

П.М. Фочук¹, В.П. Шафранюк², Г.І. Раренко¹, Є.С. Никонюк³,
А.І. Канак¹, З.І. Захарук¹

Вплив іонізуючого випромінювання на структуру, електрофізичні і оптичні характеристики кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці,
Україна 58012, e-mail: a.kanak@chnu.edu.ua

²Буковинський державний медичний університет, пл. Театральна, 2, 58002 Чернівці, Україна,
e-mail: microel-dpt@chnu.edu.ua

³Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, 33028 Рівне,
Україна, e-mail: semirivne@gmail.com

На основі рентгенівських досліджень були оптимізовані умови вирощування кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0,02 \leq x \leq 0,1$) високої структурної досконалості. В одержаних кристалах досліджені зміни структури, електричних параметрів і оптичного пропускання при опроміненні зразків γ -, β - випромінюванням. При опроміненні γ -квантами джерела ^{60}Co дозою $\Phi \geq 10^5$ Гр спостерігалось незначне погіршення структури і оптичного пропускання зразків, збільшення концентрації дірок p і зменшення рухливості носіїв заряду m в кристалах p -типу. Протягом 30 - 40 діб значення p і m релаксували до вихідних значень. Зміни структурної досконалості, оптичного пропускання і електричних параметрів зразків, опромінених електронами, були більш суттєвими.

Ключові слова: тверді розчини $Cd_{1-x}Zn_xTe$, іонізуюче випромінювання, структура, рентгенівські дослідження, оптичне пропускання, електрофізичні властивості

Стаття постуила до редакції 11.07.2018; прийнята до друку 15.09.2018.

Вступ

Інтерес до кристалів твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ обумовлений перспективами їх практичного застосування в якості різних приладів оптоелектроніки. Останнім часом все більшу увагу привертає застосування твердих розчинів на основі телуриду кадмію з невеликим вмістом цинку в якості детекторів іонізуючого випромінювання [1, 2, 3].

Проблема одержання досконалих кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з відтворюваними наперед заданими параметрами для створення детекторів іонізуючого випромінювання наразі ще не вирішена [2]. На жаль, через недоліки в якості цього матеріалу, $CdZnTe$ -спектрометри з високою роздільною здатністю обмежені відносно невеликими розмірами, що робить їх неефективними для виявлення високих енергій фотонів та для слабких сигналів випромінювання, якщо детектор знаходиться на відстані від об'єкта. В зв'язку з цим необхідно суттєво поліпшити якість матеріалу для детекторів завдяки оптимізації технології його одержання.

Оскільки такі детектори мають працювати в умовах інтенсивного опромінення, важливо знати, наскільки змінюються параметри матеріалу і його поверхні під час проведення вимірів. В роботі [4] досліджувалася поведінка $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ детектора в середовищі з підвищеним рівнем радіації шляхом вивчення впливів на дефектні стани матеріалу, індукованого γ -опроміненням. Автори [5] вивчали процес відновлення опромінюваних детекторів. Було показано, що опромінення $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ -детекторів зі збільшенням доз/флюенсів іонізуючого випромінювання, суттєво впливає на їх спектроскопічну продуктивність. В огляді робіт про зміну основних характеристик детекторів корпускулярного і γ -випромінювання під час експлуатації [6] відмічено, що, не дивлячись на те, що стабільні радіаційні пошкодження при тривалому опроміненні накопичуються поступово, деградація дозиметричних і спектрометричних властивостей при великих дозах може відбуватися пороговим чином. Причому, деградація $CdTe$ при γ -опроміненні починається з менших доз, ніж $Cd_{1-x}Zn_xTe$. В роботах [7, 8] вивчено вплив опромінення різними потоками

γ -квантів на низькотемпературну фотолюмінесценцію кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0,05$). Виявлено, що γ -опромінення кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ значно змінює вигляд їх низькотемпературних спектрів фотолюмінесценції.

З метою коректування технології вирощування великих досконалих кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ в даній роботі проводились дослідження їх структурної досконалості в залежності від умов вирощування та було вивчено вплив іонізуючого опромінення на параметри вирощених кристалів.

