

© 2002р. І.С. Кабанова, Л.А. Косяченко, С.Ю. Паранчич,  
В.М. Склярчук, О.Ф. Склярчук, І.В. Солончук

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці

## МЕХАНІЗМИ ПЕРЕНОСУ ЗАРЯДУ У ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ ДІОДАХ НА ОСНОВІ $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$

Наведено результати дослідження електричних властивостей діодів Шоттки  $\text{Al-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ . Результати розрахунку генераційно-рекомбінаційних струмів на основі моделі Саа-Нойса-Шоклі добре узгоджуються з експериментальними даними.

A study of electrical properties of  $\text{Al-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  Schottky diodes is presented. Calculations of generation-recombination currents in term of the Sah-Noyce-Shockley theory agree well with experimental data.

Телурид кадмію – типовий представник напівпровідникових сполук елементів II-ї і VI-ї груп періодичної системи, перспективність якого у детекторах рентгенівського і радіоактивного випромінювання теоретично обґрунтована й експериментально підтверджена ще в 60-х роках минулого століття. В 80-х роках детектори на основі  $\text{CdTe}$  знайшли практичне застосування в радіології, дозиметрії, медицині, промисловості, у космічних дослідженнях тощо [1]. Однак технологічні проблеми не дають можливості широко використовувати прилади на основі  $\text{CdTe}$ .

Перспективними матеріалами для напівпровідникової техніки є також тверді розчини бінарних сполук елементів II і VI-ї груп. Плавна зміна основних фізичних параметрів при зміні хімічного складу твердого розчину створює додаткові можливості для оптимізації робочих характеристик напівпровідникових приладів. Діапазон зміни властивостей твердих розчинів настільки великий, що на їх основі можна виготовляти більшість із існуючих напівпровідникових приладів. Перепоною цьому є відсутність відтворюваної технології одержання як самого матеріалу, так і *p-n* переходів на їх основі з заданими та стабільними параметрами.

Найбільш вивчений серед твердих розчинів сполук елементів II і VI-ї груп – телурид кадмію-ртуті ( $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ ) з шириною забороненої зони  $\sim 0,1$  еВ ( $x \approx 0,8$ ), який в даний час є основою інфрачервоних детекторів для діапазону довжин хвиль від 8 до 14 мкм [2]. Однак діодні структури

на основі  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  з широкою забороненою зоною (малим вмістом ртуті) практично не вивчені.

У даній роботі наводяться результати дослідження оптичних характеристик монокристалів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  ( $x=0,05$ ), а також поверхнево-бар'єрних діодів на їх основі. Вольт-амперні характеристики досліджених діодів інтерпретуються в рамках моделі генерації-рекомбінації в області просторового заряду.

Для виготовлення зразків використовувались леговані ванадієм із концентрацією  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  монокристали  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ , одержані методом Бриджмена на кафедрі фізичної електроніки ЧНУ. Злитки вихідного матеріалу розрізались на пластини товщиною 2 мм, які шліфувались і полірувались алмазними пастами, розмір зерен яких поступово зменшувався до  $\sim 1$  мкм. Поверхнево-бар'єрні структури виготовлялись методом термічного напилення алюмінію на підкладку  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  у вакуумі не гірше  $10^{-6}$  Торр. Розміри і конфігурація металевих площадок задавалась молибденовими масками. Омічні контакти до поверхнево-бар'єрної структури створювались хімічним осадженням міді з водного розчину в присутності  $\text{In}$ .

Для оптичних вимірювань використовувались пластини  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ , товщина яких поетапно зменшувалась аж до 60 мкм.

На рис.1 показана крива оптичного поглинання, знайдена зі спектрів пропускання досліджуваних зразків.

Коефіцієнт поглинання  $\sigma$  з урахуванням багатократних відбивань всередині зразка за формулою

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-r)^2}{2T} + \left[ \frac{(1-r)^4}{4T^2} + r^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

яка є розв'язком рівняння для пропускання зразка  $T$  [4]:

$$T = \frac{(1-r)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - r^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (2)$$

де  $d$  – товщина зразка,  $r$  – коефіцієнт відбивання від границі розділу напівпровідник-повітря.

Згідно з теорією власного поглинання для прямих дозволених переходів коефіцієнт  $\alpha$  виражається формулами

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= A(h\nu - E_g)^{1/2} && \text{при } h\nu > E_g \\ \alpha &= 0 && \text{при } h\nu < E_g \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $A$  – незалежна від  $h\nu$  величина. Із формули (3) випливає, що зі спектральної залежності  $\alpha^2$  від енергії кванта можна визначити ширину забороненої зони. Для досліджених нами зразків  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  із вмістом ртуті 9% виявилось, що ширина забороненої зони дорівнює  $E_g = 1,32$  еВ, що узгоджується з відомими із літератури залежностями  $E_g(x)$  [3].

