

УДК 621.315.592

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУР МЕТАЛ (In, Cu, Au)/*p*-PbTe

А. В. Сукач, д. ф.-м. н. В. В. Тетеркін, к. т. н. А. І. Ткачук¹, Г. П. Маланич,
А. Т. Ворощенко, к. ф.-м. н. М. М. Кролевець

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ;
¹Кіровоградський державний педагогічний університет ім. В. Винниченка
Україна
teterkin@isp.kiev.ua

Методом термічного напилювання у вакуумі шарів індію, а також хімічного осадження золота та міді виготовлено контакти на хімічно травленій поверхні монокристалів *p*-PbTe. Показано, що термообробка структур In/*p*-PbTe призводить до формування потенціального бар'єру, та з'ясована його природа. Досліджено механізми проходження струму в інтервалі температур 77–295 К. При хімічному осадженні Au та Cu формуються омичні контакти.

Ключові слова: телурид свинцю, електричні контакти, механізми проходження струму.

Телурид свинцю і тверді розчини на його основі широко використовуються для виготовлення інжекційних лазерів на ділянку спектра 3–5 мкм. Сильно легований PbTe є також перспективним матеріалом для термоелектрики [1]. Ефективність роботи приладів на основі телуриду свинцю в значній мірі залежить від якості електричних контактів. Відзначимо, що на основі існуючих моделей контактів до *p*-PbTe неможливо адекватно описати їх властивості. Наприклад, індій, завдяки технологічності нанесення та задовільній адгезії, часто використовується при виготовленні омичних контактів методом вплавлення або паяння до PbTe як з дірковим, так і електронним типом провідності [1–3]. Нанесені термовакуумним способом за кімнатної температури тонкі шари індію, міді або золота на PbTe можуть бути бар'єроутворюючими як для *n*-, так і для *p*-типу [5–7].

Телурид свинцю кристалізується у ґратці типу NaCl, що характерно для переважно іонного типу хімічного зв'язку [8]. У цьому випадку слід було б очікувати наявності залежності висоти бар'єру в структурах метал/*p*-PbTe від роботи виходу металу, яка описується в рамках феноменологічної моделі Андерсона [9, 10]. Проте експериментальні дослідження висоти бар'єру у вказаних структурах свідчать про відсутність такої залежності [7, 11, 12]. Автори [7, 11] пояснили цей факт утворенням інверсійного шару на межі метал/*p*-PbTe у випадку, коли енергія електронної спорідненості телуриду свинцю ($\chi = 4.6$ eV [13]) більша за роботу виходу металу. Електрична структура контакту у цьому випадку має вигляд $n^+ - n - p^+$. У рамках цієї моделі знайшов також пояснення той факт, що висота бар'єру, визначена із вольт-фарадних характеристик (ВФХ), може перевищувати ширину забороненої зони телуриду свинцю [11].

Метою роботи є дослідження механізмів формування бар'єрів та електричних властивостей структур метал/*p*-PbTe. Для цього досліджувались структури з

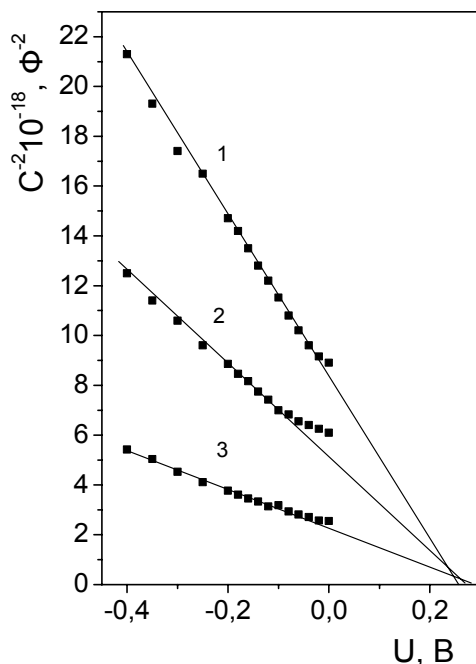


Рис. 1. ВФХ структури In/*p*-PbTe при різних температурах, К: 77 (1), 100 (2), 123 (3)

різною роботою виходу W металу (In – 3.97 eV, Cu – 4.51 eV, Au – 5.1 eV [10].)