I. Методика експерименту

Тверді розчини $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0,02 \leq x \leq 0,1$) синтезували з вихідних компонент в графітованих кварцових ампулах. Ампулу поміщали в трьохзонну піч під кутом 45° до горизонту. При нагріві температуру всіх зон підтримували однаковою. Нагрівання проводили до температури на ~ 20 К вище температури плавлення твердого розчину. Після гомогенізації розплаву та обертання ампули навколо осі для перемішування розчину, встановлювали градієнт температури вздовж ампули і при програмному зменшенні потужності печі здійснювали вертикальну спрямовану кристалізацію. Отримували полікристалічний злиток з блоками, витягнутими вздовж ампули. Вирощування кристала і подальший відпал злитка проводили після його синтезу без розгерметизації ампули. Це дозволяло уникнути можливих забруднень матеріалу при його перезавантаженні. Кристали вирощували методом Бріджмена. При цьому, використовували як традиційну, так і модифіковану установку, описану в роботі [9]. В модифікованій установці, порушення монотонності руху контейнера з розплавом, яке негативно впливає на структуру вирощеного кристалу, усувалося завдяки переміщенню масивного нагрівника відносно нерухомого контейнера з матеріалом.

З метою покращення однорідності складу кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ була також застосована установка вирощування кристалів методом зонної плавки під кутом до горизонту. Нагрівач печі для вирощування складався з кількох незалежних секцій, що давало можливість створювати різноманітні температурні профілі і контролювано змінювати величину градієнта температури на фронті кристалізації. В даній установці, під час росту, проводили обертання циліндричного контейнера з матеріалом навколо його осі. Це зумовлювало вирівнювання фронту кристалізації і інтенсивне перемішування розплаву.

Для дослідження кристалічної структури вирощених кристалів було використано такі взаємодоповнюючі методи, як рентгенодифракційна топографія на відбивання (метод Берга-Баррета), на проходження (метод Ланга) та метод двокристалічного спектрометра (ДКС) [10]. Необхідно відмітити, що ці методи є експресними, неруйнівними і дають можливість візуалізувати дефекти, які виникають у процесі вирощування

(двійники, малокутові границі, дислокації, тощо), що дозволяє корегувати технологічні процеси вирощування.

Вирощені злитки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ орієнтувалися по кристалографічних площинах (111) і (110), які були близькі до осі росту. Кристалографічна орієнтація злитків та пластин, а також визначення розорієнтації їх поверхонь здійснювалися рентген-дифрактометричним методом з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-ЗМ, гоніометра ГУР-8 і стандартних пристроїв, що входять в комплект гоніометра.

Особлива увага була приділена підготовці поверхні пластин для дослідження структури. Різання, шліфування і механічне полірування кристалів приводить до появи порушеного шару значної глибини, який спотворює властивості матеріалу. Найбільш простий спосіб зняття пошкодженого шару - глибоке хімічне травлення в 8 %-му розчині бром у метанолі, однак при цьому виникає рельєфність поверхні. Це пов'язано з тим, що хімічний травник видаляє в першу чергу більш порушені частини монокристала, в результаті утворюється поверхня з глибокими лунками. Істотно зменшити глибину порушеного шару, не викликаючи при цьому забруднення поверхні і появи рельєфу можливо за допомогою хіміко-механічного полірування (ХМП) [11, 12]. При підготовці зразків були використані обидві методики обробки. ХМП зразків $Cd_{1-x}Zn_xTe$ проводилась композиціями з колоїдним кремнеземом наступного складу: аміноетоксіяеросіл (АЕА), H_2O_2 , $NaOH$, $C_3H_8O_3$. Використання в якості абразивного матеріалу ультрадисперсних порошоків АЕА розміром 2 – 20 нм не повинно викликати суттєвих порушень структури поверхні.

Технологічні процеси вирощування кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ корегувалися за результатами рентгенодифракційних досліджень. Структурні дослідження вирощених кристалів проводились модифікованим методом Берга-Баррета з використанням симетричних (111), (220), (333), (440) і асиметричних відбивань (422), (440), (511). У цьому методі використовувалась гострофокусна рентгенівська трубка БСМ-1 з мідним і молібденовим анодами. Розмір фокуса складав 50 мкм, що дало можливість одержати велику роздільну здатність $\sim 0,5$ мкм.

