

**Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича**

Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

Основні механізми струмопереносу у фоточутливих анізотипних гетеропереходах $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ /p-CdTe

Дипломна робота

Рівень вищої освіти – бакалаврський

Виконав: студент 4 курсу,
групи 433ск,
спеціальність 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Гальчук С.В.

Керівник: Ілащук М.І.

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

від „____” _____ 2021 р.

зав. кафедри _____ доц. Майструк Е.В.

Чернівці 2021

Анотація

Виготовлено фоточутливі анізотипні гетеропереходи $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}/p\text{-CdTe}$ нанесенням тонкої плівки $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ на свіжосколоту поверхню кристалічного CdTe методом високочастотного реактивного магнетронного розпилювання металеві кадмій цинкової мішені.

Аналіз вольт-фарадних характеристик ($f=10\text{-}30\text{кГц}$) досліджуваних гетероструктур проведений з урахуванням послідовного опору; визначені їх електричні параметри (висота потенціального бар'єра $q\phi_k=0,65\text{еВ}$; товщина області просторового заряду $d\approx 3,5\text{ мкм}$; концентрація електрично активної акцепторної домішки у цій області $N_A=3.2\cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$).

Основні механізми проходження носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр в гетеропереходах $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ при прямих та зворотних напругах пояснені в рамках генераційно-рекомбінаційної моделі.

Виготовлені гетеропереходи $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ є фоточутливими і можуть працювати у фотодіодному режимі в видимій області спектра

Дипломна робота містить: сторінок - 49 , рисунків – 23 , таблиць – 6 , посилання на літературу – 13.

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. Теоретична частина.....	5
1.1. Основні фізико-хімічні властивості прозорих провідних оксидів ZnO, CdO та $Cd_xZn_{1-x}O$	5
1.1.1. Кристалічна структура оксидів цинку та кадмію	5
1.1.2. Електричні властивості тонких плівок ZnO та CdO, отриманих методом високочастотного магнетронного розпилення.....	7
1.1.3. Оптичні властивості тонких плівок ZnO, CdO та $Cd_xZn_{1-x}O$	10
1.2. Енергетична діаграма та вплив термообробки на електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів ZnO/CdTe.....	15
Розділ 2. Експериментальна частина.....	18
2.1. Методика виготовлення анізотипних гетеропереходів $n-Cd_xZn_{1-x}O/p-CdTe$	18
2.2. Методика створення омичних контактів до плівки CdZnO та базового матеріалу $p-CdTe$	22
2.3. Методики вимірювання електричних та фотоелектричних характеристик анізотипних гетеропереходів $n-Cd_xZn_{1-x}O/p-CdTe$	23
2.4. Експериментальні результати та їх обговорення.....	27
Висновки.....	35
Список літератури.....	36
ДОДАТОК. Техніка безпеки і охорона праці.....	38
1. Небезпека ураження електричним струмом.....	38
2. Робота з електровимірювальними приладами та високою напругою.....	41
3. Небезпека електромагнітних випромінювань оптичного діапазону.....	43
4. Заходи щодо пожежної безпеки.....	48

Вступ

Властивості телуриду кадмію (CdTe) такі як: ширина забороненої зони $E_g = 1.5$ eV, великий коефіцієнт оптичного поглинання $\alpha \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$, і можливість отримання кристалів *p*- і *n*-типу провідності із значенням низького питомого опору забезпечують використання його для створення високоефективних сонячних елементів [1]. Особливу зацікавленість викликає практичне використання при створенні гетеропереходів на основі CdTe широкозонного компонента (вікна) оксидів металів, а саме ZnO та CdO.

Оксид цинку є напівпровідником з досить широкою забороненою зоною ($E_g = 3.3$ eV) при кімнатній температурі. ZnO є прозорим для більшої частини сонячного спектру [2,3]. Крім цього, для плівок ZnO характерними є малі опори. Завдяки перерахованим властивостям тонкоплівковий оксид цинку використовується як широкозонне вікно в гетеропереходах з малою втратою потужності.

