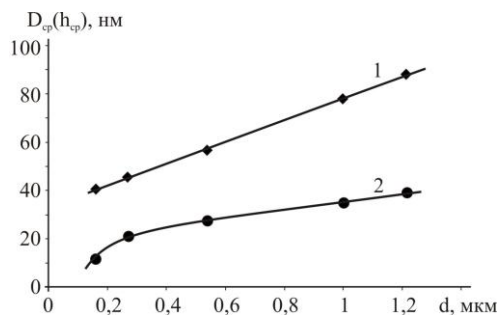


Рис. 2 – Залежність середніх латеральних D_{cp} – (1) та нормальних h_{cp} – (2) розмірів кристалітів парофазних наноструктур PbTe + 3 %Bi₂Te₃ на ситалі від їх товщини (табл. 1 – № 13-16)

Із збільшенням часу осадження процес нуклеації є головним джерелом росту і ступеня покриття субструктур. У наступному режимі агрегування нуклеація нових острівців припиняється, а адсорбовані на поверхні молекули беруть участь у рості вже сформованих структур. У режимі коалесценції на пізніх стадіях зростання, які реалізуються при значних часах осадження $\tau = 75$ с має місце злиття окремих наноструктур, що зумовлює зменшення їх щільності і формування окремих структурних «гігантів» і значне збільшення шорсткості поверхні (рис. 1б; табл. 1, зразок № 13).

Зауважимо, що при парофазному осадженні можуть реалізуватися механізми зародження за Фран-

ком-Ван-дер-Мерве (утворення суцільного шару конденсату), Странські-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) [7, 8]. У нашому випадку, за всіх умов осадження конденсатів PbTe-Bi₂Te₃ на ситалі ми спостерігаємо утворення і зростання окремих структур пірамідальної форми (рис. 1), що вказує на домінування механізму Фольмера-Вебера.

3.2 Механізми розсіювання носіїв заряду

За умови переважання розсіювання носіїв заряду на поверхні (μ_n) і межах зерен (μ_s), та сталих концентрації носіїв і ефективної маси рухливість плівок визначається правилом Маттісена [4]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{\mu_s}, \quad (1)$$

де μ – експериментально визначена рухливість.

Час між двома актами розсіювання на межах кристалітів τ_s визначається як

$$\tau_s = Dv^{-1}, \quad (2)$$

де v – теплова швидкість носіїв. При цьому згідно [4]:

$$\mu_s = \frac{2q}{h} D \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{-1/3}, \quad (3)$$

де D – середній розмір зерна, q – заряд носіїв, n – концентрація носіїв, h – стала Планка.

Згідно [6] рухливість носіїв струму у випадку дифузного розсіювання на поверхні чисельно рівна:

$$\mu_n = \mu_v (1 + \lambda/d)^{-1}. \quad (4)$$

Тут λ – середня довжина вільного пробігу носіїв, μ_v – рухливість об'ємного матеріалу.

Згідно моделі Фукса-Зондгеймера питома електропровідність σ конденсату при розсіюванні носіїв заряду на зовнішніх поверхнях пов'язана із ефективною довжиною вільного пробігу носіїв заряду у нескінченно товстій плівці співвідношенням

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \frac{3}{8} \lambda \frac{(1-P)}{d} \right]. \quad (5)$$

Тут σ_0 – питома електропровідність нескінченно товстої плівки. Рівняння (5) у координатах $\sigma \sim d^{-1}$ виражає пряму лінію $\sigma = A \pm B$ ($A = \sigma_0$; $B = -3\sigma_0\lambda(1-P)/8$), яка пересікає вісь ординат при $d^{-1} \rightarrow 0$ у точці, що визначає σ_0 . Тангенс кута нахилу прямої визначає величину в яку входить λ . Тоді для дифузного розсіювання носіїв, що характерно для нашого випадку $P=0$, можна визначити λ і σ_0 . Знаючи довжину вільного пробігу (λ) (рис. 3), та використавши формулу (4), маємо залежність поверхневої рухливості μ_n від товщини. Аналогічно, за середніми розмірами кристалітів (D) (рис. 2) та експериментальним значенням концентрації (n) із виразу (3) визначимо величину рухливості, яка враховує вплив розсіювання носіїв на міжзеренних межах (μ_s) (рис. 4; крива 2).