Найбільш чітке уявлення про дислокаційну структуру кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ дає застосування методу Ланга [10]. Однак, динамічні осциляції при дифракції рентгенівських променів можна отримати тільки у дуже досконалих кристалах на тонких зразках, в яких $m < 1$, де m - лінійний коефіцієнт поглинання, а t - товщина зразка ($130 \div 200$ мкм). Такі зразки $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ виготовлялись за спеціальною методикою, яка полягала в тому, що на плоскопаралельній пластині з однієї сторони посередині вишліфовувалась канавка шириною 10 мм на глибину $\frac{1}{2}$ товщини пластини. З протилежної сторони, повернувши пластину на 90° , вишліфовувалась така ж канавка на глибину $\frac{1}{2}$ товщини пластини. Внаслідок цього, на перехресті канавок товщина "вікна" у центрі зразка становила $\frac{1}{2}$

товщини пластини, а матриця мала товщину пластини. Такий спосіб виготовлення зразків з тонким “вікном” для проходження рентгенівських променів дав можливість уникнути їх деформацій при кріпленні під час дослідження. Вхідна поверхня зразків була перпендикулярною до кристалографічного напрямку [111].

Вимірювання параметра ґратки a проводилися на рентгенівській установці ДРОН за методом Бонда [10]. Точність вимірювання величини a була в межах $\pm 0,00002$ нм.

Для вимірів електричних характеристик із вирощених кристалів виготовляли поліровані зразки у формі прямокутних паралелепіпедів розміром $(12 \times 2 \times 1,5)$ мм³. Струмові контакти і дві пари симетричних холлівських контактів до зразків виготовляли шляхом осадження шару міді з краплі CuSO_4 з наступним пропаюванням сплавом In-Sn . Вимірювання проводили на постійному струмі в магнітному полі з індукцією 0,5 Тл. Сигнали фіксували електрометром з вхідним опором 10^{12} Ом і чутливістю 0,1 мВ. Досліджували питому електропровідність σ , коефіцієнт Холла R_H і холлівську рухливість носіїв струму $\mu = \sigma R_H$ при температурі $T = 290$ К.

ІЧ-спектри пропускання в області довжин хвиль 400-1500 нм вимірювалися на спектрофотометрі USB Ocean Optics 2000+ з оптичною роздільною здатністю 1,0 нм. В області довжин хвиль 2,4–25 мкм ІЧ-спектри пропускання вимірювалися на спектрофотометрі ИКС-29.

Опромінення γ -квантами проводилося на установці МРХ-25М (джерело ^{60}Co , енергія γ -квантів становила 1,17 МеВ), β -опромінення проводилося на установці «Аргус» з питомою дозою 10^{10} електрон/см²·с (енергія електронів становила 1 МеВ).

II. Результати та їх обговорення

Досліджувані кристали $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ характеризувались нерівномірним розподілом дефектів структури, як по довжині, так і по перерізу злитків.

Якість поверхні зразків сильно залежала від методики обробки. На рис.1а представлена рентгенівська топограма пластин $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ після тривалого травлення, яка одержана із застосуванням косонесиметричної схеми на відбивання ($\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, відбивання (511)). Використовувалися такі площини відбивання, коли кут між вхідною площиною і площиною відбивання був мінімальним, що дає можливість зменшити екстинційну товщину, а це, в свою чергу, дозволяє виявити рельєф поверхні та дефекти структури в тонких приповерхневих шарах [13].

Найкращі результати були одержані при обробці поверхонь кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ за допомогою колоїдно-кремнеземної композиції. На рис.1б приведена топограма поверхні кристала $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ після хіміко-механічного полірування. Порівнюючи топограми представлені на рис.1а і рис.1б можна помітити велику різницю у плоскопаралельності

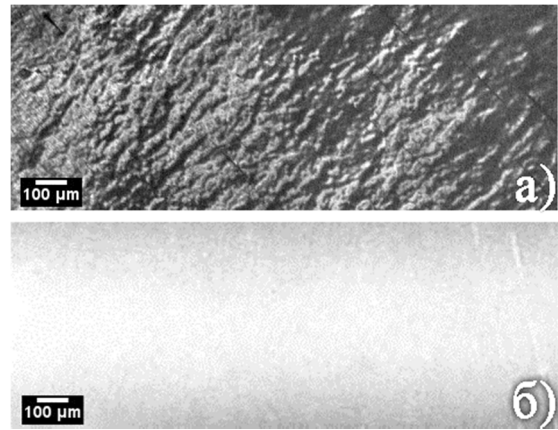


Рис. 1. Рентгенівські топограми поверхні кристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ після різної обробки: а) хімічного травлення, б) хіміко-механічного полірування композицією колоїдного кремнезему.

