

Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича

Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Кафедра електроніки і енергетики

**ФОТОДЕТЕКТОРИ НА ОСНОВІ CdZnTe ЛЕГОВАНОГО Sn**

Дипломна робота

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Виконав: студент 4 курсу, групи 433  
Спеціальність 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
Савчук Олександр Юрійович

Керівник: Олексій СЛЮТОВ

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № \_\_\_\_

від „\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ проф. Едуард МАЙСТРУК

Чернівці – 2024

### Анотація

Стор. 40, рис. 9, табл. 4, літ. 11

В літературному огляді наводиться відомості про основні параметри і характеристики телуридів, аналізуються методи їх отримання, оптичні властивості і можливі фотоелектричні прилади.

В експериментальній частині описується легування методом дифузії твердих розчинів CdZnTe домішкою олова, особливості методик досліджень спектрів оптичного відбивання та дослідження люмінесценції, наводяться та обговорюються результати досліджень оптичних властивостей і фотолюмінесценції  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$ , а також наводяться результати досліджень електричних та фотоелектричних властивостей отриманих фотодетекторів на основі фоторезисторів In– $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$ .

**Ключові слова:** *твердий розчин CdZnTe, дифузія, амфотерна домішка олова, оптичне відбивання, фотолюмінесценція, фотодетектори.*

### Анотація

The literature review provides information on the main parameters and characteristics of tellurides, analyzes their methods of obtaining, optical properties, and possible photoelectric devices.

The experimental part describes the alloying of CdZnTe solid solutions with a tin admixture by the diffusion method, the peculiarities of the methods of experimental studies of optical reflection spectra and luminescence, the results of research of the optical properties and photoluminescence of  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$  are given and discussed, and the results of investigation of the electrical and photoelectric properties of the obtained photodetectors based on photoresistors In– $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$  are given and discussed.

**Keywords:** *CdZnTe solid solution, diffusion, amphoteric tin impurity, optical reflection, photoluminescence, photodetectors.*

Дипломна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Олександр САВЧУК  
(підпис)

## Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1 Огляд літературних відомостей.....	5
1.1. Основні фізико-хімічні властивості та параметри.....	5
1.2. Основні методи отримання.....	6
1.3. Властивості телуридів кадмію і цинку.....	8
1.3.1. Особливості поглинання та відбивання.....	8
1.3.2. Люмінесцентні властивості.....	11
1.4. Фотоелектричні прилади.....	13
1.4.1. Фотодіоди видимого діапазону.....	13
1.4.2. Сонячні елементи.....	15
Розділ 2 Експериментальна частина.....	16
2.1. Легування кристалів CdZnTe.....	16
2.2. Особливості досліджень спектрів оптичного відбивання.....	18
2.3. Визначення випромінюючих властивостей кристалів.....	21
2.4. Результати досліджень оптичних властивостей $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ .....	23
2.5. Фотодетектори на основі CdZnTe:Sn.....	27
Висновки.....	32
Література.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Додаток.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Вступ

Важливим завданням для твердотільної електроніки є виявлення матеріалів, на основі яких постає можливим вирішення важливих для практики завдань і проблем. Для приладів сонячної енергетики і детекторів іонізуючого випромінювання серед напівпровідникових матеріалів привернули особливу увагу CdTe. Подальші теоретичні обґрунтування показали важливість передумови для цього в першу чергу ефективного атомного номера телуриду кадмію  $Z=48/52$ . Саме вона визначає вищу ефективність реєстрації випромінювання у порівнянні з Si або Ge через ефективний переріз поглинання. При фотоефекті він пропорційний  $Z^5$ , що при однакових товщинах активної області детектора забезпечує істотно більшу чутливість. Дослідження властивостей самого матеріалу надали значного прогресу в технології вирощування кристалів CdTe для детекторів. На даний час важливого значення набувають тверді розчини телуридів, зокрема  $Cd_xZn_{1-x}Te$ . Можливості приладів виготовлених на його основі для реєстрації оптичного і радіаційного випромінювання істотно залежать від добору технології отримання відповідних кристалів, встановлення її впливу на фізичні властивості матеріалу і технічні параметри приладів. Це вимагає розробки комплексу відповідних досліджень по контролю базових характеристик і параметрів матеріалу, встановленні можливого впливу на них розподілу власних і домішкових точкових дефектів і встановлення можливостей практичного використання через виявлені особливості електронних процеси в матеріалі та його властивості.

Метою даної роботи є встановлення складу твердого розчину кадмій-цинк телуру, дослідження його базових оптичних і люмінесцентних властивостей та виявлення умов для отримання та можливого використання фоточутливості.

## Розділ 1 Огляд літературних відомостей

### 1.1. Основні фізико-хімічні властивості та параметри

Досліджуваний твердий розчин  $CdZnTe$  належить до II-VI сполук. Він належить до алмазоподібних напівпровідників і його властивості визначаються характерними для цього класу речовин особливостями будови кристалічної ґратки. Хімічна сполука є стійкою, оскільки базові елементи, розташовуються один від одного досить далеко в ряді електрохімічних напруг. Зокрема, їх ефективні іонні радіуси становлять для кадмію  $Cd$  (1,03 Å), цинку  $Zn$  (0,83 Å) і телуру  $Te$  (1,32 Å). Вони утворюють ковалентно-іонний міжатомний зв'язок, оскільки електронні оболонки частково перекриваються і поляризуються. Ступінь іонності бінарних сполук  $CdTe$  і  $ZnTe$  незначно відрізняються і становлять  $\sim 0,62$  і  $0,64$  відповідно.

Температури плавлення  $CdTe$  і  $ZnTe$  становлять  $1295^{\circ}C$  і  $1092^{\circ}C$  відповідно. Такі халькогеніди являються відносно тугоплавкими, при цьому тиск їх парів є меншим тиску окремих складових елементів. Із підвищенням температури базові сполуки дисоціюють і за дослідженнями методом термодесорбції їх парова фаза становить прості молекули і атоми компонентів. До того ж, металоїд формує прості двоатомні молекули ( $n = 2$ ).

Властивості  $CdTe$  і  $ZnTe$  визначаються головними факторами, а саме, будовою атомів компонентів, параметрами утвореної ними кристалічної ґратки та їх валентністю. Гібридизація валентних орбіталей при формуванні сполуки визначає особливості будови структури, а головне її дефектність. Як відомо, вказані фактори впливають на електронегативність ( $\chi$ ) складових елементів. Відповідно різниця їх значень для катіону ( $\chi_A$ ) і аніону ( $\chi_A$   $\chi_B$ ) визначає закономірності формування головних властивостей базових сполук. Зокрема,  $\chi_A - \chi_A$  визначає ширину забороненої зони ( $E_g$ ), температуру плавлення, рухливість носіїв заряду, міжатомну відстань тощо. Також

перехід від телуридів цинку до кадмію впливає на міцність їх хімічного зв'язку і збільшується їх постійна ґратки від  $6,101 \text{ \AA}$  ( $ZnTe$ ) до  $6,482 \text{ \AA}$  ( $CdTe$ ).

Для II-VI сполуки  $CdTe$  і  $ZnTe$  стабільною є кубічна структура ( $\beta$ ) цинкової обманки (сфалерит) Для неї характерним є наступне розташування атомів: навколо катіону розташовуються за тетраедричною будовою чотири аніони при їх найближчих (але однакових) відстанях. При моделюванні розташувань за принципом центру сфери будь-який атом (катіону чи аніону) оточує дванадцять атомів того ж різновиду. Саме так формується координаційна сфера другого порядку при відповідній відстані  $\frac{1}{2}\sqrt{2}a$  (для сфалериту). Відповідно така структура характеризується відсутністю центру симетрії, а сама структура є полярною. Тому для них характерним є наявність залежності від напрямку таких властивостей, як піро- та п'єзоелектрики, термоелектрики, електрооптичного ефекту тощо.

## 1.2. Основні методи отримання

Важливими матеріалами при виготовленні приладів електроніки різного типу постають об'ємні монокристали. Їх висока якість і відповідні до практичного використання параметри і характеристики потребують виконання відповідних технологічних умов вирощування, а саме, високих значень температури плавлення ( $T_{пл.}$ ) та парціальних тисків ( $P$ ) складових компонентів ( $X$ ). Вони визначаються за  $P$ - $T$ - $X$ -фазовими діаграмами. Відповідні технологічні процеси росту супроводжуються фазовими переходами типу газ-рідина-тверде тіло. Вони часто можуть супроводжуватися сегрегацією. Це вимагає додаткових технологічних процесів, які мають особливості.

