

УДК 621.315.592

Д.М. Фрейк¹, Б.С. Дзундза¹, Я.С. Яворський¹, Т.С. Люба², О.М. Матківський¹

ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ У ПАРОФАЗНИХ КОНДЕНСАТАХ PbTe-Vi₂Te₃ НА ПОВЕРХНІ СЛЮДИ

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76025, Україна, E-mail: freik@pi.if.ua

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

Досліджено залежність структурних характеристик та електричних властивостей тонких плівок твердих розчинів PbTe-Vi₂Te₃ складів 1, 3, 5 мол. % Vi₂Te₃, осаджених у відкритому вакуумі на поверхню свіжих сколів (0001) слюди-мусковіт, від їх товщини $d=(0.1-1)$ мкм. Визначено ефективну довжину вільного пробігу носіїв заряду і встановлено домінуючий механізм їх розсіювання. У рамках двошарової моделі Петріца оцінені термоелектричні параметри 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, питомої електропровідності та зростання коефіцієнта Зеебека

Ключові слова: парофазні конденсати PbTe-Vi₂Te₃, поверхня слюди, термоелектричні параметри приповерхневих шарів

ВСТУП

Плюмбум халькогеніди широко застосовуються в напівпровідниковій техніці, зокрема PbTe є ефективним для середньотемпературних (500–750) К термоелектричних перетворювачів енергії [1, 2]. Тверді розчини на основі PbTe і телуридів елементів V групи Періодичної системи, зокрема Vi₂Te₃, дозволяють отримати матеріал із покращеними параметрами, необхідними для створення термоелектричних модулів [3].

Отримання тонкоплівкового матеріалу у значній мірі розширює межі практичного застосування. Властивості тонких полікристалічних плівок у значній мірі залежать від електронних процесів, що відбуваються на міжфазних і міжзеренних межах, дислокаціях невідповідності та інших дефектах росту [4–6]. Локалізація носіїв струму на поверхневих станах і їх захоплення обірваними зв'язками на межах кристалітів приводять до утворення біля них областей просторового заряду, концентрація і рухливість 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 свіжі сколи (0001) слюди-мусковіт.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

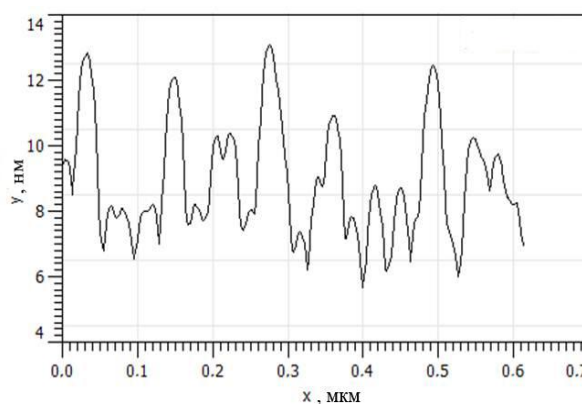
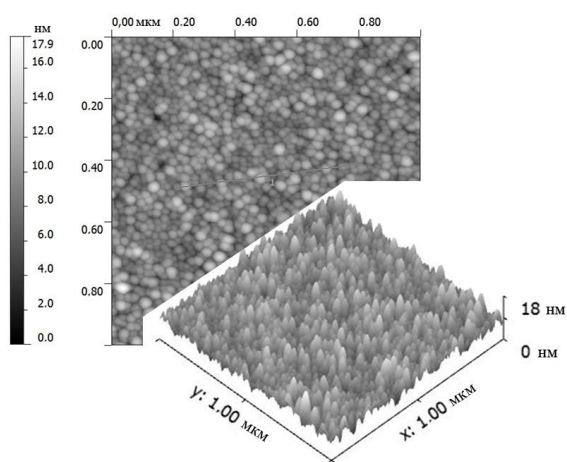
Плівки для дослідження отримували осадженням у вакуумі на підкладки слюди пари із наперед синтезованого твердого розчину PbTe-Vi₂Te₃ із вмістом 1, 3, 5 мол. % Vi₂Te₃. Температура випарника під час осадження складала $T_B = 970$ К, а температура підкладок $T_{II} = 470$ К. Товщину плівок задавали часом осадження $t = (15-75)$ с та вимірювали за допомогою мікроінтерферометра МІІ-4.

