

Д.М. Фреїк<sup>1</sup>, Б.С. Дзундза<sup>1</sup>, Г.Д. Матеїк<sup>2</sup>, Ю.В. Кланічка<sup>1</sup>

## Перенесення носіїв струму у дрібнодисперсних плівках кадмій і плумбум телуридів

<sup>1</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua

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

Досліджено залежність провідності і рухливості носіїв струму від температури в тонких полікристалічних плівках р-SaTe і р-PbTe, вирощених на скляних підкладках. Встановлено механізми перенесення носіїв струму на міжзеренних межах, пов'язані із термоелектронною емісією.

**Ключові слова:** тонкі плівки, полікристаліти, міжзеренні межі, бар'єри.

Стаття поступила до редакції 12.01.2006; прийнята до друку 15.03.2006

### Вступ

Плівки кадмій і плумбум телуридів є перспективними для створення на їх основі активних елементів мікро- і оптоелектроніки: детекторів і джерел інфрачервоного випромінювання оптичного спектру [1], термоелектричних перетворювачів енергії [2]. Так зокрема полікристалічний кадмій телурид є перспективним для створення фотоперетворювачів, теоретично можлива ефективність яких складає 29 %, але на практиці вона не перевищує 12 %, що зв'язано із складністю керування транспортними властивостями у полікристалічних плівках [3].

При дослідженні явищ переносу в напівпровідникових плівках добре відома залежність властивостей товщини, обумовлена тим, що поряд з об'ємними механізмами розсіяння носіїв заряду істотну роль відіграють процеси на поверхні. Крім того у ряді полікристалічних плівок, домінує розсіювання носіїв струму на міжзеренних межах, так як сумарна поверхня кристалітів може на декілька порядків перевищувати поверхню плівки. [4].

### І. Елементи теорії

Полікристалічний зразок являє собою сукупність невеликих кристалів, які розділені міжзеренними межами (рис. 1, а). Якщо структура кристалітів упорядкована, то міжзеренні межі є розупорядкованими. Згідно моделі запропонованої у роботах [3, 4], електронні властивості полікристалу

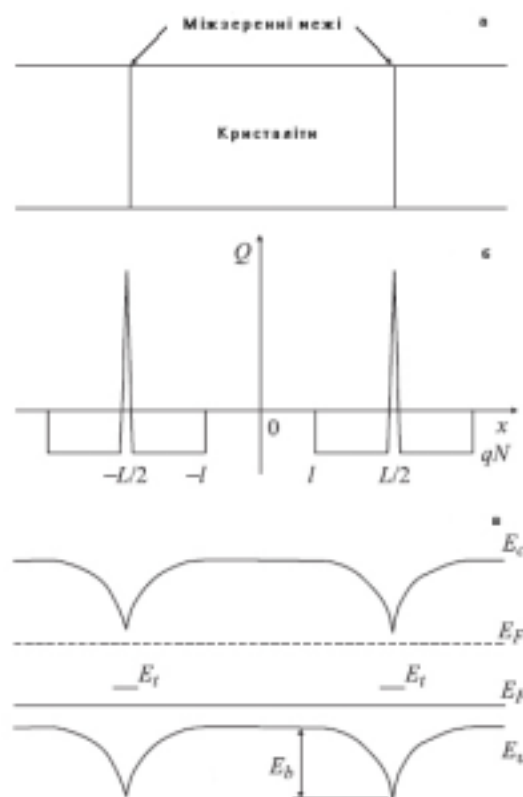


Рис. 1. Модель міжзеренної межі в полікристалах р-типу провідності: а – структура полікристала; б – розподіл заряду Q в зерні і на межі; в – зонна діаграма, E<sub>c</sub> – край зони провідності, E<sub>v</sub> – край валентної зони, E<sub>t</sub> – рівень ловушок, E<sub>F1</sub> – рівень Фермі у власному напівпровіднику, E<sub>b</sub> – висота

енергетичного бар'єру.