Основними методами вирощування об'ємних кристалів залишаються вирощування з газової фази чи (та) з розплаву. При отриманні II-VI сполук використовується з розплаву використовується методом Бріджмена-Стокбаргера. За ним відбувається спрямована кристалізація при високому

тиску інертного газу (до  $10^7$  Па). За таких умов постає можливим отримання великих за розмірами кристалів (до декількох сантиметрів). При цьому, важливим в даному процесі постає врахування відмінності коефіцієнтів лінійного розширення графітового тиглю, в якому вони вирощуються, і кристалів. Їх відмінність обумовлює як істотні напруження в об'ємі кристалу, так і утворення дислокацій пр. їх високій (до  $10^4$  см<sup>-2</sup>) густині. Зазначимо, що вказаний фактор деякій мірі цей фактор менше виявляє себе (до  $10^3$  см<sup>-2</sup>) при отриманні з газової фази II-VI сполук за методом Маркова-Давидова. За ним проводиться сублімація очищеної вихідної шихти порошкоподібної сполуки *CdTe* чи *ZnTe*. Кристали отримуються за висотою ~ 15 мм та до 20 мм в діаметрі. Процес вирощування здійснюється після попередньо проведеної ретельної підготовки хімічних реагентів та основу в ізольованому від оточуючого середовища об'ємі.

Проте, високі температури при отриманні кристалів II-VI сполук обумовлюють їх неконтрольоване легування домішками з конструкційних елементів. Можливим також є процес натікання кисню з кварцу під дією високих температур, необхідних для синтезу з газової фази. Зауважимо, що навіть в невеликій кількості кисень здійснює вплив на співвідношення парціальних тисків металу та металоїду, що може порушити в такий спосіб стехіометричність складу отриманих кристалів. До того ж, низка сполук при високих температурах росту можуть зазнавати фазового переходу типу сфалерит  $\rightarrow$  в'юрцит у кристалічній ґратці. Такий перехід кристалічної структури впливає на її досконалість і впливає на процес отримання високоякісних однорідних кристалів. Також за високих температур і парціальних тисках парів компонент та нейтрального газу важливим і необхідним є дотримання особливих правил техніки безпеки.

При виготовленні приладів на основі телуридів також застосовується методом епітаксії. Цей процес передбачає орієнтоване нарощування монокристалічних шарів. Він проводиться на матеріалах, кристалічна ґратка яких за своїми параметрами близька до осаджуваних матеріалів. Проводяться

процеси осадження шарів як з газової фази з молекулярних пучків (МВЕ), так і за участю елементоорганічних сполук (MOVPE), тобто різного типу хімічних реакцій взаємодії складових речовин.

Важливим для отримання матеріалів високої якості може бути дифузія. При цьому отримуються матеріали, властивості яких суттєво різняться з базовою сполукою. Тому такий процес отримав назву дифузійні шари. Особливості їх отримання визначають властивості шарів II-VI-сполук. Вони формуються концентрацією легуючої домішки, а також її взаємодією з власними точковими дефектами (ВТД) кристалічної ґратки. Остання зазнає впливу як електронегативності матеріалів, так і співвідношення розмірів атомів дифузанта і базової речовини, а також технологічними параметрами дифузії. Такий складний набір факторів визначає процеси утворення енергетичних центрів. Вони обумовлюють формування відповідних процесів рекомбінації при випромінюванні і генерації при фоточутливості.

На даний час процеси дифузії є головним методом отримання ізовалентних шарів. Зо відповідного типу домішок і технологічних умов можуть вирощуватись шари, що мають однаковий хімічний склад (гомошари) та такі, що мають склад відмінний від матеріалу підкладки – гетерошари (ГШ). Чисельні дослідження свідчать про те, що при концентрації домішки  $\sim 0,1$  ат. % може мати місце зміна хімічного складу проте для кожної речовини це значення є досить умовним і може відрізнитися. Механізм дифузії визначається процесами за участю вакансій і по міжвузловинах. Вони взаємно пов'язані і за певних технологічних умов домінуючим є один з процесів. Головне, що механізм заміщення має дифузійний характер.

### **1.3. Властивості телуридів кадмію і цинку**

#### **1.3.1. Особливості поглинання та відбивання**

Оптичним властивостям II-VI сполуки приділяється на даний час значна увага. Нагромаджено різноманітний матеріал, який надано у різних



оглядах, монографіях та наукових статтях. Актуальність досліджень оптичного поглинання і відбування зумовлена визначенням можливостей їх практичного використання. Важливими серед них є сонячні фотоперетворювачі, лічильники  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -випромінювання, напівпровідникові лазери, фотоприймачі. У вказаних приладах електронні процеси визначаються взаємодією фотонів із електронами в кристалах. Відповідно до умов експлуатації необхідно вивчити можливі в них різноманітні енергетичні стани та визначити їх вплив на властивості матеріалів. Для їх проведення особливе значення набувають дослідження оптичних процесів, оскільки вони дозволяють проводити вибірковий аналіз взаємодії випромінювання з речовиною. Такі виміри забезпечують високу чутливість енергетичної структури матеріалів до впливу відповідних збурень, а також спрямувати дослідження на встановлення необхідних для практики властивостей.

Вказані оптичні дослідження дозволили отримати важливу інформацію про зонну структуру напівпровідника. До того ж, за оптичним поглинанням встановлено можливий розподіл енергетичних станів, які відповідають за формування властивостей. Особлива роль належить дослідженням в області енергій фотонів, що відповідають за власне поглинання. Встановлення зон-зонних та екситонних переходами дозволяє встановити власні енергетичні стани. За ними постає можливим визначити тип переходів (прямі чи непрямі), за якими отримується інформація про величину і спектральний діапазон фоточутливості.

За дослідженнями в області власного поглинання можливо встановити структуру енергетичних зон при  $k = 0$ , а також існування можливих підзон у валентній зоні, що зумовлені спін-орбітальною взаємодією  $\Delta_{so}$  чи розщепленням кристалічним полем  $\Delta_{cr}$  в залежності від конкретної структури кристалічної ґратки. Зазначимо, що величини  $\Delta_{so}$  і  $\Delta_{cr}$  корелюють з відомими теоретичними розрахунками за  $(k \cdot p)$ -методом. У цілому використовувана зонна структура добре узгоджується із експериментом.

Поглинання за участю екситонів при низьких температурах дозволили встановити значення енергій зв'язку, величини приведених мас і положення підзон валентної зони  $A$ ,  $B$  та  $C$  відповідно до кристалічної структури. Відповідно за вказаними параметрами можливо проводити контроль досконалості отриманих матеріалів при проведенні аналізу результатів відповідних оптичних досліджень. До того ж, часто визначають про низьких температурах енергію екситонного зв'язку ("рідберг" водневоподібного екситона). Як результат, можливо встановити сили осциляторів на молекулу відповідно до поглинання чи(і) випромінювання. Достовірність отриманих результатів істотно зростає при комплексному вивченні оптичних і люмінесцентних властивостей.

Досконалість отриманого матеріалу добре визначати за дослідженням поглинання світла, яке обумовлено наявністю домішкових станів, а також їх асоціатів (донорно-акцепторних пар). Порівняння із строгою теорією домішкового поглинання для водневоподібних центрів дозволяє встановити особливості, що обумовлені реальними енергетичними станами у речовині.

На даний час оптичне відбивання  $R(\hbar\omega)$  досліджено у широкій спектральній області – інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій областях, тобто  $\hbar\omega \approx 0\div 25$  еВ. За ними встановлено властивості і параметри досліджуваних матеріалів, які особливо важливі при використанні приладів, виготовлених на їх основі. До того ж, вивчалися властивості монокристалів та шарів. Поверхня останніх спеціально готувалася з метою зменшення впливу об'ємних дефектів кристалічної ґратки. При цьому також визначалися спектральні залежності показника заломлення. У подальшому за співвідношеннями Крамерса-Кроніґа проведено розрахунки базових оптичних параметрів із встановленням впливу дійсної та уявної частин діелектричної проникності.

Такий складний процес досліджень оптичного відбивання і відповідних до них розрахунків встановити зонну структуру, а також розташування головних точок в зоні Бріллюена, зокрема  $\Gamma$ ,  $X$ ,  $L$ ,  $W$ ,  $K$ ,  $S$ ,  $Z$  у випадку

кристалічної структури типу сфалерит. Визначені величини координат екстремумів зонної структури. Це сприяло встановленню дозволених оптичних переходів носіїв заряду та відповідну симетрію кристалу. Оптичні дослідження проводилися з використанням поляризованого світла. За таких умов при врахуванні двопронезаломлення більш точно встановлювалася конфігурація енергетичних зон у центрі зони Бріллюена ( $k = 0$ ), а також конфігурація валентної та зони провідності. Визначені параметри енергетичної структури валентних підзон.

### 1.3.2. Люмінесцентні властивості

Як вище вказано, часто оптичні дослідження проводилися у комплексі із люмінесцентними. Таки комплексний підхід дозволяє істотно доповнити і розширити інформацію про властивості матеріалів. До того ж, дослідження люмінесцентних властивостей дозволяє визначити рекомбінаційні процеси, що формуються як мезонними процесами, так і за участю простих центрів, утворених власними точковими чи домішковими дефектами. Вони багато в чому визначаються досконалістю матеріалів, також впливом відповідного типу легуючих речовин.

Встановлено, що у нелегованих кристалах в крайовій області саме анігіляція екситонів зумовлює значний внесок у формування випромінювання. Визначення екситонів доцільно проводити при низьких температурах (1,6÷77) за спектрами, в яких спостерігаються інтенсивні смуги випромінювання екситонів.