На основі експериментальних залежностей питомої електропровідності (σ) від оберненої товщини ($1/d$) конденсатів (рис. 3), визначена середня довжина вільного пробігу носіїв струму складає $\lambda = 0,351$ мкм при кімнатній температурі.

Звернемо увагу на характер залежності питомої електропровідності при зменшенні товщини конденсату, яка спадає (рис. 3). Такий характер провідності зумовлений впливом дифузного розсіювання носіїв на поверхні, яке має значний вплив в області малих товщин. Це також підтверджують експериментальні та розрахункові залежності рухливості носіїв від товщини (рис. 4).

На основі аналізу результатів досліджень (рис. 4) можна стверджувати, що основний внесок у результуючу рухливість (μ) вносить дифузне розсіювання на поверхні (μ_n) (рис. 4, криві 1, 3). Це слідує із того, що розрахункова крива (μ_n) добре співпадає із експериментом (рис. 4).

3.3 Приповерхневі шари і електричні властивості тонких плівок

Введення Vi₂Te₃ зумовлює активну донорну дію у телуриді свинцю, яка виявляється у значному зростанні концентрації електронів аж до $\sim 10^{19}$ см⁻³

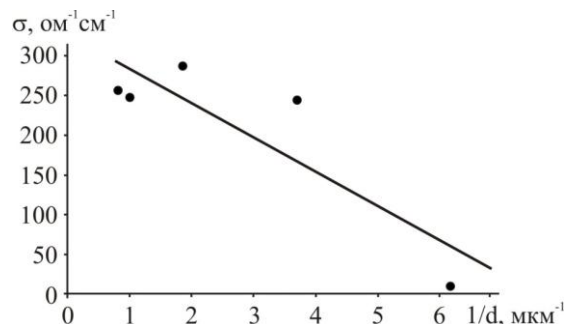


Рис. 3 – Залежність питомої електропровідності (σ) від оберненої товщини ($1/d$) для плівок PbTe-(3 мол. %)Vi₂Te₃ ($\sigma_0 = 326$ Ом⁻¹см⁻¹, $\lambda = 0,351$ мкм)

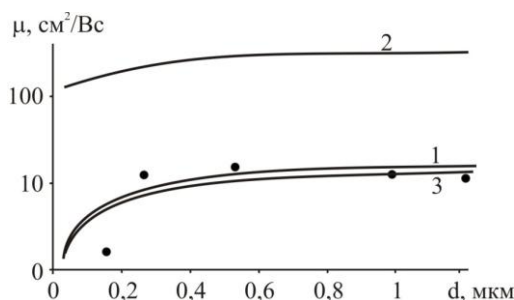


Рис. 4 – Залежність рухливості носіїв струму (μ) від товщини (d) для свіжовирощених плівок PbTe-(3 мол. %)Vi₂Te₃. Криві 1 – рухливість носіїв при врахуванні розсіювання на поверхні (μ_n); 2 – рухливість носіїв, що враховує розсіювання на межах зерен (μ_s); 3 – сумарна рухливість (μ) згідно (1), • – експеримент

(табл. 2). Маючи на увазі, що вісмут у PbTe може проявляти амфотерні властивості, які виявляються у тому, що заміщуючи свинець у катіонній підгратці ($Bi^{3+} \rightarrow Bi_{Pb}^+$) він є донором, а аніонний ($Bi^{3-} \rightarrow Bi_{Te}^-$) – акцептором, можна стверджувати про те, що у нашому випадку домінує перший механізм легування. Плівки характеризуються високими значеннями питомої електропровідності, яка досягає значень більше $(200-300)$ Ом⁻¹см⁻¹ і значними концентраціями основних носіїв $\sim 5,5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (табл. 2)

Із рис. 5 (крива 1) видно, що зі збільшенням товщини плівки d , незалежно від складу, провідність суттєво зростає з виходом на насичення при $d \approx 1$ мкм.

