

# Механізми струмопереносу в ізотипних гетероструктурах n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub>

Петро Горлей, Зінаїна Грушка, Олена Грушка, Іван Заболоцький

Кафедра електроніки і енергетики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, УКРАЇНА, м. Чернівці, вул. М. Коцюбинського, 2, E-mail: [semicon-dpt@chnu.edu.ua](mailto:semicon-dpt@chnu.edu.ua)

*Abstract – The authors created n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> heterojunction by deposition over optical contact, investigated temperature evolution of its current-voltage curves under the forward bias  $U \leq 3V$ . Analyzing temperature dependence of the curves obtained, the main mechanisms of current transport through the semiconductor contact were determined, allowing prediction of successful possible applications of the heterojunction studied under high temperatures and elevated radiation due to the parameters of the base semiconductors and the diode structure itself.*

**Ключові слова** – heterojunction, n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub>, optical contact, current-voltage curve, current transport mechanisms.

## I. Вступ

Сучасний розвиток електронної техніки надає актуальність задачі створення електронних пристроїв, які б ефективно працювали при значних потоках іонізуючого випромінювання та без охолодження при підвищених температурах. До числа таких пристроїв, можна віднести випрямляючі структури на основі шаруватих напівпровідників і напівпровідників зі стехіометричними вакансіями [1]. Це зумовлено тим, що напівпровідники з шаруватою структурою, до яких відноситься сполука SnS<sub>2</sub>, володіють цілим рядом унікальних фізико-хімічних властивостей [2], що дають можливість створювати гетеропереходи (ГП) на основі шаруватих напівпровідників методом посадки на “оптичний контакт”, який не вимагає високотемпературної обробки і за міцністю зчепленням наближається до об’ємної міцності контактуючих матеріалів.

Особливістю матеріалів з так званими дефектними напівпровідниковими фазами (типу Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> і CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>) є велика концентрація стехіометричних вакансій (до  $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup> [1]), що обумовлює підвищену стійкість напівпровідників цього класу до дії іонізуючих випромінювань і породжує практичний інтерес до створення фоточутливих структур на їх основі, що здатні працювати при високих температурах без додаткового охолодження.

У даній роботі представлено результати з технології створення гетеропереходів n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> та дослідження їх вольт-амперних характеристик (ВАХ) при прямих зміщеннях. Показано, що досліджувана структура є аналогом структур n-InSe/p-CdTe і InSe/p-GaSe, які можуть використовуватися для роботи при підвищених температурах і при наявності іонізуючого випромінювання.

## II. Об’єкти і методи досліджень

В якості базових напівпровідникових матеріалів ГП використовувалися нелеговані монокристали SnS<sub>2</sub> і

CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>, які були вирощені модифікованим методом Бріджмена зі стехіометричного розплаву. В області кімнатних температур зразки CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> і SnS<sub>2</sub> володіли електронним типом провідності з наступними значеннями концентрацій  $n$  і рухливостей  $\mu_n$  основних носіїв:  $n \approx 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> і  $\mu_n \approx 135$  см<sup>2</sup>/(В·с) для CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> [3] та  $n \approx 3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> і  $\mu_n \approx 90$  см<sup>2</sup>/(В·с) для SnS<sub>2</sub>.

Підкладками служили монокристалічні пластинки n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> товщиною  $\sim 700$  мкм. При виготовленні ГП необхідна якість поверхні підкладок n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> досягалася шляхом механічного та хімічного полірування. Пластинки n-SnS<sub>2</sub> площею декілька квадратних міліметрів отримувалися відщепленням тонких ( $\sim 10$  мкм) шарів від монокристалічного зразка. Вони мали дзеркально-гладкі та досконалі поверхні і тому не потребували додаткової обробки. Сколоті тонкі пластинки n-SnS<sub>2</sub> накладалися на поверхню підкладки n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> та легенько притискалися, що приводило до їх взаємного зчеплення та утворення “оптичного контакту”. Омичні контакти створювалися за допомогою вплавлення індію з обох сторін ГП.

