

**А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, А.І. Ткачук<sup>1</sup>,  
А.Т. Ворощенко, М.Ю. Кравецький,  
І.Г. Луцишин**

## **МЕХАНІЗМИ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗАРЯДУ В ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ САНДВІЧ- СТРУКТУРАХ $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe**

Методом гарячої стінки виготовлено полікристалічні сандвіч-структури  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe на сітлових підкладках. Показано, що при використанні сильно легovanого PbTe на гетеромежі  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe не утворюється потенціальний бар'єр, тому можна формувати омичні гетероконтакти типу метал— $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe. ВАХ таких контактів зумовлена монополярною інжекцією дірок із  $p^+$ -PbTe. Досліджено вертикальний та латеральний транспорт носіїв заряду і визначено енергії активації темного струму. Латеральний транспорт пояснюється наявністю потенціального бар'єра на міжзеренній межі у полікристалічних шарах  $p$ -CdTe. При цьому механізм перенесення заряду є термоемісійним. Виконано оцінку висоти потенціального бар'єра, яка становила  $\sim 0,1$  еВ за кімнатної температури.

**Ключові слова:** полікристалічний CdTe, вертикальний та латеральний транспорт, омичний контакт PbTe.

### **ВСТУП**

Полікристалічні шари CdTe є базовим матеріалом при виготовленні тонкопліткових сонячних елементів [1—4]. Повідомляється про досягнення коефіцієнта корисної дії  $\sim 16,5$  % в лабораторних зразках сонячних елементів на основі гетероструктури CdS/CdTe при теоретично можливому 29 % [4]. На базі досить товстих (30—150 мкм) полікристалічних шарів CdTe розроблено спектрометричні детектори ядерних випромінювань [5]. Однією з актуальних проблем, що потребує вирішення, є стабільність параметрів полікристалічного CdTe та формування омичних контактів до них, особливо до матеріалу з дірковим типом провідності. Стабільність параметрів полікристалічних шарів CdTe зумовлена як об'ємом зерен, так і станом міжзеренних меж, які суттєво впливають на рухливість та час життя нерівноважних носіїв заряду. Крім того, міжзеренна межа порівняно з об'ємом зерна характеризується більш високим коефіцієнтом дифузії атомів легувальних домішок, що може викликати шунтування активної області сонячного елемента в процесі його експлуатації. Особливо це стосується атомів купруму, який використовується як контактний метал [1, 2, 6]. Саме використання купруму та купрумвмісних матеріалів спричинює швидку деградацію сонячних елементів.

Унаслідок впливу високоенергетичних квантів випромінювання на CdTe-детектори виникають глибокі рекомбінаційні центри в їх активній області, що зменшує лічильний ресурс роботи детектора, а також змінює властивості омичного контакту, який може перетворюватись у випрямний [7].

У праці вивчається можливість заміни металевого (Au, Cu) контакту до  $p$ -CdTe гетероконтактом на основі сильно легovanого PbTe. Основні причини такого вибору контактного матеріалу наступні: а) гетероперехід  $p$ -PbTe/ $p$ -CdTe характеризується гарним збігом сталої ґратки  $\sim 0,3$  %; б) теоретично та експериментально показано [8—13], що значення розри-

ву зон на гетеромежі не перевищує 0,14 еВ, що дає можливість реалізації ефективного транспорту дірок при невеликих напругах зміщення; в) технологію вирощування шарів PbTe добре розроблено [14]. Зазначимо, що механізми перенесення заряду в структурах  $p$ -PbTe/ $p$ -CdTe на базі полікристалічних матеріалів практично не досліджувались. Тому мета цієї праці — такі дослідження.

### ЗРАЗКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Експериментальні зразки полікристалічних сандвіч-структур  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe були виготовлені методом гарячої стінки на діелектричних підкладках сіталу. Спочатку на підкладку наносили шар  $p$ -PbTe за технологічними режимами: температура джерела випаровування  $530 \pm 10$  °С, температура підкладки —  $395 \pm 5$  °С, температура стінки реактора —  $430 \pm 2$  °С. Товщина шару  $p$ -PbTe становила 25—27 мкм. Як джерело випаровування використовували  $p$ -PbTe, легований талієм атомною часткою 0,8 %. Як матеріал для омичного контакту до  $p$ -PbTe застосовували станум. За кімнатної температури концентрація та рухливість дірок відповідно становили  $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup> і  $\sim 10^2$  см<sup>2</sup>/В с, що свідчило про їх вироджений стан.

