

## ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ НА ОСНОВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ БАР'ЄРІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

К. ф.-м. н. І. Г. Орлецький, к. ф.-м. н. М. І. Ілащук, д. ф.-м. н. Е. В. Майструк,  
к. ф.-м. н. І. П. Козярьський, к. ф.-м. н. Д. П. Козярьський, д. ф.-м. н. М. М. Солован

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
Україна, м. Чернівці  
i.koziarskyi@chnu.edu.ua

*На основі аналізу температурних залежностей  $I$ - $V$ -характеристик і частотних залежностей  $C$ - $V$ -характеристик встановлено енергетичні параметри діода Шотткі графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  та з'ясовано роль поверхневих енергетичних станів на межі розділу компонентів структури у формуванні контактної різниці потенціалів. Запропоновано модель енергетичної діаграми досліджуваних діодів, яка добре описує експериментальні електрофізичні явища.*

*Ключові слова:* бар'єри Шотткі, поверхневі стани, енергетична діаграма.

Використання тонких графітізованих плівок вуглецю для фотоелектричного перетворення зумовлене їхньою високою електропровідністю (концентрація електронів  $n = (7,0 — 9,3) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) та прозорістю у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах спектру оптичного випромінювання (коефіцієнт пропускання  $T = 70,7\%$ ) [1]. Дослідження електричних та фотоелектричних характеристик бар'єрних структур з фронтальним шаром тонких плівок графіту на основі таких напівпровідників, як CdTe, SiC, Si, GaAs, 4H-SiC та органічних напівпровідників показали їхні добре виражені випрямні властивості та фоточутливість, а отже, й перспективність використання для сонячної енергетики [2]. При цьому особлива увага звертається на стан металургійної межі розділу внаслідок виникнення локальних енергетичних станів, за участю яких відбувається рекомбінація фотогенерованих носіїв заряду.

У роботі досліджувався вплив поверхневих електрично-активних центрів на енергетичні параметри бар'єрів Шотткі графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , отриманих нанесенням тонких плівок графітізованого вуглецю на свіжосколоті кристалічні підкладки твердого розчину  $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  методом електронного променевого випаровування.

Кристали твердого розчину  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  були отримані вертикальним методом Бріджмена за високого тиску парів Cd. Електронний тип провідності кристалів одержували внаслідок легування домішкою індію в процесі вирощування. Кінетичні параметри кристалів за температури  $T = 295 \text{ K}$  становили: питома електропровідність  $\sigma = 2,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , концентрація електронів  $n = 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  та їхня холлівська рухливість  $\mu_n = 770 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Діоди Шотткі графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  виготовляли з використанням методу випаровування чистого полікристалічного графіту електронним пучком в універсальній вакуумній установці Leybold-Heraeus L560. Випаровування графіту тривало 1,5 хв при середній швидкості осадження 0,27 нм/с та температурі підкладки 723 К. Значення електричних параметрів для графітізованих плівок вуглецю були такими:  $\sigma = 1,53 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $n = 9,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Аналіз однофонових раманівських спектрів в діапазоні частот 1000 — 2000  $\text{см}^{-1}$ , що відповідають коливанням вуглецевих  $sp^2$ -зв'язків, показав, що отримані плівки можна розглядати як нанокристалічні вуглецеві структури з розмірами кристалітів  $L_a \approx 5,0 \text{ нм}$ .

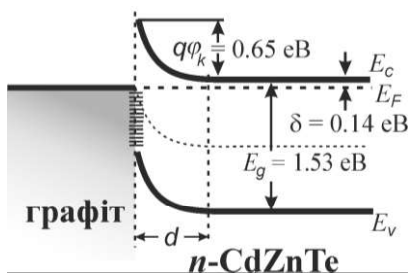
Вольт-амперні ( $I$ - $V$ ) характеристики діодів вимірювали за допомогою апаратно-програмного комплексу, реалізованого на базі платформи Arduino, цифрового мультиметра Agilent 34410A та програмованого джерела живлення Siglent SPD3303X, які управлялися персональним комп'ютером з програмним забезпеченням, створеним авторами у середовищі LabView. При вимірюванні вольт-фарадних ( $C$ - $V$ ) характеристик структур використовувався прилад LCR Meter BR2876.