У даній роботі викладено результати досліджень електрофізичних властивостей структур метал/ p -PbTe в залежності від технологічних умов їх виготовлення. Для виготовлення структур використано PbTe p -типу, вирощений методом Бріджмена з концентрацією дірок $p \approx (2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та їх рухливістю $\mu_p = 680 \pm 5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 300 \text{ К}$. Після відповідних механічних обробок поверхні зразків порушений шар видалявся методом хіміко-механічного полірування з використанням бромвдільючого полірувального травильного розчину складом (в об'ємних частинах) $6\text{H}_2\text{O}_2 + 74\text{HBr} + 20$ етиленгліколь. Після завершення процесу травлення зразки вилучались з травильника і промивались за схемою: дистильована $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\% \text{ NaOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl}$ (концентрована) $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$. Тривалість кожної операції промивки $\sim 30 \text{ с}$, а для запобігання окислення поверхні зразків до нанесення металевих контактів зразки зберігали в диметилформаміді. Остаточні зразки мали прямокутну форму з розмірами $3 \times 3 \times 1.5 \text{ мм}^3$. Структури In/ p -PbTe виготовлялись термовакуумним нанесенням шарів In на протилежні сторони зразків більшої площі з наступною термообробкою в атмосфері очищеного водню при температурі $520 \pm 1 \text{ К}$ впродовж 10 хв. Структури Au(Cu)/ p -PbTe виготовлялись хімічним осадженням золота із золотохлористоводневої кислоти та міді із насиченого у дистильованій воді розчину CuSO_4 . Термообробка структур Au (Cu)/ p -PbTe не проводилась.

Результати вимірювань високочастотних (1 МГц) вольт-фарадних характеристик структур In/ p -PbTe показані на рис. 1. В інтервалі температур 77–130 К бар'єрна ємність лінеаризується в координатах C^2-U , що вказує на різкий характер розподілу дефектів в квазінейтральній області структур. Концентрація основних носіїв заряду в цих областях при температурах 77, 100 та 123 К становила $1.2 \cdot 10^{14}$, $2.1 \cdot 10^{14}$ та $4.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, відповідно, що вказує на формування компенсованої приконтактної області, обумовленої дифузією індію в p -PbTe. Відзначимо, що ємнісна напруга відсічки U_C для цих температур відповідно становила 0.23, 0.25 та 0.27 В, що перевищує значення ширини забороненої зони PbTe.

На рис. 2 показано результати вимірювань зворотних ВАХ структур. На основі їх аналізу встановлено наступне. В інтервалі температур 77–182 К ВАХ задовільно апроксимуються залежністю $I \sim U^n$. Для напруг зміщення $U \leq 20 \text{ мВ}$ $n \approx 1.0$ для всього інтервалу температур. При $U > 30 \text{ мВ}$ спостерігається чітка тенденція до насичення ВАХ, що характерно для генераційного та дифузійного механізмів проходження струму. При цьому значення n на сублінійній ділянці ВАХ змінюється від 0.6 (77 К) до 0.25 (182 К). Температурні залежності ВАХ, виміряні при невеликих зміщеннях, показані на рис. 3. Лінеаризація експериментальних даних в координатах $\lg-10^3/T$ вказує на експоненціальну за-

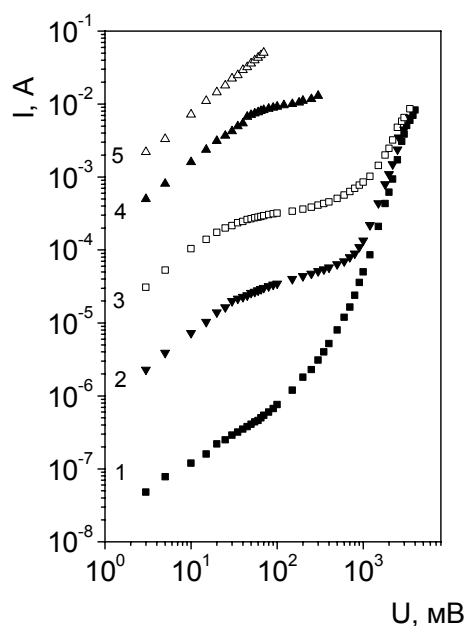


Рис. 2. Зворотні ВАХ структури In/ p -PbTe при різних температурах, К:
77 (1); 100 (2); 123 (3), 182 (4), 293 (5)

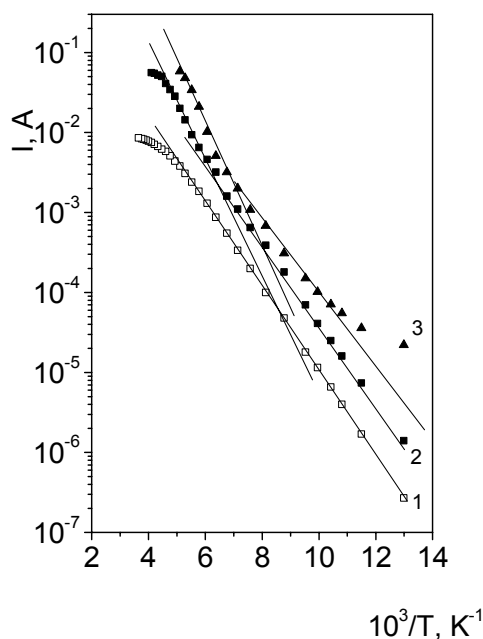


Рис. 3. Температурні залежності зворотного струму структури In/ p -PbTe при різних зміщеннях, мВ:
15 (1), 150 (2); 600 (3)