Тим самим методом на  $p$ -PbTe наносили шар полікристалічного телуриду кадмію при технологічних режимах: температура випаровування джерела —  $600 \pm 10$  °С, температура підкладки —  $410 \pm 5$  °С, температура стінки реактора —  $430 \pm 2$  °С. Як джерело випаровування використовували нелегований телурид кадмію  $p$ -типу провідності з питомим опором  $(1-2) \cdot 10^3$  Ом · см. Товщина шарів CdTe становила  $120 \pm 3$  мкм при середньому розмірі зерна  $106 \pm 3$  мкм. Верхній шар  $p$ -PbTe становив 10—15 мкм. Досліджували вертикальний (перпендикулярного до сандвіч-структури) транспорт заряду. Крім того, у плівках CdTe досліджувався латеральний транспорт, для цього були вирощені полікристалічні шари безпосередньо на сіталі товщиною  $\sim 128$  мкм із середнім розміром зерна  $\sim 63$  мкм. На поверхні цих шарів були виготовлені планарні PbTe-контакти. Середній розмір зерен у полікристалічних шарах визначали за допомогою металографічного мікроскопа методом січної [15]. Механізми перенесення заряду вивчали методом ВАХ в інтервалі температур 218—387 К, а також температурних залежностей темного струму при постійних напругах зміщення у цьому самому інтервалі температур.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Типові ВАХ сандвіч-структур за різних температур, виміряні при напрямку струму перпендикулярному до поверхні контактуючих матеріалів (вертикальний транспорт), наведено на рис. 1. Як бачимо, ВАХ є лінійними і не залежать від полярності прикладеної напруги. Цей експериментальний факт свідчить про омичний характер гетероконтактів і відсутність впливу потенціального бар'єра на гетеромежі  $p$ -PbTe/ $p$ -CdTe на темновий струм. Він також корелює з результатами досліджень ВАХ в епітаксійних гетероструктурах  $p$ -PbTe/ $p$ -CdTe [13] та теоретичних оцінок величини розриву валентної зони [8—12]. Темновий струм в таких структурах визначається монополярною інжекцією дірок з  $p$ -PbTe в телурид кадмію.

Температурні залежності темного струму при постійних напругах зміщення наведено на рис. 2. Експериментальні залежності лінеаризуються в координатах  $\ln I - 1/T$ , із нахилу яких знайдено значення енергії актива-

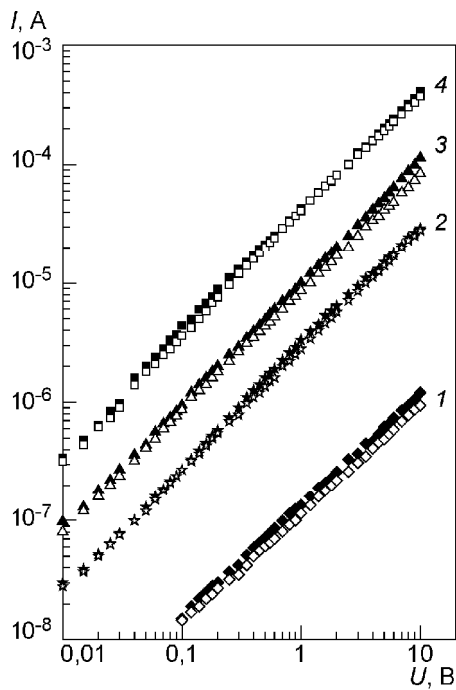


Рис. 1. ВАХ сандвіч-структур  $p^+-PbTe/p-CdTe/p^+-PbTe$  при позитивній та негативній полярностях напруги зміщення (відповідно світлі та темні точки) за температур, К: 1 – 218; 2 – 261; 3 – 329; 4 – 387

