

© 2001 р. Я.І. Кушнір, З.І. Захарук, О.Б. Мартинюк,  
А.І. Раренко, О.Л. Тарко

Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці

## СПЕКТРАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ОПТИЧНОЇ ГУСТИНИ, ОБ'ЄМНА І БАР'ЄРНА ФОТОЕРС ВАРИЗОННИХ СТРУКТУР CdHgTe

Розраховані оптична густина, локальний коефіцієнт поглинання та спектральна залежність варизонної і бар'єрної фотоерс для варизонних структур CdHgTe з різним композиційним профілем.

It has been calculated the optical density, local absorption coefficient and spectral dependence of graded-gap and barrier photoelectromotive force for graded-gap CdHgTe structures with different composition profile.

Через свою природу варизонні структури не можуть характеризуватися фіксованим коефіцієнтом поглинання. Відповідною інтегральною характеристикою поглинання світла може служити оптична густина  $D$ :

$$D = \int_0^{l_0} \alpha(h\nu, l) dl, \quad (1)$$

де  $\alpha(h\nu, l)$  – локальний коефіцієнт поглинання в точці  $l$  структури.

При цьому передбачається, що цей коефіцієнт в точці  $l$  структури, де склад розчину  $x$ , дорівнює коефіцієнту поглинання однорідного зразка складу  $x$ :  $\alpha(h\nu, E_g)$ .

Для прямозонних твердих розчинів з ростом енергії фотонів  $h\nu$  коефіцієнт поглинання  $\alpha(h\nu)$  зростає спочатку експоненціально згідно з правилом Урбаха [1], а потім за законом

$$\alpha^2 \sim (h\nu - E_g). \quad (2)$$

Тому локальний коефіцієнт поглинання можна записати у вигляді:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 e^{S(h\nu - E_g)} & \text{при } h\nu \leq E_g; \\ x(h\nu - E_g)^{1/2} + \alpha_0 & \text{при } h\nu \geq E_g, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\alpha_0, S, x$  – параметри, які не залежать від  $h\nu$  і  $E_g$ .

Якщо вважати в першому наближенні  $E_g(l) \sim l$ , тобто композиційний профіль структури лінійний, то після підстановки (3) в (1) і інтегрування, отримаємо:

а) в області енергій фотонів  $h\nu \leq E_n$ , де  $E_n = E_g \min$

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g} e^{-S(E_n - h\nu)}, \quad (4)$$

б) при  $E_n \leq h\nu \leq E_0$ , де  $E_0 = E_g \max$ :

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g} \left\{ S(h\nu) - E_n \left[ \frac{2}{3} \frac{x}{\alpha_0} (h\nu - E_n)^{1/2} + 1 \right] + 1 \right\}, \quad (5)$$

тут  $\Delta E_g = E_0 - E_n = E_g \max - E_g \min$ .

При  $h\nu = E_n$  оптична густина шару становить

$$D(h\nu = E_n) = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g}, \text{ що в } S \Delta E_g \text{ разів менше, ніж}$$

у однорідного зразка тієї ж товщини  $l_0$ , що й шар, для якого  $E_0 = E_n$ . У випадку CdHgTe  $S \Delta E_g \approx 10^2$ . Отже, визначення оптичної ширини забороненої зони  $E_n$  по краю поглинання, тобто графіку  $T(h\nu)$ , як це робиться для однорідних зразків, у випадку варизонних структур неправомірно.

Реально структури CdHgTe мають композиційний профіль, близький до експоненціального, так що  $E_g \sim \exp\left(-\beta \frac{l}{l_0}\right)$ . В цьому випадку, знову

з підстановкою (3), інтегрування дає:

а) в області  $h\nu \leq E_n$

$$D \approx \frac{\alpha_0 l_0}{\beta S \Delta E_g} e^{-S(E_n - h\nu)}, \quad (6)$$

б) в області  $E_n \leq h\nu \leq E_0$

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{\beta} \left\{ \left( 1 + \frac{\chi}{\alpha_0} g \right) \ln \frac{g}{\delta} - \frac{x}{\alpha_0} (g - \delta) + (1 + Sg) \ln \left( 1 + \frac{1}{Sg} \right) \right\}, \quad (7)$$

при  $g = h\nu - E_n + \delta$ ,  $\delta = \frac{\Delta E_g}{E^\beta - 1}$ . Оскільки  $\beta > 3$ , то  $\delta \ll 1$ .

