

УДК 681.7.015.2;621.315.592;539.234

ISSN 1729-4428

М.Л. Ковальчук¹, З.І. Захарук¹, Г.І. Раренко¹, Є.В. Рибак¹,
Є.М Косенков¹, Е.Б. Тальянський²

Перенастроювані оптичні фільтри і спектрометричні елементи на основі варизонних структур CdHgTe, CdMnHgTe

¹Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2,
м. Чернівці, 58012, Україна, E-mail: microel@chnu.cv.ua
²Stardust Technology, Inc. R&D Dept., 4278 Arthur Kill Rd., Staten Island, NY, USA

В даній роботі приведені розрахунки і експериментальні спектральні залежності оптичної густини вирощених варизонних структур (ВЗС) Cd_xHg_{1-x}Te та Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te від їх композиційного складу і його розподілу по товщині. Представлені розрахунки і конструкція перенастроюваних оптичних фільтрів і спектрометричних елементів на основі цих ВЗС для ІЧ-області спектру λ=1÷6 мкм.

Ключові слова: варизонні структури, оптична густина, спектрометричні елементи.

Стаття постуила до редакції 07.11.2005; прийнята до друку 15.11.2005.

Вступ

В ІЧ-фотоелектроніці та оптиці широко застосовуються кристали та плівки напівпровідникових твердих розчинів Cd_xHg_{1-x}Te та Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te з фіксованими значеннями x та y [1]. Використовуються також їх епітаксійні плівкові варизонні структури (ВЗС). В них хімічний склад і фізичні властивості змінюються в напрямку перпендикулярному до їх поверхні (координата Z). На ВЗС створюються широкополосні фотоприймачі, оптичні фільтри, сонячні елементи [2, 3]. Фізичні властивості, зокрема, ширина забороненої зони E_g в ВЗС залежить від розподілу компонентів по їх товщині. В нашій роботі досліджено оптичні властивості і варіанти приладних структур ВЗС компонентного складу Cd_xHg_{1-x}Te та Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te. ВЗС формувались на монокристалічних підкладках відповідно CdTe і CdMnTe при використанні в якості джерела випаровування кристалів HgTe. Найчастіше ВЗС вирощуються методом “випаровування-конденсація-дифузія” (ВКД), де під час їх росту джерело і підкладка знаходяться у вакуумованій ампулі при однаковій температурі [4]. В нашому випадку – HgTe випаровується і конденсується на підкладках CdTe чи CdMnTe. Після цього проходить дифузія ртуті з конденсату в підкладку, одночасно Cd чи Cd і Mn – з підкладки в конденсат. При ізотермічному ВКД композиційний профіль і відповідно E_g змінюються експоненційно з товщиною ВЗС. Для керування цим профілем ми

здійснювали вирощування при різних температурах підкладки і джерела, під керованим тиском парів ртуті, з використанням ВЗС різного складу в якості джерел випаровування [5].

I. Розрахунки та дослідження оптичних параметрів ВЗС

В силу природи ВЗС не можуть характеризуватись визначеним 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 α(hν, l) – локальний коефіцієнт поглинання в точці l=Z структури. При цьому вважається, що цей коефіцієнт в точці l, де склад розчину x, рівний коефіцієнту поглинання однорідного зразка того ж складу x при тих же енергіях фотонів.

Розглянемо оптичну густину ВЗС у найбільш простому випадку лінійної зміни ширини забороненої зони E_g(l) ~ l.

Такі структури вирощуються при керуванні тиском парів Hg в методі ВКД [5]. Для прямозонних напівпровідникових твердих розчинів з ростом енергії фотонів hν коефіцієнт поглинання α(hν) зростає спочатку експоненційно в відповідності з правилом Урбаха, а тоді по закону

$$\alpha^2 \sim (hv - E_g) \quad (2)$$

Тому, локальний коефіцієнт поглинання можна записати у вигляді:

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

де S- параметр Урбаха, який характеризує нахил лінійної ділянки залежності $\ln D$ від енергії фотонів hv і може служити показником структурної досконалості ВЗС. α_0 , і χ – параметри, які не залежать від hv і E_g .