Оксид кадмію (CdO) також є перспективним матеріалом для використання в фотоелектричній промисловості. Через свою високу електропровідність (навіть без легування), високу оптичну прозорість в спектральній області сонячного випромінювання, показник заломлення і хороший збіг з кристалічною ґраткою CdTe, він може бути використаний як заміник CdS в гетероструктурі CdS/CdTe.

Створення твердих розчинів на основі різних оксидів металів, дозволяє контролювано змінювати фізичні властивості і ширину забороненої зони тонких плівок, що актуально при конструюванні фотоелектричних приладів для підвищення ефективності роботи в різних спектральних діапазонах. В зв'язку з цим увага науковців приділяється дослідженню і створенню тонких плівок твердих розчинів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ [4,5].

Метою даної роботи було створення анізотипних гетеропереходів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ та дослідження їх електричних і фотоелектричних властивостей.

Розділ 1. Теоретична частина

1.1. Основні фізико-хімічні властивості прозорих провідних оксидів ZnO , CdO та $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$

1.1.1. Кристалічна структура оксидів цинку та кадмію

Важливим технологічним завданням сучасного напівпровідникового матеріалознавства є одержання якісних тонких плівок з високим ступенем повторюваності електрофізичних параметрів. Від досконалості технології нанесення тонкоплівкових шарів у значній мірі залежать надійність і якість приладів, виготовлених на їх основі.

Оксид цинку у рівноважних умовах кристалізується у гексагональній структурі вюрциту (Рис.1.1), з постійними ґратки $a = 0,3250$ нм і також $c = 0,5205$ нм.

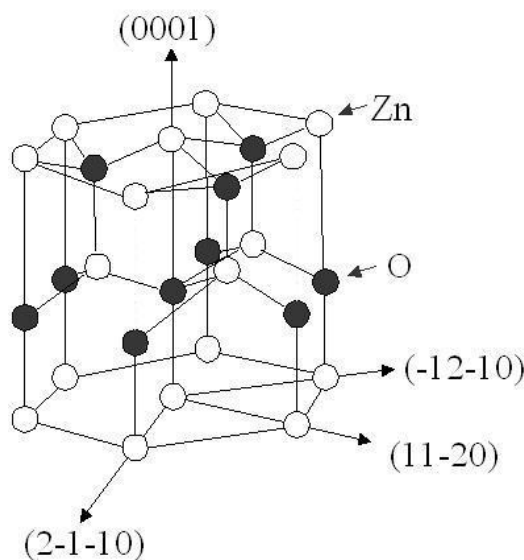


Рис. 1.1 – Кристалічна структура ZnO

Якість плівок визначається їх структурними характеристиками (епітаксійний характер, полікристалічність, текстурованість), досконалістю кристалічної структури (наявністю внутрішніх напружень, відхиленням постійних кристалічної ґратки від стандартних, концентрацією власних точкових та структурних дефектів), відхиленням від стехіометрії, концентрацією домішок, однорідністю плівки по товщині та на площині.

Таблиця 1

Фізичні характеристики оксиду цинку

Фізичний параметр	ZnO
Молекулярна вага	81,388
Питома вага, г/см ³	5,642
Просторова група, тип ґратки	Pb ₃ mc (Вюрцит)
Період ґратки, Å	a=3,249, c=5,204
Температура плавлення, К	2250
Ширина забороненої зони E_g , еВ (КТ)	3,37
ТК E_g , еВ/К	$-8 \cdot 10^{-4}$
Енергія зв'язка екситона, меВ	60
Ефективна маса електрона m^*/m_e	0,24
Холлівська рухливість електронів, см ² /В·с	120
Статична діелектрична стала	7,40 для E _⊥ c 8,49 для E//c
Оптична діелектрична стала	3,68 для E _⊥ c 3,72 для E//c

Оксид кадмію CdO кристалізується у кубічній структурі NaCl. Період ґратки становить $a = 4,69 \text{ Å}$.