Вільні екситони характеризують випромінювання, яке спостерігається в області енергій фотонів, що близька до ширини забороненої зони. Це визначається кулонівською взаємодією носіїв заряду при їх відповідних енергіях зв'язку та борівському радіусі. Значення цих основних параметрів для широкозонного *CdTe* за літературними даними наведені у таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Борівський радіус ( $a_0$ ) та енергія зв'язку ( $R^*$ ) вільних екситонів для деяких прямозонних напівпровідників

Сполука	$a_0, \text{Å}$	$R^*, \text{meV}$
<i>ZnTe</i>	11,5	11,21–13
<i>CdTe</i>	12,2	10,71–11

Разом з тим, крайове випромінювання більшості матеріалів формується різного типу зв'язаними екситонами. Тому їх аналіз наведено у відомих монографіях і довідниках. Тип енергетичного стану впливає на локалізацію екситонів. Зокрема, власні точкові дефекти утворюють стани в катіонній (акцептори  $A$ ) чи аніонній (донори  $D$ ) підгратках, в тому екситони зв'язуються, утворюючи екситони ( $D^+, X$ ) та ( $A^-, X$ ), при локалізації на нейтральних донорах та акцепторах.

Варто відзначити, що в різних кристалах можуть існувати різні типи екситонів, що будуть зумовлювати формування різних за інтенсивністю смуг випромінювання. В таблиці 1.2 наведено основні складові спектрів ФЛ, що формуються за участю екситонів.

Таблиця 1.2

Основні переходи за участю екситонів в широкозонних II-VI напівпровідниках

Сполука	Ширина забороненої зони при 4,2 К ( $E_g$ ), eV	Енергія, eV	Тип екситонного переходу	$T$ , К
<i>ZnTe</i>	2,39 (S-структура)	2,381	Вільний екситон	4,2
		2,3779	Серія двоелектронних переходів, обумовлених анігіляцією екситону ( $D^0, X$ )	1,5
		2,3785		
		2,3798	( $A^0, X$ ); акцептор - $V_{Zn}$	4,2
<i>CdTe</i>	1,605 (S-структура)	2,375		
		1,5973	Вільний екситон, $n = 1$	10
		1,5938	( $D^0, X$ ); $E_d \approx 9 \text{ meV}$	10
		1,5924	( $D^+, X$ ); $E_d \approx 9 \text{ meV}$	10
		1,5892	( $A^0, X$ ); акцептор- $V_{Cd}$ ; $E_d \approx 60 \text{ meV}$	10

## 1.4. Фотоелектричні прилади

У сучасних електронних приладах важливі функціональні призначення мають різного типу фоточутливі структури. Вони отримуються як окремі пристрої (фотодіоди, сонячні елементи тощо), так і різного типу системи відображення інформації, де зазначені структури є основними. Зазначимо, широкозонні II-VI сполуки за своїми електрофізичними та оптичними властивостями і параметрами обумовлюють їх використання у широкому спектральному діапазоні. Важливим для цього є застосування сучасних технологічних процесів, які дозволяють отримувати різні за хімічним складом гетерошари зі стабільною кристалічною структурою. Тому на основі II-VI сполук актуальним є виготовлення фотоприймачів.

### 1.4.1. Фотодіоди видимого діапазону

Для виготовлення фотодіодів важливим виявився метод ізовалентного заміщення. За літературними даними вони формують умови для виготовлення цілої низки оригінальних фоточутливих структур. На особливу увагу заслуговують фотодіоди для видимого спектрального діапазону 0,38-0,82 мкм з високою виявляючою здатністю при 300 К. Головні параметри деяких з основних виготовлених приладів і пристроїв наведено у таблиці 1.3. У ній отриманий ізовалентним заміщенням гетерошар вказано першим.

Таблиця 1.3

Фотодіоди

Структури	$\Delta\lambda$ , мкм	$S_{\lambda_m}$ , А/Вт
$pZnTe-nZnSe$	0,51-0,68	0,3
$nCdTe-pZnTe$	0,56-0,83	0,4
$pCdTe-nCdS$	0,54-1,0	0,4

У приведеній таблиці використані наступні позначення:  $\Delta\lambda$  – область спектральної чутливості,  $S_{\lambda_m}$  – максимальна монохроматична чутливість. Відмітимо, що наведеним фотодіодам в режимі короткого замикання притаманний великий діапазон лінійності в процесі експлуатації і виявляюча здатність не менше за  $10^{13} \text{ В}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}$  за температури 300 К.

Також встановлено можливість отримання методом ізовалентного заміщення гетероструктур  $n\text{CdTe-pZnTe}$  і  $p\text{CdTe-nZnTe}$ , як ефективних детекторів лазерного випромінювання, особливо  $\text{He-Ne}$ -лазера, рис. 1.1.

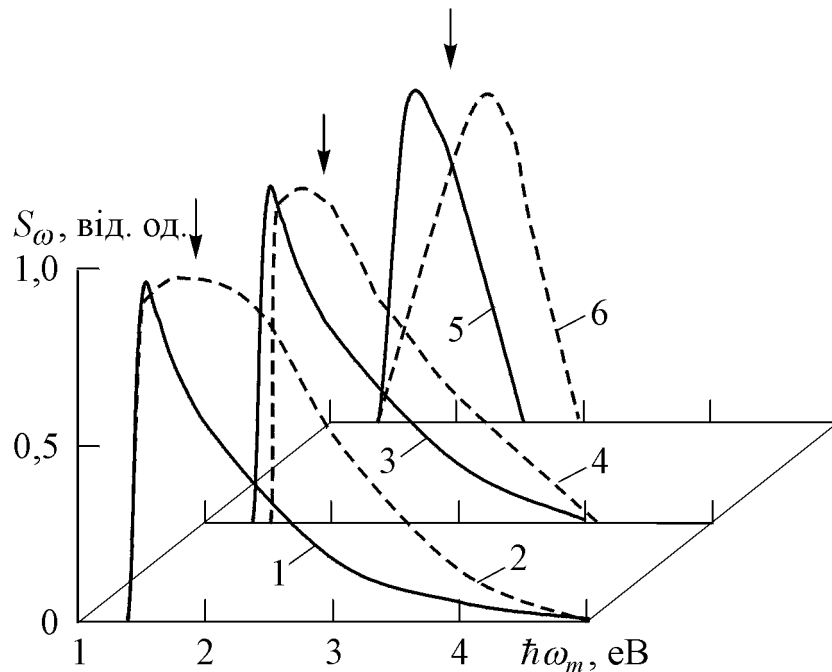


Рис. 1.1 Спектри fotocутливості структур  $\text{Au-nCdTe}$  (1),  $\text{Au-nCdTe}\langle\text{O}\rangle$  (2),  $\text{ITO-nCdTe}$  (3),  $\text{ITO-nCdTe}$  (4),  $\text{nCdTe-pZnTe}$  (5) та  $\text{pCdTe-nCdS}$  (6). Стрілками показано положення максимуму  $\hbar\omega_m=1,95$  еВ.  $T = 300$  К.

В області максимальної енергії фотонів  $\hbar\omega_m \sim 1,95$  еВ абсолютне значення їх чутливості  $S_\omega$  складає 0,2-0,4 А/В. За своєю величиною  $S_\omega$  порівняна з fotocутливістю поверхнево-бар'єрних структур типу  $\text{Au-nCdTe}$ ,  $\text{TO-nCdTe}$ ,  $\text{Au-nCdTe}\langle\text{O}\rangle$ . Відмітимо, що остання з них ( $\text{Au-nCdTe}\langle\text{O}\rangle$ ), виготовлена на основі телуриду кадмію, легованого

ізовалентною домішкою кисню. Вона вводилася при відпалі монокристалічної підкладки  $CdTe$  на повітрі. Така температурна обробка при відповідних режимах ( $T = 520$  °С,  $t = 10$  хв.) дозволяє виготовляти поверхневі шари, які забезпечують можливість отримання фотодіодів з високою чутливістю.

#### 1.4.2. Сонячні елементи

Серед таких фотоелектричних приладів важливими є сонячні елементи. Вони забезпечують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Оптимальність фотоперетворювання характеризується електрорушійною силою холостого ходу розімкненого кола  $V_{OC}$  (напряга холостого ходу), густиною струму короткого замикання (максимальний фотострум)  $I_{SC}$ ; фактор заповнення  $ff$ . Відповідні основні типи структур і їх параметри наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Сонячні елементи

Структури	$V_{OC}$ , В	$I_{SC}$ , мкА / см <sup>2</sup>	$ff$	к. к. д., %
$pCdTe-nCdS$	0,5	25	0,7	9
$nCdTe-pZnTe$	0,9	10	0,55	5
$pZnTe-nZnSe$	1,2	5	0,7	4

Значення наведених параметрів отримані при 300 К за умовою освітленості AM2. Хоча коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) розроблених фотоелементів менший за кремнієві, проте температурний коефіцієнт його зміни практично в чотири рази менший. Це особливо важливо при експлуатації фотоперетворювачів в умовах концентрованого сонячного випромінювання.