Схожу поведінку має холлівська концентрація носіїв струму (рис.5, крива 2): зі зростанням товщини плівок концентрація носіїв збільшується в декілька разів. Зміна концентрації носіїв пов'язана із акцепторною дією кисню, який зв'язує частину електронів провідності. Однак, завдяки високим початковим значенням концентрації електронів, незважаючи на вплив кисню всі зразки залишаються n -типу провідності.

Для розрахунків провідності приповерхневого шару у плівках аналіз електричних властивостей можна використати двошарову модель Петріца [9]. Тонку плівку у цій моделі представляють складеною з двох шарів: приповерхневого (s) (область поверхневого заряду) завтовшки d_s , концентрація носіїв струму в якому n_s , а їх рухливість μ_s , і об'ємного (b), що характеризується аналогічними величинами: d_b , n_b , μ_b які з'єднані паралельно. Товщина плівки $d = d_s + d_b$.

Таблиця 1 – Технологічні фактори і структурні параметри парофазних конденсатів PbTe - Bi₂Te₃ на підкладках із ситалу. Температура випаровування $T_B = 970$ К, температура осадження $T_{II} = 470$ К

№ зразка	Матеріал	Час наплення, τ , с	Товщина плівки d , нм	h_{max} , нм	h_{cp} , нм	R_a , нм	R_q , нм	D_{max} , нм	D_{cp} , нм
4	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	15	270	44	13	1,63	1,99	64	31
5	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	30	405	75	23	2,28	2,75	69	44
6	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	45	540	95	34	2,85	3,24	70	43
7	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	60	810	94	33	2,81	3,15	93	56
8	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	75	1215	69	36	2,64	3,01	62	38
13	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	75	1215	129	39	2,66	2,98	128	88
14	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	60	1000	131	35	2,26	2,59	157	78
15	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	30	270	65	21	1,98	2,42	75	45
16	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	15	162	35	12	1,68	2,05	61	41
21	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	75	2025	287	102	2,56	2,98	385	162
22	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	60	918	69	34	1,47	1,91	183	100
23	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	30	634	49	24	1,38	1,76	110	63
24	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	15	405	54	14	2,16	2,62	73	39

Примітка: h_{max} , D_{max} і h_{cp} , D_{cp} – максимальні і середні нормальні та латеральні розміри наноструктур; R_a , R_q – середня і середньоквадратична шорсткість.

Таблиця 2 – Термоелектричні параметри парофазних структур PbTe - Bi₂Te₃ на підкладках із ситалу при технологічних факторах згідно таблиці 1

№ зразка	Матеріал	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	R_H , см ³ /Кл	n , см ⁻³	μ , см ² /Вс	S , мкВ/К	$S^2\sigma$, мкВт/К ² см
4	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	59	41,7	$5,5 \cdot 10^{19}$	7	-146	1,2
5	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	124	5,7	$1,1 \cdot 10^{20}$	7	-123	1,9
6	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	203	0,2	$4,2 \cdot 10^{19}$	30	-173	6,1
7	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	203	0,1	$1,1 \cdot 10^{18}$	1169	-150	4,6
8	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	43	0,1	$1,5 \cdot 10^{17}$	1794	-137	0,8
13	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	253	0	$2,7 \cdot 10^{20}$	6	-68	1,2
14	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	245	0,1	$1,2 \cdot 10^{20}$	12	-72	1,3
15	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	303	0,1	$1,2 \cdot 10^{20}$	15	-113	3,8
16	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	4	0,4	$1,6 \cdot 10^{19}$	2	-472	0,9
21	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	211	0,5	$1,2 \cdot 10^{19}$	114	-275	15,9
22	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	178	1,2	$5,1 \cdot 10^{18}$	220	-318	18,0
23	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	149	1,6	$3,8 \cdot 10^{18}$	244	-387	22,4
24	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	139	1,7	$3,7 \cdot 10^{18}$	234	-409	23,2