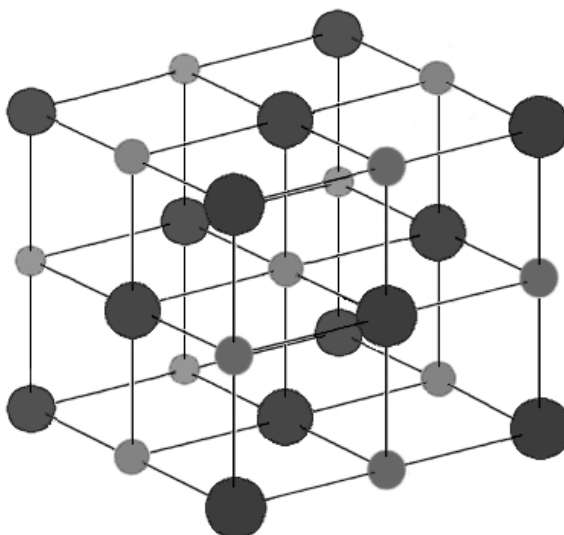


Рис.1.2 – Кристалічна структура оксиду кадмію

1.1.2.Електричні властивості тонких плівок ZnO та CdO, отриманих методом високочастотного магнетронного розпилення

Оксиди цинку та кадмію, а також оксид індію та оксид індію, легований оловом (ІТО) належать до найбільш використовуваних в електроніці прозорих провідних оксидних матеріалів. Електричні параметри цих матеріалів приведені у таблиці 2 .

Таблиця 2 .

Електричні характеристики прозорих провідних оксидів. Значення провідності взяті для випадку полікристалічних плівок

Матеріал	Ширина забороненої зони, eV	Питома електропровідність, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Концентрація електронів, см^{-3}	Рухливість електронів, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
In_2O_3	3,75	10000	$> 10^{21}$	35
ZnO	3,35	8000	$> 10^{21}$	20
SnO_2	3,6	50000	$> 10^{20}$	15

Необхідно відмітити, що всі матеріали, приведені у таблиці, мають *n*-тип провідності і є сильно виродженими провідниками, тобто концентрація електронів у них істотно перевищує ефективну густину станів у зоні провідності.

Плівки ZnO та CdO, отримані методом високочастотного магнетронного розпилення, демонстрували хорошу електропровідність, особливо високою електропровідністю характеризувалися тонкі плівки CdO зі значною концентрацією вакансій кисню [6]. Електропровідність зростає через точкові дефекти, що виникають внаслідок центрів, пов'язаних з нестачею кисню. Вакансії кисню генерують надлишкові носії заряду в плівці, що сприяє збільшенню концентрації електронів, і, відповідно, зростанню електропровідності плівки.

Подібним чином у випадку ZnO також ці дефекти утворюють надлишкові носії заряду і підвищують електропровідність, але при дуже великій кількості вакансій кисню структурна досконалість плівок погіршується, що призводить до зменшення рухливості носіїв заряду. При цьому, ефективна електропровідність плівок ZnO та CdO зменшується (рис.1.3).

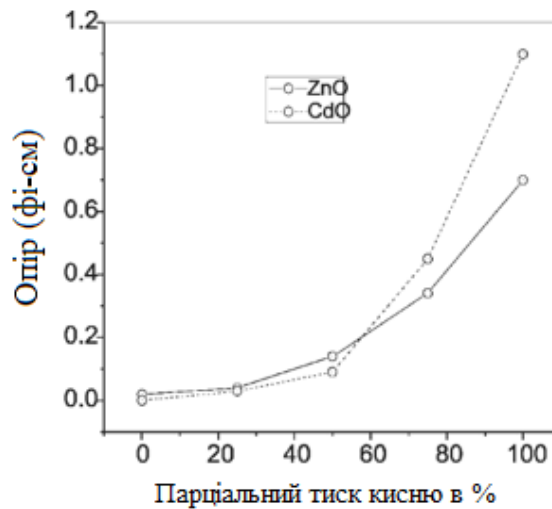


Рис.1.3 – Залежність значення опору тонких плівок ZnO та CdO від тиску парів кисню у вакуумній камері