## Розділ 2 Експериментальна частина

### 2.1. Легування кристалів CdZnTe

Для проведення досліджень вирізались за допомогою дискової та струнної різок з об'ємних кристалів підкладинки типорозміром  $4 \times 4 \times 1$  мм<sup>3</sup>. При механічній обробці зразки шліфувалися алмазними порошками з послідовно спадаючим від 20 до 5 мкм розміром зерен і заключне полірування алмазною пастою типу МЗ. На кожному етапі механічної обробки проводилося ретельне відмивання пластинок у дистильованій воді з метою вилучення залишків абразиву та напівпровідникового матеріалу.

Проте, загально відомо, що приповерхневий шар таких підкладинок містить низку дефектів. Для їх вилучення к подальшому пластинки зазнавали хімічного травлення у розчині складу  $K_2Cr_2O_7:HNO_3:H_2O=2:5:12$  впродовж 15-20 с при кімнатній температурі. У подальшому після хімічної обробки проводилася фінішна ретельна відмивка пластинок у деіонізованій воді на ультразвуковій установці типу УЗДН-2Т. Вказана обробка забезпечувала дзеркальність поверхні пластин при їх візуальному спостереженні. До того ж, отриманим зразкам властива фотолюмінесценція, яка зовсім не спостерігається на пластинах після хіміко-механічної обробки. Тому подальші дослідження властивостей матеріалу, а також проведення підготовчих робіт по виготовленню фоточутливих приладів і вивченню можливостей їх практичного використання здійснювалися після вказаної обробки підкладинок.

Отримані базові підкладинки легувалися домішкою Sn при її дифузії у закритому об'ємі з парової фази. Вказаний метод має низку відомих переваг порівняно з іншими відомими способами отримання легованих шарів. Для цього підкладинка і лігатура розташовувалися у вакуумованій до  $10^{-4}$  Торр і



запаяній кварцовій ампулі. Зазначені складові розташовувалися на протилежних краях ампули. Типові температурний та часовий інтервали відпалу склали 1000-1200 К і 0,5-2 год.. Схема розташування ампули у печі із складовими вказана на рис. 2.1.

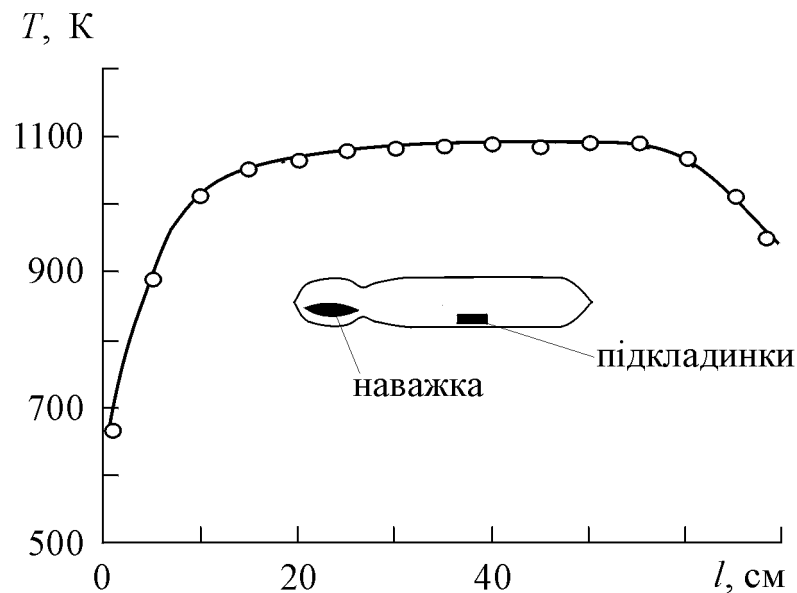


Рис. 2.1 Положення ампули та градієнт температури необхідні для отримання дифузійних шарів

Наважка Sn для проведення дифузії добиралася у її кількості, що забезпечувала створення режиму насиченості пари олова при даній температурі відпалу  $T_a$ . Оскільки висока температура може викликати неконтрольоване випаровування складових із базового кристалу то додатково завантажувалась його подрібнена бездомішкова речовина. В такий спосіб запобігалася ерозія поверхні підкладинки під час відпалу. Після проведення ізотермічного відпалу ампула виймається з печі і розташовується при кімнатній температурі для подальшого охолодження. Такий швидкий процес забезпечував процеси "загартовування" кристалів і "заморожування" дефектів. Це забезпечить можливість проведення у подальшому аналітичних розрахунків ансамблю точкових дефектів. Після охолодження ампули розкривалися, зразки вилучались і у подальшому використовувались без

додаткових хімічних обробок для створення омичних контактів та проведення вимірювань фізичних характеристик.

## 2.2. Особливості досліджень спектрів оптичного відбивання

Дослідження оптичного відбивання проводилося для діагностики властивостей отриманих зразків матеріалу на установці, блок-схема якої наведена на рис. 2.2.

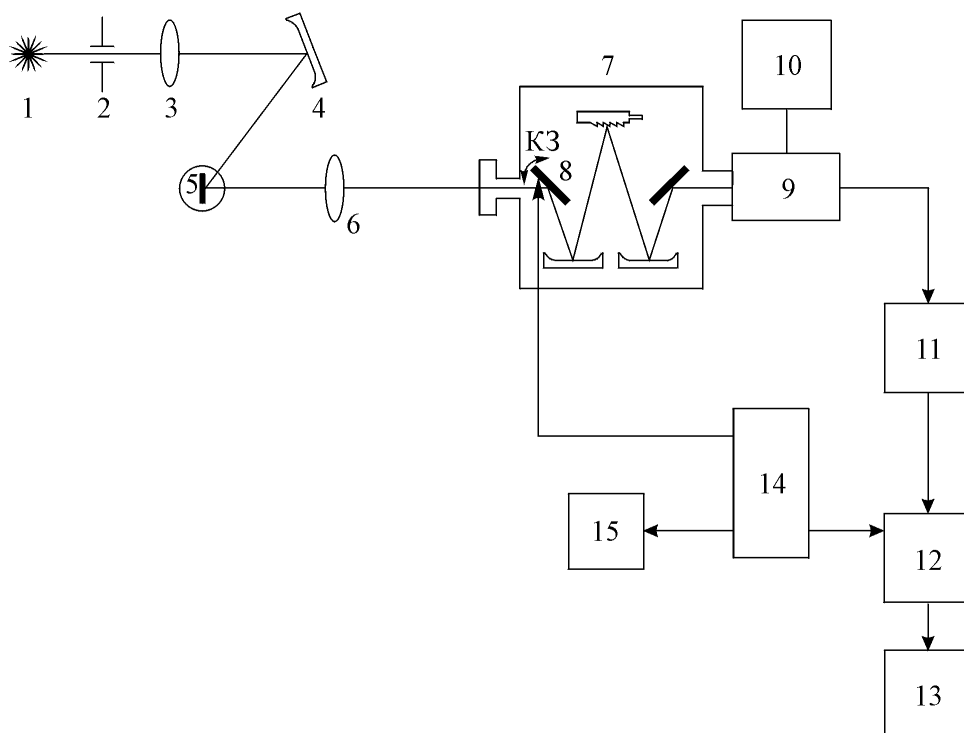


Рис. 2.2. Схематичне представлення установки для дослідження спектрального розподілу  $\lambda$ -модульованого оптичного відбивання

- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – джерело світла ELC/C;         | 9 – фотоприймач ФЕП-79;           |
| 2 – обмежувача діафрагма;         | 10 – блок живлення фотоприймача ; |
| 3, 6 – кварцові лінзи;            | 11 – селективний підсилювач У2-6; |
| 4 – обертальне увігнуте дзеркало; | 12 – синхродетектор КЗ-2;         |
| 5 – досліджуваний зразок;         | 13 – самописець КСП-2;            |
| 7 – монохроматор МДР-23;          | 14 – звуковий генератор ГЗ-112;   |
| 8 – модулятор (коливне дзеркало); | 15 – вольтметр.                   |

Дослідження проводилися при використанні світлового потоку від галогенної лампи ELC/C (1). Він характеризується монотонним гладким спектром, який діафрагмується (2) і в подальшому фокусується за допомогою кварцової лінзи (3) на увігнуте дзеркало (4). У фокусі дзеркала (4) розташовується досліджуваний зразок (5). Передбачається можливість його обертання тримачем навколо вертикальної вісі з метою фокусування відбитого променя на вхідний отвір спектрального приладу (7). Така оптична схема дозволяє отримати кут падіння в межах  $10-12^\circ$ , а це в свою чергу забезпечує практичне виключення поляризаційних ефектів в процесі відбивання. Для отримання спектральних розподілів випромінювання застосовувався спектральний прилад МДР-23 (4) в яком розташовувалась дифракційна ґратки 1200 шт/мм, що відповідає величині оберненої лінійної дисперсії  $13 \text{ \AA}/\text{мм}$ . На виході зі спектрального приладу МДР-23 світловий сигнал реєструвався фотоелектронними помножувачами ФЕП-79 з блоком живлення (10) ВС-23).