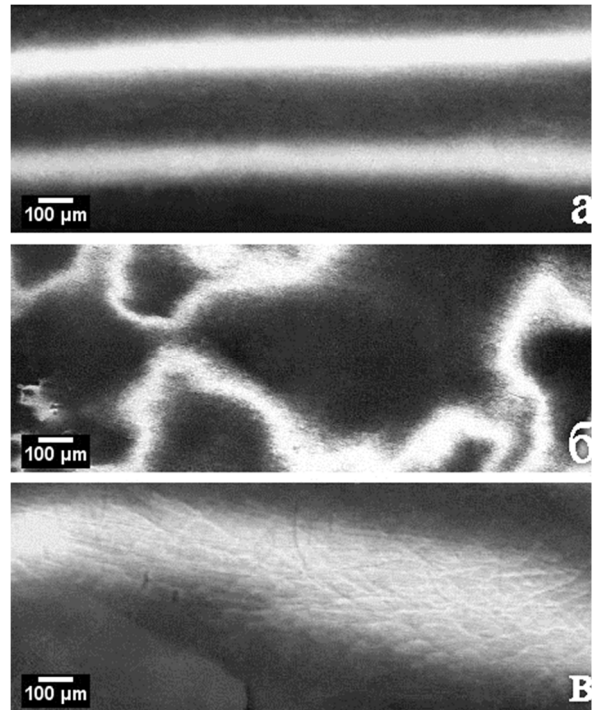


Рис. 2. Рентгенівські топограми кристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$: а) структурно-досконалий кристал, вирощений за оптимізованою технологією; б) дефектний кристал, одержаний за традиційною методикою; в) кристал з напруженнями, обумовленими неоднорідністю параметра ґратки. $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ -випромінювання, відбивання (333).

оброблених поверхонь.

Топограма досконого кристалу містить на позитиві дві паралельні прямі світлі смуги, які являються фрагментами конусів Косселя $\text{K}\alpha_1$ і $\text{K}\alpha_2$ (рис. 2а). Якщо у кристалі присутні спотворення ідеальної структури, вони проявляються у викривленні атомних площин, градієнта параметра ґратки, наявності малокутових границь, двійників та ін. Такі дефекти приводять до викривлення косселівських ліній, утворення замкнутих контурів, збільшення їх кількості до трьох і більше (рис. 2б).

Дані топограми були одержані на кристалах, вирощених традиційним методом Бріджмена з охолодженням в режимі виключеної печі. Як було встановлено, кристали вирощені з використанням рухомого нагрівника, мали значно досконалішу структуру, ніж отримані на традиційній установці.

Одержання великих монокристалів залежить від форми контейнера. Найбільш високий вихід великих монокристалів ми спостерігали при вирощуванні кристалів в циліндричному кварцевому контейнері діаметром 50-60 мм з подвійними стінками та плоским дном і тепловідводом розташованим по центру дна контейнера [14]. При переміщенні ампули в холодну частину печі зародження кристалу відбувалося в точці, де був прикріплений тепловідвід, а подальший ріст – в оточенні розплаву. Завдяки цьому, усувався тиск стінок контейнера на зародок кристалу і покращувалася його структура. На рис. 2а представлені топограми, характерні для кристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ вирощених в таких ампулах в установці з модифікованим рухомих нагрівником. Спостерігалось чітке розділення дублетів $K\alpha_1$ і $K\alpha_2$ для різних відбивань, що підтверджує відсутність у кристалах макронапруг, блоків, двійників та ін.

Була досліджена однорідність розподілу параметра ґратки a по перерізу і довжині злитків $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при фіксованому значенні x , розрахованому для завантаження компонентів. У всіх кристалах вирощених модифікованим методом Бріджмена, по радіальному перерізу злитків величина a істотно не змінюється. Незначну зміну величини a виявлено тільки в перерізі широких злитків (діаметром більше 30 мм), охолоджених після вирощування з швидкістю, що перевищувала 100 К/год.

Істотніша зміна величини a (до 10 %) спостерігається вздовж осі злитків. Оптичні дослідження показали, що при цьому відбувається збільшення значення граничної довжини хвилі оптичного пропускання по злитку від початку росту до кінця. Зміна складу твердого розчину по довжині особливо суттєва при вищому вмісті цинку ($x > 0,04$). В таких кристалах неоднорідність величини a викликає напруження в кристалічній ґратці (рис. 2в). З метою вирівнювання складу злитка проводився тривалий (48÷30 год) відпал кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при температурах від 1370 К до 1000 К одразу після вирощування в установці Бріджмена. За допомогою такого відпалу вдалося зменшити неоднорідність по величині a до 5 %.

