

Я.С. Яворський<sup>1</sup>, Б.С. Дзундза<sup>1</sup>, Г.Д. Матеїк<sup>2</sup>, О.Б. Костюк<sup>1</sup>, А.І. Ткачук<sup>1</sup>

## Приповерхневі шари та профілі електричних параметрів тонких плівок PbTe:Sb

<sup>1</sup>Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний університет нафти і газу вул. Карпатська 15, Івано-Франківськ, 76000, Україна

Досліджено розподіл за товщиною ефективних і локальних термоелектричних параметрів тонких плівок PbTe:Sb, вирощених із парової фази методом відкритого випаровування у вакуумі на ситалових підкладах. Показано, що важливу роль у формуванні приповерхневих шарів відіграє атмосферний кисень, який створює додаткові акцепторні центри.

**Ключові слова:** тонкі плівки, телурид свинцю, питомий опір, рухливість, легування.

Стаття постуила до редакції 11.01.2012; прийнята до друку 15.03.2012.

### Вступ

Тонкі плівки халькогенідів свинцю – перспективні матеріали для створення детекторів та джерел випромінювання в інфрачервоному діапазоні оптичного спектру [1], а також як термоелектричний матеріал в середній області температур (500-700 К) [2].

Встановлено, що їх властивості визначаються як технологічними факторами процесу вирощування, так і умовами їх наступної експлуатації [3]. При цьому домінуючу роль, через низько розмірний стан, відіграють міжфазні межі. У таких системах поверхня створює для електронів потенціальні бар'єри, що суттєво впливає на явища переносу. Крім того, взаємодія поверхні із атмосферним киснем значно ускладнює поверхневі процеси [4,5]. Легування донорною домішкою основної матриці призводить до утворення додаткових центрів розсіяння, що також впливає на кінетичні коефіцієнти конденсату.

У даній роботі досліджено розподіл за товщиною ефективних і локальних питомої провідності, холлівського коефіцієнта та термо-ЕРС у плівках PbTe:Sb.

### І. Методика експерименту

Плівки для дослідження отримували з парової фази на ситалових підк методом відкритого випаровування у вакуумі наперед синтезованої

сполуки. Температура випарника під час осадження складала  $T_v = 700$  оС, а температура підкладок  $T_p = 150$  оС. Наявність “пічки-каруселі” із п'яти нагрівників підкладки дозволяла отримати плівки різної товщини в одному технологічному процесі. Товщину плівок у межах (0,08-1,2) мкм задавали часом осадження в інтервалі (0,25-5) хв та визначали за допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4.

Вимірювання електричних параметрів свіжо вирощених плівок проводили при кімнатній температурі у постійному магнітному полі. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти. В якості омичних контактів використовувалися плівки срібла. Струм через зразки складав  $\approx 1$  мА. Магнітне поле напрямлялося перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 1,5 Тл.

Залежність питомої провідності, коефіцієнта Холла і термо-ЕРС плівок PbTe:Sb від товщини зображено на рис. 1.

### ІІ. Елементи теорії розрахунків

Виміряні ефективні кінетичні параметри (рис. 1) є деякими інтегральними величинами і залежать від профілю розподілу концентрації носіїв заряду і питомої електропровідності, тобто локальних значень.

У загальному випадку ефективні електричні параметри питома електропровідність  $\sigma(d)$ , холлівський коефіцієнт  $R_H(d)$ , термо-ЕРС  $S(d)$ ,

концентрації  $n(d)$  і рухливості носіїв  $\mu(d)$  плівок пов'язані з відповідними локальними  $\sigma(z)$ ,  $R_H(z)$ ,  $\alpha(z)$ ,  $p(z)$ ,  $\mu(z)$  значеннями співвідношеннями [6]:

