

Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза

## Вплив поверхні і міжзеренних меж на рухливість носіїв у тонких плівках телуриду свинцю

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

Досліджено залежність рухливості носіїв струму від товщини у тонких мозаїчних плівках PbTe, вирощених на сколах слюди. Виділено внесок розсіювання на поверхні і міжзеренних межах.

**Ключові слова:** тонкі плівки, телурид свинцю, рухливість, механізми розсіювання.

*Стаття поступила до редакції 5.10.2004; прийнята до друку 15.06.2005.*

### Вступ

Дослідженням механізмів розсіювання носіїв струму у об'ємних кристалах PbTe присвячена значна кількість робіт і тому на даний час можна вважати їх достатньо вивченими [1]. Що відноситься до тонких плівок, то відомо тільки те, що рухливість носіїв у них, як правило, значно менша ніж у масивних зразках [2]. Зменшення рухливості у тонких плівках, зазвичай, пояснюють високою концентрацією різного роду дефектів кристалічної структури – домішки, вакансії, дислокації, межі кристалітів, поверхня і т.д. Так, зокрема, автори робіт [2,3] вивчали рухливість носіїв у плівках n-PbTe, вирощених на сколах (100) кристалів KCl [2] і (111) BaF<sub>2</sub> [3] відповідно. Визначено роль поверхні і залишкової рухливостей. Останню із них пов'язують із розсіюванням носіїв на структурних дефектах [2], або ж на дислокаціях невідповідності [3]. Результати проведених досліджень особливостей розсіювання електронів у тонких плівках PbTe на слюді [4] підтверджують значну роль міжзеренних меж.

Таким чином, стає очевидним, що проблеми пов'язані із вивченням домінуючих механізмів розсіювання у плівках халькогенідів свинцю залишаються ще і тепер актуальними. Вони визначаються не тільки фізико-хімічною природою матеріалу, але й технологічними факторами: спосіб вирощування, температура осадження, вид підкладки, структурна досконалість, тощо.

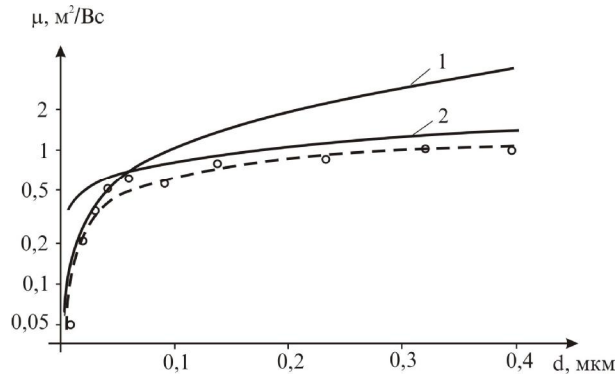
Метою цієї роботи є уточнення переважаючих механізмів розсіювання у плівках PbTe для товщини до 0,5 мкм.

### I. Методика експерименту

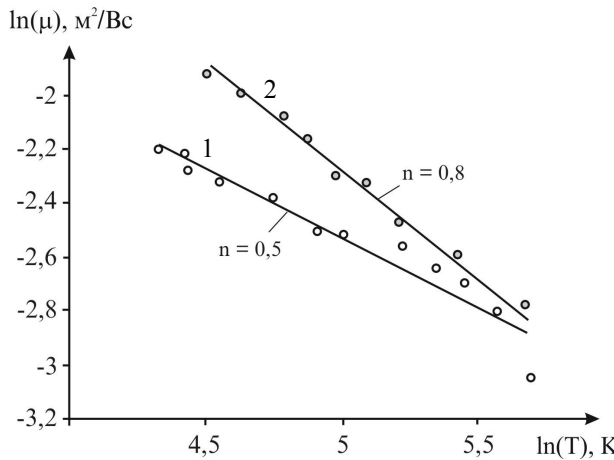
Плівки для дослідження отримували з парової фази методом гарячої стінки на свіжих сколах (001) слюди (мусковіт) згідно [5]. Швидкість росту плівок складала 1-3 нмс<sup>-1</sup>, а їх товщина варіювалася від 50 Å до 0,5 мкм. Структура плівок досліджувалася методами електронної мікроскопії і дифракції, а також оптичної металографії. Вимірювання електричних параметрів плівок проводилося компенсаційним методом у постійних електричних і магнітних полях. Вимірювання проводили на окремих плівках різної товщини. Струм через зразки складав ≈ 0,1 мА. Магнітне поле напрямлялося перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 0,8 Тл. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти.