## III. Результати досліджень

ВАХ ГП n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> вимірювались у режимі постійного струму і при прямих зміщеннях володіли випрямляючими властивостями в інтервалі температур 250–332 К (Рис. 1). Аналіз отриманих температурних залежностей ВАХ показав, що властивості структури n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> можуть бути описані на основі моделі різкого ГП [4]. Встановлено, що при напругах  $0.75V < U < 3.0V$  ВАХ ГП n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> описуються лінійною залежністю:

$$I \approx C \cdot (U - U_0) \quad (1)$$

де  $U_0$  – напруга відсічки, величина якої визначається екстраполяцією лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг, і складає  $U_0 = 0.32 \pm 0.02$  В. Характерно, що в цьому інтервалі напруг температурна залежність струму при різних фіксованих напругах (вставка на Рис. 1) підкоряється експоненційній залежності:

$$I \sim \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

де  $E_a$  – енергія активації, величина якої складає  $E_a = (0.36 \pm 0.03)$  еВ і досить непогано корелює з енергією активації власних дефектів  $E_a = (0.42 \pm 0.03)$  еВ у CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> [3]. Слід зауважити, що енергія активації дефектів у n-SnS<sub>2</sub>, згідно з літературними даними [2], знаходиться у межах 0.20 - 0.26 еВ і тому отримана величина  $E_a$  засвідчує, що питомий опір досліджуваного ГП визначається опором підкладки CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>

і його температурна залежність обумовлена енергетичним рівнем власних дефектів у забороненій зоні енергетичного спектру базового напівпровідника.

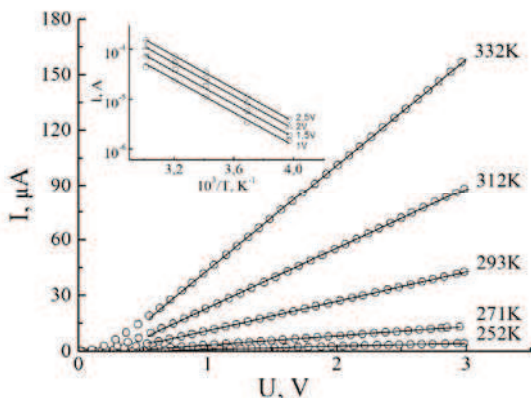


Рис. 1 Залежність  $I=f(U)$  ВАХ ГП n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> при прямих зміщеннях і різних температурах. На вставці – залежність струму від оберненої температури при фіксованих напругах.

Детальний аналіз отриманих температурних залежностей ВАХ показав, що в ізотипній гетероструктурі n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> в інтервалі прямих зміщень  $U < 0.75$ В існують два механізми перенесення струму (МПС): генераційно-рекомбінаційний ( $I_{gr}$ ) та тунельний ( $I_t$ ).

Для ділянки прямих зміщень  $0 < U < 0.35$ В домінуючим є генераційно-рекомбінаційний механізм, ВАХ для якого може бути описана залежністю [4]:

$$U = n \frac{k_0 T}{e} \ln \left( \frac{I}{I_{gr}^0} + 1 \right) \quad (3)$$

Тут  $n$  – коефіцієнт неідеальності, струм відсічки, який визначається при  $U \rightarrow 0$ В і змінюється з температурою як:

$$I_{gr}^0 \approx \exp \left( -E_g(0) / (nk_0 T) \right) \quad (4)$$

де  $E_g(0)$  – значення ширини забороненої зони одного із базових напівпровідників при  $T \rightarrow 0$  К, а інші позначення загальноприйняті.

Побудовані у відповідності з (3) ВАХ при різних температурах дали можливість визначити величину коефіцієнта неідеальності  $n=2.1 \pm 0.1$  та встановити енергію активації  $E_g(0)=1.22 \pm 0.01$ еВ величина якої знаходиться у межах приведеного в літературі розкиду значень  $E_g(\text{CdIn}_2\text{Te}_4)$  – від 0.9еВ до 1.28еВ [5].