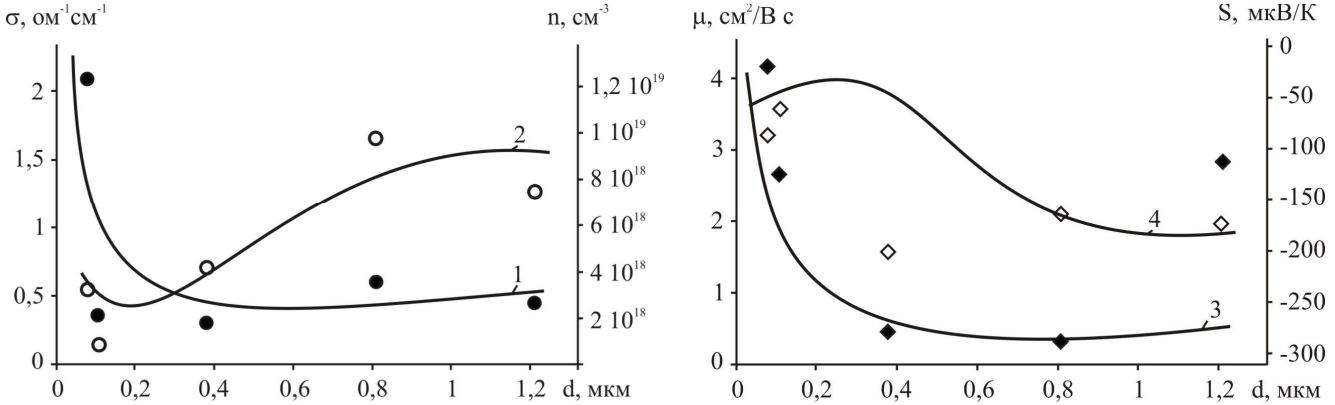


Рис. 1. Залежність питомої провідності  $\sigma$  – (1,  $\circ$ ), холлівської концентрації  $n$  – (2,  $\bullet$ ), рухливості  $\mu$  – (3,  $\blacklozenge$ ), термо-

$$\sigma(z) = \frac{\left[ \sigma \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) - \sigma \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \right]}{\Delta d}; \quad (1)$$

$$R_H(z) = \frac{\left[ R_H \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) - R_H \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \right] \cdot \Delta d}{\left[ \sigma \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) - \sigma \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \right]^2}; \quad (2)$$

$$\mu(z) = R_H(z) \sigma(z); \quad (3)$$

$$p(z) = \frac{1}{R_H(z) \cdot e}; \quad (4)$$

$$S(z) = \frac{S \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) - S \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right)}{\sigma \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i + \frac{\Delta d}{2} \right) - \sigma \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left( d_i - \frac{\Delta d}{2} \right)}. \quad (5)$$

Тут  $d_i \pm \Delta d/2$  – задана товщина плівки, яка відрізняється внеском наступного елементарного шару  $\Delta d$ ;  $z$  – координата цього шару.

Для оцінки провідності приповерхневого шару у плівках аналіз електричних властивостей проводився у рамках двошарової моделі Петріца [7]. 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  $\mu_s$ , і об'ємного (b), які з'єднані паралельно. Товщина плівки  $d = d_s + d_b$ .

У цьому випадку [7]:

$$\sigma = \frac{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}{d}; \quad (6)$$

$$R = \frac{R_s \sigma_s^2 d_s + R_b \sigma_b^2 d_b}{(\sigma_s d_s + \sigma_b d_b)^2} d; \quad (7)$$

$$\mu = \sigma R = \frac{\sigma_s^2 d_s R_s + \sigma_b^2 d_b R_b}{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}; \quad (8)$$

