

**П.О. Генцарь, Ю.П. Кияк, М.А. Міняйло, Л.А. Демчина,  
М.В. Вуйчик, О.М. Стрільчук, М.С. Заяць, Л.І. Тріщук,  
О.І. Власенко**

## **ОПТИЧНА СПЕКТРОСКОПІЯ МОНОКРИСТАЛІВ n-CdTe, ЛЕГОВАНИХ Ge В ОБЛАСТІ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ E<sub>0</sub>**

В даній роботі проведено оптичні (спектри відбивання, спектри пропускання) дослідження монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$  в спектральному діапазоні 800 нм - 1100 нм та вимірювання спектрів фотолюмінесценції монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  при температурі 77 К, при збудженні лазерним (електромагнітним) випромінюванням із довжиною електромагнітної хвилі 660 нм в енергетичному діапазоні 1,3 еВ - 1,65 еВ. Отримано наступні результати: визначено, що енергія фундаментального оптичного переходу  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм при  $T = 300 \text{ К}$ , дорівнює 1,459 еВ; визначено, що фундаментальний оптичний перехід  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм при  $T = 77 \text{ К}$ , дорівнює 1,580 еВ; визначено температурний коефіцієнт зміни ширини забороненої зони  $dE_0 / dT$  монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$ , який дорівнює  $-5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ ; встановлено співвідношення між енергією фундаментального оптичного переходу  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм, та температурою  $T$  в температурному діапазоні  $77 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$ :  $E_0(\text{CdTe:Ge}) = 1,580 \text{ eV} - 5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} (T - 77 \text{ К})$ ; побудовано оптичні спектри поглинання досліджуваних матеріалів ( $\ln(I_0/I) = f(\lambda)$ ); оцінено час енергетичної релаксації  $\tau$  і ефективну оптичну рухливість  $\mu_{opt}$  вільних носіїв заряду для монокристалів n-CdTe, легованих германієм; показано, що досліджувані кристали мають високу (детекторну) якість, що є визначальним для виготовлення високочутливих та високороздільних сенсорів іонізуючого випромінювання; практична цінність отриманих результатів полягає у визначенні електронних та фізичних параметрів технічно важливого напівпровідника CdTe, легованого германієм.

Ключові слова: відбивання, пропускання, поглинання, фотолюмінесценція, монокристали n-CdTe, легування, германій.

### **1. ВСТУП**

Останнім часом все більша увага приділяється технології вирощування монокристалів CdTe. Розвиток технології базується на контролі процесів синтезу, визначенні дефектної структури та її впливу на фізичні властивості матеріалу [1]. Умови отримання матеріалу визначають склад і розподіл точкових дефектів, які суттєвим чином впливають на електронні процеси в матеріалі. CdTe використовується для виготовлення неохолоджуваних детекторів гамма - випромінювання. Особливо перспективним у цьому відношенні виявився CdTe, легований хлором [2]. Однією із основних проблем при використанні напівпровідникових сполук типу  $A_2B_6$ , як базового матеріалу оптоелектроніки, є отримання однорідного за об'ємом матеріалу.

Для покращення технологічних процесів отримання халькогенідних напівпровідникових матеріалів потрібно провести ряд електричних та оптичних досліджень, для того щоб оцінити вплив відхилення від стехіометрії та легуючих домішок на параметри матеріалу. В результаті досліджень можна оцінити, а в подальшому і контролювати дані параметри (покращення параметрів) в ході технологічного процесу [3]. В останній час інтенсивно досліджуються кристали CdTe [4-6]. Одним із способів стабілізації фізичних

© П.О. Генцарь, Ю.П. Кияк, М.А. Міняйло, Л.А. Демчина, М.В. Вуйчик, О.М. Стрільчук, М.С. Заяць, Л.І. Тріщук, О.І. Власенко, 2025

параметрів функціональних матеріалів електронної техніки є легування різними домішками хімічних елементів. Легування атомами германію монокристалів телуриду кадмію призводить до стабільності та відтворюваності електрофізичних властивостей електронних приладів на основі телуриду кадмію. В зв'язку з вищесказаним, дослідження впливу легування на фізичні властивості напівпровідників є актуальним.