Встановлено залежності питомого опору плівок оксиду цинку від вмісту кисню в суміші газів Ar / O_2 (Рис.1.4) [7]. При збільшенні вмісту кисню у суміші газів Ar / O_2 питомий опір спочатку зменшується і досягає мінімуму $35\text{-}40\text{ Ом}\cdot\text{м}$ при вмісті кисню $10\text{-}30\%$, а потім різко збільшується до $10^6\text{ Ом}\cdot\text{м}$ при вмісті кисню $40\text{-}50\%$. При подальшому збільшенні вмісту кисню опір збільшується незначно, до $6 \cdot 10^6\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Зміна провідності плівок оксида цинку пов'язана зі зміною концентрації кисневих вакансій у плівці. При розпилюванні мішені оксиду цинку в атмосфері Ar з низьким вмістом кисню відбувається часткове відновлення оксиду цинку і в плівках спостерігається нестача кисню. Це сприяє збільшенню електричної провідності нанесених плівок.

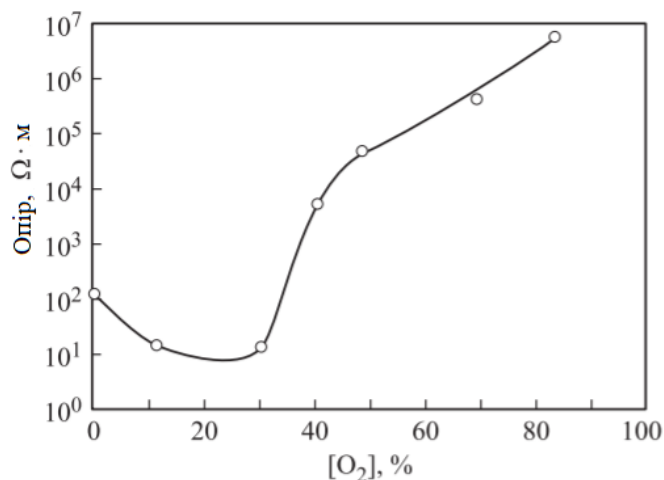


Рис. 1.4 – Залежність питомої електричного опору плівок оксиду цинку від вмісту кисню в

Подальший відпал плівок на повітрі і в атмосфері O₂ приводив до різкого збільшення питомого опору нанесених плівок. Питомий опір відпалених плівок незалежно від режимів нанесення зростає і досягає 10⁶ Ом · м.

Залежність в питомого опору плівок CdO від парціального тиску кисню P_{Cd} у вакуумній камері було детально досліджено у роботі [6]. Як видно з таблиці 3, питомий опір плівок ρ істотно залежить від P_{Cd} у вакуумній камері. Мінімальне значення величини $\rho = 7 \cdot 10^{-4}$ Ом·см відповідає значенню P_{Cd} в камері 5,2·10⁻⁴ мм рт.ст. Зниження тиску кисню до величини менше ніж 4·10⁻⁵ мм рт.ст. зумовлює збільшення опору плівок.

Таблиця 3

Залежність в питомого опору плівок CdO від парціального тиску кисню в камері

Парціальний тиск кисню, мм рт.ст.	Питомий опір, Ом·см
3·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻³
4,5·10 ⁻⁴	8,4·10 ⁻⁴
5,2·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁴
7,6·10 ⁻⁴	1·10 ⁻³
1,2·10 ⁻³	1,2

Встановлену залежність ρ можна пояснити тим, що провідність плівок оксиду кадмію зумовлена вакансіям кисню, концентрація яких визначається відсутністю атомів кисню у плівці. Якщо останніх не вистачає для утворення хімічного зв'язку з атоми Cd, то не зв'язані атоми Cd можуть віддавати валентні електрони у зону провідності. Якщо ж, всі атоми Cd будуть зв'язані з киснем плівка буде високоомною.