Якщо прийняти в першому наближенні, що композиційний профіль структури є лінійний $E_g(l) \sim l$, то після підстановки (3) в (1) та інтегрування одержимо:

в області енергій фотонів $hv \leq E_{g,\min}$ при $\Delta E_g = \text{const}$:

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g} e^{S(hv - E_{g,\min})}, \quad (4)$$

в області $E_{g,\min} \leq hv \leq E_{g,\max}$:

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g} \times \left\{ S(hv - E_{g,\min}) \left[\frac{2}{3} \frac{\chi}{\alpha_0} (hv - E_{g,\min})^{1/2} + 1 \right] + 1 \right\} \quad (5)$$

Тут $\Delta E_g = E_{g,\max} - E_{g,\min}$. Вважається, що χ, α_0 і S не залежать від складів x та y.

При $hv = E_{g,\min}$, оптична густина шару $D(hv - E_g) = \frac{\alpha_0 l_0}{S \Delta E_g}$, що в $(S \Delta E_g)$ разів менше,

ніж у однорідного зразка тієї ж товщини l_0 , в якому $E_g = E_{g,\min}$. У випадку $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0,2$), $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ ($x + y = 0,35$) величина $S \Delta E_g \approx 10^2$ [6]. Отже, визначення оптичної ширини забороненої зони $E_{g,\min}$ по краю поглинання, тобто по графіку $T(hv)$, як це робиться для однорідних зразків, у випадку варизонних структур неправомірно.

При певних технологічних умовах розподіл компонентів в ВЗС може бути лінійним [5]. Але частіше ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$ та $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ вирощувані методом ВКД в ізотермічних умовах мають композиційний профіль близький до експоненційного. Тому профіль (3) і формулу (5) слід вважати наближеними.

Розглянемо оптичне поглинання ВЗС, де залежність $E_g(l)$ близька до експоненційної

$$E_g \sim \exp\left(-\beta \frac{l}{l_0}\right). \quad \text{Замінімо для спрощення}$$

розрахунку $\alpha \sim (hv - E_g)^{1/2}$ на $\alpha = \chi(hv - E_g) + \alpha_0$. В цьому випадку після підстановки (3) в (1) та інтегрування одержимо:

в області $hv \leq E_{g,\min}$:

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{\beta S \Delta E_g} e^{S(hv - E_{g,\min})}, \quad (6)$$

в області $E_{g,\min} \leq hv \leq E_{g,\max}$:

$$D = \frac{\alpha_0 l_0}{\beta} \left[\left(1 + \frac{\chi}{\alpha_0} q \right) \ln \frac{q}{\delta} - \frac{\chi}{\alpha_0} (q - \delta) + (1 + Sq) \ln \left(1 + \frac{1}{Sq} \right) \right], \quad (7)$$

де $q = hv - E_{g,\min} + \delta$, $\delta = \Delta E_{g,\max} - \Delta E_{g,\min} / (e^\beta - 1)$.
Поскілки звичайно $\beta > 3$, то $\delta \approx \Delta E_g \cdot e^{-\beta}$ – мала величина.

Для визначення величини оптичної густини ВЗС проводили вимірювання спектральної залежності коефіцієнтів пропускання $T(\lambda)$ ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$ і $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ на інфрачервоному спектрометрі. Роздільна здатність приладу на довжині хвилі $\Delta\lambda/\lambda$ – не гірша 0,5 %, точність вимірювання пропускання була $\Delta T \approx 0,02$. За допомогою експериментально одержаних величин T, α та l була обчислена оптична густина ВЗС, вирощених в різних технологічних умовах (таблиця 1, рис. 1). Зміщення кривих $D(hv)$ в область більших значень hv відбувається за рахунок змін товщини ВЗС і композиційного профілю (рис. 1, криві 1-5). Для зразків, які мають близький склад на поверхні і близькі значення товщини ВЗС, але відрізняються композиційним профілем ми одержуємо різні значення оптичної густини D (рис. 1, криві 3, 4).

Таблиця 1

Умови вирощування, товщина l та склад x поверхні ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$.

№	Склад поверхні, x	Товщина ВЗС, l_0 (мкм)	Метод вирощування
1	0,35	10	Ізотермічний ВКД (джерело – ВЗС з іншим значенням x(l))
2	0,32	22	ВКД (температура підкладки більша ніж температура плівки)
3	0,30	25	ВКД в присутності парів Cl
4	0,29	32	Ізотермічне ВКД
5	0,28	65	ВКД при керуванні тиском ртуті

В деяких випадках в ВЗС $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ р-типу провідності спостерігалось погіршення пропускання випромінювання. Особливо це проявлялось на вирощуваних ВЗС при високих температурах $T \geq 590^\circ C$. Такі умови підвищують ймовірність утворення вакансій ртуті (акцепторів), які викликають додаткове поглинання. Збільшення оптичної густини невідпалених ВЗС такого типу в області прозорості при $300^\circ C$ описується законом $D = f(\lambda^r)$, що характерно для поглинання вільними носіями заряду (рис. 2, крива 3). В ВЗС $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Mn_yTe$ (рис. 2, крива 1), пропускання випромінювання мало характер $T \sim \lambda^r$, де $r = 0,85 \div 1,1$.