Для отримання інформації про структурні, електронні та оптичні властивості монокристалів CdTe широко і успішно використовують оптичну спектроскопію та фотолюмінесценцію.

В даній роботі для отримання фізичних характеристик монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , проведено дослідження оптичних спектрів відбивання в спектральному діапазоні 800 нм-1100 нм, оптичних спектрів пропускання в області фундаментального оптичного переходу  $E_0$  досліджуваного матеріалу, спектрів фотолюмінесценції при температурі 77 К в енергетичному діапазоні 1,3 еВ-1,65 еВ.

## 2.МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Полікристалічні зразки CdTe синтезували в евакуйованих до  $10^{-3}$  мм рт.ст. кварцевих ампулах. Чистота вихідних елементів для синтезу CdTe складала 6N.

Вирощування монокристалів CdTe:Ge проводили у вакуумованих кварцевих ампулах направленою кристалізацією власних розплавів в градієнті температур (метод Бріджмена). Діаметр ампули становив 35 мм, а довжина вирощеного злитка дорівнювала 70 мм - 80 мм. Легуюча добавка Ge додавалась у шихту CdTe у вигляді GeTe, що забезпечувало більш однорідний аксіальний і радіальний розподіл добавки. В проведених експериментах температурні градієнти в зоні кристалізації розплавів змінювались в межах 15 град/см - 50 град/см, швидкість переміщення ампули складала 1,5 мм/год - 8 мм/год. Було вирощено монокристали з концентрацією Ge  $(2 \div 10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Особлива увага приділялась охолодженню кристалів, зокрема, в діапазоні температур 1000°C - 800°C швидкість охолодження складала 5 град/год  $\div$  10 град/год, а в діапазоні температур 800 С - 400°C охолодження проводилось із швидкістю 50 град/год  $\div$  80 град/год. Вирощені монокристали мали питомий опір  $\rho = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см} \div 5 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Спостерігалась зміна питомого опору по довжині кристалів. Вирощені кристали CdTe, леговані германієм, розрізали на пластини товщиною 3 мм, після чого з двох сторін пластини зішліфовувались на 250 мікрон для того, щоб зняти порушений шар. Після проведення технологічних процесів пластини піддавались хіміко-механічному і хіміко-динамічному поліруванню.

Оптичні спектри відбивання в спектральному діапазоні 800 нм - 1100 нм та оптичні спектри пропускання в області фундаментального оптичного переходу  $E_0$  монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , вимірювались за допомогою дифракційного ґраткового монохроматора МДР-23 із роздільною здатністю  $2 \cdot 10^{-4}$  еВ. Дослідження проводились при кімнатній температурі.

Для збудження низькотемпературної фотолюмінесценції використано напівпровідниковий лазер (довжина електромагнітної хвилі – 660 нм, інтегральна потужність –100 мВт). Фотолюмінесценція реєструвалась при температурі 77 К за допомогою охолоджуваного азотом сурм'яно-цезієвого фотопомножувача ФЭУ-62 та дифракційного ґраткового монохроматора МДР-23.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис.1 показано оптичні спектри відбивання монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge}=(2-10) \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см}$  -  $5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$  в спектральному діапазоні 800 нм - 1100 нм. Кількісною характеристикою оптичного явища відбивання електромагнітних хвиль є енергетичний коефіцієнт відбивання  $R(\lambda)$ . Коефіцієнт відбивання  $R(\lambda)$  при нормальному падінні, або оптичне відбивання  $R(\lambda)$  напівнескінченного ізотропного середовища (напівпровідника, твердого тіла) визначається наступним співвідношенням:

$$R = \frac{(n - n_0)^2 + \chi^2}{(n + n_0)^2 + \chi^2}, \quad (1)$$

де  $n_0$ ,  $n$  – показник заломлення зовнішнього середовища та напівпровідника відповідно,  $\chi$  – коефіцієнт екстинкції напівпровідника. Оскільки оптична глибина проникнення електромагнітної хвилі в зразок  $d_{opt}$  дорівнює  $\alpha^{-1}$  (де  $\alpha$  – показник поглинання досліджуваного матеріалу), а для напівпровідників в типових випадках  $\alpha$  вище краю поглинання має порядок  $10^4 \text{ см}^{-1} \div 10^6 \text{ см}^{-1}$ , тому при таких великих коефіцієнтах поглинання  $\alpha$  електромагнітна хвиля буде зондувати тільки дуже тонкий шар біля поверхні зразка (1 мкм або менше).

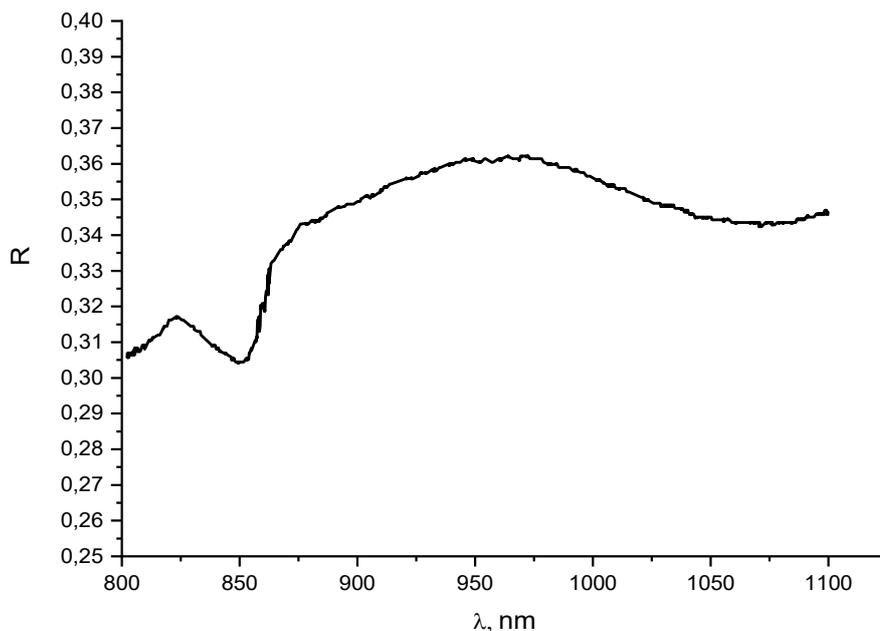


Рис.1. Спектр оптичного відбивання R монокристалів n-CdTe, легованих германієм.

На рис.2 показано оптичні спектри пропускання монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge}=(2-10) \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см}$  -  $5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$  в області фундаментального оптичного переходу  $E_0$ . Оптичне пропускання функціональних матеріалів електронної техніки для довжини електромагнітної хвилі  $\lambda$  виражається через коефіцієнт відбивання  $R(\lambda)$ , показник поглинання  $\alpha(\lambda)$  та товщину зразка  $d$  за допомогою співвідношення:

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

Пік показника заломлення  $n(\lambda)$  напівпровідникового матеріалу відповідає фундаментальному краю поглинання  $D=D(\lambda)$ . В той же час спад показника заломлення  $n(\lambda)$  відповідає піку поглинання  $D=D(\lambda)$  [7]. Із кількісного аналізу спектрів оптичного пропускання  $T(\lambda)$  визначено, що енергія фундаментального оптичного переходу  $E_0$  монокристалів n-CdTe, легованих германієм, дорівнює 1,459 еВ.