Плівки являли собою епітаксійні мозаїчні структури із орієнтацією площинами {111} і напрямками  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  паралельно до площини (001) і напрямків [100] та [010] слюди. Розміри кристалітів складали 0,01-0,5 мкм із кутом азимутальної розорієнтації до 5°.

Залежність холлівської рухливості носіїв заряду плівок PbTe від товщини і температури зображено на рис. 1,2. Видно, що із зменшенням товщини плівок, особливо за 0,1 мкм, має місце різке спадання холлівської рухливості (рис. 1). Температурні залежності холлівської рухливості плівок різної товщини представлено у координатах  $\ln \mu - \ln T$  (рис. 2). Це дає можливість визначити у температурній залежності рухливості  $\mu = \mu_0 T^{-n(d)}$  значення параметра  $n(d)$  ( $d$  – товщина плівки), який і характеризує переважання конкретного механізму розсіювання у плівках для заданої товщини.



**Рис. 1.** Залежність рухливості носіїв струму ( $\mu$ ) плівок PbTe від товщини ( $d$ ):  $\circ$  – експеримент; 1, 2 – розраховані значення поверхневої ( $\mu_n - 1$ ) і міжзеренної ( $\mu_3 - 2$ ) рухливостей.



**Рис. 2.** Залежність рухливості носіїв струму ( $\mu$ ) плівок PbTe від температури ( $T$ ). Товщина плівок  $d$ , мкм: 1 – 0,08; 2 – 0,35.

## II. Аналіз експериментальних результатів

За умови переважання розсіювання носіїв струму на поверхні ( $\mu_n$ ) і межах зерен ( $\mu_3$ ) питомий опір цих областей визначається правилом Маттісена [6]. Якщо концентрація носіїв і ефективна маса є сталими, тоді

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{\mu_3} \quad (1)$$

Тут  $\mu$  – експериментально визначена рухливість. Час між двома актами розсіювання на межах кристалітів  $\tau_3$  визначається як

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

де  $\nu$  – теплова швидкість носіїв, яка у випадку виродження, згідно статистики, у принципі не залежить від температури. Для халькогенідів свинцю температура виродження велика через високу концентрацію носіїв внаслідок значного відхилення від стехіометричного складу. За цих умов згідно [6]:

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

де  $D$  – середній розмір зерна,  $q$  – заряд носіїв,  $n$  – концентрація носіїв,  $h$  – стала Планка. Рухливість носіїв струму у випадку дифузного розсіювання на поверхні визначається як [7]:

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

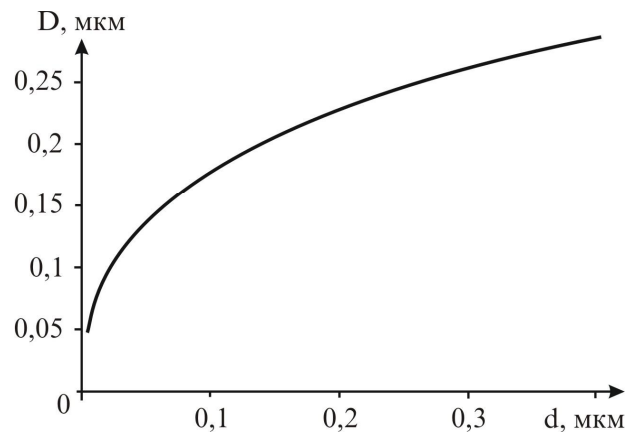
Тут  $\lambda$  – середня довжина вільного пробігу носіїв,  $\mu_v$  – рухливість об'ємного матеріалу.