Однорідність величини a вздовж осі злитків вдалося забезпечити при вирощуванні кристалів методом зонної плавки з обертанням циліндричного контейнера з матеріалом навколо його осі під кутом до горизонту. В таких умовах забезпечувався майже рівномірний розподіл компонент по всьому об'єму. Однак, моноклоки в злитках, вирощених таким методом були меншими, ніж в кристалах, одержаних модифікованим методом Бріджмена в ампулах спеціальної форми.

Зразки кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$, які не містили блоків, двійників досліджувались за допомогою ДКС. Кількісну оцінку ступеня досконалості даних кристалів проводили шляхом порівняння

експериментально отриманих значень півширин кривих гойдання $q_{екс}$ з теоретично обчисленими величинами $q_{теор}$. Так, для відбивань (111), (220), (440), (422) ідеального кристала $Cd_{1-x}Zn_xTe$ теоретичне значення півширин кривих гойдання відповідно дорівнюють $\sim 24,7''$, $17''$, $13''$, $16,5''$. Для реальних кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ $q_{екс} > q_{теор}$, що зумовлено наявністю таких дефектів, як дислокації, включення, мікропорушення. По уширенню кривих гойдання Δq , визначалась густина дислокацій N_d , яка служить кількісною інтегральною оцінкою досконалості кристалів:

$$N_d = \frac{\Delta q^2}{9,42 \cdot b^2},$$

де $\Delta q = (q_{екс}^2 - q_{теор}^2)^{1/2}$, \mathbf{r} – вектор Бюргерса.

Дослідження показали, що середня густина дислокацій у великих блоках знаходиться у межах $4 \cdot 10^3 \div 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Відібрані для опромінення зразки $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ відзначались високою структурною досконалістю і однорідністю, а значення півширин кривих гойдання були близькі до теоретичних $\sim 25''$ для (111) (рис.4, крива 1). На рис. 3 приведено топограми ($\bar{4}22$) таких зразків до і після γ -опромінення. На топограмі до опромінення чітко видно дислокаційну сітку з ліній підвищеної інтенсивності (рис. 3а). Скупчення наявних дислокацій призводять до утворення широких дислокаційних смуг ковзання, які на топограмах проявляються у вигляді трикутників, що характерно для кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ високої досконалості з густиною дислокацій $< 10^4 \text{ см}^{-2}$. Слід відмітити, що контраст дислокацій буде максимальний, коли вектор дифракції \mathbf{g} і вектор Бюргерса \mathbf{b} будуть паралельні і буде нульовим, коли вони взаємно перпендикулярні. Після опромінення дозою 10^5 Гр структура зразка $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ змінювалася, про що свідчить розмитість зображення дислокацій, що пов'язано з градієнтом напруг по товщині зразка (рис. 3б).

3 одержаних результатів після γ -опромінення,

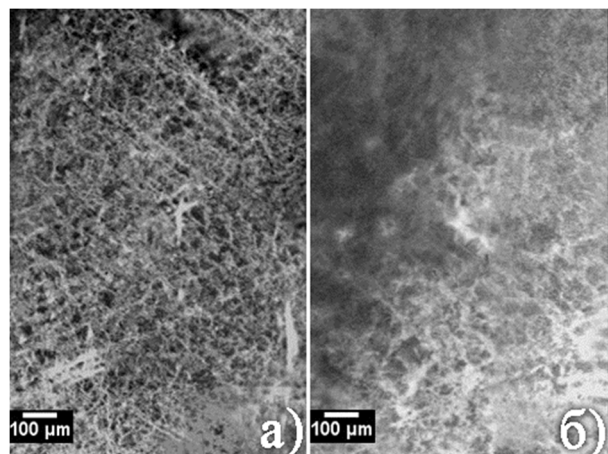


Рис. 3. Рентгенівські топограми, одержані методом Ланга, зразків $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$: а) до опромінення, б) після γ -опромінення.