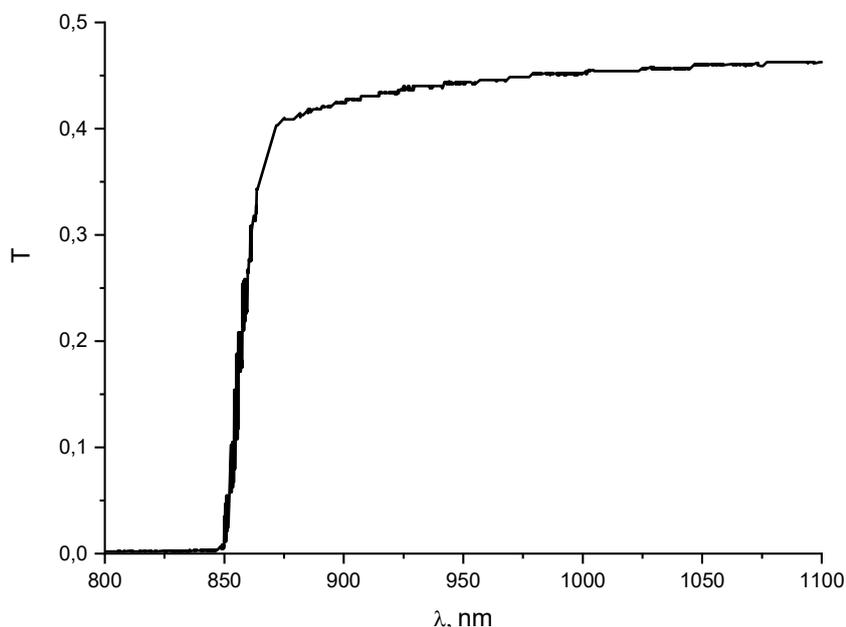


Рис.2. Спектр оптичного пропускання в області фундаментального оптичного переходу  $E_0$  монокристалів n-CdTe, легованих германієм.

На рис.3 показано спектри оптичного поглинання монокристалів n-CdTe, легованих германієм, без врахування оптичного відбивання  $R(\lambda)$ . Із співвідношення (2) можна отримати коефіцієнт поглинання  $\alpha(\lambda)$ :

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{2TR^2}{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2}}. \quad (3)$$

Коефіцієнт пропускання  $\alpha$  функціональних матеріалів електронної техніки пов'язаний із коефіцієнтом екстинкції  $\chi$  співвідношенням:

$$\alpha = \frac{4\pi\chi}{\lambda}. \quad (4)$$

Інтенсивність оптичного випромінювання при проходженні через суцільне середовище зменшується. Основним законом, що описує поглинання світлових (електромагнітних) хвиль, є закон Бугера (Ламберта-Бера):

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot d), \quad (5)$$

де  $\alpha$  – показник поглинання,  $d$  – товщина шару поглинаючого середовища.

