

Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза

## Вплив структурної завершеності плівок селеніду свинцю на механізми розсіювання носіїв струму

*Фізико-хімічний інститут, кафедра фізики і хімії твердого тіла  
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)*

Досліджено залежність кінетичних коефіцієнтів плівок PbSe, вирощених із парової фази на свіжих сколах слюди і ВаF2 від товщини. Показано, що якщо для мозаїчних плівок характерне дифузне розсіювання носіїв на поверхні, то для монокристалічних – дзеркальне. У рамках моделі Петріца визначені значення при поверхневих шарів які збагачені акцепторними центрами за рахунок впливу атмосферного кисню.

**Ключові слова:** селенід свинцю, тонкі плівки, розсіювання, міжзеренні межі.

Стаття поступила до редакції 07.07.2006; прийнята до друку 10.10.2006.

### Вступ

Явища переносу у тонких напівпровідникових плівках суттєво відрізняються від монокристалів у зв'язку із впливом поверхневих ефектів: міжфазних границь на межах „плівка-підкладка” чи „плівка-вільна поверхня” та границь між кристалітами або мозаїчними блоками. При цьому, якщо наявність міжзеренних границь еквівалентна у електричних властивостях послідовному з'єднанню, то міжфазні границі аналогічні до паралельного з'єднання приповерхневих областей і об'єму.

За умови, що на межах „плівка-підкладка” чи „плівка-вільна поверхня” домінує дифузне розсіювання рухливості  $\mu$  плівки буде залежати від її товщини згідно [1]:

$$\mu_s = \frac{\mu_b}{1 + \frac{l_p}{d}}, \quad (1)$$

де  $\mu_b$  – об'ємне значення рухливості,  $d$  – товщина плівки.

Середня довжина вільного пробігу носіїв  $l_p$  характеризує процеси розсіювання у явищах переносу, вона визначається як [2]:

$$l_p = \frac{\mu_b h}{2e} \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Тут  $n$  – концентрація носіїв,  $h$  – стала Планка,  $e$  – заряд електрона.

Рухливість, пов'язана із розсіюванням на границі зерен  $\mu_3$ , чисельно рівна [2]

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

тут  $D$  – величина блоків мозаїки.

Якщо концентрація носіїв і ефективна маса стала у всіх областях, то згідно правила Матіссена [2]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_3}. \quad (4)$$

Для оцінки провідності приповерхневого шару у плівках аналіз електричних властивостей доцільно проводити за допомогою двошарової моделі Петріца [3]. Тонку плівку у цій моделі представляють складеною з двох шарів: приповерхневого (I) (область поверхневого заряду) завтовшки  $d_1$ , концентрація носіїв струму в якому  $n_1$ , а їх рухливість  $\mu_1$ , і об'ємного (II), що характеризується аналогічними величинами:  $d_2$ ,  $n_2$ ,  $\mu_2$  які з'єднані паралельно. Товщина плівки  $d = d_1 + d_2$ .

У цьому випадку [3]:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2}{d}; \quad (5)$$

$$R = \frac{R_1 \sigma_1^2 d_1 + R_2 \sigma_2^2 d_2}{(\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)^2} d; \quad (6)$$

$$\mu = \sigma R = \frac{\sigma_1^2 d_1 R_1 + \sigma_2^2 d_2 R_2}{\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2}. \quad (7)$$

Співвідношення (5)-(7), за умови відомих значень  $\sigma$ ,  $R$ ,  $\mu$  та  $\sigma_2$ ,  $R_2$ ,  $\mu_2$  і  $d$ , дає можливість наближено визначити параметри приповерхневого шару  $\sigma_1$ ,  $R_1$ ,  $\mu_1$  відповідно.

Мета роботи – дослідити особливості механізмів розсіювання носіїв струму у плівках PbSe із різним структурним ступенем завершеності.

## I. Методика експерименту

Епітаксійні плівки PbSe вирощували з парової фази методом гарячої стінки на сколах (111) ВаF<sub>2</sub> і слюди. Температурні режими процесу вирощування плівок були наступними: температура випаровування основної наважки T<sub>в</sub> = 870-920 К; температура осадження пари (підкладки) T<sub>п</sub> = 620 - 670 К. Товщина плівок варіювалась в межах 0,1-14 мкм.

Плівки на сколах ВаF<sub>2</sub> були монокристалічними із паралельною орієнтацією відносно поверхні підкладок. На слюді вони являли собою мозаїчні структури із орієнтацією площинами {111} і напрямками  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  паралельно до площини (001) і напрямків  $\langle 100 \rangle$  та  $\langle 010 \rangle$  слюди. Розміри кристалітів складали 0,1-0,5 мкм із кутом азимутальної розорієнтації до 5°.