лежність струму від зворотної температури в інтервалі температур 77–180 К, причому для інтервалу температур 77–150 К енергія активації становила ~ 0.1 еВ, а для температур > 150 К – 0.16 еВ. Така відмінність у значеннях енергії активації пояснюється зміною механізму проходження струму з генераційного при $T < 150$ К на дифузійний при більш високих температурах.

При зміщеннях $U > 600$ мВ спостерігалось зростання темного струму, причому значення струму слабо залежать від температури до значень $T \leq 150$ К, що можна пояснити тунельним механізмом проходження струму. Доказом тунельного механізму проходження струму є лінеаризація експериментальних даних в координатах $\lg I - (U_D - U)^{-1/2}$, де U_D – дифузійний потенціал [14]. Експериментальні дані, побудовані у вказаних координатах, приведені на рис. 4. Зазначимо, що при температурі 77 К (крива 1) на ВАХ спостерігаються дві лінійних ділянки. Зменшення нахилу ВАХ при малих зміщеннях пояснюється тунелюванням носіїв заряду за участю глибоких центрів. При зростанні зміщення спостерігається міжзонне тунелювання.

Сукупність результатів, показаних на рис. 1–4, свідчить про формування потенціального бар'єру в In/p-PbTe. Для встановлення його природи були проведені виміри локальної термо-ерс. Для цього шар металу стравлювався в HCl. За знаком термо-ерс встановлено наявність легованої індієм підконтактної області телуриду свинцю з електронним типом провідності. Найбільш ймовірно, що ця область є компенсованою, про що свідчать результати досліджень ВФХ. Більші за ширину забороненої зони PbTe значення емнісної напруги відсічки можна пояснити впливом послідовного опору компенсованої області [15].

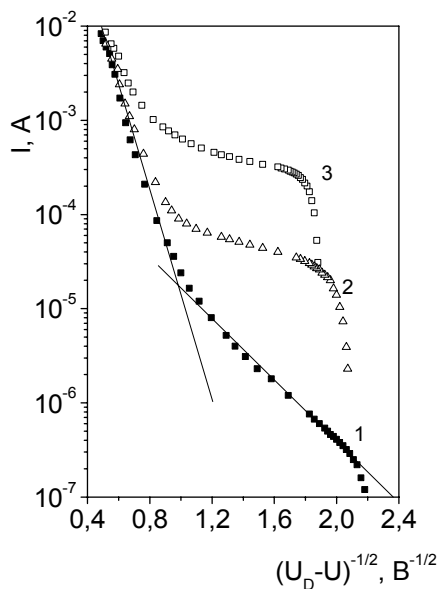


Рис. 4. Зворотні ВАХ структури In/p-PbTe при різних температурах, К: 77 (1); 100 (2); 146 (3)

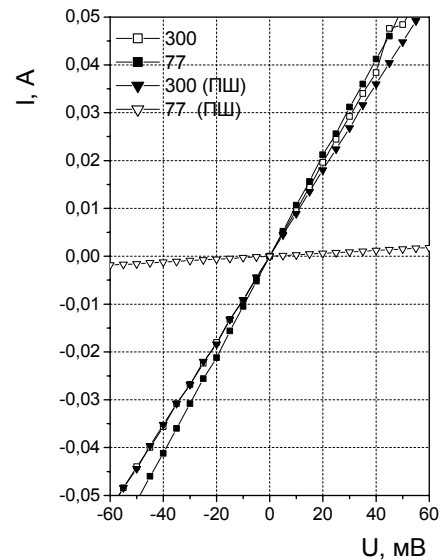


Рис. 5. ВАХ структур Cu/p-PbTe зі стравленим та порушеним шаром (ПШ) при температурах 77 та 300 К

Досліджувались ВАХ структур Cu(Au)/p-PbTe при різних обробках поверхні підкладок - механічно шліфованих з наявністю порушеного шару (ПШ) та хімічно травлених, рис. 5. У структурах Cu/p-PbTe з хімічно травленою поверхнею ВАХ при температурах 77 та 295 К є лінійними у всьому діапазоні прикладених напруг. Слаба залежність ВАХ від температури пояснюється виродженістю концентрації дірок у підкладках. Проте у структурах з ПШ спостерігається значний його вплив на ВАХ при 77 К, що свідчить про його високоомність. Можливою причиною цього є генерація дефектів донорного типу під час механічної обробки з формуванням компенсованої області.