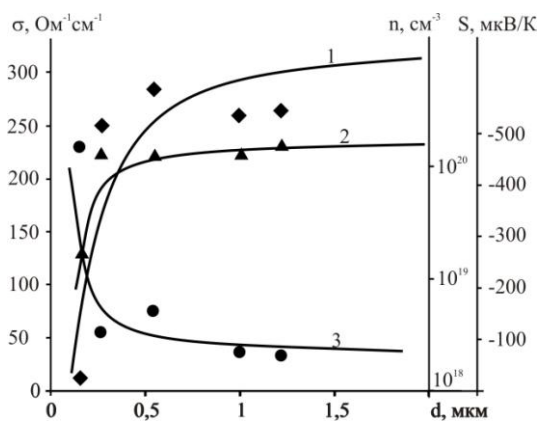


Рис. 5 – Залежності питомої електропровідності (σ – 1), концентрації носіїв струму (n – 2) та коефіцієнта Зеебека (S – 3) від товщини плівок PbTe-(3 мол. %)Bi₂Te₃. Точки – експеримент, суцільні лінії – розрахунок згідно моделі Петріца.

У цьому випадку згідно [9]:

$$\sigma = \frac{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}{d};$$

$$R = \frac{R_s \sigma_s^2 d_s + R_b \sigma_b^2 d_b}{(\sigma_s d_s + \sigma_b d_b)^2} d; \tag{6}$$

$$\mu = \sigma R = \frac{\sigma_s^2 d_s R_s + \sigma_b^2 d_b R_b}{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}.$$

За умови відомих експериментальних значень σ , R , μ та об'ємних σ_b , R_b , μ_b і d , із даних співвідношень (6) можна оцінити параметри приповерхневого шару σ_s , R_s , μ_s відповідно.

У таблиці 3 наведені результати розрахунків за моделлю Петріца параметрів електроперенесення приповерхневого шару. Розраховані залежності задовільно описують експериментально отримані результати (рис. 5) за визначених значень приповерхневих електричних параметрів d_s , σ_s , R_s , n_s , μ_s (табл. 3). Видно, що концентрація електронів приповерхневого шару n_s приблизно на порядок менша за об'ємну для всіх зразків незалежно від складу. Це пов'язано з процесом адсорбції кисню вільною поверхнею конденсатів. Коефіцієнт Зеебека значно зростає до значень ~ 480 мкВ/К зі зменшенням товщини

Таблиця 3 – Значення електричних параметрів приповерхневого шару (*s*) і об'єму (*b*) для плівок PbTe-(3 мол. %)Vi₂Te₃ на ситалі, розраховані згідно двошарової моделі Петрица

Параметри	
$d_s, \text{мкм}$	0,15
$\sigma_s, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	12
$\sigma_b, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	350
$R_s, \text{см}^3\text{Кл}^{-1}$	-0,41
$R_b, \text{см}^3\text{Кл}^{-1}$	-0,04
$n_s, \text{см}^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{19}$
$n_b, \text{см}^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{20}$
$\mu_s, \text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	4,8
$\mu_b, \text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	13,3
$S_s, \text{мкВ/К}$	-600
$S_b, \text{мкВ/К}$	-90

плівки (рис. 5, крива 3), що може бути пов'язане із пониженням концентрації основних носіїв заряду спричиненої впливом кисню. Для товстих плівок ($d > 700$ нм) він практично не залежить від товщини.

Отже, причиною того, що електропровідність приповерхневих шарів є набагато меншою ніж в об'ємі є вплив двох факторів: зменшенню концентрації основних носіїв під впливом кисню та дифузному розсіюванню їх поверхнею плівки. Значні ве-

личини приповерхневого коефіцієнта S_s (табл. 3) зумовлена процесами дроселювання носіїв струму на потенціальних бар'єрах міжзеренних меж.

У цілому, високі значення провідності, коефіцієнта Зеебека плівок на основі твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ дозволяють отримати ефективний матеріал *n*-типу провідності який є перспективним для побудови плівкових мікромодулів для термоелектричного перетворення енергії.

4. ВИСНОВКИ

1. Досліджено залежності термоелектричних параметрів для плівок твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ отриманих на ситалових підкладках від їх товщини.

2. Визначено середню довжину вільного пробігу носіїв струму та показано, що домінуючими механізмами є дифузне розсіювання носіїв на поверхні.