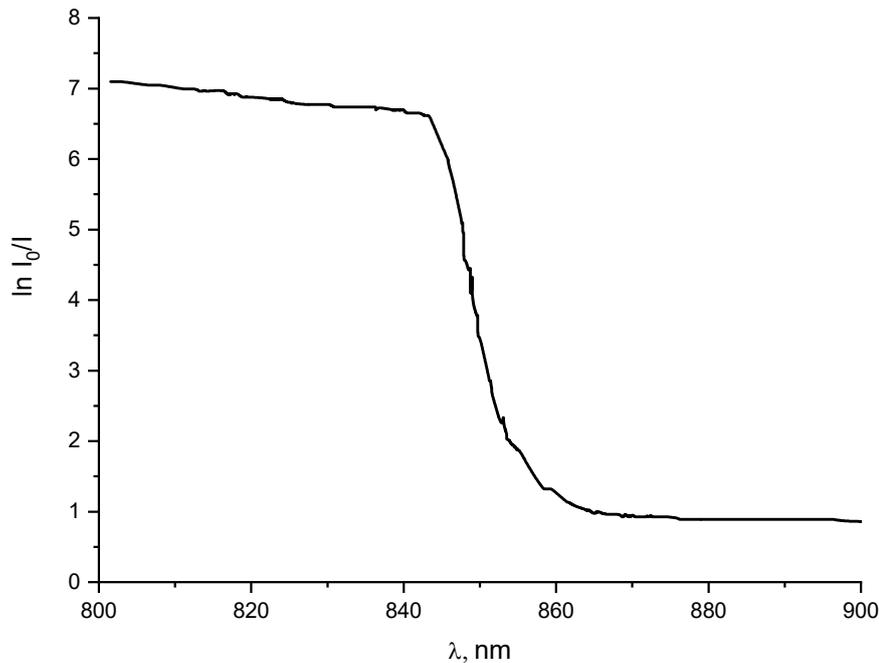


Рис.3. Поглинання монокристалів n-CdTe, легованих германієм ( $\ln(I_0/I) = f(\lambda)$ ), без врахування оптичного відбивання R ( $\lambda$ ).

Приведені експериментальні результати свідчать, що досліджувані кристали мають високу (детекторну) якість, що є визначальним для виготовлення високочутливих та високороздільних сенсорів іонізуючого випромінювання.

На рис.4 представлено спектри низькотемпературної (77 К) фотолюмінесценції монокристалів n-CdTe, легованих германієм. Енергія лазерного випромінювання E, яка дорівнює 1,879 eV, в нашому випадку більша, ніж енергія фундаментального оптичного переходу E<sub>0</sub> досліджуваного матеріалу. Максимум низькотемпературної фотолюмінесценції монокристалів n-CdTe, легованих германієм, відповідає енергії 1.58 eV. Дана енергія відповідає фундаментальному оптичному переходу E<sub>0</sub> досліджуваного матеріалу при температурі 77К. В нашому випадку виникає механізм власного поглинання (міжзонне поглинання світлової (електромагнітної) хвилі ( $\hbar\omega > E_0$ ), при цьому один із валентних електронів стає вільним, одночасно утворюється дірка (утворюється електронно-діркова пара). Процес міжзонного поглинання – це внутрішній фотоелектр. Температурний коефіцієнт зміни ширини забороненої зони  $dE_0 / dT$  монокристалів n- CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом См}$ , дорівнює  $- 5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ . Отримане чисельне значення температурного коефіцієнта зміни ширини забороненої зони  $dE_0 / dT$  монокристалів n- CdTe, легованих германієм, близьке до значення  $dE_0 / dT$ , що дорівнює  $- 5,400 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$  для монокристалів телуриду кадмію, наведеного в [8]. Узагальнюючи результати, отримані при дослідженні низькотемпературної фотолюмінесценції та спектрів оптичного пропускання в спектральному діапазоні 800 нм-1100 нм, встановлено співвідношення між енергією фундаментального оптичного переходу E<sub>0</sub> для монокристалів n-CdTe, легованих германієм, та температурою T в температурному діапазоні  $77 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$ :  $E_0(\text{CdTe:Ge}) = 1,580 \text{ eV} - 5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} (T - 77 \text{ K})$ .