Вимірювання електричних параметрів плівок проводилося на повітрі при кімнатних температурах у постійних магнітних полях на автоматизованій установці, яка забезпечує як процеси вимірювання електричних параметрів, так і реєстрацію і первинну обробку даних, з можливістю побудови графіків часових і температурних залежностей. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти. Як омичні контакти використовувалися плівки срібла. Струм через зразки складав ≈ 1 мА. Магнітне поле було напрямлене перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 1.5 Тл.

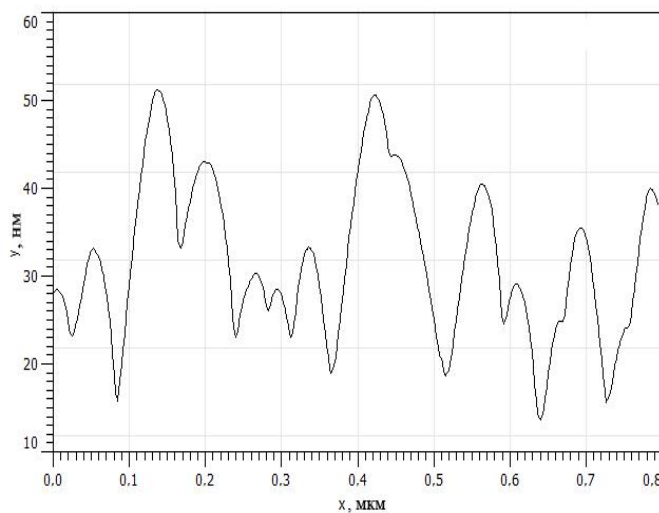
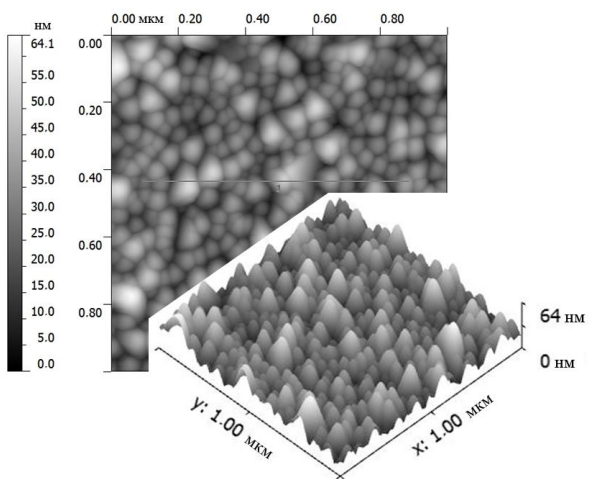
Отримані зразки досліджувалися методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimension 3000 (DigitalInstruments USA) у режимі періодичного контакту. Вимірювання проведені в центральній частині зразків з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом закруглення вістря до 10 нм (NTOMDT, Росія). За результатами АСМ досліджень, крім морфології поверхні та профілограф, у програмі WSxM 4.0 Developer 10.4 визначені розміри нанокристалів у латеральному напрямку, їх висоту та шорсткість поверхні.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Структура плівок. Деякі із результатів АСМ-досліджень поверхні конденсатів $PbTe-Vi_2Te_3$ наведено на рис. 1, 2 та в табл. 1. Технологічні фактори осадження у значній мірі визначають процеси зародження, росту і формування окремих нанокристалів, які у свою чергу є відповідальними за морфологію поверхні конденсатів у цілому.



a



б

I

II

Рис. 1. 3D і 2D АСМ-зображення (I) та профілограми (II) конденсатів $PbTe + 3\%Bi_2Te_3$, отриманих на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт при часі осадження 15 с (а, № 12) та 75 с (б, № 9); температура випарування $T_B = 970$ К, температура підкладки $T_{II} = 470$ К

Таблиця 1. Технологічні фактори і структурні параметри парофазних конденсатів PbTe - Bi₂Te₃ на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт. Температура випаровування T_B = 970 К, температура осадження T_П = 470 К

№ зразка	Плівка	Час напilenня, t, с	Товщина плівки d, нм	h _{max} , нм	h _{cp} , нм	R _a , нм	R _q , нм	D _{max} , нм	D _{cp} , нм
1	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	75	1080	61	28	2.05	2.54	64	41
2	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	60	810	39	15	1.73	2.15	65	40
3	PbTe + 5 % Bi ₂ Te ₃	30	540	26	6	0.44	0.82	115	53
9	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	75	1080	64	28	2.66	3.11	95	50
10	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	60	405	55	21	2.26	2.60	94	49
11	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	30	270	32	13	1.70	2.12	58	34
12	PbTe + 3 % Bi ₂ Te ₃	15	108	18	9	0.84	1.23	34	25
17	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	75	1485	65	31	2.48	2.84	77	49
18	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	60	675	43	20	1.82	2.12	69	39
19	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	30	270	29	12	1.54	1.95	61	32
20	PbTe + 1 % Bi ₂ Te ₃	15	135	17	7	0.92	1.30	43	30

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.