Стехіометричним відпалом в рівноважних парах ртуті при 200°C ($\tau = 100$ год) вдавалось значно понизити цей вид поглинання (рис. 2, крива 2).

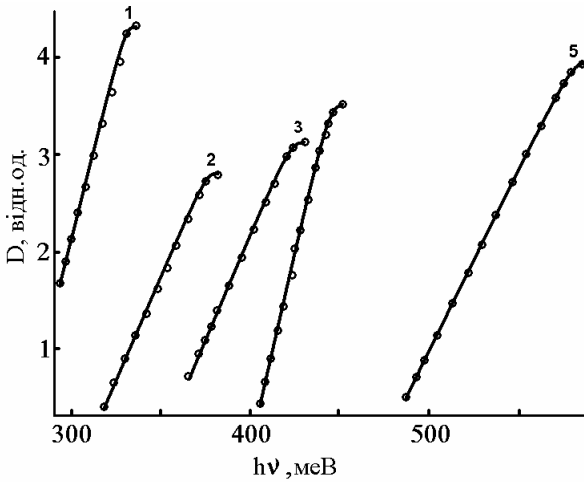


Рис. 1. Спектральні залежності оптичної густини ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$. Нумерація кривих відповідає номерам ВЗС в Таблиці 1.

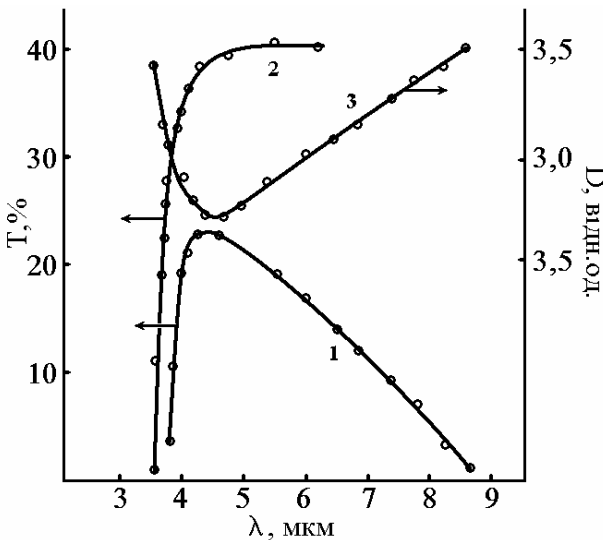


Рис. 2. Спектральна характеристика ВЗС $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ (склад поверхні: $x=0,25, y=0,10$): 1,2 – пропускання випромінювання до і після відпалу; 3 – оптична густина до відпалу.

II. Перенастроювані оптичні фільтри і спектрометричні елементи на основі ВЗС

Варизонність вирощених нами шарів використана при конструюванні різноманітних оптичних приладів. В якості таких пропонуються перенастроювані оптичні фільтри і спектрометричні елементи, виготовлені на базі ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te, Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$.

Під кутом 0,5 градуса до поверхні ВЗС, по всій її товщині (координата Z) робився косий зріз (шліф) довжиною 10 ÷ 15 мм вздовж координати Y. На його поверхню проступав послідовно весь композиційний

профіль структури. Оскільки спектральне положення "краю поглинання" визначається в першу чергу мінімальною шириною забороненої зони по ходу променя, то така структура представляє собою плавно-перенастроюваний відрізаючий оптичний фільтр. Перенастройка фільтра виконується шляхом поступального переміщення променя-зонда, перпендикулярного поверхні фільтра, в напрямі Y, що співпадає зі зміною ширини забороненої зони на поверхні структури. На рис. 3 показана залежність положення краю поглинання такого фільтра від його зміщення відносно променевого пучка. Розрізнення в шкалі довжин хвиль зондуючого променя покращується з довжиною хвилі. Цей ефект пов'язаний з видом композиційного профілю варизонного шару.