$I$ - $V$ -характеристики виготовлених бар'єрів Шотткі графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , виміряні при прямих та зворотних зміщеннях в інтервалі температури від 296 до 344 К показують наявність хороших випрям-

них властивостей. Коефіцієнт випрямлення при  $V = 0,7$  В і  $T = 296$  К становив  $\approx 10^4$ . Висота потенціального бар'єра  $q\phi_k$ , визначена екстраполяцією прямолінійних ділянок  $I$ - $V$ -характеристик до вісі напруг, становила  $q\phi_k = 0,65$  еВ при  $T = 296$  К.

Характер залежностей  $C = f(V)$ , виміряних як в області низьких ( $f = 10 - 100$  кГц), так і високих ( $f = 500 - 1000$  кГц) частот при зворотних напругах  $0 > V > -2,0$  В та прямих напругах  $V > 0,65$  В добре пояснюється на основі теорії бар'єрної ємності асиметричних випрямних структур з розподілом вбудованого потенціалу в області напівпровідника зі значно меншою концентрацією легувальної домішки  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ . Спостережувана залежність ємності від частоти змінного сигналу добре пояснюється впливом заряду глибоких енергетичних рівнів, розташованих як на межі розділу, так і в зарядженій області структури. Їх наявність підтверджується відсутністю співпадання значень напруги, визначених екстраполяцією прямолінійних ділянок залежностей  $C^{-2} = f(V)$  до перетину з віссю абсцис  $V_C = 0,8$  еВ та визначених з аналізу прямих гілок  $I$ - $V$ -характеристик  $\phi_k = 0,65$  еВ. Розрахована за моделлю Донеллі — Мілса [3], що враховує вплив локалізованого на поверхневих станах металургійної межі розділу електричного заряду на  $C$ - $V$ -характеристики структури, концентрація станів становила  $N_{SS} = 8,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Вплив енергетичних станів на межі поділу графіту і  $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  на профіль енергетичної діаграми виготовленої діодної структури аналізувався шляхом порівняння реальних енергетичних параметрів переходу, отриманих на основі експериментальних досліджень (див. рисунок), з енергетичними параметрами електричного переходу графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  згідно з моделлю Андерсона [3].



Енергетична діаграма структури графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  з врахуванням експериментальних даних

Значення енергетичних параметрів компонентів структури (спорідненість до електрона  $\chi$  та ширина заборонної зони  $E_g$ ) були взяті з наукової літератури. Положення рівня Фермі відносно дна зони провідності у кристалі  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $\delta = 0,14$  еВ) розраховували з використанням значення концентрації електронів  $n = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , отриманим за експериментальними результатами дослідження  $C$ - $V$ -характеристик діодів. Визначена за різницею термодинамічних робіт виходу (модель Андерсона) висота потенціального бар'єра діода графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  становила  $0,18$  еВ, що відрізняється від експериментально встановленої  $q\phi_k = 0,65$  еВ. Згідно з моделями ізотипних бар'єрних структур, заряджена область у приконтатному шарі напівпровідника  $n$ -типу провідності може формуватися внаслідок захоплення електронів поверхневими станами, наявність яких підтверджується результатами дослідження  $C$ - $V$ -характеристик.

Результати проведених досліджень показують, що формування вбудованого електричного поля у діодах Шоттки графіт/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  та їхні основні енергетичні параметри при виготовленні методом електронно-променевого випаровування тонких наноструктурованих плівок графітізованого вуглецю з розмірами кристалітів  $L_a \approx 5,0$  нм на сколоту поверхню твердих розчинів  $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  суттєво обумовлені електрично-активними поверхневими станами на металургійній межі.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Pierson H.O. *Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes*. New Jersey, Noyes Publications, 1993.
2. Tongay S., Schumann T., Hebard A. F. Graphite based Schottky diodes formed on Si, GaAs, and 4H-SiC substrates *Appl. Phys. Lett.* **95**, 2009, 222103.
3. Milnes A.G., Feucht D.L. *Heterojunctions and Metal-Semiconductors Junctions*. New-York, Acad. Press, 1972.

I. G. Orletskyi, M. I. Ilashchuk, E. V. Maistruk, I. P. Koziarskyi, D. P. Koziarskyi, M. M. Solovan

#### Influence of surface states on the main energy parameters of graphite/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ Schottky barriers

*The authors analyze temperature dependences of  $I$ - $V$  and frequency dependences of  $C$ - $V$  characteristics to establish the energy parameters of the graphite/ $n$ - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  Schottky diode and clarify the role of surface energy states at the interface of structural components in the formation of contact potential difference. The study proposes an energy diagram model of the studied diodes, which well describes the experimental electro-physical phenomena.*

*Keywords: Schottky barriers, surface states, energy diagram.*