Поверхнево-бар'єрні структури створювались напиленням алюмінію у вакуумі на монокристаліні пластини  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ .

На рис.2 зображені прямі та обернені гілки вольт-амперних характеристик для одного із зразків. Вольт-амперні характеристики діодів  $\text{Al-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  вимірювались при температурах 273, 293, 320, 340 К.

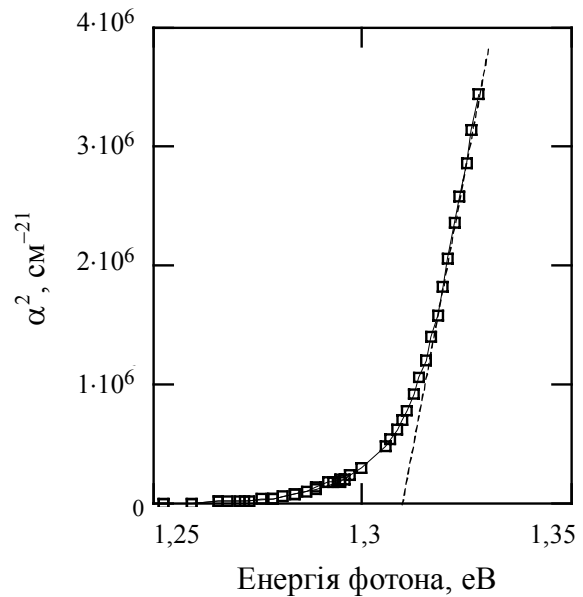


Рис.1. Спектральна крива оптичного поглинання монокристала  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  (297 К).

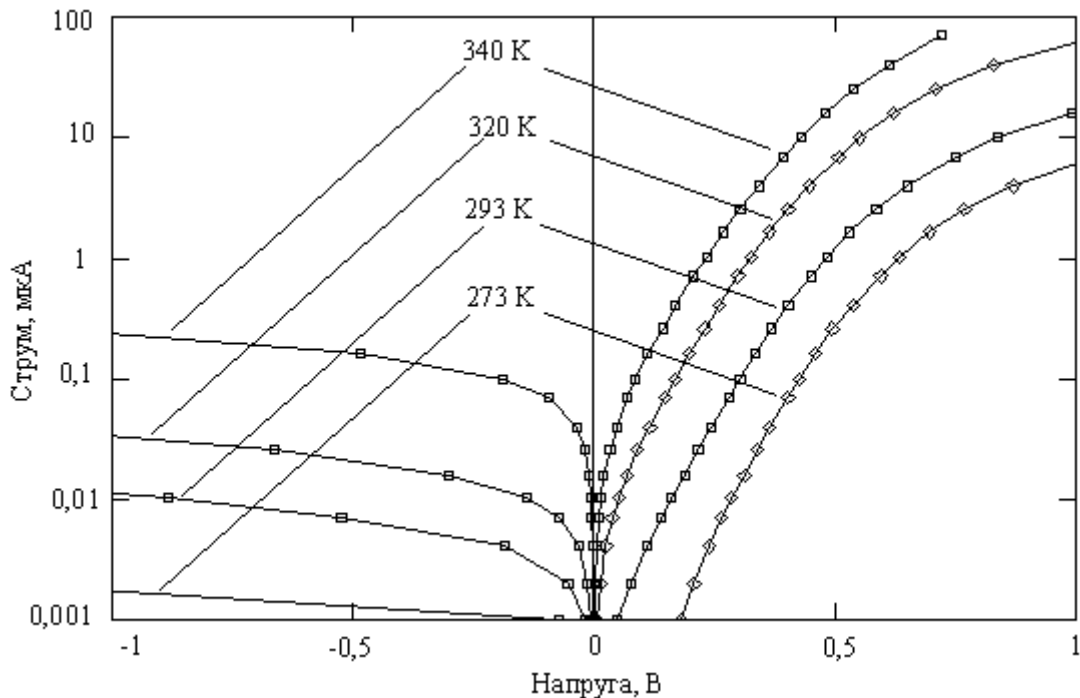


Рис.2. Вольт-амперні характеристики  $\text{Al-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  діодів при різних температурах.

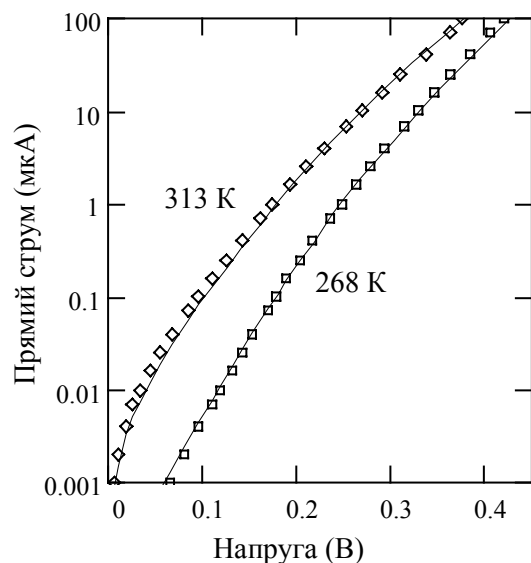


Рис.3. Вольт-амперна характеристика діода при двох температурах: маркери — експеримент, суцільні лінії — розрахунок.