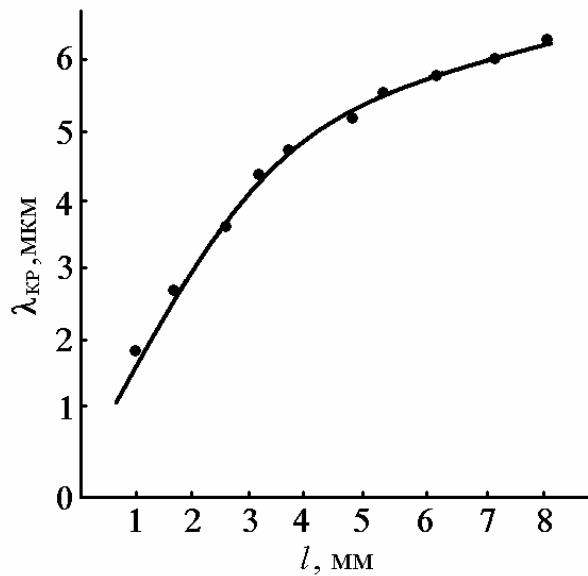


Рис. 3. Положення краю поглинання перенастроюваного фільтра в залежності від його зміщення відносно променевого пучка на ВЗС $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$.

В області глибокого однофотонного поглинання згідно правила Урбаха коефіцієнт поглинання для $h\nu \leq \Delta E_g$ має вигляд (3). У випадку спектрометричного елемента, коли опромінення здійснюється послідовно у певних точках косою шліфа ВЗС, при умові $dE_g/dz = \text{const}$, де $\nabla_z E_{g,y} = (E_{g,y,\text{max}} - E_{g,y,\text{min}})/l_0$, де $E_{g,y,\text{min}} = E_g(Z = l_0)$, а $E_{g,y,\text{max}} = E_g(Z = 0)$. Оптична густина (4) набуде вигляду

$$D \approx \frac{\alpha_0}{S \nabla_z E_g} e^{S(h\nu - E_\phi(y))}, \quad (8)$$

де $E_\phi(y)$ – ширина забороненої зони на поверхні шару в точці падіння променя.

Локальний коефіцієнт пропускання фільтра тоді можна записати наступним чином:

$$T(h\nu) = (1 - R) \exp \left\{ - \frac{\alpha_0}{S \nabla_z E_g} e^{S(h\nu - E_\phi)} \right\} \text{ при } h\nu \leq E_\phi, \quad (9)$$

де R - коефіцієнт відбивання поверхні ВЗС.

В поліхроматичному випромінюванні потік, що пройшов через фільтр, буде пропорційний $T(h\nu)$. Крутизна краю поглинання буде високою в тому випадку, якщо $\nabla_z E_g \leq 0,3\alpha_0/S$, тобто шар повинен бути порівняно товстим.

Розглянемо тепер спектрометричний елемент на базі ВЗС. На поверхні шару при наявності градієнтів $\nabla_z E_g$ і $\nabla_y E_g$, як це було описано по відношенню до варизонного перенастроюваного фільтра, формується контактний бар'єр метал-напівпровідник. Світловий потік, що досягає області об'ємного заряду, генерує фотострум, густина якого, без врахування рекомбінації в шарі об'ємного заряду, має вигляд :

$$I(h\nu) = e \left[q_p + \int_w G(z, h\nu) dz \right], \quad (10)$$

$$I(h\nu) = \begin{cases} A\Phi_0 \exp[S(h\nu - E_{g,\min})] & \text{при } h\nu \leq E_\phi \\ A\Phi_0 \exp \left[-\frac{h\nu - E_{g,\min}}{L_p^+ \nabla_z E_g} - \frac{\alpha_0}{S \nabla_z E_g} e^{S(h\nu - E_\phi)} \right] & \text{при } E_{g,\min} \leq h\nu \leq E_\phi \end{cases}, \quad (11)$$

де $A = \text{const}(h\nu)$, Φ_0 - падаючий поліхроматичний потік, $E_{g,\min}$ - мінімальне значення E_g на початковій поверхні ВЗС. Якщо виконати конструкцію елемента таким чином (що технічно можливо) щоб мінімальна різниця $[E_\phi(y) - E_{g,\min}(y)]$ забезпечувала максимум спектральної характеристики близький до $I_{\max} = A\Phi_0$, то реалізується селективна фоточутливість такої структури. Переміщуючи елемент відносно нормально падаючого променя, можна досліджувати його спектр. Вимоги до фоточутливого варизонного шару в конструкції елемента, що містить варизонний

де q_p - потік нерівноважних дірок, W - ширина об'ємного заряду, G - функція генерації.