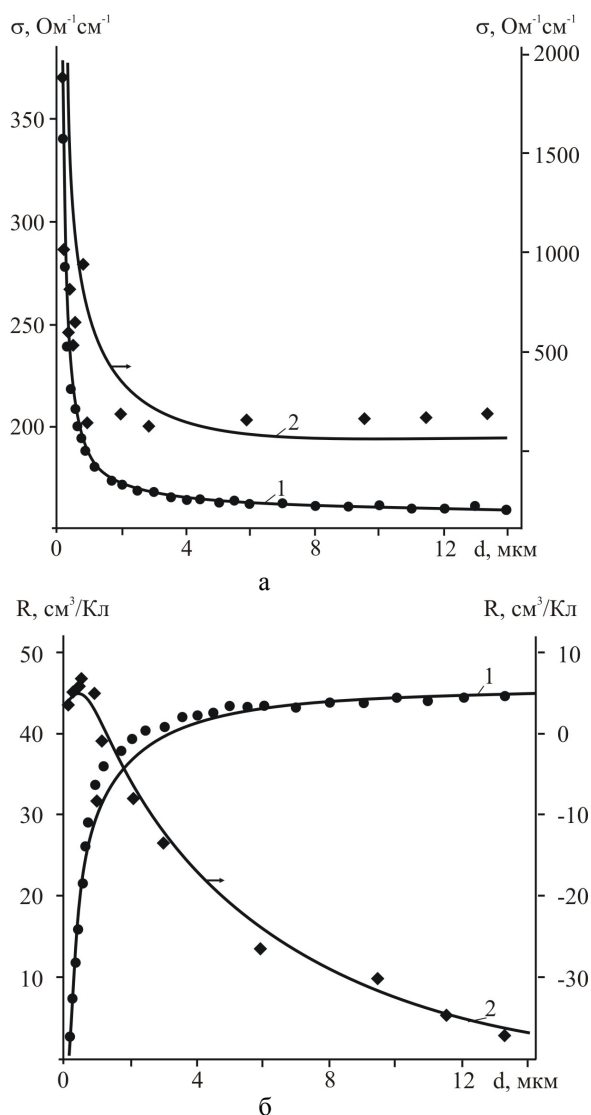
Електричні параметри плівок вимірювали компенсаційним методом у постійних електричних і магнітних полях при температурі 77 К. Використовували срібні та золоті електричні контакти. Струм, який протікав через зразок складав ~ 1 мА, а магнітне поле 2,0 Тл.

Визначили залежності питомої електропровідності  $\sigma$ , сталої Холла R і рухливості носіїв  $\mu$  від товщини осаджених плівок.

Результати проведених експериментальних досліджень і розрахунків наведено на рис. 1-3 та у таблиці.

## II. Аналіз результатів

Видно (рис. 1-3), що у плівках селеніду свинцю має місце розмірний ефект для досліджуваних електричних параметрів. Так, зокрема, із зменшенням товщини d плівок питома електро-

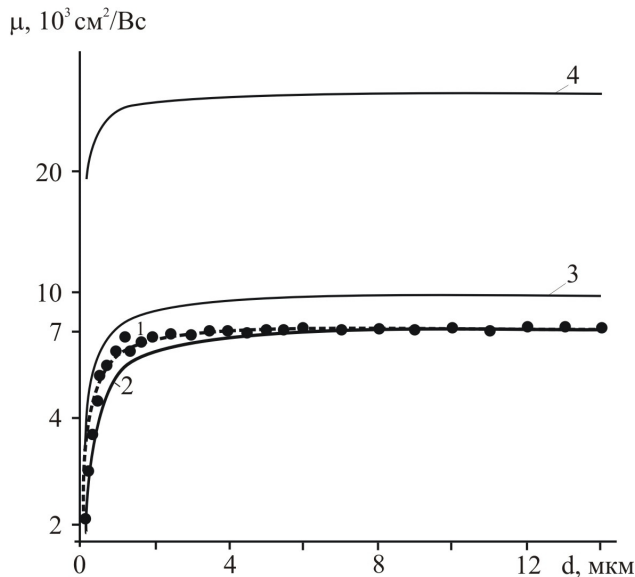


**Рис. 1.** Залежність питомої електропровідності ( $\sigma$  – а), сталої Холла ( $R_H$  – б) від товщини (d) для мозаїчних p – PbSe (1) і n – PbSe (2) плівок: ●,◆ – експеримент; суцільні лінії – розрахунок за моделлю Петріца. Стрілка вказує розмірну вісь.