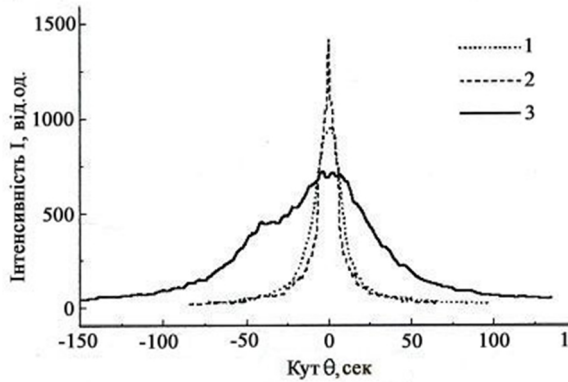


Рис. 4. Рентгено дифракційні криві гойдання ($\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, відбивання (111)), одержані на зразках $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$: 1 - до опромінення; 2 - після зняття порушеного шару γ -опроміненого зразка; 3 - після γ -опромінення $\Phi \sim 10^4$ Гр.

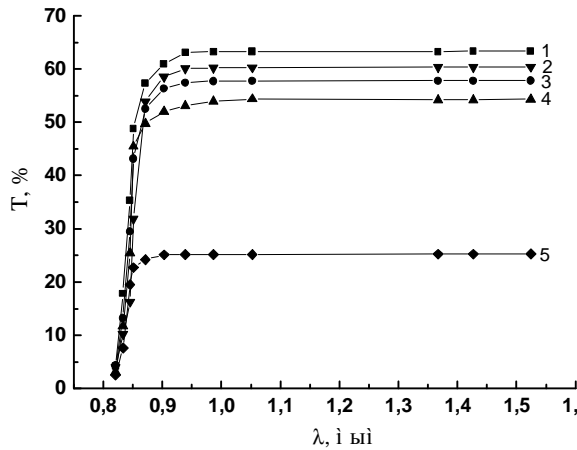


Рис. 5. Спектральна залежність оптичного пропускання зразків $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ товщиною 1 мм до і після опромінення: 1 - γ -опромінення $\Phi \sim 10^4$ Гр (після додаткової поліровки); 2 - до опромінення; 3 - γ -опромінення $\Phi \sim 10^4$ Гр (без додаткової поліровки); 4 - γ -опромінення $\Phi \sim 10^5$ Гр; 5 - β -опромінення $\Phi = 2 \cdot 10^{17}$ н/см².

можна зробити висновок, що збільшення дози опромінення до $\Phi \sim 10^4$ Гр призводить до збільшення товщини порушеного шару (до 0,2 мкм). Це відповідним чином відображається на уширенні відбитих рефлексів $\text{CuK}\alpha$ при різних порядках відбивань, а також на зміні форми кривих гойдання і збільшення їх півширин (рис.4, крива 3). Після зняття даного пошкодженого шару хімічним травленням спостерігається зменшення півширини кривих гойдання (рис.4, крива 2), ріст когерентної складової відбивання, а також більш чітке зображення косселівських ліній $\text{CuK}\alpha_{1,2}$, що свідчить про покращення структури зразків після опромінення.

Отримані результати можна пояснити тим, що генеровані при опроміненні кристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$

первинні радіаційні дефекти термічно нестабільні і достатньо рухливі. В процесі міграції по кристалу вони можуть анігілювати, або утворювати більш стабільні комплекси як один з одним, так і з домішковими атомами. При високоенергетичному γ -опроміненні зароджуються переважно точкові дефекти типу Френкеля або Шотткі. Так як такого роду зразки містять високі концентрації дислокацій, мікродефектів і точкових дефектів, то дія γ -опромінення призводить до активізації анігіляційних процесів і більш рівного перерозподілу дефектів.

Таким чином, приведені результати досліджень у випадку дії дози γ -опромінення ($\Phi \sim 10^4$ Гр), свідчать про незначні структурні зміни в кристалах твердих розчинів на основі телуриду кадмію, при чому ступінь структурної досконалості в об'ємі навіть дещо зростає. Це підтверджується результатами оптичних досліджень γ -опроміненних зразків ($\Phi \sim 10^4$ Гр), в яких спостерігається незначне зростання оптичного пропускання після зняття порушеного шару (рис. 5, крива 1).

Проводились виміри спектральної залежності пропускання γ -опроміненних зразків ($\Phi \sim 10^5$ Гр), які витримувались при кімнатній температурі протягом місяця. Якщо безпосередньо перед вимірюванням поверхню таких зразків полірували для зняття приповерхневого шару, то прозорість кристалу при 77 К зростала. Це означає, що при збереженні опроміненних кристалів частина радіаційних дефектів із об'єму дифундує на поверхню, утворюючи приповерхневу тонку (40-80 мкм) область, яка сильно поглинає світло в широкому спектральному інтервалі довжин хвиль. Варто відмітити, що полірування контрольного неопроміненого зразка практично не впливало на його прозорість. Опромінена поверхня в даному випадку виступає гетером, що призводить до покращення кристалічної структури матеріалу.