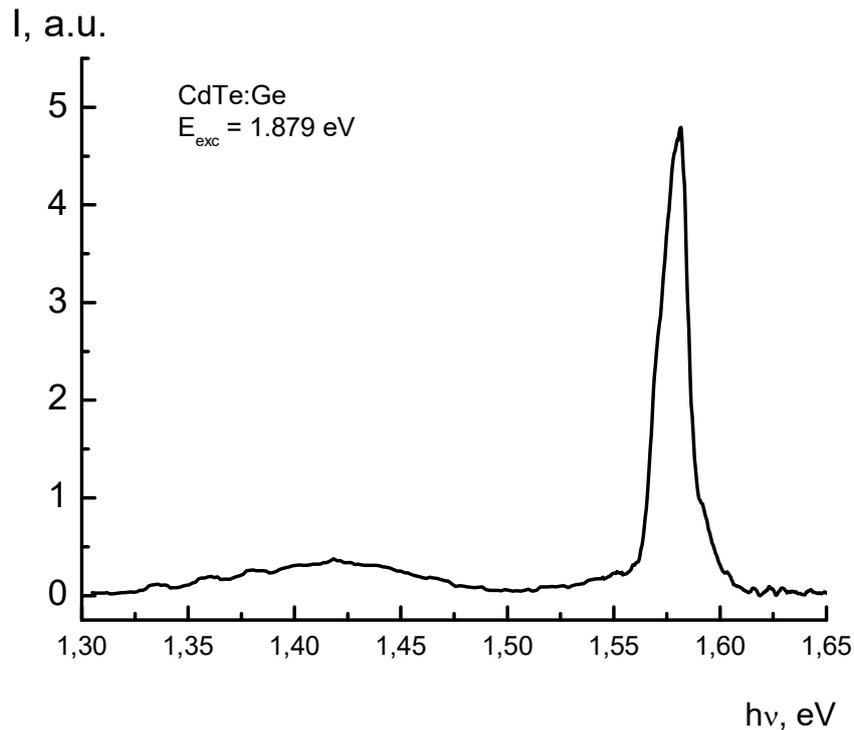


Рис.4.Спектр низькотемпературної фотолюмінесценції монокристалів n-CdTe, легованих германієм.

Виходячи із принципу невизначеності Гейзенберга для енергії  $E$  і часу  $t$  ( $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ ), релаксаційні ефекти в поглинанні світлових (електромагнітних) хвиль кристалом описують феноменологічним параметром уширення  $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$  (уширення  $\Gamma$  електронного переходу  $E_0$  пов'язане з часом життя вільних носіїв заряду через взаємодію їх з коливаннями кристалічної ґратки, домішками, дефектами, в тому числі і поверхневого характеру), де  $\tau$  – час енергетичної релаксації фотогенерованих носіїв заряду. Дане співвідношення дозволяє оптичним методом оцінити значення  $\tau$  для відповідних електронних станів. Використовуючи кореляцію між феноменологічним параметром уширення оптичних спектрів  $\Gamma$  і рухливістю вільних носіїв заряду  $\mu$ , визначають ефективну оптичну рухливість[9]:

$$\mu_{opt} = \frac{e\hbar}{m^*\Gamma}, \quad (6)$$

де  $m^*$  – ефективна маса вільних носіїв заряду;

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_p}, \quad (7)$$

де  $m_e$  і  $m_p$  – ефективні маси електрона і дірки відповідно для даного оптичного переходу.

У даній роботі оцінено ефективну оптичну рухливість  $\mu_{opt}$ . Для розрахунку було взято наступні величини:  $\Gamma = 0,042$  еВ (експеримент-енергетичне уширення фундаментального оптичного переходу  $E_0$ );  $m_e = 0,11 m_0$ ;  $m_p = 0,40 m_0$ . Чисельні значення ефективних мас електронів та дірок було взято із [10, 11]. Згідно з нашими експериментальними результатами час енергетичної релаксації вільних носіїв заряду  $\tau$  дорівнює  $1,567 \cdot 10^{-14}$  с, а ефективна оптична рухливість  $\mu_{opt}$  дорівнює  $320,508 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{Vs}$ . Згідно з літературними даними [12-16] оксидні покриття поверхонь дослідженого напівпровідника – це аморфні плівки,

товщина яких коливається в границях 0,5 нм-7 нм. На інтерфейсі напівпровідник-окисел існує перехідний шар окислу. В телуриді кадмію на поверхні можуть бути окисли кадмію, телуру та їхні комплекси. В германії існують поверхневі шари – GeO<sub>2</sub> або GeO та інші.