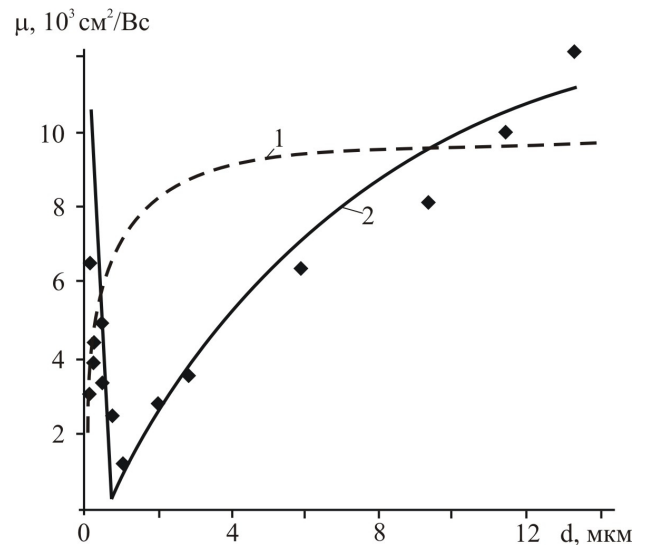
**Таблиця**

Значення параметрів приповерхневого шару (s) і об'єму (b) для мозаїчних p - PbSe і монокристалічних n – PbSe плівок, які використовувалися при розрахунках за моделлю Петріца і дифузного розсіювання

Параметри	Плівки PbSe	
	p-тип	n-тип
$\sigma_s, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	280	2500
$R_s, \text{см}^3\text{Кл}^{-1}$	3.6	1,5
$n_s, \text{см}^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{18}$	$1,56 \cdot 10^{18}$
$\mu_s, \text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^3$
$d_s, \text{мкм}$	0,2	0,18
$\sigma_b, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	160	250
$R_b, \text{см}^3\text{Кл}^{-1}$	46	-60
$n_b, \text{см}^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{17}$
$\mu_b, \text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	$0,74 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$
$l_n, \text{мкм}$	0,25	0,40
$\mu_b, \text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	$0,9 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$
$D, \text{мкм}$	0,35	-



**Рис. 2.** Залежність холлівської рухливості носіїв ( $\mu$ ) від товщини ( $d$ ) для мозаїчних плівок  $p$ -PbSe: 1 – сумарна рухливість; 2 – розрахунок за моделлю Петріца; 3 – розрахунок для дифузного розсіювання на поверхні ( $\mu_s$ ), 4 – розрахунок для розсіювання на границях зерен ( $\mu_b$ ); ● – експеримент.



**Рис. 3.** Залежність холлівської рухливості носіїв ( $\mu$ ) від товщини ( $d$ ) для монокристалічних плівок  $n$ -PbSe: 1 – розрахунок для дифузного розсіювання на поверхні; 2 – розрахунок за моделлю Петріца; ● – експеримент.

провідність різко зростає, особливо для області  $d < 2$  мкм (рис. 1,а). При цьому, якщо плівки осаджені на сколах (111) монокристалів  $\text{BaF}_2$  при товщинах менших за  $d \sim 1$  мкм зразки мають діркову провідність, то при більших значеннях товщини  $d = 1-14$  мкм переважає тільки електронна провідність (рис. 1,б – крива 2). Плівки селеніду свинцю на слюді мали тільки  $p$ -тип провідності (рис. 1,б – крива 1). Характерною ознакою для всіх плівок є зростання за абсолютною величиною постійної Холла  $R$  із збільшенням їх товщини  $d$  (рис. 1,б). Останнє вказує на зменшення концентрації основних носіїв згідно  $R = \frac{1}{en}$  із ростом товщини плівок, що і визначає зменшення питомої електропровідності  $\sigma$  (рис. 1,а) і зростання рухливості носіїв  $\mu$  (рис. 2,3). Зауважимо, що спостережуване зростання рухливості носіїв  $\mu$  для плівок, осаджених на монокристалах  $\text{BaF}_2$  в області малих товщин ( $d < 1$  мкм) (рис. 3 – крива 2), обумовлене дзеркальним відбиванням на міжфазних границях завдяки їх монокристалічній структурі. Для мозаїчних плівок цей ефект не спостерігається (рис. 2). Проведені розрахунки підтверджують вище зроблені припущення. Так, зокрема, для випадку плівок, осаджених на слюді, що характеризуються яскраво вираженою мозаїчною структурою, розрахунок результуючого значення рухливості  $\mu$  (рис. 2 – крива 1) згідно правила Матіссена (4), що враховує дифузне розсіювання на поверхні  $\mu_s$  (рис. 2 – крива 3) і границях зерен  $\mu_b$  (рис. 2 – крива 4) добре підтверджується експериментом (рис. 2 – ●). Для монокристалічних плівок PbSe, осаджених на сколах  $\text{BaF}_2$  модель дифузного розсіювання (рис. 3 – крива 1) адекватно не описує

експеримент (рис. 3 – ♦).