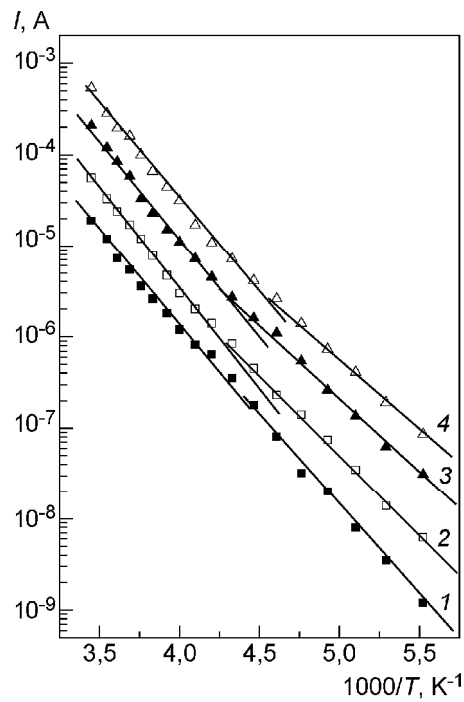


Рис. 2. Температурні залежності темного струму в сандвіч-структурах при вертикальній геометрії вимірів, В: 1 – 1; 2 – 4; 3 – 9; 4 – 18

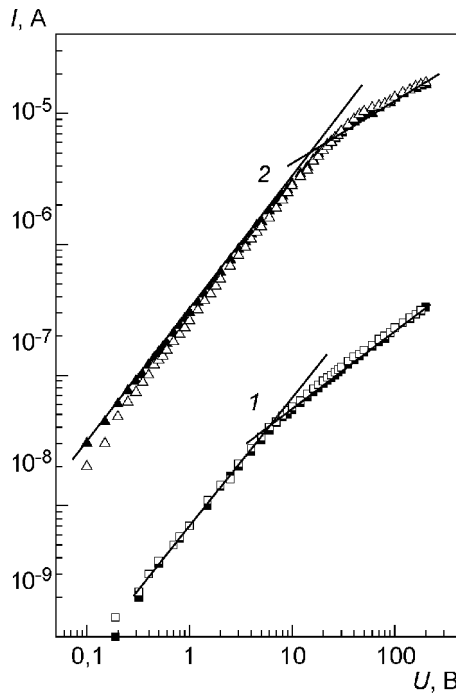


Рис. 3. ВАХ полікристалічних шарів CdTe при позитивній та негативній полярностях напруги зміщення (відповідно світлі та темні точки) виміряні у планарній геометрії розміщення контактів за температур, К: 1 – 298; 2 – 387

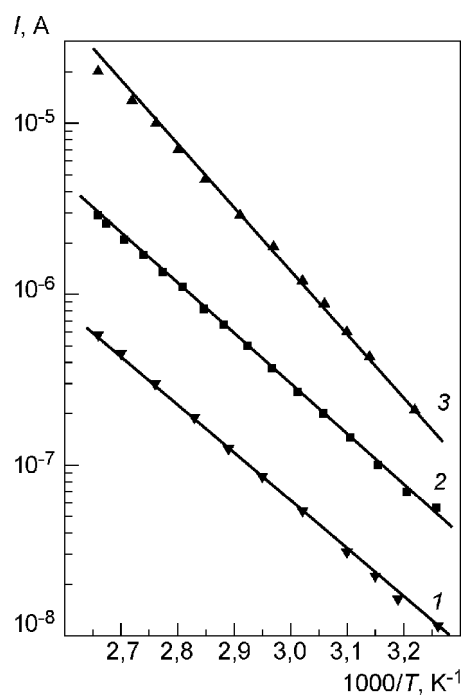


Рис. 4. Температурні залежності темного струму у полікристалічних шарах CdTe при планарній геометрії розміщення контактів за напруг зміщення, В: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 150

ції  $\Delta E$  темного струму: 0,32 при температурах  $T < 222$  К та 0,48 еВ при вищих температурах. Оскільки у досліджених структурах використовували сильно легований телурид плумбуму з металічним характером провідності, знайдені енергії пояснюються активацією носіїв з глибоких центрів у зерні CdTe. У поєднанні з лінійним характером ВАХ, експериментальні результати можна пояснити перенесенням заряду через об'єм зерна, а не по міжзеренній межі. У останньому випадку слід було очікувати транспорт носіїв, характерний для неупорядкованого напівпровідника [16].

На рис. 3 наведено ВАХ, виміряні на полікристалічних шарах CdTe/сітал у планарній геометрії розміщення контактів. Відстань між контактами становила приблизно 2 мм. Експериментальні результати лінеаризуються в подвійних логарифмічних координатах, що вказує на степеневий характер ВАХ. При цьому при менших напругах спостерігається лінійна ділянка ВАХ, яка змінюється сублінійною при більш високих напругах зміщення з нахилом  $n \approx 0,5$ . Саме наявність сублінійної ділянки ВАХ пояснюється наявністю потенціального бар'єра на міжзеренній межі.