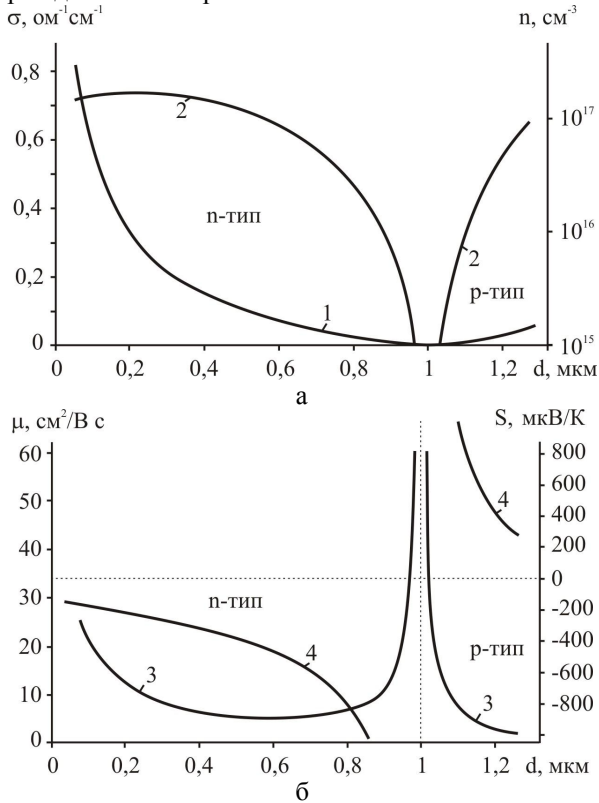
$$S = \frac{S_s \sigma_s d_s + S_b \sigma_b d_b}{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}. \quad (9)$$

Співвідношення (6)-(9), за умови вимірних значень  $\sigma$ ,  $R_H$ ,  $\mu$ ,  $S$  та відомих  $\sigma_b$ ,  $R_b$ ,  $\mu_b$ ,  $S_b$  і  $d$ , дає можливість наближено визначити параметри приповерхневого шару  $\sigma_s$ ,  $R_s$ ,  $\mu_s$  відповідно.

### III. Аналіз результатів

Свіжовирощені плівки характеризувались n-

типом провідності і немонотонною залежністю концентрації носіїв (рис. 1, крива 2), яка при зменшенні товщини спадає. Провідність і рухливість зростають в області малих товщин (рис. 1, крива 1,3), а термо-ЕРС, навпаки, більша для товстих плівок (рис. 1, крива 4), крім того локальні (рис. 2) значення електричних параметрів виявляють біля поверхні, завдяки дії кисню, область р-типу провідності. На повітрі протягом двох діб всі зразки змінюють провідність з n на р-тип.



**Рис. 2.** Профілі розподілу за товщиною локальних значень електричних параметрів (питомої провідності  $\sigma$  – (1), холлівської концентрації  $n$  – (2), рухливості  $\mu$  – (3) термо-ЕРС  $S$  – (4)) від товщини  $d$  для плівок PbTe:Sb. Нуль відповідає межі розділу “плівка-підкладка”.

Для пояснення немонотонних змін концентрації носіїв були розраховані профілі розподілу електричних параметрів по товщині (рис. 2), що в поєднанні з розрахунками згідно моделі Петріца дало можливість оцінити вплив приповерхневих шарів на електричні властивості плівок. Результати розрахунку наведено в таблиці.

Значення електричних параметрів приповерхневого шару, розраховані згідно моделі Петріца, підтверджують отримані з профілів розподілу результати про значний вплив кисню і наявність досить товстого (~280 нм) поверхневого шару р-типу провідності. Порівняно низькі значення ефективної концентрації носіїв (рис. 1, крива 2) в легованому конденсаті PbTe:Bi зумовлено якраз акцепторним впливом кисню. Наявність приповерхневого шару р-типу і взаємною компенсацією також можна пояснити те, що локальні

значення рухливості на порядок вищі ніж експериментальні.