В інтервалі напруг  $0.35 < U < 0.75$ В переважаючим є тунельний механізм перенесення струму через контакт [4], ВАХ для якого добре описується залежністю:

$$I_t = I_{t0} \cdot \exp(\alpha U + \beta T) \quad (5)$$

де  $I_{t0} = B \cdot \exp(-\alpha U_d)$  – струм відсічки при  $U=0$ ,  $U_d$  – величина дифузійного потенціалу, коефіцієнт  $B = \text{const}$ , який визначається параметрами ГП, а  $\alpha$  і  $\beta$  – параметри, значення яких становили  $\alpha=26.05 \text{ В}^{-1}$  і  $\beta=7.79 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$ .

Проведений нами аналіз показав, що при напругах  $U > 0.75$ В дослідна ВАХ досить добре описується відомим виразом для надбар'єрного механізму перенесення струму [4]:

$$\ln I - \frac{U}{k_0 T} = \ln I_{b0} - \frac{I}{C k_0 T}, \quad (6)$$

де  $C$  – постійна, яка входить в формулу (1), а  $I_{b0}$  – струм відсічки при  $U=0$ В, температурна залежність якого визначається формулою:

$$I_{b0} = A \cdot T^2 \cdot \exp \left( -\frac{e\phi_b}{k_0 T} \right). \quad (7)$$

У (7)  $e\phi_b$  – висота потенціального бар'єру, а величина постійної  $A$  визначається вибором моделі ГП, ефективними масами носіїв заряду, площею контакту тощо і здебільшого вибирається у якості "підгонючого" параметру. Отримане значення величини потенціального бар'єру складало  $e\phi_b=(0.85 \pm 0.03)$  еВ. Зауважимо, що встановлена величина параметру  $e\phi_b$  для ГП n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> є більшою за значення аналогічного параметру для ГП n-InSe/p-CdTe ( $e\phi_b=0.76$  еВ) і n-InSe/p-GaSe ( $e\phi_b=0.73$  еВ), що свідчить про перспективність використання досліджуваного ізотипного ГП n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> у якості робочого елемента пристроїв електронної техніки, здатних ефективно і стабільно працювати в екстремальних зовнішніх температурних і радіаційних умовах.

## ВИСНОВОК

На основі аналізу температурних залежностей ВАХ встановлено, що в структурі n-CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-SnS<sub>2</sub> в досліджуваному інтервалі прямих зміщень існують генераційно-рекомбінаційний, тунельний та надбар'єрний струми і визначено параметри цих механізмів. З використанням отриманих дослідних результатів зроблено припущення, що дана структура є перспективною для роботи в умовах підвищеної температури або значних потоків радіації.

## References

- [1] L. P. Galchinetsky, V. M. Koshkin, V. M. Kumakov et. al., "Effect of radiating stability of semiconductors with stoichiometric vacancies", Fizika Tverdogo Tela, vol. 14 (2), pp. 643–646, 1972.
- [2] C. Wang, K. Tang, Q. Yang, Y. Quan, "Raman scattering, far infrared spectrum and photoluminescence of SnS<sub>2</sub> nanocrystallites", Chem. Phys. Let., vol. 357, pp. 371–375, 2002.
- [3] P. M. Gorley, O. G. Grushka, O. I. Vorobets, Z. M. Grushka, "Temperature dependens of the concentration of carriers in CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> crystals", Ukr. J. Phys., vol. 51(5), pp. 475–477, 2006.
- [4] B. L. Sharma, P. K. Purohit, "Semiconductor heterojunction", Mir, Moscow, 1979.
- [5] J.-F. Lambert, "Cristallogenèse et caractérisations physico-chimiques et optiques des matériaux semi-conducteurs AlIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> (A= Cd, Zn et Mn). Leurs potentialités comme modulateurs dans la bande spectrale 1,06-10,6 micromètres", PhD These, 1993.