#### 4.ВИСНОВКИ

На основі проведених оптичних (спектри відбивання, спектри пропускання) досліджень монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$  в спектральному діапазоні 800 нм-1100 нм та вимірювання спектрів фотолюмінесценції монокристалів n-CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  при температурі 77 К, при збудженні лазерним (електромагнітним) випромінюванням із довжиною електромагнітної хвилі 660 нм в енергетичному діапазоні 1,3 еВ - 1,65 еВ, отримано наступні результати: визначено, що енергія фундаментального оптичного переходу  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм при  $T = 300 \text{ К}$ , дорівнює 1,459 еВ; визначено, що фундаментальний оптичний перехід  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм при  $T = 77 \text{ К}$ , дорівнює 1,580 еВ; визначено температурний коефіцієнт зміни ширини забороненої зони  $dE_0 / dT$  монокристалів n - CdTe, легованих германієм із концентрацією  $N_{Ge} = (2-10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , з питомим опором  $\rho = 10^4 \text{ Ом см} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ом см}$ , який дорівнює  $-5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ ; встановлено співвідношення між енергією фундаментального оптичного переходу  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм, та температурою  $T$  в температурному діапазоні  $77 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$ :  $E_0(\text{CdTe:Ge}) = 1,580 \text{ eV} - 5,426 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} (T - 77 \text{ K})$ ; побудовано оптичні спектри поглинання досліджуваних матеріалів ( $\ln(I_0/I) = f(\lambda)$ ); оцінено час енергетичної релаксації  $\tau$  і ефективну оптичну рухливість  $\mu_{opt}$  вільних носіїв заряду для монокристалів n-CdTe, легованих германієм; показано, що досліджувані кристали мають високу (детекторну) якість, що є визначальним для виготовлення високочутливих та високороздільних сенсорів іонізуючого випромінювання; практична цінність отриманих результатів полягає у визначенні електронних та фізичних параметрів технічно важливого напівпровідника CdTe, легованого германієм; у отриманні співвідношення між енергією фундаментального оптичного переходу  $E_0$  для монокристалів n-CdTe, легованих германієм, та температурою  $T$  в температурному діапазоні  $77 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$ , що дозволяє оцінити ширину забороненої зони при роботі напівпровідникового приладу при різних температурах.

**P.O. Gentsar, J.P. Kyiak, M. A. Mynaylo, L.A. Demchyna,**

**M.V. Vuichyk, O.M. Strilchuk, N.S. Zayats, L.I. Trishchuk,**

**O.I. Vlasenko**

#### **Optical spectroscopy of n-CdTe single crystals doped with Ge in the region of the fundamental optical transition $E_0$**

**Abstract.** In this work optical (reflection spectra, transmission spectra) studies of n-CdTe single crystals doped with germanium with a concentration of  $N_{Ge} = (2 - 10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  with a resistivity  $\rho = 10^4 \text{ Ohm cm} - 5 \cdot 10^6 \text{ Ohm cm}$  in the spectral range of 800 nm - 1100 nm were performed and photoluminescence spectra of n-CdTe single crystals doped with germanium with a concentration of  $N_{Ge} = (2 - 10) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  at a temperature of 77 K were measured when excited by laser (electromagnetic) radiation with an electromagnetic wavelength of 660 nm in the energy range of 1.3 eV - 1.65 eV. The following results were obtained: it was determined that the energy of the fundamental optical transition  $E_0$  for n-CdTe single crystals doped with germanium at  $T = 300 \text{ K}$  is 1.459 eV; it was determined that the fundamental optical transition  $E_0$  for n-CdTe single crystals doped with germanium at  $T = 77 \text{ K}$  is 1.580 eV; the temperature coefficient of