Важливим при проведенні такого типу оптичних досліджень є використання методу  $\lambda$ -модуляції. У цьому випадку збільшувалася фоточутливість та істотно підвищувалася чутливість до можливих спектральних особливостей. Їх виявлення експериментально забезпечувалося спеціальним пристроєм, розташованим після вхідної щілини всередині монохроматора. У ньому періодичні механічні коливання відбиваючого дзеркала забезпечували  $\lambda$ -модуляцію. Це реалізовувалось за допомогою котушки електромагнітів на які з генератора звукових коливань (14) відбувалась подача змінного електричного сигналу. З виходу генератора також подавався і опорний сигнал. В такий спосіб реалізовувалася стандартна систему синхронного детектування, яка становить послідовно з'єднані селективний підсилювач У2-6 (11) і сінхродетектор КЗ-2 (12). На виході фіксація вимірювального сигналу реалізовувалась з використанням самописця КСП-2 (13). У цілому для даної установки величина похибки вимірів не перевищує 3 %.

Зазначений принцип дозволяє визначати можливе тонку структуру відбивання у досліджуваних оптичних спектрах. Проведення  $\lambda$ - модуляції при малих періодичних збуреннях від модулятора дозволяє вимірювати зміни в спектрах. Вони обумовлені змінами у світловій хвилі, яка виходить з монохроматора, відповідно до наступного виразу

$$\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda \cos \Omega t \quad (2.2)$$

де  $\Omega$  являється частотою модуляції,  $\Delta\lambda$  це амплітуда або глибина модуляції. За даним рівнянням відповідний сигнал на виході фотоприймача змінюється за законом:

$$I(\lambda) = I(\lambda_o + \Delta\lambda \cos \Omega t) \quad (2.3)$$

При малих  $\Delta\lambda$  такий сигнал можна представити в наступний спосіб

$$\begin{aligned} I(\lambda) = & I(\lambda_o) + \left(\frac{dI}{d\lambda}\right)_{\lambda_o} \Delta\lambda \cos \Omega t + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \cos^2 \Omega t + \\ & + \frac{1}{6} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^3 \cos^3 \Omega t + \dots = I(\lambda_o) + \frac{1}{4} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 + \\ & + \left[ \left(\frac{dI}{d\lambda}\right)_{\lambda_o} + \frac{1}{8} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \right] \Delta\lambda \cos \Omega t + \frac{1}{4} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \cos 2\Omega t + \\ & + \frac{1}{24} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^3 \cos^3 \Omega t + \dots \end{aligned} \quad (2.4)$$

Доданки в виразі (2.4), що знаходяться з множниками  $\cos \Omega t$ ,  $\cos 2\Omega t$ ,  $\cos 3\Omega t$  характеризують першу, другу та третю похідні. Відповідно при настроюванні відповідної системи детектування на одну з частот  $\Omega$ ,  $2\Omega$  і т.д. можна визначати складові, які утворюються тільки однією з частот, виключаючи решту. Тому в такий спосіб постає можливим експериментальне дослідження першої, другої тощо похідних від вихідного спектру.

Проведений аналіз результатів оптичних досліджень дозволяє за отриманим спектрами оптичного відбивання (а також і люмінесценції) виявляти важливі особливості генераційно-рекомбінаційних процесів, що

формується внаслідок відповідних властивостей досліджуваного матеріалу. За ними постає можливим виявлення необхідних для практичного використання технологічних і конструкційних дій. Тому взаємодоповнюваність вимірів та їх точність та коректність співставлень потребують за необхідністю проводити всі виміри на одній універсальній оптичній установці. Зазначимо, що конструкція тримача зразків також дозволяє здійснювати обертання об'єктів досліджень у діапазоні кутів  $0 \div \pm 90^\circ$  з точністю  $1^\circ$  навколо вертикальної вісі, а також переміщувати його горизонтально і вертикально. Проведені  $\lambda$ -модуляційні вимірювання подібні до досліджень, які проводяться за класичними методиками.

### 2.3. Визначення випромінюючих властивостей кристалів

Оптичні спектри люмінесценції досліджувалися на установці, блок-схему якої наведено на рис. 2.3. Збудження фотолюмінесценції проводилося за допомогою азотного лазера ЛГН-21 (1). Довжина хвилі випромінювання становить  $\lambda=0,337$  мкм ( $\hbar\omega=3,68$  еВ). Випромінювання лазера фокусувалося кварцовою лінзою (2) на зразок (3). Вимірювання спектра проводилося за допомогою дифракційного монохроматора МДР-23 (5) з використанням змінних дифракційних решіток на 1200 шт/мм (обернена лінійна дисперсія  $\Delta\lambda/\Delta l = 13$  Å/мм) та 600 шт/мм ( $\Delta\lambda/\Delta l = 26$  Å/мм). Світлові потоки на виході МДР-23 вимірювалися фотоелектронним помножувачем.

Сигнал фотоприймача реєструвався системою синхродетектування і записувався на самописці КСП-2. При необхідності інтенсивності збуджуючого випромінювання змінювалася в межах чотирьох порядків при використанні набору каліброваних світлофільтрів (12).

Виміряні спектри люмінесценції будувалися в координатах: кількість фотонів у одиничному інтервалі енергій  $N_\omega$  — енергія фотона  $\hbar\omega$ . До того ж, проводилося врахування спектральної квантової чутливості установки  $A_\omega$  за відомим виразом

$$N_{\omega} = \frac{i_{\omega}}{A_{\omega}} \quad (2.5)$$

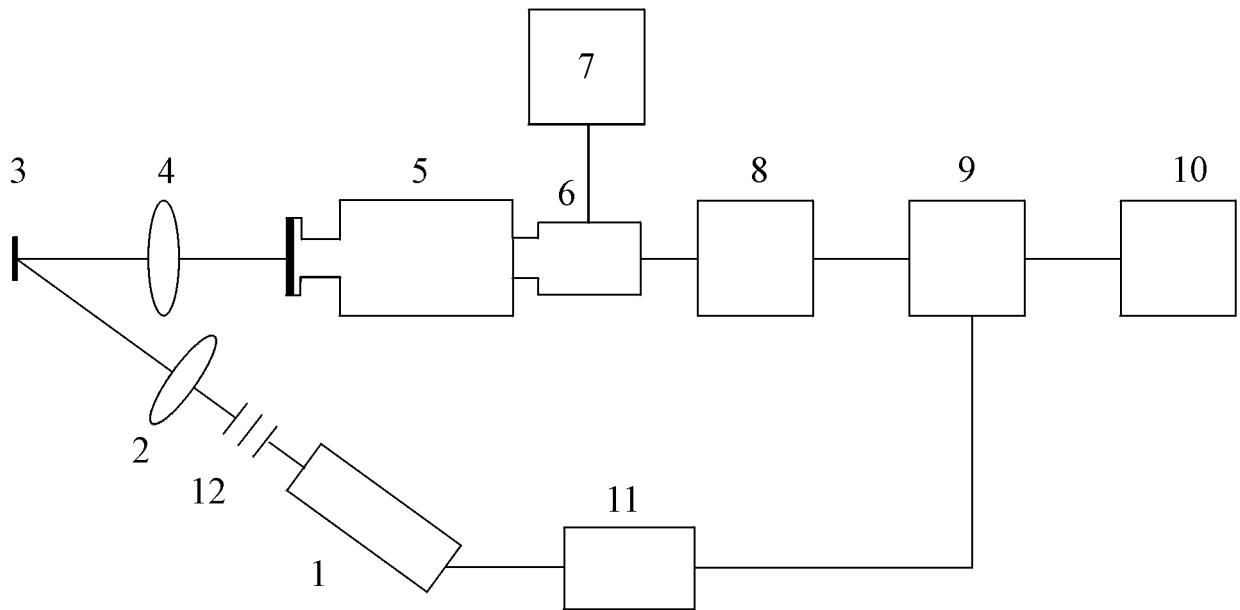


Рис. 2.3 Схема установки проведення досліджень фотолюмінесценції

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1 – імпульсний лазер;           | 8 – селективний підсилювач У2-6;        |
| 2, 4 – кварцові лінза;          | 9 – синхродетектор В9-2;                |
| 3 – об'єкт досліджень;          | 10 – самописець КСП-2;                  |
| 5 – монохроматор МДР-23;        | 11 – блок живлення лазера;              |
| 6 – фотоприймач;                | 12 – набір послаблюючих світлофільтрів. |
| 7 – блок живлення фотоприймача; |   |

У наведеному виразі (2.5)  $i_{\omega}$  являється фотовідгуком фотоприймача за відповідної до вимірів енергії фотонів  $A_{\omega}$  (eВ). Визначення чутливості  $A_{\omega}$  забезпечувалось використанням паспортизованої лампи СИ-8-200 (вторинний еталон) для якої відома кольорова температура, а розрахунок – відомої формули Планка. Проведення градуювання відбувалось за однакових умов вимірювання спектрів люмінесценції, тобто розмірах щілин спектрального приладу та напрузі на фотопомножувачі. Саме використання спеціальної клиноподібної щілини забезпечило таку можливість, оскільки ослаблювала інтенсивність еталонної лампи без зміни її спектрального розподілу.

## 2.4. Результати досліджень оптичних властивостей $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$

Дослідження оптичних властивостей є одним із фундаментальних методів діагностики можливостей практичного використання матеріалів. Серед них на особливого значення набуває метод оптичного відбивання. Такий класичний неруйнівний метод постає необхідним для встановлення як досконалості кристалічної структури, так і особливостей утвореного розподілу енергетичних станів.