Температурні залежності темного струму, виміряні за різних напруг зміщення, наведено на рис. 4. Спостерігається нетривіальна залежність енергії активації темного струму, знайденої за нахилом експериментальних кривих, від прикладеної напруги. Енергія активації зростає від 0,58 еВ при напругах зміщення 2 і 10 В, до 0,69 еВ при 150 В. Факт зростання енергії активації не можна пояснити ефектом Френкеля—Пула — у цьому випадку слід було очікувати її зменшення. Важливим є також той факт, що енергія активації темного струму при латеральній геометрії вимірів перевищує значення, отримане для вертикальної геометрії. Це перевищення пояснюється наявністю потенціальних бар'єрів на міжзеренних межах. У цьому випадку енергія активації темного струму є сумою енергій активації енергетичних рівнів у об'ємі зерна  $\Delta E$  та висоти потенціального бар'єра  $\phi_B$ . Оцінюючи  $\phi_B$ , одержуємо значення  $\sim 0,2$  еВ при температурі абсолютного нуля, а екстраполюючи цю величину до кімнатної температури, маємо значення  $\sim 0,1$  еВ. Факт зростання енергії активації темного струму при високих напругах зміщення можна пояснити її розподілом між об'ємом зерна та потенціальним бар'єром. При невеликих напругах зміщення висота бар'єрів майже не змінюється, при цьому темновий струм визначається активацією енергетичних рівнів у об'ємі зерна. При високих напругах на енергію активації впливає висота зворотно зміщеного бар'єра, товщина області просторового заряду (ОПЗ) якого сумірна з зерном, або навіть його перевищує. Про це свідчить тенденція до насичення ВАХ (див. рис. 3, крива 2). Для знайдених значень висоти бар'єра товщина ОПЗ по порядку величини становить 32 мкм за відсутності зміщення, і зростає від 45 до 270 мкм при зростанні напруги від 2 до 150 В. Вказані оцінки були отримані для значення рухливості дірок в об'ємі зерна  $10 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , з використанням значення провідності шарів CdTe, виміряної у вертикальній геометрії контактів за кімнатної температури.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що в сандвіч-структурах  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe в інтервалі температур 218—387 К вольт-амперні характеристики є лінійними в діапазоні напруг зміщення  $\pm 10$  В. Ємність таких структур визначається їх геометричними розмірами і не залежить від полярності

напруги зміщення, що свідчить про відсутність потенціального бар'єра на гетеромежі  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe. Омичність ВАХ пояснюється монополярною інжекцією з  $p^+$ -PbTe в  $p$ -CdTe. Активаційний характер температурних залежностей темної провідності пояснюється наявністю глибоких рівнів з енергіями 0,32 та 0,48 еВ.

2. Латеральна провідність в полікристалічних шарах  $p$ -CdTe є активаційною, причому енергія активації перевищує відповідні значення при вертикальному перенесенні. Цей факт пояснюється наявністю потенціальних бар'єрів на міжзеренній межі в  $p$ -CdTe. Висоту бар'єра визначено із різниці значень енергії активації для вертикального та латерального транспорту і становить  $\sim 0,2$  еВ при нульовій температурі, а унаслідок екстраполяції до кімнатної температури одержуємо значення  $\sim 0,1$  еВ. Транспорт носіїв заряду відбувається за механізмом термоелектронної емісії.

**A.V. Sukach, V.V. Tetyorkin, A.I. Tkachuk<sup>1</sup>, A.T. Voroschenko,  
M.Yu. Kravetskii, I.G. Lutsyshyn**

**CARRIER TRANSPORT MECHANISMS IN POLYCRYSTALLINE SANDWICH STRUCTURES  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe**

Polycrystalline sandwich structures  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe/ $p^+$ -PbTe were prepared by a hot wall technique on glassceramic substrates. It is shown that potential barrier at the  $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe interface is not formed in the case of usage of heavily doped lead telluride. That allows one to create ohmic heterocontact of «metal- $p^+$ -PbTe/ $p$ -CdTe» type. The current-voltage characteristics of such contacts is determined by unipolar injection of holes from the  $p^+$ -PbTe into cadmium telluride. The vertical and lateral transport of carriers is investigated in  $p$ -CdTe and the activation energy of the dark conductivity is determined. The lateral transport is explained by presence of potential barriers at the grain boundaries. The mechanism of carrier transport is thermionic emission. The potential barrier height is estimated to be  $\sim 0,1$  eV at room temperature.