Відсутність потенціального бар'єру на межі розділу Cu(Au)/p-PbTe можна пояснити в рамках моделі Андерсена. При використанні міді як контакту робота виходу металу W_{Cu} близька до $W_{PbTe} \cong \chi + E_g$, а у випадку золота $W_{Au} > W_{PbTe}$. Використання золота для створення омичних контактів більш доцільно, оскільки у підконтактній області формується збагачений основними носіями шар. Зазначимо також, що у структурах Cu/p-PbTe, виготовлених термовакуумним методом, формується потенціаль-

ний бар'єр з висотою $<E_g$ [12]. Відмінності у висоті бар'єрів виготовлених різними методами пояснюються хімічними реакціями на межі метал/ p -PbTe.

Висновки

1. При використанні металів In, Cu, Au для виготовлення контактів до p -PbTe можуть формуватись як бар'єрні (In), так і омичні (Cu, Au) структури. Термообробка структур In/ p -PbTe обумовлює конверсію типу провідності в приконтактній області і формування мілкого p - n -переходу з компенсованою областю, високий послідовний опір якої впливає на значення висоти потенціального бар'єру.

2. У структурах In/ p -PbTe в інтервалі температур від 77 до 150 К при напругах зміщення $U=15$ –600 мВ переважає генераційний механізм проходження струму, а зі збільшенням температури – дифузійний механізм. Тунельний механізм пробую реалізується при зміщеннях $U \geq 800$ мВ в інтервалі температур 77–150 К.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Ананичук Л.І., Михайлівський В.Я. Розвиток досліджень і розробок термогенераторів на органічному паливі // Термоелектрика.– 2004.– № 4.– С. 5–38.
2. Салій Я.П., Мельник П.І., Довгий О.Я., Калинюк М.В. Розмірні ефекти у полікристалічних плівках PbTe // Фізика і хімія твердого тіла.– 2001.– 2, № 1.– С. 161–163.
3. Рогачова О.І., Григоров С.М., Федоров О.Г. Приготування, дослідження структури та властивостей тонких плівок PbTe, легованого натрієм // Нові технології.– 2010.– 28, № 2.– С. 16–21.
4. Nugraha O., Tamura W., Itoh O. The vapor pressure dependence of the p - n - junction properties of PbTe liquid phase epitaxial layers // J. Electron Materials.– 1998.– 27, № 5.– P. 438–441.
5. Александрова О.А., Ахмеджанов А.Т., Бондоков Р.Ц. Исследование барьерных структур In/PbTe с промежуточным тонким диэлектрическим слоем // ФТП.– 2000.– 34, № 12.– С. 1420–1425.
6. Сизов Ф.Ф., Сава А.А., Тетеркин В.В. Граница раздела и свойства выпрямляющих контактов In(Cu)/PbTe // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.– 1990.– 24, № 6.– С. 1193–1198.
7. Vaars I., Bassett D., Schulz M. Metal-semiconductor barrier studies of PbTe // Phys. Stat. Sol. (a) – 1978.– 49, № 2.– P. 483–488.
8. Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А.. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS.– М., Наука, 1968.
9. Бехштедт Ф, Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников.– М.: Мир, 1990.
10. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник.– М.: Радио и связь, 1982.
11. Walpole J.N. and Nill K.W., Capacitance-Voltage Characteristics of Metal Barriers on p PbTe and p InAs: Effects of the Inversion Layer J. Appl. Phys.– 1971.– 42, № 13.– 5609–5617.
12. Sizov F.F., Tetyorkin V.V., Troyan Yu.G., Chopick V.Yu. Properties of the Schottky Barriers on compensated PbTe<Ga> // Infrared Phys.– 1989.– 29, N 2.– 271–277.
13. Щарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы.– М.: Сов. Радио, 1979.
14. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.– М: Мир, 1984.– Т. 1.
15. Константинов О.В., Мезрин О.А. Влияние последовательного сопротивления диода Шоттки на его эффективную емкость // ФТП.– 1983.– 17, № 2.– С. 305–311.

A. V. Sukach, V. V. Tetyorkin, A. I. Tkachuk, G. P. Malanchich, A. T. Voroschenko, M. M. Krolevets
Electrical properties of (In, Cu, Au) p -PbTe structures.

Contacts has been formed on chemically etched surface of p -PbTe single crystals by thermal evaporation of indium in a vacuum chamber and electroless deposition of copper and gold. It has been shown that heat treatment of In/ p -PbTe structures results in formation of potential barriers, the nature of which has been investigated. The carrier transport mechanisms has been investigated in the temperature range of 77–295 K. The chemical deposition of Au and Cu metal results in ohmic contacts.

Keywords: *lead telluride, electrical contact, carrier transport mechanism.*