визначаються захопленням носіїв обірваними зв'язками атомів, які локалізовані на міжзерених межах, а струм через них проходить за рахунок термоелектронної емісії.

За умови, що всі кристаліти мають однакові лінійні розміри  $L$ , [см], концентрація домішок  $N$  [см<sup>-3</sup>] тільки одного типу, а ширина міжзерених меж  $l$  [см] із концентрацією ловушок  $Q_l$  [см<sup>-2</sup>] і те, що всі вільні носії заряду поблизу межі  $L/2 - l$  захоплюється лопушками утворюється збіднена область із характерним розподілом електричного заряду  $Q$  (рис. 1, в) і відповідними енергетичними рівнями  $E_l$  у забороненій зоні для матеріалу р-типу (рис.1, г).

Для випадку  $LN < Q_l$ , що відповідає умові, коли кристаліти повністю збіднені на носії, а лопушки тільки частково заповненні висота потенціального бар'єру  $V_b$  лінійно збільшується із ростом концентрації  $N$  у погодженні з виразом [3]:

$$V_b = \frac{qL^2N}{8\epsilon}, \quad (1)$$

Рівень Фермі  $E_F$  у цьому випадку визначається співвідношенням

$$E_F = E_c - kT \ln \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{Q_c}{LN} - 1 \right) \right]. \quad (2)$$

При  $LN > Q_l$  тільки частина кристалітів збіднена, а величина потенціального бар'єру чисельно рівна

$$V_b = \frac{qQ_l^2}{8\epsilon N}. \quad (3)$$

Тут  $q$  – заряд електрона,  $T$  – температура,  $k$  – стала Больцмана,  $\epsilon$  – діелектрична стала.

Сумарний струм через полікристалал визначається як провідністю кристалітів, так і механізмом переходу носіїв з одного кристаліта в інший, тобто провідністю межзерених меж. Як правило, провідність кристалів істотно перевищує провідність меж, тому, вивчаючи транспортні властивості полікристалів, в першу чергу слід розглядати провідності межзерених областей.

Розглядають два найважливіших процеси, що визначають струм через межі: тунельні процеси і електронна емісія. Тунельні струми істотні у разі дуже вузьких бар'єрів, наприклад, в сильно легованих полікристалах. У помірно легованих полікристалах тунельні струми малі в порівнянні із струмами електронної емісії і ними можна знехтувати.

Густина струму електронної емісії при прикладенні до бар'єру напруги  $U$  рівна [3]:

$$j = \frac{q^2 p}{\sqrt{2\pi m^* kT}} U e^{-\frac{qV_b}{kT}} \quad (4)$$

із формули (4) провідність полікристалу з розміром кристаліта  $L$  буде визначатися як.

$$\sigma = \frac{Lq^2 p}{\sqrt{2\pi m^* kT}} e^{-\frac{qV_b}{kT}}, \quad (5)$$

Враховуючи, що

$$\sigma = q\mu p, \quad (6)$$

ефективне значення рухливості при цьому буде

$$\mu = \frac{Lq}{\sqrt{2\pi m^* kT}} e^{-\frac{E_b}{kT}}. \quad (7)$$

За умови, що  $qV_b = E_b$   $V_b$  – потенціал бар'єру маємо [3]:

$$\sigma \sim \exp \left[ - \left( \frac{E_g}{2} - E_F \right) / kT \right] \text{ при } NL < Q_l, \quad (8)$$

$$\sigma \sim T^{-1/2} \exp \left[ - \left( E_g / kT \right) \right] \text{ при } NL > Q_l. \quad (9)$$

Тут  $p$  – концентрація дірок,  $m^*$  – ефективна маса.