На рис.1, 2 показані спектральні залежності коефіцієнта пропускання і оптичної густини варизонних структур. Всі криві добре апроксимуються залежностями (6, 7).

Як зазначалось вище, при певних умовах можуть бути вирощені варизонні структури CdHgTe, у яких поверхневий шар являє собою чистий HgTe. Цей шар може бути досить тонким, що дає можливість вимірювати його оптичні параметри.

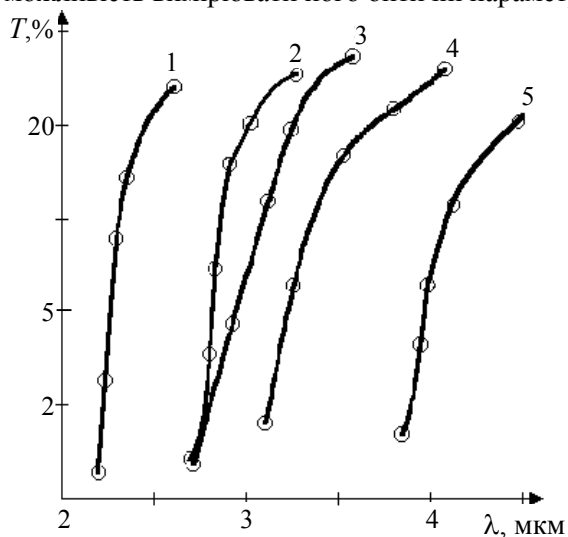


Рис. 1. Спектральні характеристики оптичного пропускання ВЗС CdHgTe.

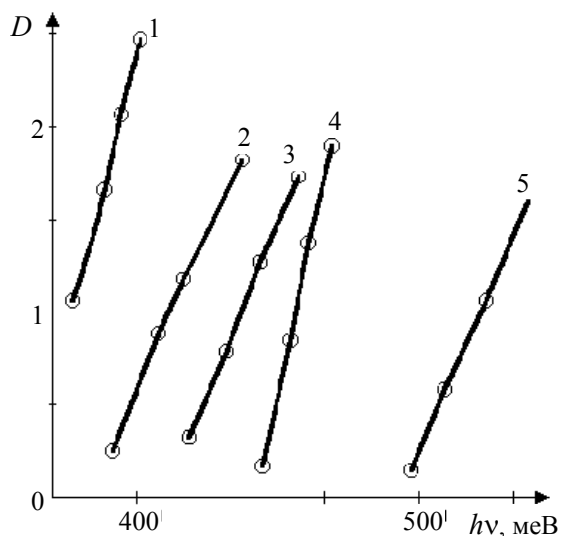


Рис. 2. Спектральні залежності оптичної густини ВЗС CdHgTe.

Тоді з порівняння експериментальної і розрахункової спектральної залежності оптичної густини варизонної структури із задалегідь визначеним композиційним профілем можна в першому наближенні оцінити величину коефіцієнта поглинання напівметалу в різних спектральних діапазонах. В наших дослідях отримані такі дані для α<sub>HgTe</sub>:

$$\begin{aligned} &0,4 \text{ eV} - 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}; \\ &0,3 \text{ eV} - 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}; \\ &0,25 \text{ eV} - 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}, \end{aligned}$$

що добре узгоджується з раніше опублікованими величинами в роботі [2].

Поглинання на вільних носіях мало характер  $D \sim \lambda^r$ , де  $r = 0,85 \div 1,1$  (рис.3). Стехіометричним відпалом у парах ртуті вдалося звести цей вид поглинання до величини, якою можна знехтувати.

Як відомо [1], у варизонних структурах, завдяки вбудованому варизонному полю

$$E_{n,p} = \frac{1}{e} \frac{dE_{c,v}(l)}{dl}, \quad (8)$$

може спостерігатися при їх опроміненні виникнення варизонної (об'ємної) фотоерс. При високому рівні збудження  $\Delta n = \Delta p \gg n, p$  варизонна фотоерс дорівнює [1]:

$$U_B = -\frac{1}{e} \Delta E_g \frac{b}{b+1}, \quad (9)$$

де  $b = U_n / U_p$ . Якщо  $b \gg 1$ , що характерно для твердих розчинів Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te, то ця фотоерс максимальна:

$$U_B = -\frac{1}{e} \Delta E_g. \quad (10)$$

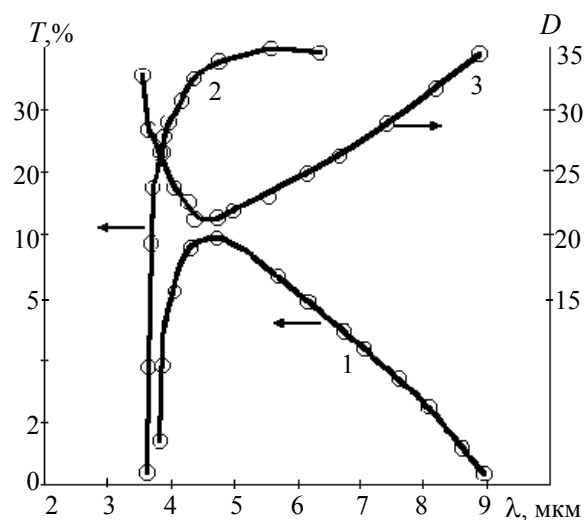


Рис. 3. Спектральні характеристики оптичного пропускання (1) і оптичної густини (3) ВЗС CdHgTe до відпалу і її пропускання після відпалу у парах ртуті (2).

При низькому рівні збудження ( $\Delta n \ll n$ ) і при умові  $\Delta n(l) \approx \text{const}$ :

$$U_B = -\frac{1}{e} \Delta E_g \frac{\Delta \sigma}{\sigma}, \quad (11)$$

де  $\Delta \sigma$  і  $\sigma$  – приріст і величина електропровідності відповідно. У зв'язку з відсутністю бар'єра для основних носіїв величина  $U_B$  при малих рівнях збудження невелика.

На рис. 4 показані спектральні характеристики фотовідповіді трьох структур, які відрізняються товщиною. Структура №1 мала товщину 4 мкм, таким чином виконувалась умова [3]  $L^+ > l_0$ , де дифузійно-дрейфова довжина  $L^+$  визначається формулою [1]:

$$L^+ = \sqrt{L^2 + \frac{1}{4} L_\varepsilon^2 + \frac{1}{2} L_\varepsilon}; \quad L_\varepsilon = L^2 \frac{|\Delta \varepsilon g|}{kT}, \quad (12)$$

$L$  – дифузійна довжина.

ВАХ структури була лінійною, максимум кривої відповідає  $h\nu \approx 1,56$  еВ, що свідчить про варизонне походження фотоерс [1]. Дві інші структури мали товщини 7 мкм і 20 мкм, умова  $L^+ > l_0$  не виконується, що ясно відображається на спектральній залежності фотоерс та її амплітуді. Максимуми зміщуються в область менших енергій фотонів.

На рис.5 показані спектральні характеристики фотоерс поверхнево-бар'єрної структури, в якій бар'єр сформований на широкозонній області шару. Бар'єрна і варизонна фотоерс мали різні знаки, що дозволило виділити сигнали, які належали різним спектральним діапазнам. Якщо

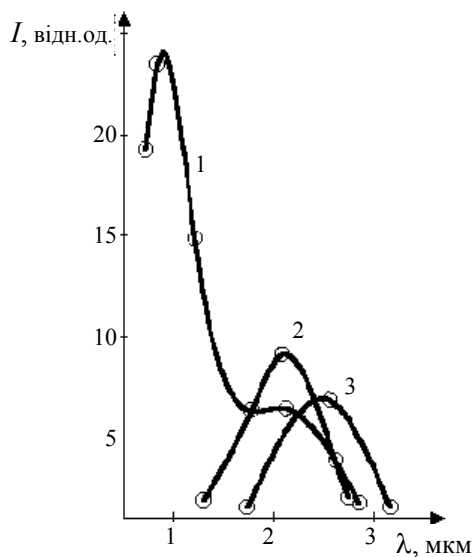


Рис.4. Спектральні характеристики фотоструму ВЗС CdHgTe з товщинами: 4 мкм (1), 7 мкм (2), 20 мкм (3).

бар'єр сформований на вузькозонній поверхні структури, то при умові, що  $l_0 \sim L^+ + w$  ( $w$  – ширина шару об'ємного заряду), можлива реєстрація суми бар'єрної та об'ємної фотоерс (рис.6).

Теорія і практика показують [4-7, 1], що при виконанні умови  $L^+ + w < l_0$  спектральна характеристика фотоерс поверхнево-бар'єрної структури буде вузькозонною (селективною), а у випадку  $L^+ + w > l_0$  – ширококуговою.