Так, зокрема, за оптимальних значень температур випаровування T_B = 970 К та підкладки T_П = 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 (10–30) нм і діаметром (25–50) нм (рис. 1, 2; табл. 1). 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 τ = 75 с, має місце злиття окремих наноструктур, що зумовлює зменшення їх щільності і формування окремих структурних «гігантів» і значне збільшення шорсткості поверхні (рис. 1 б; табл. 1, зразки № 9, 17).

Зауважимо, що при парофазному осадженні можуть реалізуватися механізми зародження за Франком-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 одразу три вимірних окремих зародків наноструктур на поверхні субстрату) [7, 8]. У нашому випадку, за всіх умов осадження конденсатів PbTe-Bi₂Te₃ на слюду, ми спостерігаємо утворення і зростання

окремих структур пірамідальної форми (рис. 1), що вказує на домінування механізму Фольмера-Вебера.

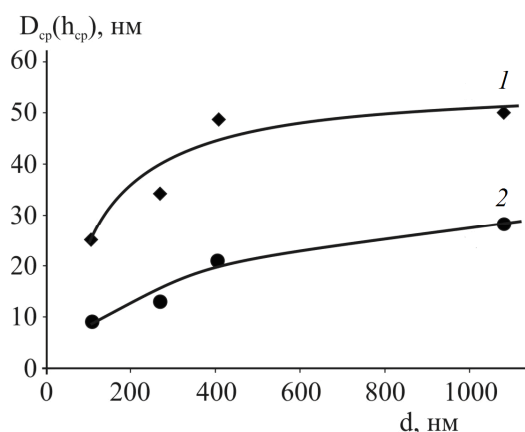


Рис. 2. Залежність середніх латеральних D_{cp} – (1) та нормальних h_{cp} – (2) розмірів кристалітів плівок PbTe + 3 % Bi₂Te₃ на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт від їх товщини (табл. 1 – №9–12)

Механізми розсіювання носіїв заряду. За умови переважання розсіювання носіїв заряду на поверхні (μ_П) і межах зерен (μ_з) та сталих концентрації носіїв і ефективної маси рухливість плівок визначається правилом Маттісена [4]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{П}} + \frac{1}{\mu_{з}}, \quad (1)$$

де μ – експериментально визначена рухливість.

Час між двома актами розсіювання на межах кристалітів τ_з визначається як

$$\tau_3 = Dv^{-1}, \quad (2)$$

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

$$\mu_3 = \frac{2q}{h} D \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{-1/3}, \quad (3)$$

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 дорівнює:

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

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

У моделі Тейлера [9] питома електропровідність σ конденсату при розсіюванні носіїв заряду на межах зерен пов'язана із ефективною довжиною вільного пробігу носіїв заряду (λ) у нескінченно товстій плівці співвідношенням

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

де σ_0 – питома електропровідність у нескінченно товстій плівці. Рівняння (5) у координатах $\sigma \sim d^{-1}$ відповідає прямій $\sigma = A \pm B$ ($A = \sigma_0$; $B = \frac{3}{8} \sigma_0 \lambda (1-P)$), яка перетинає 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) з виразу (3) визначимо величину рухливості, яка враховує вплив розсіювання носіїв на міжзеренних межах (μ_3) (рис. 4, крива 2).

Для кімнатних температур, згідно експериментальних залежностей питомої електропровідності (σ) від оберненої товщини ($1/d$) конденсатів (рис. 3), визначена середня довжина вільного пробігу носіїв струму складає $\lambda = 0.247$ мкм.

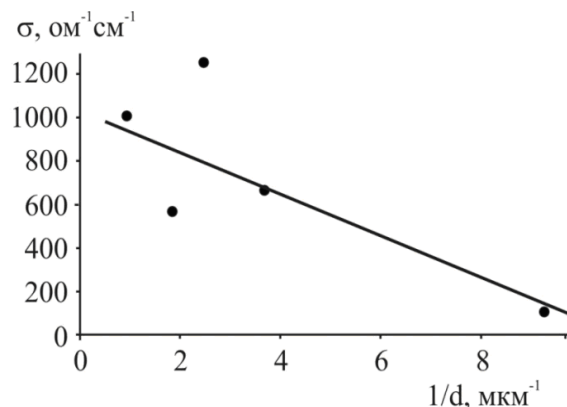


Рис. 3. Залежність питомої провідності від оберненої товщини ($1/d$) для плівок PbTe-3%Bi₂Te₃ на свіжих сколах (0001) слою-мусковіт ($\sigma_0 = 1023$ Ом⁻¹см⁻¹, $\lambda = 0.247$ мкм)

Звернемо увагу на характер залежності питомої електропровідності при зменшенні товщини конденсату, яка спадає (рис. 3). Він 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).