## II. Методика експерименту

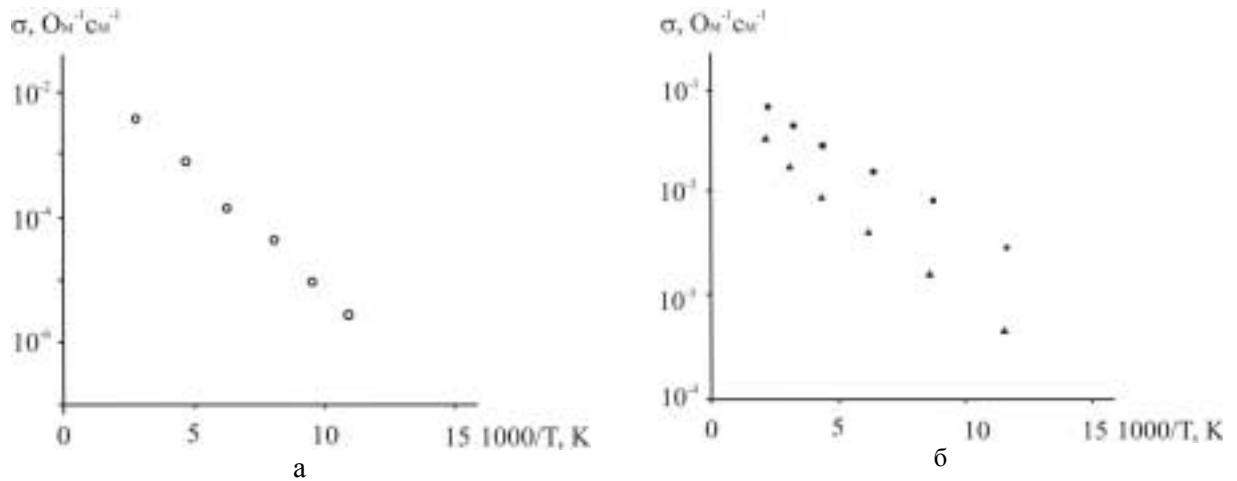
Полікристалічні плівки одержували методом гарячої стінки осадженням на скляні підкладки згідно [5]. Товщина плівок визначалася часом напилення. Структура плівок досліджувалася електронномікроскопічними та рентгенівськими методами. Електропровідність плівок вимірювалася на постійному струмі в інтервалі температур (77-300 К). Всі плівки, незалежно від температури і розміру зерна, мали діркову провідність.

Основними параметрами, що визначають розмір зерна в полікристалічних плівках є температура підкладки і товщина плівки [6]. Зменшуючи товщину плівки до 0,05 мкм і знижуючи температуру підкладки до температури рідкого азоту можна одержати плівки з розміром зерен  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  см.

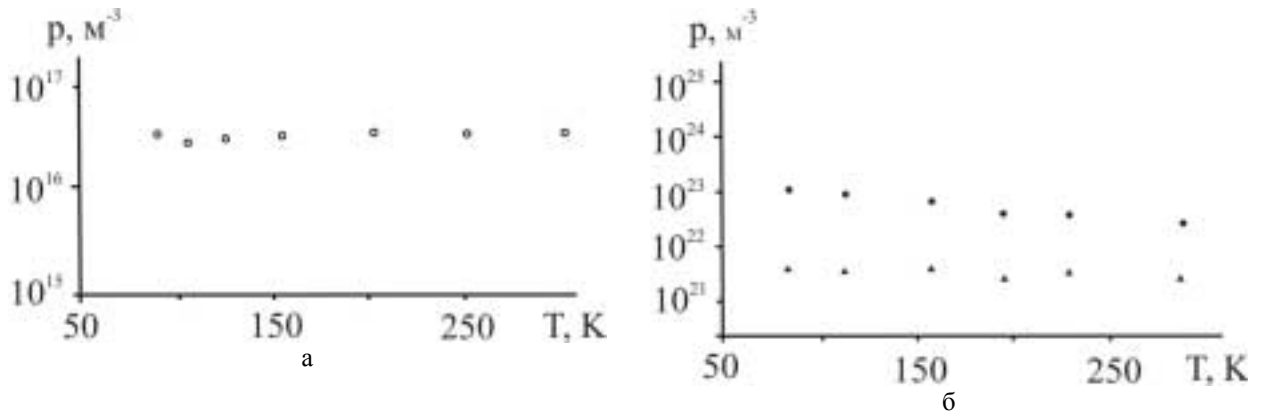
## III. Результати досліджень та їх аналіз

На рис. 2-4 наведено експериментальні результати для полікристалічних плівок р-CdTe і р-PbTe з різним розміром кристалітів.