На рис.7 показані спектральні характеристики двох структур CdHgTe, легованих In, бар'єр на вузькозонній частині яких сформований з допомогою хімічного осадження золота. Товщини структур склали 5 мкм та 90 мкм.

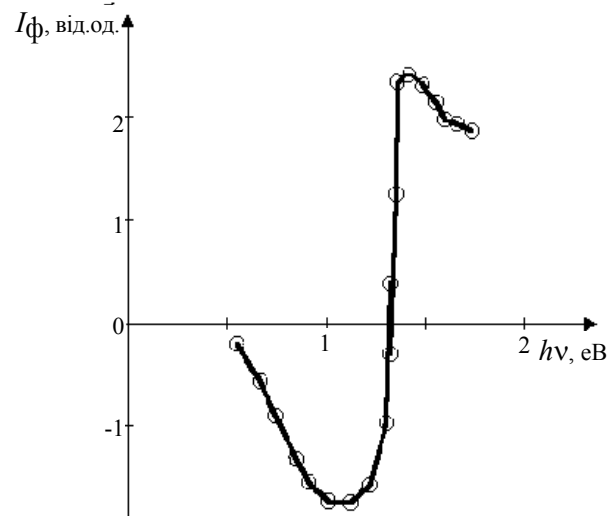


Рис.5. Спектральна залежність фотоерс системи Al-p-VZS CdHgTe (:Sb) з широкозонною поверхнею.

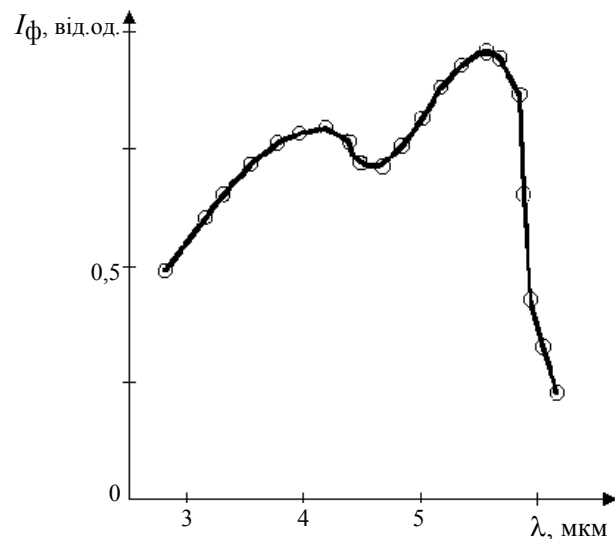


Рис.6. Спектральна характеристика фотоструму ВЗС CdHgTe з випростовуючим контактом на вузькозонній поверхні з  $x=0,27$ . Товщина ВЗС – 9 мкм.

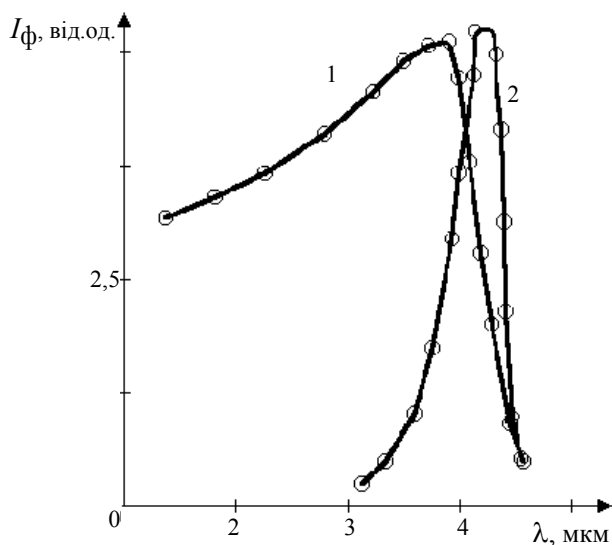


Рис.7. Широкопasmовий (1) і селективний (2) фотоприймачі на основі ВЗС CdHgTe із поверхневим складом 0,33.