Із температурних залежностей вольт-амперних характеристик визначена висота потенціального бар'єра  $\phi_0$ , яка складає  $\sim 0,6$  еВ. Виміряні вольт-амперні характеристики показали, що досліджувані поверхнево-бар'єрні структури мають чітко виражені діодні характеристики з коефіцієнтом випрямлення не гірше  $\sim 10^5$ .

Прямі гілки вольт-амперних характеристик, побудовані в напівлогарифмічних координатах, зображаються прямими лініями з нахилом, що відповідає залежності  $\exp(eV/kT)$  при малих зміщеннях. При більших напругах вольт-амперні характеристики відповідають прямим з нахилом, що описується залежністю  $\exp(eV/2kT)$ . Останнє характерне для рекомбінаційного механізму прямого струму [1]. Наявність ділянки, де струм пропорційний  $\exp(eV/kT)$ , вказує на те, що рекомбінація відбувається через рівні, які розташовані не строго посередині забороненої зони, а зміщені ближче до зони провідності або валентної зони. Ймовірно, що такі рівні зумовлені домішками ванадію, концентрація якого в досліджуваному матеріалі доволі велика.

З огляду на викладене генераційно-рекомбінаційний струм слід розраховувати, виходячи із загального виразу в моделі Саа-Нойса-Шоклі [5]:

$$I = S \cdot e \int_0^W U(x, V) dx, \quad (4)$$

де

$$U(x, V) = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)}, \quad (5)$$

тут  $S$  — площа бар'єра,  $n$  і  $p$  — нерівноважна концентрація електронів і дірок відповідно,  $n_1$  і  $p_1$  — їх рівноважні значення за умови збігу рівня Фермі з рекомбінаційним рівнем,  $n_i$  — їх власна концентрація,  $\tau_{n0}$  і  $\tau_{p0}$  — часи життя електронів і дірок відповідно,  $W = [2\epsilon\epsilon_0(\phi_0 - eV)/e^2(N_a - N_d)]^{1/2}$ ,  $W$  — ширина ОПЗ,  $\epsilon$  і  $\epsilon_0$  — діелектрична проникність напівпровідника і вакууму,  $\phi_0$  — висота бар'єра,  $N_a - N_d$  — концентрація некомпенсованих акцепторів.

Порівняння експериментальної вольт-амперної характеристики  $\text{Al-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  діода з результатами проведених розрахунків свідчить про їх добре узгодження як при прямій, так і при зворотній напругах зміщення для енергетичної віддалі домішкового рівня від однієї із зон  $0,42$ – $0,44$  еВ (рис.3).

Одержані результати пояснюють також спостережуване відхилення зворотної гілки вольт-амперної характеристики діода від залежності  $I \sim W \sim (\phi_0 - eV)^{1/2}$ . Для досить високого бар'єра ( $0,6$  еВ) надбар'єрний струм виявляється малим і обернений струм цілком визначається генерацією носіїв струму в бар'єрі. У цьому випадку зворотний струм при  $eV \gg kT$  описується виразом [5]:

$$I_{\text{зв}} = S \frac{\exp(\sqrt{E_g/2 - \Delta\mu - eV} - \sqrt{E_g/2})}{\tau_n \sqrt{\phi_0 - eV}}. \quad (6)$$

Аналіз (6) вказує, що лише при високих обернених напругах генераційний струм у поверхневому бар'єрі зростає у відповідності з розширенням області просторового заряду  $I \sim d \sim (\phi_0 - eV)^{1/2}$ , як це звичайно приймається [1].

Отже, електричні характеристики поверхнево-бар'єрних структур  $\text{Al-CdHgTe}$  пояснюються в рамках моделі генерації рекомбінації в області просторового заряду діодної структури.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зі С. Физика полупроводников. - М.: Мир, 1981.
2. Корбутяк Д.В., Мельничук С.В., Корбут Є.В., Борисюк М.М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. - Київ.: Іван Федоров, 2000.
3. Берченко Н.Н., Кревс В.Є., Средин В.Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение: Справочные таблицы / Под ред. Средина В.Г. - М.: Воениздат, 1982.
4. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. - М.: Мир, 1973.
5. Косяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Температурные зависимости генерационно-рекомбинационных и ионизационных процессов в CdTe-диодах // УФЖ. - 1977. - 22, №3. - С.476-482.