Спектральна характеристика такого елемента визначається точкою падіння променя і мінімальною шириною забороненої зони $E_{g,\min}$ в цій точці.

Метод ізотермічного росту [4, 5] дозволяє створювати одночасно з обох сторін підкладки ідентичні варизонні структури. Це дає можливість сумістити на одному кристалі два прилади - перенастроюваний оптичний фільтр і спектрометричний елемент.

При умові, що дифузійна довжина носіїв заряду $L^+ \ll Y_0$, спектральна характеристика такого елемента має вигляд:

фільтр, суттєво нижчі, ніж в звичайних конструкціях, де необхідною умовою є наявність товстого варизонного шару: $L^+ \ll l_0$.

Розглянемо елемент з варизонним фільтром, в якому ця умова не виконується, і, більш того, $L^+ \gg l_0$. Якщо для простоти прийняти, що при $h\nu \geq E_g$, $\alpha = \alpha_0 + b(h\nu - E_g)$, де α_0, b - постійні величини, то спектральна характеристика фотоподповіді може бути представлена у вигляді:

$$I(h\nu) = \begin{cases} A\Phi_0 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\alpha_0}{\nabla_z E_g} (h\nu - E_{g,\min}) \right] \right\} & \text{при } E_{g,\min} \leq h\nu \leq E_\phi \\ A\Phi_0 \exp \left\{ -\frac{\alpha_0}{\nabla_z E_g} \left(h\nu - E_\phi + \frac{b}{2\alpha_0} (h\nu - E_\phi)^2 \right) \right\} & \text{при } h\nu \geq E_\phi \end{cases}. \quad (12)$$

Відомо [2, 6], що при виконанні умови $L^+ + W < l_0$ спектральна характеристика фото-ЕРС поверхнево-бар'єрної структури буде селективною, а у випадку $L^+ + W > l_0$ - широкосмуговою.

Максимум спектральної характеристики $I_{\max} \approx A\Phi_0$ може бути забезпечений при дотриманні селективності, що відповідає умові:

$$\Delta Z \approx 3 \frac{\nabla_z E_g}{\nabla_y E_g} \frac{1}{\alpha_0} \quad (13)$$

Таким чином, в спектрометричних елементах на базі тонких варизонних структур реалізується

селективна фоточутливість з максимумом поблизу енергій фотонів $(h\nu)_{\max} \approx E_\phi$. З просуванням променя до вузькозональної частини елемента фото-ЕРС помітно знижується внаслідок зменшення висоти бар'єру, тоді як напівширина селективної спектральної характеристики зростає в зв'язку з зменшенням коефіцієнта поглинання і збільшенням дифузійно-дрейфової довжини.

Конструкція спектрометричного елемента на основі двохсторонньої ВЗС $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ на підкладці $CdMnTe$ подана на рис. 4.

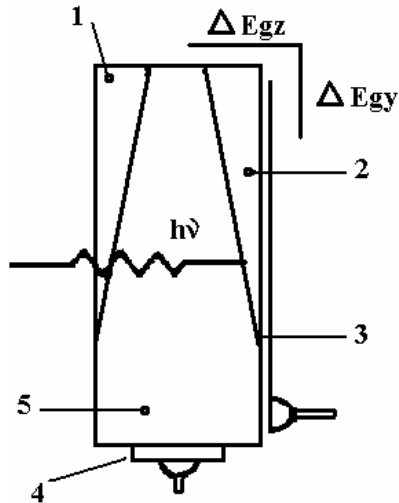


Рис. 4. Конструкція спектрометричного елемента на основі двох ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$ вирощених на одній підкладці.

1 – фільтруюча ВЗС, 2 – фотоприймальна ВЗС, 3 – випрямляючий контакт, 4 – омичний контакт, 5 – підкладка з телуриду кадмію.

На рис. 5 показані залежності в реальних спектрометричних елементах на базі шарів ВЗС $Cd_xHg_{1-x}Te$ положення максимума фотовідповіді та її відносної величини від координати променевого зонда на поверхні цього фотоелемента.