3. З використанням моделі Петрица визначено термоелектричні параметри приповерхневих шарів, величини яких визначаються акцепторним впливом адсорбованого атмосферного кисню.

Робота виконана згідно комплексного наукового проекту МОН України (державний реєстраційний номер 0113U000185, та ДФФД України (державний реєстраційний номер 0113U003689).

Явлення переносу в парофазних конденсатах PbTe-Vi₂Te₃ на ситаллах

Д.М. Фрейк¹, Б.С. Дзундза¹, Я.С. Яворський¹, І.С. Билина¹, Т.С. Люба²

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, ул. Шевченко, 57, 76025 Івано-Франківськ, Україна

² Каменець-Подольський національний університет імені Івана Огієнка, ул. Огієнка, 61, 32300 Каменець-Подольський, Україна

Проведено дослідження залежності структурних характеристик і електричних властивостей тонких плівок твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ складу 1,3,5 мол. % Vi₂Te₃, осаджених в відкритому вакуумі на ситалових підложках від їх товщини $d = (0,2-2)$ мкм. Визначено ефективну довжину вільного пробігу λ носіїв заряду і встановлено домінуючий механізм їх розсіяння. В рамках двошарової моделі Петрица зроблено оцінку величини термоелектричних параметрів приповерхневих шарів. Встановлено, що конденсат характеризується стабільним *n*-типом провідності і має місце дифузне розсіювання носіїв на поверхні, що обумовлює значне зменшення по відношенню до об'єму плівки величини подвижності (μ_s), удільної електропровідності (σ_s), і зростає коефіцієнта Зеебека (S_s). Отримані результати пояснені акцепторним впливом атмосферного кисню та дроселюванням носіїв заряду на потенціальних бар'єрах міжзеренних меж.

Ключові слова: Пленки твердого розчину PbTe-Vi₂Te₃, Термоелектричні властивості, Механізми розсіяння.

Transport Phenomena in the Vapor-phase PbTe-Bi₂Te₃ Condensates on Sital

D.M. Freik¹, B.S. Dzundza¹, J.S. Yavorsky¹, I.S. Bylina¹, T.S. Lyuba²

¹ *Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University, 57, Shevchenko Str., 76025 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

² *Kamenetz-Podolsk National University, 61, Ogienko Str., 32300 Kamenetz-Podolsk, Ukraine*

Dependences of the structural characteristics and electrical properties of thin films of PbTe-Bi₂Te₃ solid solutions with compositions of 1,3,5 ml. % of Bi₂Te₃ deposited in an open vacuum on the sital substrates on their thickness $d = (0,2-2)$ microns were studied. The effective mean free path λ of charge carriers is defined and the dominant mechanism of scattering is found. The values of thermoelectric parameters of the near-surface layers are estimated within the two-layer Petritz model. It is established that condensate is characterized by a stable n -type conductivity, and there is a diffuse scattering on the surface that conditions a significant decrease in the magnitude of mobility (μ_s), conductivity (σ_s), and increase in the Seebeck coefficient (S_s) with respect to the film volume. The obtained results are explained by acceptor influence of atmospheric oxygen and throttling of charge carriers on potential barriers of the interfaces.

Keywords: Films of PbTe-Bi₂Te₃ solid solution, Thermoelectric properties, Scattering mechanisms.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.М. Шперун, Д.М. Фреїк, Р.І. Запхляк, *Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів* (Івано-Франківськ: Плай: 2000).
2. Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.Й. Межиловская, *Фізика и технология тонких пленок* (Львов: Вища школа: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. Vaya, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan, *phys. status solidi a* **87**, 341(1985).
7. *Наноструктурирование халькогениды свинца: монография* (С.П. Зимин, Е.С. Горлачев) (Ярославль: ЯрГУ: 2011).
8. С.В. Волков, Є.П. Ковальчук, В.М. Огенко, О.В. Решетняк, *Нанохімія, наносистеми, наноматеріали* (Київ: Наукова думка: 2008).
9. R.L. Petritz. *Phys. Rev.* **110**, 1254 (1958).