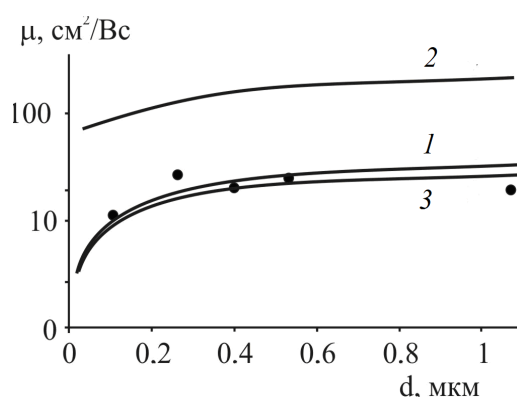


Рис. 4. Залежність рухливості носіїв струму (μ) від товщини (d) плівок PbTe-3%Bi₂Te₃ на свіжих сколах (0001) слою-мусковіт. Криві 1 – рухливість носіїв при врахуванні розсіювання на поверхні (μ_n); 2 – рухливість носіїв, що враховує розсіювання на межах зерен (μ_3); 3 – сумарна рухливість (μ) згідно (1), • – експеримент

З 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 впливає із того, що розрахункова крива (μ_n) добре співпадає з експериментом (рис. 4).

Приповерхневі шари і електричні властивості тонких плівок. Введення Bi_2Te_3 зумовлює активну донорну дію у телуриді свинцю, яка виявляється у значному зростанні концентрації електронів аж до $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (табл. 2). Маючи на увазі, що бісмут у PbTe може проявляти амфотерні властивості, які виявляються у тому, що заміщуючи плюмбум у катіонній підґратці ($\text{Bi}^{3+} \text{ @ } \text{Pb}^{2+}$), він є донором, а аніонній ($\text{Bi}^{3-} \text{ @ } \text{Te}^{2-}$) – акцептором, можна стверджувати, що у нашому

випадку домінує перший механізм легування. Плівки характеризуються високими значеннями питомої електропровідності, яка досягає значень більше $1300 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ і значними концентраціями основних носіїв $\sim 4.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (табл. 2).

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

Таблиця 2. Термоелектричні параметри парофазних структур $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт при технологічних факторах згідно таблиці 1

№ зразка	Плівка	σ , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	$R_{\text{НБ}}$, $\text{см}^3/\text{Кл}$	n , см^{-3}	μ , $\text{см}^2/\text{Вс}$	$-S$, $\text{мкВ}/\text{К}$	$S^2\sigma$, $\text{мкВт}/\text{К}^2\text{см}$
1	$\text{PbTe} + 5\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	464	0.11	$5.6 \cdot 10^{19}$	52	38	0.7
2	$\text{PbTe} + 5\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	735	0.19	$3.2 \cdot 10^{19}$	143	65	3.1
3	$\text{PbTe} + 5\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	381	3.64	$1.7 \cdot 10^{18}$	1386	89	3.0
9	$\text{PbTe} + 3\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	76	0.17	$3.6 \cdot 10^{19}$	13	98	0.7
10	$\text{PbTe} + 3\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	1303	0.01	$4.2 \cdot 10^{20}$	19	114	16.8
11	$\text{PbTe} + 3\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	661	0.04	$1.6 \cdot 10^{20}$	25	98	6.3
12	$\text{PbTe} + 3\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	105	0.11	$5.6 \cdot 10^{19}$	11	239	5.9
17	$\text{PbTe} + 1\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	13	3.32	$1.9 \cdot 10^{18}$	44	388	2.0
18	$\text{PbTe} + 1\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	31	2.35	$2.6 \cdot 10^{18}$	73	481	7.2
19	$\text{PbTe} + 1\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	197	3.2	$2.0 \cdot 10^{18}$	630	624	76.8
20	$\text{PbTe} + 1\% \text{Bi}_2\text{Te}_3$	93	6.86	$9.1 \cdot 10^{17}$	636	744	51.4