**Таблиця**

Значення параметрів приповерхневого шару (s) і об'єму (b) для плівок SnTe

Параметри	Свіжовирощені
$d_s$ , мкм	0,28
$\sigma_s$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	0,1
$\sigma_b$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	0,8
$R_s$ , см <sup>3</sup> Кл <sup>-1</sup>	40
$R_b$ , см <sup>3</sup> Кл <sup>-1</sup>	-0,9
$\rho_s$ , см <sup>-3</sup>	1,56E+17
$\rho_b$ , см <sup>-3</sup>	6,94E+18
$\mu_s$ , см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	4
$\mu_b$ , см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	0,72
$S_s$ , мкВ/К	270
$S_b$ , мкВ/К	-200

У будь-якому випадку неоднорідність плівок варто враховувати при інтерпретації експериментальних результатів. Внаслідок неоднорідності провідності матеріалу по товщині, визначені з вимірювань ефекту Холла і електропровідності, концентрація і рухливість носіїв струму є деякими усередненими величинами, що залежать від профілю їх розподілу. Більше того, навіть тип провідності, в деяких випадках, може бути усередненою величиною. Такий стан має місце, коли в плівці спостерігається р-п-перехід як у нашому випадку (рис. 2).

## Висновки

1. Досліджено розподіл за товщиною ефективних і локальних значень електричних параметрів для плівок телуриду свинцю легованого сурмою, вирощених із парової фази методом відкритого випаровування у вакуумі на ситалових підкладках.

2. Для плівок із усередненою електронною провідністю на поверхні виявлено досить товстий (~280 нм) шар р-типу. Показано, що він виникає внаслідок акцепторної дії атмосферного кисню вже при кімнатній температурі.

3. В рамках моделі Петріца розраховано значення електричних параметрів приповерхневих шарів.

*Робота частково виконана у рамках наукових проектів МОН України (№ реєстрації 0111U001766), ДФФД України (державні реєстраційні номери 0111U00550074, 0112U003693) та НАН України (державний реєстраційний номери 0110U006281).*

**Яворський Я.С.** – аспірант;  
**Дзундза Б.С.** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;  
**Матеїк Г.Д.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент;  
**Костюк О.Б.** – студентка;  
**Ткачук А.І.** – аспірант.

- [1] J.N. Zemel. J. Luminescence 7, 524 (1973).
- [2] D.M. Freik, M.A. Galushhak, L.J. Mezhirovskaja. Fizika i tehnologija tonkih plenok (Vishha shkola, L'vov, 1988).
- [3] A.N. Kovalev, V.V. Ostroborodova, V.I. Paramonov, P.I. Folomin. Fizika i tehnika poluprovodnikov 23(11), 2039 (1989).
- [4] Ju.A. Bojkov, V.A. Kutasov. Fizika tverdogo tela 25(10), 2984 (1983).
- [5] D.M. Freik, B.S. Dzundza, Ja.S. Javors'kij, O.B. Kostjuk. Fizika i himija tverdogo tila 12(1), 85 (2011).
- [6] D.M. Freik, Ja.P. Salij, O.Ja. Dvgij. Fizika i himija tverdogo tila 2(4), 711 (2001).
- [7] R.L. Petritz. Theory of an Experiment for Measuring the Mobility and Density of Carriers in the Space-Charge Region of a Semiconductor Surface

Ya.S. Yavorskiy<sup>1</sup>, B.S. Dzundza<sup>1</sup>, G.D. Mateik<sup>2</sup>, O.B. Kostuk<sup>1</sup>, A.I. Tkachuk<sup>1</sup>

## Near-Surface Layers and Profiles of Electric Parameters of Thin Films PbTe:Sb

<sup>1</sup>Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)  
<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

Investigated the distribution of the thickness and effective local thermoelectric parameters of thin films of PbTe:Sb, grown from the vapor phase by open evaporation in a vacuum at sital substrates. It is shown that an important role in the formation of surface layers of the atmosphere plays oxygen, which creates additional acceptor centers.

**Keywords:** thin films of lead telluride, resistivity, mobility, doping.