**Keywords:** polycrystalline CdTe, vertical and lateral transport, ohmic contact PbTe.

1. Чопра К., Дас. С. Тонкопленочные солнечные элементы. — М.: Мир, 1985. — 440 с.
2. Венгер Є.Ф., Дмитрук М.Л., Комащенко В.М. Перспективні фотовольтаїчні матеріали і структури на основі напівпровідників  $A^2B^6$  (фізико-технологічні аспекти) // ОПТ. — Київ: Наук. думка, 2002. — Вып. 37. — С. 220—235.
3. Хрипунов Г.С. Структурные методы оптимизации фотоэлектрических свойств пленочных гетеросистем CdS—CdTe // ФТП. — 2005. — **39**, № 10. — С. 1266—1270.
4. Хрипунов Г.С. Влияние тыльного контакта на электрические свойства пленочных солнечных элементов на основе CdS—CdTe // Там же. — 2006. — **40**, № 1. — С. 117—121.
5. Пленочные детекторы ядерных излучений из теллурида кадмия / Б.Н. Заверюхин, Ш.А. Мирсагатов, Н.Н. Заверюхина и др. // Письма ЖТФ. — 2003. — **29**, № 22. — С. 80—87.
6. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання на основі кадмій телуриду. II. Основні досягнення і сучасний стан (огляд) / Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, О.С. Криницький, І.В. Горічок // Фізика і хімія твердого тіла. — 2012. — **13**, № 3. — С. 744—758.
7. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості / Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, Є.В. Корбут, М.М. Борисюк. — Київ: Іван Федоров, 2000. — 198 с.
8. Leitsmann R., Ramos L., Bechstedt F. Structural properties of PbTe/CdTe interfaces from first principles // Phys. Rev. — 2006. — **B74**. — P. 085309-1—085309-8.
9. Leitsmann R. and Bechstedt F. Electronic-structure calculations for polar lattice-structure-mismatched interfaces PbTe/CdTe (100) // Ibid. — 2007. — **B76**. — P. 125315-1—125315-11.
10. Crystal and electronic structure of PbTe/CdTe nanostructures / Malgorzata Bukala, Piotr Sankowski, Ryszard Buczko and Perla Kacman // Nanoscale Res. Lett. — 2011. — **6**. — P. 126.

11. *Experimental* determination of valence band offset at PbTe/CdTe(111) heterojunction interface by x-ray photoelectron spectroscopy / J. Si, S. Jin, H. Zhang, P. Zhu et al. // Appl. Phys. Lett. — 2008. — **93**, N 20. — P. 202101-1—202101-3.
12. *Energy* band alignment of PbTe/CdTe(111) interface determined by ultraviolet photoelectron spectra using synchrotron radiation / C.F. Cai, H.Z. Wu, J.X. Si et al. // Chin. Phys. — 2010. — **B19**, N 7. — P. 077301-1—077301-3.
13. *Injection* current and infrared photosensitivity in iso-type *p*-PbTe/*p*-CdTe heterojunctions / V.V. Tetyorkin, A.V. Sukach, A.I. Tkachuk, S.P. Movchan // SPQEO. — 2013. — **16**, N 1. — P. 57—61.
14. *G. Nimitz, B. Schlicht.* Narrow-Gap Lead Salts // Eds. R. Dornhaus, G. Nimitz, B. Schlicht, Narrow-Gap Semiconductors. — Springer: Berlin, 1985. — 117 p.
15. *Блэнк Дж.Р., Гледман Г.* Количественная металлография // Приборы и методы физического металловедения. — М.: Мир, 1973. — Вып. 1. — С. 277—301.
16. *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979. — 416 с.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України  
Проспект Науки, 43  
03028 Київ

Отримано 15.03.2013

<sup>1</sup>Кіровоградський державний  
педагогічний університет  
ім. В. Винниченка  
Вул. Шевченка, 1  
25006 Кіровоград