Досліджувався вплив амфотерної домішки олова  $Sn$  на властивості кристалів твердих розчинів телуридів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . За результатами проведених вимірів у спектрах оптичного відбивання виявлено два головних максимуми, рис.2.4.

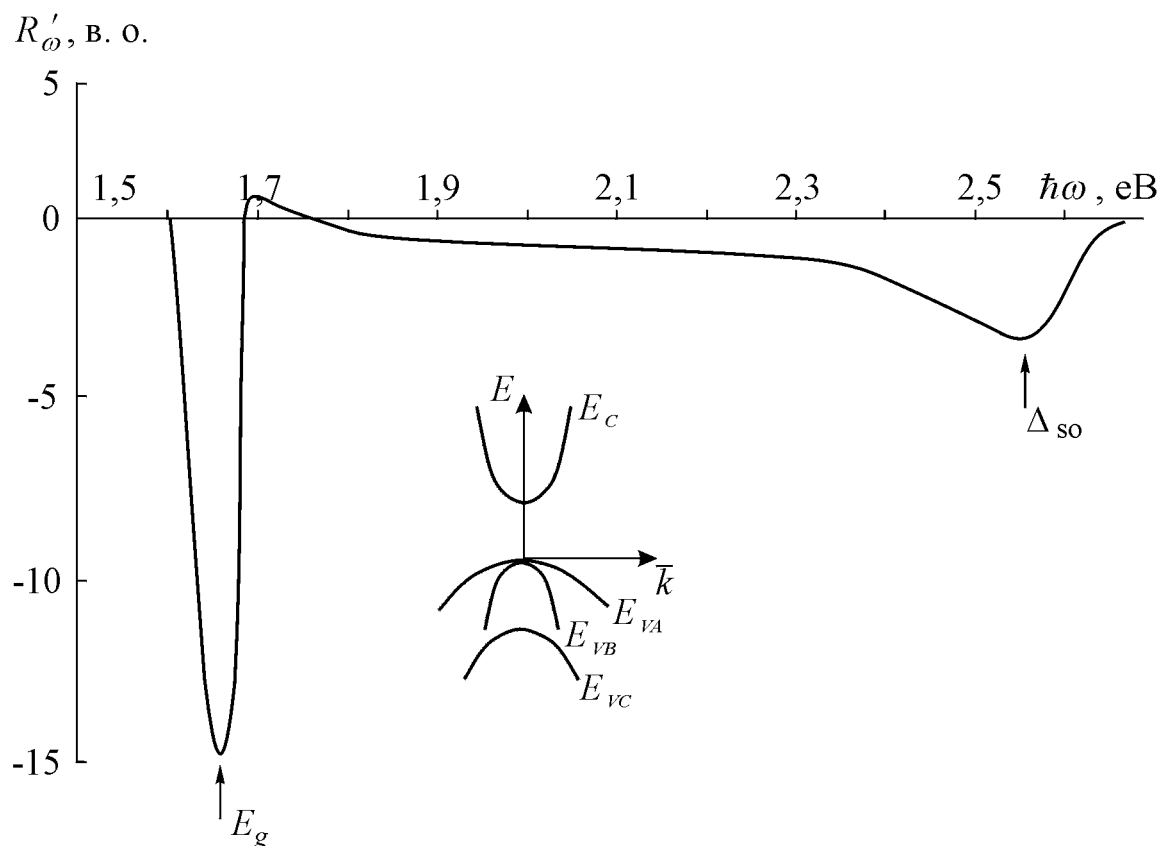


Рис. 2.4. Спектри  $\lambda$ -модульованого оптичного відбивання твердого розчину  $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ . На вставці наведено енергетичну структуру в центрі зони Брюллієна.  $T=300$  К.

Зазначимо, що характер спектрального розподілу інтенсивності відбитого оптичного випромінювання визначається методом  $\lambda$ -модуляції. Отримується типова для даної методики диференціальна крива. Її максимуми визначаються оптичними переходами вільних носіїв заряду за участю відповідних енергетичних станів. Головний максимум відповідає міжзонним переходам і його енергетичне положення відповідає енергії фотонів  $\hbar\omega = 1,65$  еВ. Зазначимо, що легування домішкою  $Sn$  за встановлених технологічних умов не впливає на положення максимуму. Оскільки він формується оптичними переходами через заборонену зону напівпровідник, то отримується зазначена величина ширини забороненої зони  $E_g = 1,65$  еВ.

Для нелегованих кристалів базового телуриду кадмію  $CdTe$  встановлене за даною методикою значення ширини забороненої зони становить  $E_g = 1,50$  еВ. Відповідно за встановленими параметрами можна констатувати, що у випадку розчинів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  величина забороненої зони збільшується на відповідну величину. Як відомо, при утворенні твердих розчинів базовими кристалами  $CdTe$  і  $ZnTe$  ( $E_g = 2,28$  еВ) величина забороненої зони змінюється лінійно. Вказана залежність наведена на рис. 2.5. За наведеною на рис 2.5 залежністю  $E_g \sim f(x)$  можливо визначити склад досліджуваного кристалу твердого розчину. Він становить  $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ , тобто вміст компоненти  $Zn$  у базовому  $CdTe$  відповідає  $x=0,2$ .

Разом з головним максимумом при енергії фотонів  $\hbar\omega = 2,55$  еВ спостерігається ще один важливий екстремум. Різниця енергій  $2,55-1,65$  еВ становить  $0,90$  еВ. Отримане значення добре узгоджується з величиною енергії, відщепленої валентної підзони. Вона формується внаслідок спіно-орбітальної взаємодії  $\Delta_{SO}$ . Для досліджуваних матеріалів такий енергетичних проміжок є важливою характеристикою зонної структури. У даному випадку вона відповідає кубічній модифікації кристалічної ґрати.



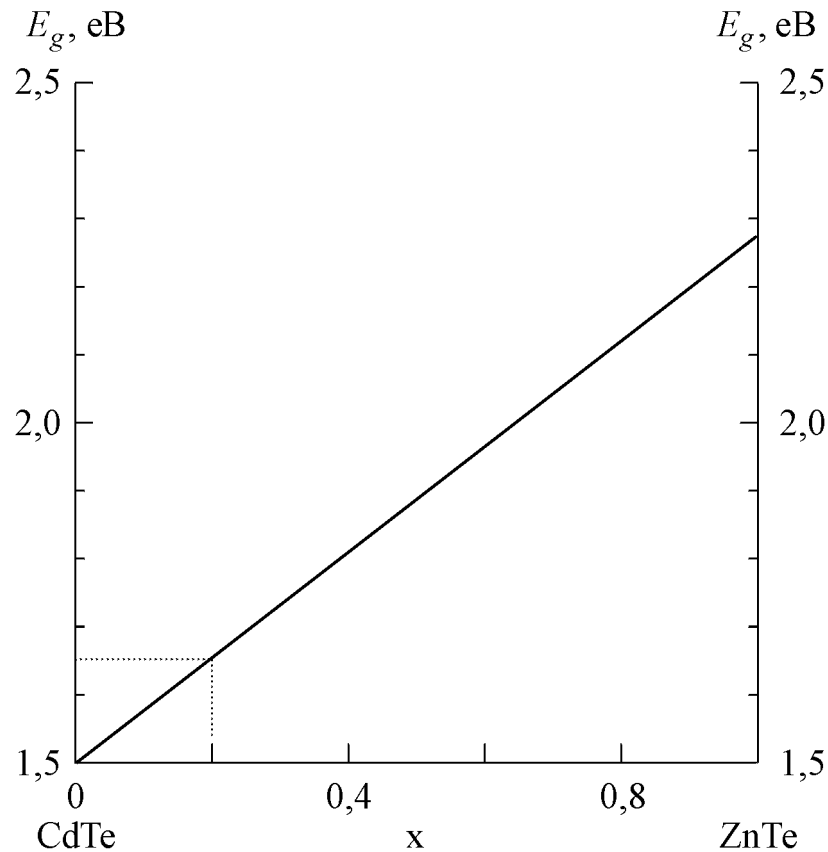


Рис. 2.5. Залежність ширини забороненої зони твердих розчинів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$

Відповідно, дослідження  $\lambda$ -модульованого оптичного відбивання дозволили встановити ширину забороненої зони  $E_g=1,65$  eВ кристалів твердого розчину  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  і за його значенням визначити його склад  $x=0,2$ . Другий максимум при  $\hbar\omega = 2,55$  eВ визначається оптичними переходами за участю підзони, відщепленої внаслідок спін-орбітальної взаємодії  $\Delta_{SO}$ . Її величина узгоджується з  $\Delta_{SO} = 0,90$  eВ кубічних структур  $CdTe$  і  $ZnTe$ . Зазначимо, що інтенсивність оптичних переходів за участю відщепленої вілентної підзони є достатньо великою, що вказує на високу структурну досконалість досліджуваного  $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ .

Достатньо висока якість досліджуваних твердих розчинів  $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$  і важливе значення для них легуючої домішки  $Sn$  впливає (і підтверджується) дослідженнями фотолюмінесценції. Зазначимо, що для нелегованих матеріалів люмінесценція при опроміненні випромінюванням лазера ЛГН-21 ( $\lambda=0,337$  мкм;  $\hbar\omega=3,68$  eВ) не спостерігається. Проте, після легування  $Sn$  в

області енергій фотонів, близьких до величини ширини забороненої зони  $E_g=1,65$  eV, при дослідженнях за вказаною у п 2.4 методикою спостерігається достатньо інтенсивна фотолюмінесценція (ФЛ). Спектр випромінювання наведено на рис.2.6.

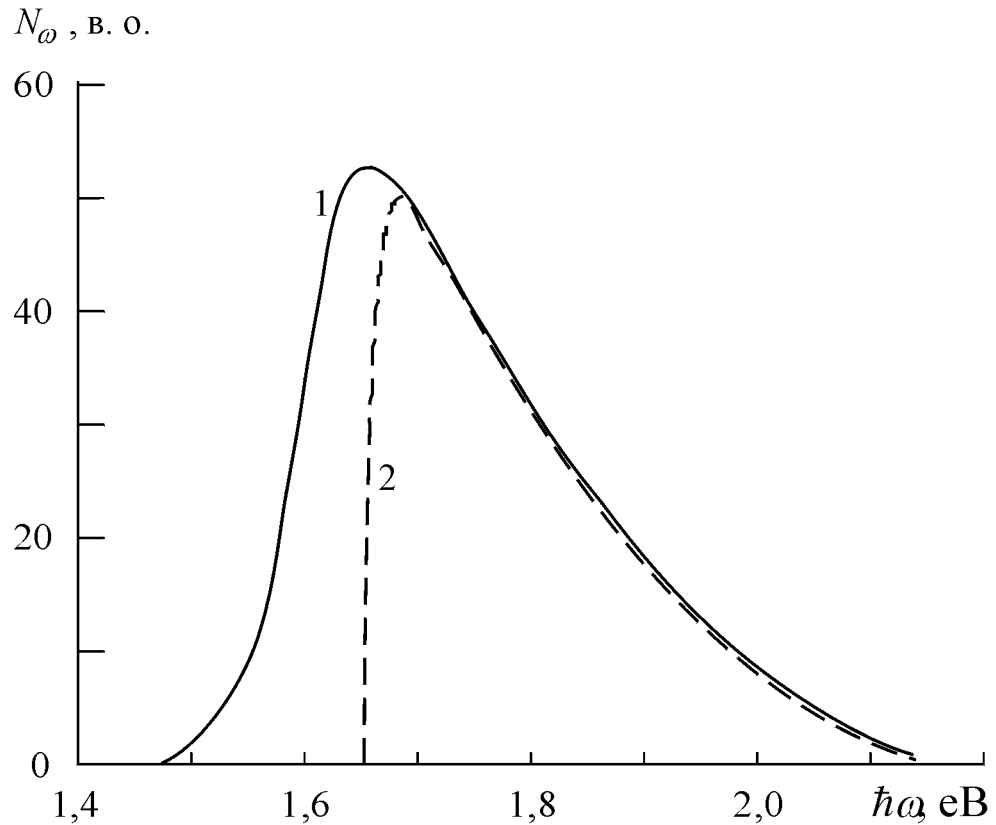


Рис. 2.6. Спектр фотолюмінесценції шарів  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$  (1) і розрахований за виразом (2.6) спектр міжзонної рекомбінації (2).

Для нього характерні наступні головні властивості:

- 1) припадає на діапазон енергій квантів  $\hbar\omega \geq E_g$ ;
  - 2) положення максимуму  $\hbar\omega_m$  не залежить його від інтенсивності опромінення лазером, що характеризується параметром рівень збудження  $L$ ;
- Вони свідчать про зон-зонну випромінювальну рекомбінацію.

За отриманим значенням  $E_g=1,65$  eV для досліджуваного  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$  проведено теоретичні розрахунки відповідно до відомого виразу для міжзонної рекомбінації

$$N_{\omega} \sim (\hbar\omega)^2 \sqrt{\hbar\omega - E_g} \exp\left[-\frac{\hbar\omega - E_g}{kT}\right] \quad (2.6)$$

де  $k$ - стала Больцмана,  $T$ - температура ( $T=300\text{K}$ ). Розрахунки виявили спектр, який добре корелює із експериментальним спектром ФЛ в області енергій квантів  $\hbar\omega \geq E_g$ .

Разом із розглянутою смугою у крайовій області ФЛ  $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}:\text{Sn}$  також спостерігається додаткове випромінювання в області енергій фононів  $\hbar\omega_m < E_g$ . Інтерпретація можливої природи випромінювання вимагає спеціальних додаткових досліджень. Зважаючи на амфотерний характер легуючої домішки  $\text{Sn}$  вони можуть багато в чому подібні до впливу ізовалентної домішки  $\text{Mg}$  на властивості кристалів  $\text{CdTe}$ .

## 2.5. Фотодетектори на основі $\text{CdZnTe}:\text{Sn}$

На даний час напівпровідникові сполуки нітридів є важливим матеріалом для виготовлення різного типу детекторів. Серед них особлива важливість для енергетики є сонячні і детектори іонізуючого випромінювання. Для них випробовуються низка бінарних сполук і твердих розчинів телуридів  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ . Тому актуальним є можливостей практичного використання саме  $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}$ , як матеріалу із незначним вмістом нових катіонів II-групи. Також необхідно визначитися із впливом домішок, а особливо амфотерних і їх впливу на властивості.

У випадку телуриду кадмію легування оловом визначає найбільш суттєву особливість отриманих дифузійних шарів. Для них властиве істотне збільшення питомого опору матеріалу, який може досягати  $10^9$ - $10^{11}$  Ом·см при 300 К. При цьому варто також відзначити, що на електропровідність шарів  $\text{CdTe}:\text{Sn}$  практично не впливає склад та концентрація точкових власних і домішкових дефектів у базовій підкладці. Отримані результати вказують на те, що набуття наполовину ізолюючого стану у телуриді кадмію

обумовлено саме домішкою олова, а не можливим утворенням у CdTe в результаті відпалу любого типу інших дефектів.

Дослідження вказаного матеріалу свідчать про утворення домішковим атомом Sn глибоких енергетичних рівнів. До того ж, вони можуть викликати поблизу домішки спотворення кристалічної ґратки. Саме цим пояснюється результат відсутності крайової люмінесценції в утворених шарах CdTe:Sn. Навіть при низьких температурах 77 К у діапазоні енергій фотонів 0,6-1,6 еВ не спостерігається випромінювання.

Зазначимо, що наведені вище результати досліджень впливу легування Sn на люмінесценцію твердого розчину  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  свідчать про формування крайової люмінесценції. Вона істотно (на декілька порядків) менша за інтенсивність випромінювання телуриду кадмію, легованого ізовалентною домішкою Mg. Разом з цим, такий результат є важливим для подальшого пошуку можливості отримання фотодетекторів на основі  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}:\text{Sn}$ . Базовий матеріал  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  після дифузії амфотерної домішки характеризується питомим опором який становить  $10^4\text{-}10^5$  Ом·см. Омичним контактом до нього слугував класичний метал In. Він вплавлявся у кристали після відповідної обробки поверхні, проведеної безпосередньо перед нанесенням In. Процес його вплавлення проводився у вакуумній установці ВУП-4К за широко використовуваною методикою. Типову виміряну вольт-амперну характеристику наведено на рис. 2.7.

Зазначимо, що характерною особливістю вольт-амперних характеристик (ВАХ) досліджуваних сполук для всіх отриманих омичних контактів характеризуються як лінійністю, так і симетричністю залежності  $U-I$  в досить широкому діапазоні зміни напруг  $U$ , струмів  $I$  та температур  $T$ .

Виготовлена пластина  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$ , легована домішкою Sn, після нанесення омичних контактів In на краях досліджувалася з метою встановлення фоточутливості. Такий режим відповідає використанню конструкції у режимі фоторезистора.