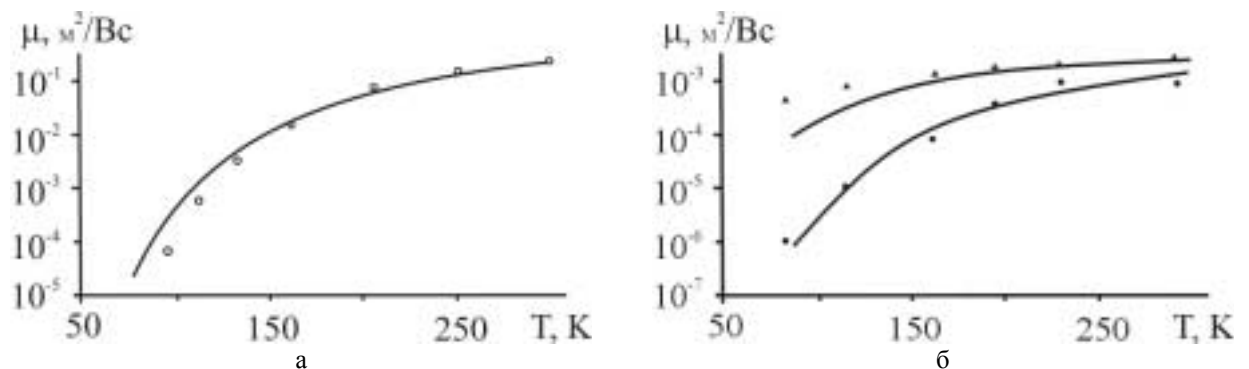
Розраховані з нахилу прямолінійних ділянок температурних залежностей питомих електропровідностей (рис. 2) значення енергій активації виявилися рівними 0,09 еВ для плівок кадмій телуриду (рис. 2, а) і (0,06 – 0,1) еВ для р-PbTe (рис. 2, б). При цьому для останніх енергія активації залежить від величини кристалітів: зростає від 0,06 еВ до 0,1 еВ із зменшенням його розмірів від  $10^{-6}$  см до  $2 \cdot 10^{-7}$  см (рис. 2, б). Отримані значення енергій активації приводять до наступних висновків. По-перше, їх не можна пов'язати із захопленням дірок – основних носіїв у плівках – при зменшенні температури акцепторними рівнями ( $E_v + 0.09$ ) еВ для р-CdTe чи ( $E_v + 0.06$ ) еВ та ( $E_v + 0,1$ ) еВ для р-PbTe, так як для розглядуваного інтервалу температур всі акцепторні рівні іонізовані [3] і тому не можуть давати будь якого внеску у зміну концентрації носіїв. Це і слідує із результатів експериментів температурної залежності концентрації носіїв (рис. 3). Таким чином можна стверджувати, що визначені енергії активації пов'язані із потенціальними бар'єрами на межах зерен, які і призводять до зменшення рухливості дірок при зменшенні температури (рис. 4). Зауважимо, що експериментальні результати добре співпадають із розрахунками, проведеними за виразом [7], що вказує



**Рис. 2.** Температурна залежність електропровідності полікристалічних плівок p-CdTe (а) ( $L=10^{-4}$  см,  $E_b=0,09$  eВ), p-PbTe (б) ( $L$ , см: ●  $-1 \cdot 10^{-6}$ , ▲  $-2 \cdot 10^{-7}$ .  $E_b$ , eВ: ●  $-0,04$ , ▲  $-0,1$ ) з різними розмірами кристалітів.