change of the band gap width  $\frac{dE_0}{dT}$  of n - CdTe single crystals doped with germanium with a concentration of  $N_{Ge} = (2 - 10) \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$  with a resistivity  $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{cm} - 5 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ , which is equal to  $- 5.426 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ ; the relationship between the fundamental optical transition energy  $E_0$  for n-CdTe single crystals doped with germanium and the temperature T in the temperature range  $77 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$  was established:  $E_0(\text{CdTe:Ge}) = 1.580 \text{ eV} - 5.426 \cdot 10^{-4} \frac{eV}{K} (T - 77 \text{ K})$ ; the optical absorption spectra of the studied materials were constructed ( $\ln(I_0/I) = f(\lambda)$ ); the energy relaxation time  $\tau$  and the effective optical mobility of free charge carriers for n-CdTe single crystals doped with germanium were estimated; it was shown that the studied crystals have high (detector) quality, which is decisive for the manufacture of highly sensitive and high-resolution ionizing radiation sensors; the practical value of the obtained results consist in determining the electronic and physical parameters of the technically important semiconductor CdTe doped with germanium.

**Keywords:** reflection, transmission, absorption, photoluminescence, n-CdTe single crystals, doping, germanium.

1. Корбутяк Д.В., Мельничук С.В., Корбут Є.В., Борисюк М.М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. К.: «Іван Федоров», 2000. 200 с.
2. Хіврич В.І. Ефекти компенсації та проникаючої радіації в монокристалах CdTe: монографія. К.: Ін-т ядерних досл. 2010. 122 с.
3. Баранський П.І., Беляєв О.С., Гайдар Г.П. Кінетичні ефекти в багатодолінних напівпровідниках. Київ: Наукова думка, 2019. 448 с. ISBN 978-966-00-1616-3.
4. Ільчук Г.А., Петрусь Р.Ю., Кашуба А.І., Семків І.В., Змійовська Е.О. Оптико-енергетичні властивості об'ємного та тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe). *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2018. **16**, №3. С.519-533. DOI:10.15407/nmn.
5. Корбутяк Д.В., Коваленко О.В., Будзуляк С.І., Мельничук О.В. Наноструктури напівпровідникових сполук  $A_2B_2$ . Ніжин: Видавництво НДУ ім. М.Гоголя, 2020. 183 с. ISBN 978-617-527-223-7.
6. Kurchak I.M., Korbutyak D.V. Spectral characteristics of passivated CdTe quantum dots with coordinate-dependent parameters. *Ukr.J.Phys.* 2023. **68**. P. 38-46. doi. org/10.15407/ujre68.1.38.
7. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978. 616 с.
8. Ю Питер, Кардона М. Основы физики полупроводников. Москва: Физматлит, 2002. 560 с.
9. Евстигнеев А.М., Генцар П.А., Груша С.А., Конакова Р.В., Красико А.Н., Снитко О.В., Тхорик Ю.А. Столкновительное уширение оптических спектров и его связь с подвижностью. *ФТП*. 1987. **21**, №6. С.1138-1141.
10. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ: справочник. Под ред. А.В. Новоселовой, В.Б. Лазарева. М.: Наука, 1979. 340 с.
11. Физика и химия соединений  $A^{II}B^{IV}$ . Пер. с англ. под ред. С.А.Медведева. М.: Мир, 1970. 624 с.
12. Бехштедт Ф., Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников. Москва: Мир, 1990. 488 с.
13. Проблемы физики поверхности полупроводников. К.: Наукова думка, 1981. 332 с.
14. Примаченко В.Е., Снитко О.В. Физика легированной металлами поверхности полупроводников. К.: Наукова думка, 1988. 232 с.
15. Физика твердого тела. Энциклопедический словарь. Киев: Наукова думка, 1996. **I**. 652 с.
16. Физика твердого тела. Энциклопедический словарь. Киев: Наукова думка, 1998. **II**. 648 с.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
41, проспект Науки, 03028 Київ, Україна  
e-mail: [rastneg@isp.kiev.ua](mailto:rastneg@isp.kiev.ua)

Отримано: 21.04.2015