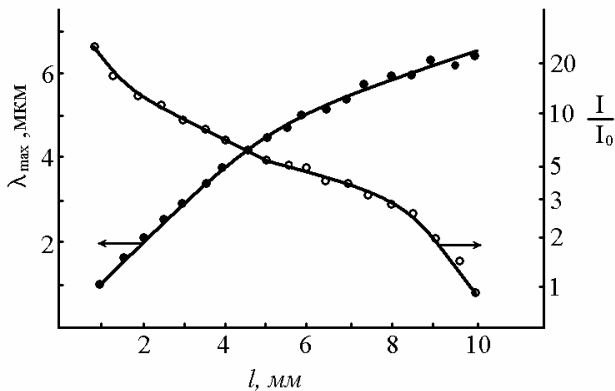


Рис. 5. Розташування спектрального максимума фотовідповіді і її відносна величина в залежності від зміщення світлового зонда по поверхні спектрометричного елемента.

Висновки

Вирощені епітаксінні варизонні структури (ВЗС) $Cd_xHg_{1-x}Te$, $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ на підкладках з монокристалів $CdTe$ і $CdMnTe$ видозміненим методом «випаровування-конденсація-дифузія» (ВКД). В якості джерела для випаровування використано кристали $HgTe$. Показано, що можна спрямовано керувати розподілом компонентів по товщині ВЗС при незалежній зміні температури джерела і підкладки, при керуванні тиском парів ртуті. В силу змінного складу варизонні структури не можуть характеризуватись одним визначеним оптичним коефіцієнтом поглинання. Тому для характеристики проходження випромінювання через такі структури, доцільно застосовувати оптичну густину. Остання була порахована в загальному вигляді для різних композиційних профілів в структурах і заміряна для $Cd_xHg_{1-x}Te$, $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ ВЗС. Обраховані і створені на їх основі перенастроювані довгохвильові ІЧ-фільтри та спектрометричні елементи на діапазон $\lambda = 1\div 6$ мкм.

Захарук З.І. – старший науковий співробітник;

Ковальчук М.Л. – аспірант;

Косенков Є.М. – старший науковий співробітник;

Раренко Г.І. – канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник;

Рибак Є.В. – науковий співробітник;

Тальянський Е.Б. – науковий співробітник.

- [1] A. Rogalski. Infrared detectors: Overseas Publishes Association (2000).
- [2] А.Р. Ананьєва, А.В. Беркелиєв, Ю.А. Гольдберг, Б.В. Царєнков. Полосовые варизонные поверхностно-барьерные фотоприемники // *ФТП*, **14**(2), сс. 356-359 (1980).
- [3] O.A. Bodnaruk, A.V. Marcov, S.E. Ostapov, A.I. Rarenko, V.M. Godovanyuk. Shottky diode on base of the solid solution $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ // *SPIE*, **3890**, pp. 111-116 (1999).
- [4] F. Bailly, G. Cohen-Solal, I. Marfaing. Preparation et control de structures a largeur de bande interdite variable // *CR Acad. Sc. Paris*, **257**, pp. 103-108 (1963).
- [5] V.S. Antonov, O.N. Janikay, A.I. Rarenko, S.L. Koroluk, E.D. Talyanskiy, Z.I. Zakharuk. Dependence of compositional profile and structural perfection of $Cd_xHg_{1-x}Te$ films // *SPIE*, **3890**, pp. 523-527 (1999).
- [6] Э.Б. Тальянский, Я.И. Кушнир, А.Ф. Слонцкий, И.М. Раренко. Электрофизические свойства тонких варизонных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ // *УФЖ*, **23**(5), сс. 833-837 (1978).

M.L. Koval'chuk¹, Z.I. Zakharuk¹, A.I. Rarenko¹, Ye.V. Rybak¹,
Ye.M. Kosenkov¹, E.B. Tal'yanski²

Tunable optical filters and spectrometric elements based on CdHgTe and CdMnHgTe graded band-gap structures

¹*Yuriy Fedkovich' Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynskiy Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine,
E-mail: microel@chnu.cv.ua*

²*Stardust Technology, Inc. R&D Dept., 4278 Arthur Kill Rd., Staten Island, NY, USA*

The present paper deals with calculations and experimental dependencies of $Cd_{1-x}Hg_xTe$ and $Cd_{1-x-y}Mn_yHg_xTe$ grown graded band-gap structures (GBS) on their chemical composition and its distribution along thickness. Calculations and construction of tunable optical filters and spectrometric elements based on these GBS for $\lambda=1\div 6\ \mu m$ IR-region are represented.