**Таблиця**

Значення основних величин, які використані при розрахунках рухливостей у плівках PbTe

Величина	Позначення і розмірність	Значення
Об'ємна рухливість	$\mu_v, \text{m}^2/\text{V}\cdot\text{c}$	4,42
Довжина вільного пробігу	$\lambda, \text{m}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$
Концентрація носіїв	$n, \text{m}^{-3}$	$1 \cdot 10^{24}$
Заряд електрона	$q, \text{Кл}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Стала Планка	$h, \text{Дж}\cdot\text{c}$	$6,62 \cdot 10^{-34}$

За прийнятих значень параметрів сталих величин (таблиця) які входять у вирази (3) і (4), розрахована поверхнева рухливість  $\mu_n$  (4) добре співпадає із експериментом для товщин плівок менших від  $d < 0,1$  мкм (рис. 1 – крива 1). За припущенням реалізації розсіювання носіїв на міжзеренних межах при товщинах плівок більших за 0,1 мкм (рис. 1 – крива 2) розраховано залежність середніх лінійних розмірів зерен  $D$  у плівках від товщини  $d$  (рис. 3). Зауважимо, що їх значення зростають із товщиною плівок за законом  $D = 3,8 \cdot 10^{-3} d^{1/3}$ , що є очевидно, і знаходиться у межах, підтверджених експериментально [5].



**Рис. 3.** Залежність лінійних розмірів кристалітів ( $D$ ) плівок PbTe від їх товщини ( $d$ ).

Переважання визначених вище механізмів розсіювання підтверджує температурна залежність рухливості носіїв струму для плівок PbTe різної товщини (рис. 2). Так, зокрема, значення показника  $n = 0,5$  для плівок із товщинами, меншими від 0,1 мкм (рис. 2 – крива 1) є характерним при поверхневому розсіюванні [7]. Зростання показника до значення  $n = 0,8$  для плівок із більшою товщиною (рис. 2 – крива 2) вказує на переважання

розсіювання носіїв струму на дефектах росту [7] – міжзеренних межах.

0,1 мкм домінує дифузійне розсіювання на поверхні, а при більших товщинах – на міжзеренних межах.

3. Розраховано залежність розмірів кристалітів від товщини плівок.

## Висновки

1. Виконано експериментальне дослідження, а також здійснено розрахунок залежності рухливості носіїв струму для мозаїчних плівок PbTe від товщини.

2. Показано, що для товщин плівок менших від

**Фреїк Д.М.** – заслужений діяч науки і техніки України, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;

**Дзундза Б.С.** – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] Ю.И. Равич, В.А. Ефимова, В.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS*. Наука, М. 384 с. (1968).
- [2] P.R. Vaya, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan. Thickness Dependence of Hall Mobility of HWE Grown PbTe Films // *Phys. Stat. Sol. (a)*, **87**(341), pp. 341-350 (1985).
- [3] Д.М. Фреїк, В.Ф. Пасічняк, О.Л. Соколов, Б.С. Дзундза. Особливості розсіювання носіїв заряду в епітаксійних структурах на основі халькогенідів свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(3), сс. 455-459 (2004).
- [4] Т.С. Гудкин, И.А. Драбкин, В.И. Кайданов, О.Г. Стерлядкина. Особенности рассеяния электронов в тонких пленках PbTe // *Физика и техника полупроводников*, **8**(11), сс. 2233-2235 (1974).
- [5] Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Вища школа, Львів, 152 с. (1988).
- [6] *Поверхностные свойства твердых тел*. Под ред. М. Грина. Мир, М. 432 с. (1972).
- [7] О.А. Александрова, Р.Ц. Бондоков, Н.В. Саунин, Ю.М. Таиров. Подвижность носителей заряда в двухслойных структурах PbTe/PbS // *Физика и техника полупроводников*, **32**(9), сс. 1064-1068 (1998).

D.M. Freik, B.S. Dzundza

## The Surface Influence and Intergrain Boundaries on Charge Mobility on Lead Tellurides Thin Films

*Physics and Chemistry of Solid State Department, 'Vasiliy Stefanyk' Precarpathian National University, 201, Galytska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua*

It is researched the charge carrier mobility due the thickness on PbTe thin inlaid films, growth on mica. The contribution of both the surface and intergrain boundaries is marked.