**Рис. 3.** Залежність концентрації носіїв струму від температури для полікристалічних плівок p-CaTe (а) ( $L = 10^{-4}$  см) та p-PbTe (б) (1 —  $L=10^{-6}$  см, 2 —  $L=2 \cdot 10^{-7}$  см)



**Рис. 4.** Залежність рухливості носіїв струму від температури для полікристалічних плівок p-CdTe (а) ( $L = 10^{-4}$  см) та p-PbTe (б) (1 —  $L=10^{-6}$  см, 2 —  $L=2 \cdot 10^{-7}$  см) (точки – експеримент, суцільна лінія розрахунок згідно (7)).

на правомірність вибору фізичної моделі для полікристалічного матеріалу. Зменшення рухливості носіїв, за рахунок розсіювання на бар'єрах, є причиною зменшення провідності із пониженням температури (рис. 2). Тепер друге – збільшення

енергії активації – міжзеренних потенціальних бар'єрів – із зменшенням розмірів кристалітів  $L$  може бути пояснено реалізацією умови  $LN > Q_1$ , для якої  $V_b$  згідно (3) зростає зі збільшенням поверхневої густини ловушок  $Q_1$ . Дійсно, зменшення розмірів

кристалітів у нашому випадку веде до зростання площі їх поверхні міжзеренних меж, що, безумовно, приводить і до зростання концентрації  $Q_i$ , а отже і величина бар'єру, що і підтверджується експериментом (рис. 2).

Таким чином, у дрібнодисперсних полікристалічних плівках р-CaTe і р-PbTe домінуючу роль у транспортних явищах відіграють процеси на міжзеренних межах, пов'язані із утворенням потенціальних бар'єрів та термоемісію носіїв струму.

## Висновки

1. Досліджено температурні залежності коефіцієнтів транспортних явищ для дрібнодисперсних полікристалічних плівок р-CaTe і р-PbTe.
2. Визначено енергії міжзеренних потенціальних меж які складають 0,09 еВ для плівок р-CaTe і (0,06 – 0,1) еВ для плівок р-PbTe.

3. Показано, що модель потенціальних бар'єрів із лопушками за умови термоелектронної емісії носіїв струму через межі добре пояснює експеримент для дрібнокристалічних плівок.

*Робота виконана при підтримці МОН України (0106U000220).*

**Фреїк Д.М.** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри;  
**Дзундза Б.С.** – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;  
**Матеїк Г.Д.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики і новітніх технологій;  
**Кланічка Ю.В.** – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] Ф.Ф. Сизов. Твердые растворы халькогенидов свинца и олова и фотоприемники на их основе // *Зарубежная электронная техника*, 24, сс. 31-48 (1977).
- [2] В.М. Шперун, Д.М. Фреїк, Р.І. Запхляк. *Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів*. Плаї, Івано-Франківськ (2000).
- [3] С.А. Колосов, Ю.В. Клевков, А.Ф. Плотников. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe // *Физика и техника полупроводников*. 38(4), сс. 473-478 (2004).
- [4] *Поверхностные свойства твердых тел*. Под ред. Грына. Мир, М. (1972).
- [5] Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.И. Межыловская. *Физика и техника полупроводниковых пленок*. Вища школа, Львов (1988).
- [6] Ю.А. Браташевський, В.Д. Окунев, Н.Н. Пафомов, З.А. Самойленко. Размерные эффекты в поликристаллических пленках PbTe // *Физика твердого тела*, 27(3), сс. 723-729 (1985).

D.M. Freik<sup>1</sup>, B.S. Dzundza<sup>1</sup>, G.D. Mateik<sup>2</sup>, Yu.V. Klanichka<sup>1</sup>

## Charge Carrier Transport in Low-Disperse Cadmium and Lead Tellurides Films

<sup>1</sup>Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas  
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

The dependence of the conductivity and charge carrier mobility due temperature at the p-CaTe і p-PbTe polycrystalline thin films, deposited on glasses substrates. The charge carrier transport at the inter-grain boundary that shown by thermal-electronic emission are receive.