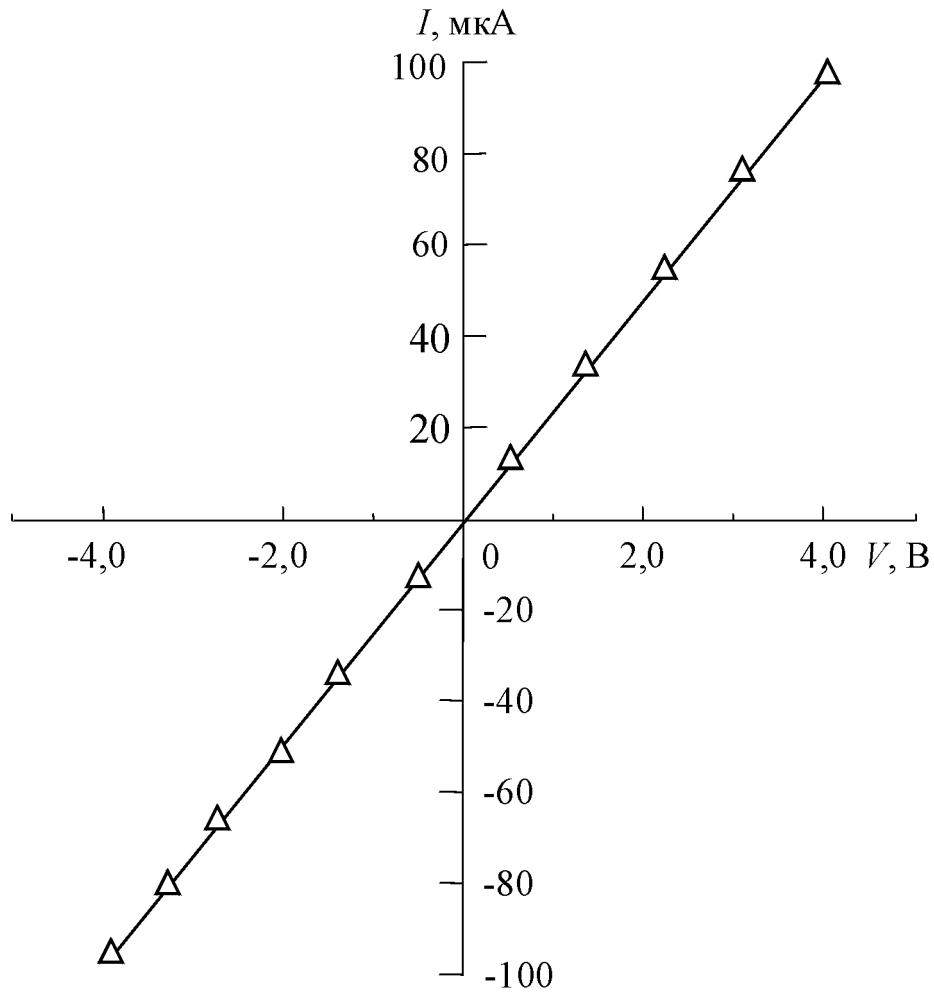


Рис.2.7. Вольт-амперна характеристика контакта  $\text{In-Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te:Sn}$ .  $T=300\text{K}$ .

Спектральна залежність фоточутливості  $S_\omega$  характеризується широким діапазоном енергій квантів, що реєструються, рис. 2.8. Для нього характерним є декілька областей відповідно до фізичних процесів її формування. Спостерігається стрімке збільшення фотоструму в області енергій фотонів близьких до величини  $E_g$ . При енергіях квантів відповідних до  $\hbar\omega \approx E_g$  спостерігається максимальна фоточутливість, яка визначається власною фотопровідністю. Вона визначається процесами при генерації фотоносіїв.

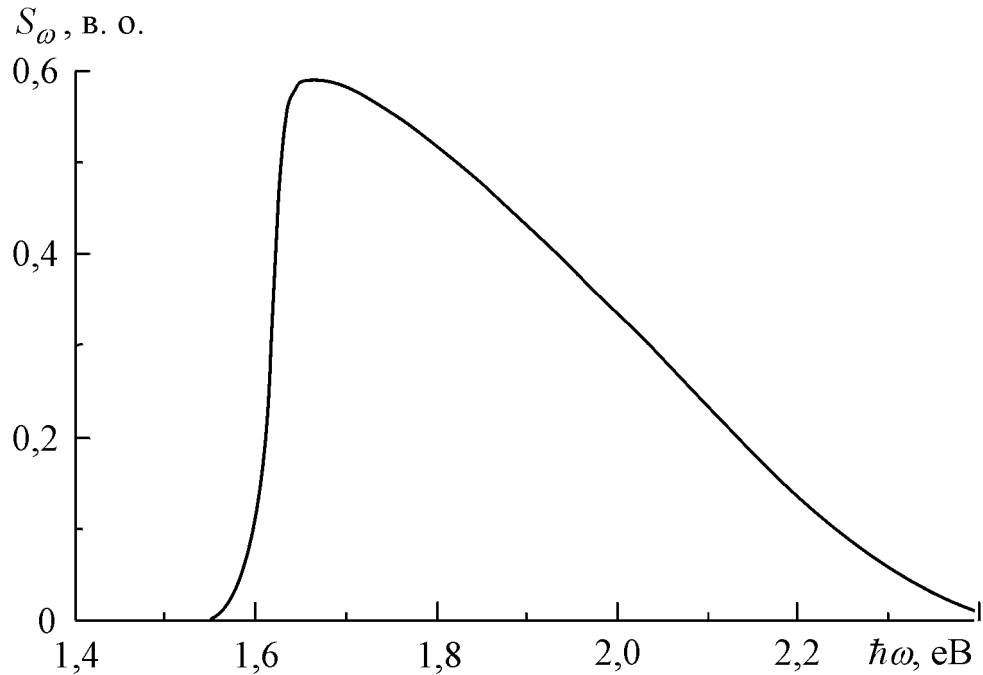


Рис. 2.8 Спектри fotocутливості фотодетекторів  $\text{In-Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te:Sn}$   $T=300\text{ K}$ .

Відомо, що при освітленні напівпровідника відбувається утворення електронно-діркових пар. Збільшення провідності при цьому зростає на величину

$$\Delta\sigma = q(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) \quad (2.7)$$

де  $q$  – заряд;  $\mu_n$  і  $\mu_p$  – рухливості електронів і дірок відповідно;  $\Delta n$  і  $\Delta p$  – надлишкова концентрація електронів і дірок. Збільшення провідності отримала назву фотопровідність.

Концентрація генерованих світлом нерівноважних носіїв визначається як

$$\Delta n = \alpha \beta \Phi \tau_{n \text{ еф}} \quad (2.8)$$

де  $\Phi$  – інтенсивність світла;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання;  $\tau_{n \text{ еф}}$  і  $\tau_{p \text{ еф}}$  – ефективні часи життя електронів і дірок;  $\beta$  – квантовий вихід. Останній параметр характеризує, що утворюються одним квантом. Відповідно кількість електронно-діркових пар при фотопровідності

$$\Delta\sigma = q\alpha\beta\Phi(\mu_n \tau_{n \text{ еф}} + \mu_p \tau_{p \text{ еф}}) \quad (2.9)$$

Проведений аналіз процесів при фотогенерації носіїв заряду (електронів) відповідає їх переходу із зони провідності у валентну зону при енергіях квантів  $\hbar\omega \sim E_g$ . Разом з тим, при  $\hbar\omega < E_g$  також спостерігається незначна фотопровідність. Швидше за все вона відбувається за участю теплових коливань атомів кристалічної ґратки. Вони обумовлюють флуктуацію енергії електронів.

Зменшення інтенсивності фотоструму в області енергій фотонів  $\hbar\omega$  більших за величину забороненої зони  $E_g$  обумовлене зменшенням часу життя носіїв заряду з ростом коефіцієнта поглинання. Внаслідок цього швидкість рекомбінації неосновних носіїв заряду на поверхні зазвичай більше ніж в об'ємі. Відповідно при зростанні коефіцієнта поглинання  $\alpha$  зі збільшенням  $\hbar\omega$  все більша частка випромінювання поглинається біля поверхні. Оскільки генерація носіїв відбувається ближче до поверхні, то частка об'ємної рекомбінації зменшується. При цьому внесок поверхневої рекомбінації збільшується. Зазначений перерозподіл обумовлює зменшення ефективного часу  $\tau_{\text{еф}}$  і відповідне послаблення фотопровідності.

У цілому фоточутливість фотодетекторів  $\text{In-Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te: Sn}$  є незначною порівняно із відповідною для  $\text{CdTe:Ca}$  – діодів. У останніх вона формується процесами за участю ізовалентної домішки кальцію.

## Висновки

1. Розроблено режими легування кристалів CdZnTe амфотерною домішкою Sn методом дифузії у замкнутому об'ємі. Виготовлено омичні контакти In і отримано структуру In–Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te: Sn.

2. Досліджено оптичне відбивання Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te: Sn і визначено його ширину забороненої зони  $E_g = 1,65$  еВ. Визначено характер межзонних переходів і встановлено їх відповідність кубічній модифікації кристалічної ґратки. Показано, що відщеплення валентної підзони відбувається внаслідок спин-орбітальної взаємодії  $\Delta_{SO} = 0,90$  еВ.

3. Встановлено, що легування амфотерною домішкою Sn кристалів Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te визначає формування фотолюмінесценції в спектральній області краєвого поглинання. Незначне за інтенсивністю випромінювання формується домінуючою міжзонною рекомбінацією вільних носіїв заряду.

4. Показано, що вплавлення у кристали Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te: Sn у вакуумній установці ВУП-4К металічного In забезпечує утворення омичного контакту. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) всіх отриманих омичних контактів на характеризуються лінійністю і симетричністю залежності  $U-I$  у широкому діапазоні зміни напруг  $U$ , струму  $I$ .

5. Визначено умови виготовлення і проведено формування фотодетекторів на основі In–Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te: Sn. Опановано режими і створено надійні омичні In контакти, що дозволяє використовувати кристали Cd<sub>0,8</sub>Zn<sub>0,2</sub>Te: Sn у класичному режимі роботи фоторезистора. Фоточутливість  $S_\omega$  детекторів обумовлена генерацією електронно-діркових пар внаслідок освітлення напівпровідника. Проведено аналіз процесів, що визначають спектральну область фоточутливості на її різних ділянках.