Зміну оптичного пропускання інфрачервоного випромінювання та структури зразків $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ викликає β -опромінення дозами $10^{15} \div 10^{16}$ см⁻². Взаємодоповнюючі рентгенівські і оптичні дослідження показали, що в опроміненних такими дозами кристалах відбувається збільшення концентрації радіаційних дефектів в об'ємі кристалу, про що свідчать зміни кривих гойдання і коефіцієнта поглинання (рис. 5, крива 5). Такі зміни оптичних властивостей після опромінення не можна пояснити впливом тільки одних хвостів густини станів, що виникають внаслідок флуктуацій випадкового електричного поля заряджених дефектів. Зміну стану ґратки в опроміненних зразках можуть викликати внутрішні механічні напруги та дефекти, які виникли внаслідок опромінення. Після опромінення структура кристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ помітно погіршується, про що свідчить розмитість зображення дислокацій (рис. 3б), що пов'язано з градієнтом напруг по товщині зразка.

Отже, оптичні дослідження зразків показали, що β - і γ -опромінені кристали відрізняються концентрацією радіаційних дефектів в об'ємі кристалу, яка значно більша в β -опроміненних зразках, про що свідчить зміна оптичного пропускання в

області краю власного поглинання (рис. 5). Не виключено, що в β -опромінених кристалах утворюються деякі скупчення дефектів (кластери), які розпадаючись, при зберіганні опромінених зразків, збагачують ґратку мілкими рухливими донорами.

Були досліджені зміни електрофізичних властивостей до і після опромінення енергіями γ -квантів джерела ^{60}Co (дозою $\Phi \sim 10^5$ Гр). Безпосередньо після опромінення в області домішкової провідності виявлено збільшення концентрації дірок p в кристалах p -типу. Відбулося зменшення рухливості носіїв заряду m від 60-65 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ до 50-55 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Ці зміни нестабільні, і протягом тривалого часу (30-40 діб) значення p і m релаксують до вихідних. Це можна пояснити механізмом γ -стимульованого перетворення дефектів: γ -опромінення приводить до утворення френкелівських пар (переважно $\text{Cd}_i + \text{V}_{\text{Cd}}$), компоненти яких мігрують до стоків з різною швидкістю. Через більшу швидкість дифузії до стоків міжвузельного кадмію, об'єм кристалу одразу після випромінювання збагачується акцепторами V_{Cd} , що приводить до відповідних змін концентрації вільних носіїв в області домішкової провідності. Релаксація γ -стимульованих змін (p , m) має складний характер і проходить в 2 етапи: звільнення об'єму від залишкових V_{Cd} за рахунок міграції на стоки (протягом 7-10 діб) і анігіляції пар на стоках (протягом 30-40 діб). Утворення електрично-активних комплексів, стійких протягом більш тривалого часу не виявлено.

Опромінення електронами приводить до утворення значно більшої зміни електричних параметрів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$. Після опромінення в зразках p -типу рухливість носіїв заряду падає від 60-65 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ до 20-25 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Матеріал стає високоомним і неоднорідним.

Висновки

На основі рентгенівських досліджень структури були оптимізовані способи вирощування кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0,02 \leq x \leq 0,1$) високої структурної досконалості.

При опроміненні зразків вирощених кристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ γ -квантами джерела ^{60}Co дозою 10^4 Гр зміни структурної досконалості і оптичного пропускання були несуттєвими. Опромінення більшою дозою ($\Phi \sim 10^5$ Гр) зумовлює погіршення структури і оптичного пропускання зразків, збільшення концентрації дірок p в кристалах p -типу і зменшення рухливості носіїв заряду m . Ці зміни нестабільні, протягом 30 - 40 діб значення p і m релаксують до вихідних значень. Спостерігалася дифузія частини радіаційних дефектів із об'єму на поверхню. Кількість радіаційних дефектів більша в зразках опромінених електронами, в результаті чого зменшується пропускання ІЧ-випромінювання, матеріал стає високоомним і неоднорідним.