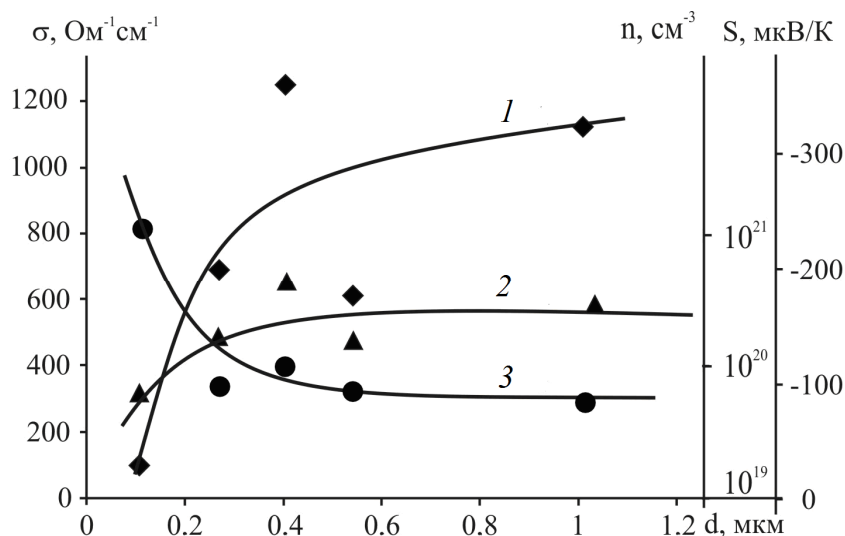


Рис. 5. Залежності питомої електропровідності σ (1), концентрації носіїв струму n (2) та коефіцієнта Зеєбека S (3) від товщини плівок $\text{PbTe-3\%Bi}_2\text{Te}_3$ на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт. Точки – експеримент, суцільні лінії – розрахунок згідно моделі Петрица

Подібну поведінку має холлівська концентрація носіїв струму (n) (рис. 5, крива 2): зі зростанням товщини плівок концентрація носіїв збільшується в декілька разів. Це пов'язано із зменшенням впливу акцепторної

дії кисню, який зв'язує частину електронів провідності. При цьому, завдяки високим початковим значенням концентрації електронів, всі зразки зберігають n -тип провідності.

Для оцінки електричних властивостей приповерхневого шару у плівках доцільно використати двошарову модель Петріца [10]. 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 $d = d_s + d_b$.

У цьому випадку згідно [10]:

$$s = \frac{s_s d_s + s_b d_b}{d}, \quad R = \frac{R_s s_s^2 d_s + R_b s_b^2 d_b}{(s_s d_s + s_b d_b)^2} d, \\ m = sR = \frac{s_s^2 d_s R_s + s_b^2 d_b R_b}{s_s d_s + s_b d_b}. \quad (6)$$

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

Як видно з таблиці 3, розраховані криві задовільно описують експериментально отримані результати (рис. 5) за визначених значень приповерхневих електричних параметрів d_s , σ_s , R_s , n_s , μ_s . 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 ~ 330 мкВ/К зі зменшенням товщини плівки (рис. 5, крива 3), що може бути пов'язане з пониженням концентрації основних носіїв заряду, спричиненої впливом кисню. Для товстих плівок ($d > 600$ нм) він практично не залежить від товщини.

Таблиця 3. Значення електричних параметрів приповерхневого шару (s) і об'єму (b) для плівок PbTe-(3 мол. %)Vi₂Te₃ на свіжих сколах (0001) слюди-мусковіт, розраховані згідно двошарової моделі Петріца

Параметр	
d_s , мкм	0.11
σ_s , Ом ⁻¹ см ⁻¹	70
σ_b , Ом ⁻¹ см ⁻¹	1200
R_s , см ³ Кл ⁻¹	-0.11
R_b , см ³ Кл ⁻¹	-0.025
n_s , см ⁻³	$5.68 \cdot 10^{19}$
n_b , см ⁻³	$2.51 \cdot 10^{20}$
μ_s , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	7.7
μ_b , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	30
S_s , мкВ/К	-330
S_b , мкВ/К	-90

Отже, причиною того, що електропровідність приповерхневих шарів є набагато меншою, ніж в об'ємі, є вплив двох факторів: зменшення концентрації основних носіїв під впливом кисню та дифузне розсіювання їх поверхнею плівки. Значні величини 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 розчині PbTe-Vi₂Te₃ дозволяють отримувати ефективний матеріал *n*-типу провідності, який є перспективним для побудови плівкових мікромодулів термоелектричного перетворення енергії.