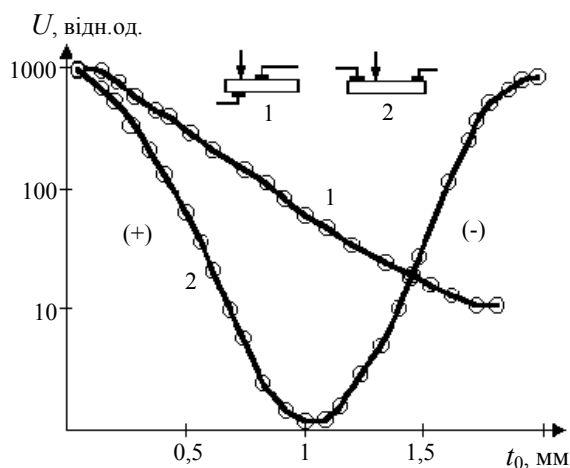


Рис. 8. Залежність фотоерс координатно чутливого фотоприймача на основі ВЗС CdHgTe від зміщення світлової плями для конструкцій з центральним (1) і смуговим (2) контактами.

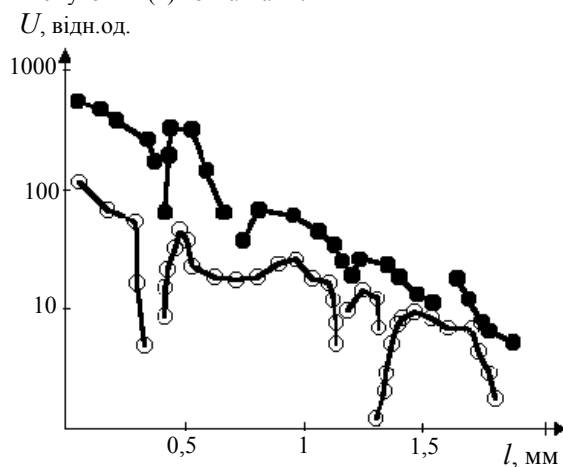


Рис.9. Фотоерс, що збуджується лазерним (темні точки) та електронним променем (світлі точки) на поверхні варизонного координатно-чутливого фотоприймача з дефектами структури.

Шляхом формування одного чи двох випрямляючих контактів на вузькозонній поверхні структури, як показано на рис.8, були отримані координатно-чутливі фотоприймачі. Залежність фотоерс від зміщення променя  $U_{\text{ф}}$  близька до експоненційної (рис.8). Помічено, що чим менш досконалі кристали CdTe, з яких виготовлена підкладка, тим більше особливостей вміщувала функція  $U_{\text{ф}}$ , причому незалежно від способу збудження – сфокусованим променем лазера з  $\lambda = 0,63$  чи електронним променем з енергією електронів 20 кеВ (рис.9).

Отже варизонні структури не можуть характеризуватися визначенням коефіцієнтом поглинання ви-промінювання, тому відповідною інтегральною характеристикою цього поглинання служить оптична густина. Розраховані залежності оптичної густини варизонних структур у загальному вигляді від їх товщини і композиційного профілю. Знайдено співпадання розрахованих і експериментальних залежностей коефіцієнта пропускання, оптичної густини варизонної і бар'єрної фотоерс для CdHgTe–ВЗС.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пека Г.П., Коваленко В.Ф., Смоляр А.Н. Варизонные полупроводники. Киев: Высшая школа, 1989.
2. Средин В.Г., Савицкий В.Г., Дорожко Е.В. и др. Оптические свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов халькогенидов ртути // Материалы V Всесоюзного симпозиума "Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы", 1980. - Львов, 1980. - Ч.1. - С.56-58.
3. Царенков Г.В. Фотоэффект в варизонной p-n-структуре // ФТП. - 1975. - 9, №2. - С.253-262.
4. Аннаева А.Р., Берклиев А.Н., Гольдберг Ю.А. Полосовые варизонные поверхностно-барьерные фотоприемники // ФТП. - 1980. - 14, №2. - С.356-359.
5. Тальянский Э.Б., Кушнір Я.И., Слоневский А.Ф., Раренко И.М. Электрофизические свойства тонких варизонных структур Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te // УФЖ. - 1978. - 23, №5. - С.833-837.
6. Бессонов В.Н., Данилова Т.Н., Именков А.Н. и др. Варизонные селективные элементы на основе Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As: <Ge,Te> - p-n- структур // ФТП. - 1975. - 14, №8. - С.1648-1650.
7. Царенков Б.Ф., Данилова Т.П., Именков А.Н., Яковлев Ю.П. Селективные фотоэлементы из варизонных Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As:Si p-n структур // ФТП. - 1981. - 17, №6. - С.1118-1119.