Автори висловлюють подяку співробітникам радіаційного відділу Інституту фізики НАНУ за проведення опромінення зразків.

Фочук П.М. - доктор хімічних наук, професор, проректор з наукової роботи і міжнародних зв'язків;
Шафранюк В.П. - кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Никонюк Є.С. - кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Захарук З.І. - старший науковий співробітник;
Раренко Г.І. - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Канак А.І. - кандидат хімічних наук.

- [1] A. E. Bolotnikov, J. Butcher, G. S. Camarda, Y. Cui, G. De Geronimo, J. Fried, P. M. Fochuk, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 60(4), 2875 (2013).
- [2] Mohd. Shkir, V. Ganesh, S. AlFaify, A. Black, E. Dieguez, G. Bhagavannarayana, J. Alloys Compd. 686, 438 (2016).
- [3] P. Fochuk, Y. Nykoniuk; Z. Zakharuk; O. Kopach; et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 64(10), 2725 (2017).
- [4] A. Cavallini, B. Fraboni, W. Dusi, M. Zanarini, P. Siffert, Appl. Phys. Lett. 77(20), 3212 (2000).
- [5] B. Fraboni, A. Cavallini, N. Auricchio, et al, Semiconductor Sci. and Techn. 21(8), 1034 (2006).
- [6] Л.Н. Давыдов, А.А. Захарченко, Д.В. Кутний, В.Е. Кутний, И.М. Неклюдов, А.В. Рыбка, И.Н. Шляхов, Вестник ХНУ, № 627. Серия физическая "Ядра, частицы, поля". 1(26), 3 (2005).
- [7] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, Ю.М. Насека, А.В. Прохорович та ін., УФЖ. 55(7), 777 (2010).
- [8] Н.М. Литовченко, Ю.Н. Насека, А.В. Прохорович, Л.В. Рашковецкий и др., Оптоэлектроника и полупроводниковая техника: Сб. научн. тр. 45, 54 (2010).
- [9] Ye.S. Nykonyuk, Z.I. Zakharuk, A.I. Rarenko, et al., J. Nano- and Electron. Phys. 7(4), 04054 (2015).
- [10] В.В. Лидер. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 73(12) (2007).
- [11] Крылюк О.Н., Раренко И.М., Захарук З.И. Композиция для химико-механической полировки поверхности полупроводниковых кристаллов. АС №1773083 от 1.07.1992 по заявке № 4780730 от 9.01.1990.
- [12] S.G. Dremlyuzhenko, Z.I. Zakharuk, A.I. Savchuk, and P.M. Fochuk, Phys. stat. sol. (b). 244(5), 1650 (2007).
- [13] С.А. Кшевецкий, Ю.П., Стецько, І.М., Фодчук та ін., УФЖ. 35(3), 344 (1990).
- [14] Z.I. Zakharuk, A.I. Rarenko, E.V. Rybak, et al., Phys. Chem. Solid State. 8(1), 25 (2007).

P.M. Fochuk¹, V.P. Shafranyuk², A.I. Rarenko¹, A.I. Kanak¹
Ye.S. Nikonuk³, Z.I. Zakharuk¹

Effect of Ionizing Radiation on the Structure, Electro-Physical and Optical Characteristics of Cd_{1-x}Zn_xTe Crystals

¹*Yuriy Fedkovich' Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine*

E-mail: a.kanak@chnu.edu.ua

²*Bukovinian State Medical University, 2, Teatral'na Sq., Chernivtsi, 58002, Ukraine*

³*National University of Water Management and Nature Resources, 11, Soborna Str., Rivne, 33028, Ukraine*

Based on X-ray studies, conditions for growth of high structural perfect Cd_{1-x}Zn_xTe (0,02≤x≤0,1) crystals have been optimized. In crystals obtained, changes in the structure, electrical parameters and optical transmission at samples irradiation by γ -, β - radiations were investigated. At ⁶⁰Co source γ -quanta irradiation with a dose of $\Phi \geq 10^5$ Gy, a slight decrease of samples' structure and optical transmission, an increase of holes concentration p and a decrease of charge carrier mobility m in p -type crystals was observed. Within 30-40 days, the values of p and m were relaxed to an initial ones. Changes in structural perfection, optical transmission and electrical parameters of samples irradiated by electrons were more significant.

Keywords: Cd_{1-x}Zn_xTe solid solutions, ionizing radiation, structure, X-ray studies, optical transmission, electro-physical properties.