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 поверхні слюди

Д.М. Фрейк, Б.С. Дзундза, Я.С. Яворський, Т.С. Люба, А.Н. Матківський

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
ул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76025, Україна, freik@ri.if.ua
Каменець-Подольський національний університет імені Івана Огієнко
ул. Огієнко, 61, Каменець-Подольський, 32300, Україна*

Исследованы зависимости структурных характеристик и электрических свойств тонких пленок твердых растворов PbTe-Vi₂Te₃ составов 1, 3, 5 мол. % Vi₂Te₃, осажженных в вакууме на свежие сколы (0001) слюды-мусковит, от их толщины $d=(0.1-1)$ мкм. Определено эффективную длину свободного

пробега носителей заряда и установлен доминирующий механизм их рассеяния. В рамках двухслойной модели Петрица оценены термоэлектрические параметры приповерхностных слоев. Установлено, что конденсат характеризуется стабильным *n*-типом проводимости и имеет место диффузное рассеяние носителей на поверхности, что обуславливает значительное уменьшение по отношению к объему пленок величины подвижности, удельной электропроводности и рост коэффициента Зеебека.

Ключевые слова: парофазные конденсаты $PbTe-Bi_2Te_3$, поверхность слюды, термоэлектрические параметры приповерхностных слоев

Transport phenomena in vapor-phase $PbTe-Bi_2Te_3$ condensate on mica substrates

D.M. Freyik, B.S. Dzundza, Ya.S. Yavorskiy, T.S. Lyuba, O.N. Matkivskiy

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University
57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, fcss@pu.if.ua
Ivan Ogienko Kamenetz-Podolsk National University
61 Ogienko Str., Kamenetz-Podolsk, 32300, Ukraine

*Dependences of the structural characteristics and electrical properties of thin films of solid solutions $PbTe-Bi_2Te_3$ containing 1, 3, 5 mol. % Bi_2Te_3 , deposited in open vacuum for fresh chips (0001) of mica muscovite, on their thickness $d=(0.1-1)$ microns were studied. The effective mean free path of charge carriers was detected and the dominant scattering mechanism was determined. Within the two-layer Petritz model an estimation the thermoelectric parameters extent of surface layers was carried out. It has been found that the condensate has stable *n*-type conductivity and there is diffuse scattering on the surface, which leads to a significant decrease in relation to the films volume for mobility, conductivity, and increasing Seebeck efficient.*

Keywords: vapor-phase $PbTe-Bi_2Te_3$ condensate, mica substrate, thermoelectric parameters of surface layers

ЛІТЕРАТУРА

1. Шперун В.М., Фреїк Д.М., Затухляк Р.І. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів. – Івано-Франківськ: Плай, 2000. – 250 с.
2. Фреїк Д.М., Гапуцук М.А., Межиловська Л.Й. Фізика і технологія тонких плінок. – Львів: Вища школа, 1988. – 18 с.
3. Фреїк 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 $PbTe-Sb_2(Bi_2)Te_3$ // Фізика і хімія твердого тіла. – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 82–89.
4. Zemel J.N. Recent developments epitaxial IV-VI films // J. Luminescence. – 1973. – V. 7. – P. 524–541.
5. Грин М. Поверхностные свойства твердых тел. – Москва: Мир, 1972. – 432 с.
6. Vaya P.R., Majht J., Gopalam B.S.V., Dattatrepan C. Thickness dependence of hall mobility of HWE grown $PbTe$ films // Phys. Stat. Sol. A. – 1985. – V. 87. – P. 341–350.
7. Зимин С.П., Горлачев Е.С. Наноструктурированные халькогениды свинца: монографія. – Ярославль: ЯрГУ, 2011. – 230 с.
8. Волков С.В., Ковальчук Є.П., Огенко В.М., Решетняк О.В. Нанохімія, наносистеми, наноматеріали. – Київ: Наукова думка, 2008. – 424 с.
9. Tellier C.R., Tossier A.J., Boutrit C. The Mayadas-Shatzkes conduction model treated as a Fuchs-Sondheimer model // Thin Solid Films. – 1977. – V. 44. – P. 201–208.
10. Petritz R.L. Theory of an experiment for measuring the mobility and density of carriers in the space-charge region of a semiconductor surface // Phys. Rev. – 1958. – V. 110. – P. 1254–1260.

Надійшла 03.10.2013, прийнята 15.01.2014