Тепер зупинимось дещо детальніше на значеннях електричних параметрів при поверхневих шарів для досліджуваних плівок, отриманих згідно двошарової моделі Петріца (рис. 1-3, таблиця). У першу чергу зауважимо вона добре описує експеримент як у випадку мозаїчних (рис. 1,а,б – криві 1; рис. 2 – крива 2), так і монокристалічних (рис. 2,а,б – криві 2; рис. 3 – крива 2) плівок. Це вказує на те, що у плівках дійсно існують приповерхневі шари із відмінними від об'єму характеристиками. По-перше, як у випадку  $n$ -PbSe (монокристалічні плівки), так і  $p$ -PbSe (мозаїчні плівки) приповерхневий шар збагачений акцепторними центрами – інверсна область у першому випадку і збагачена на дірки у другому ( $n_s$  і  $p_b$ , таблиця). Останнє можна пояснити взаємодією вільної поверхні плівок із атмосферним киснем, який є ефективним акцептором [4]. Основним механізмом взаємодії кисню із плівками згідно [5] є заміщення халькогену у аніонній підгратці основної матриці та входження у міжвузля.

Звертаємо увагу на те, що значення концентрацій дірок у приповерхневому шарі як для мозаїчних  $p$ -PbSe, так і монокристалічних  $n$ -PbSe приблизно однакові і складають  $(1,6-1,7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3})$  (таблиця), що вказує на насичений характер взаємодії кисню із поверхнею плівок. При цьому, що є зрозуміло, товщина  $d_s$  приповерхневого змінного шару для монокристалічних плівок дещо менша ніж для мозаїчних (таблиця).

## Висновки

1. Досліджено залежність електричних параметрів мозаїчних p-PbSe і монокристалічних n-PbSe плівок від товщини.
2. Встановлено, що якщо для монокристалічних плівок переважає дзеркальне розсіювання на поверхні, то для мозаїчних – дифузне і на границях зерен.
3. В рамках моделі Петріца розраховано значення електричних параметрів приповерхневих шарів.
4. Показано, що на поверхні плівок за рахунок взаємодії з атмосферним киснем утворюється

збагачений на акцепторні центри шар товщиною  $d_s = (0,18-0,20)$  мкм з концентрацією носіїв  $n_s = (1,6-1,7) 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

*Робота частково фінансується МОН України – державний реєстраційний номер 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.

- [1] J.D. Jensen, R.B. Schoolar. Surface charge transport in  $PbS_xSe_{1-x}$  and  $Pb_{1-y}Sn_ySe$  epitaxial films // *J. Vac. Sci. Technol.*, **13**(4), pp. 920-925 (1976).
- [2] Jay N. Zemel, James D. Jensen, and Richard B. Schoolar. Electrical and Optical Properties of Epitaxial Films of PbS, PbSe, PbTe, and SnTe // *Phys. Rev.*, **140**(1A), pp. A330-A343 (1965).
- [3] Richard L. Petritz. Theory of an Experiment for Measuring the Mobility and Density of Carriers in the Space-Charge Region of a Semiconductor Surface // *Phys. Rev.*, **110**(6), pp. 1254-1262 (1958).
- [4] *Поверхностные свойства твердых тел.* Под ред. М. Грина. Мир, М. 432 с. (1972).
- [5] Б.М. Рувінський. Рівноважні концентрації носіїв струму і дефектів у плівках PbSe при вирощуванні з парової фази і окисленні // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(4), сс. 565-577 (2001).

D.M. Freik, B.S. Dzundza

## Influence of Structural Completeness of Lead Selenide Films on the Current Carrier Scattering Mechanisms

*Sub-Faculty of the Physics and Chemistry of Solid State Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)*

Dependence of kinetic coefficients of PbSe films, grown from a steam phase on the mica and BaF<sub>2</sub> from a thickness, are research. It is shown, that if for the inlaid films characteristic of diffuse current carrier scattering on a surface, for monocrystalline is a - mirror. Within the framework of Petritz model there are defined values of near-surface which are enriched by acceptor centers due to influencing of oxygen atmospheric.