1.1.3. Оптичні властивості тонких плівок ZnO, CdO та $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$

Оптичні властивості тонких плівок ZnO

Залежність прозорості плівок оксиду цинку від різних технологічних умов вирощування, а саме від співвідношення кисню і аргону у суміші газів (Рис.1.5), були досліджені в роботі [8]. Для цього плівки наносили на підкладки зі скла. Встановлено, що середній коефіцієнт пропускання у видимій області спектра знаходився на рівні 0.8-0.85. Положення піків пропускання залежало від оптичної товщини шарів. Для порівняння на (Рис. 1.5) приведена спектральна залежність коефіцієнт пропускання підкладки (рис.1.5, крива d). Навіть при розпилюванні тільки в середовищі Ar формувалися оптично прозорі шари. Встановлено, що край оптичного пропускання на рівні 0.5 відповідав довжині хвилі 395 нм.

Ширину забороненої зони плівок оксиду цинку визначали по краю власного поглинання. Для випадку прямих міжзонних переходів залежність між коефіцієнтом поглинання α і енергією фотонів $E = h\nu$ описується рівнянням $\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2}$, де A - константа, яка не залежить від частоти, E_g - ширина

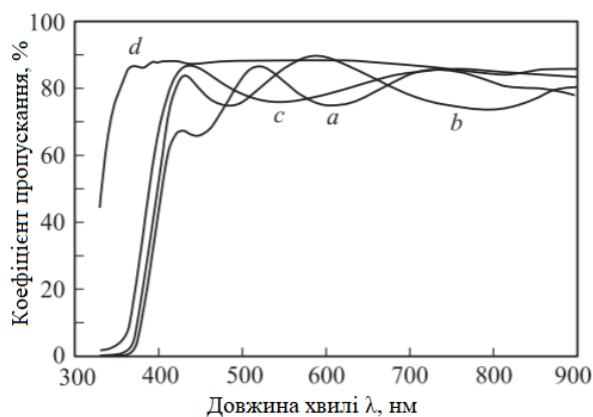


Рис.1.5 – Спектри пропускання плівок оксиду цинку, нанесених методом іонно-променевого розпилення при різному співвідношенні кисню та аргону в суміші газів $\text{Ar} / \text{O}_2, \%$: a - 0, b - 50, c – 100, d - спектр пропускання підкладки.

забороненої зони напівпровідника. В ідеальному випадку при графічному представленні результатів в координатах $\alpha^2 = f(h\nu)$ експериментальні точки

повинні лягати на пряму з нахилом A^2 , причому при $\alpha = 0$ ця лінія перетинає вісь E в точці $E = E_g$.

На (Рис.1.6) приведена спектральна залежність коефіцієнта поглинання плівок оксиду цинку, отриманих при різному вмісті кисню в суміші газів Ar/O_2 . Розширення забороненої зони при збільшенні концентрації аргону в процесі нанесення тонких плівок оксиду цинку може бути пов'язане зі збільшенням концентрації носіїв заряду, що зумовлене ефектом Бурштейна-Мосса.

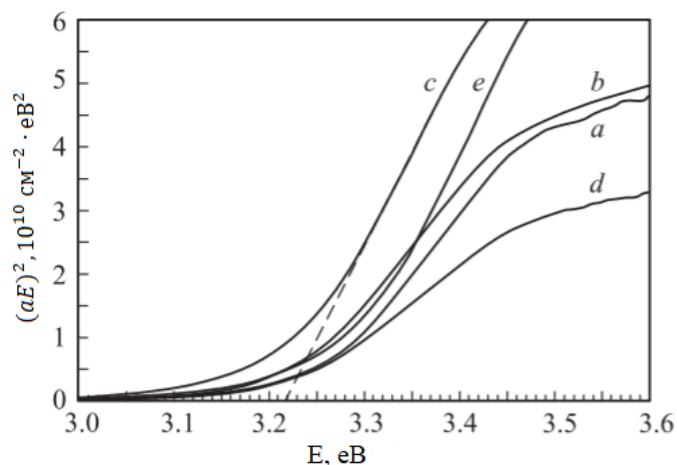


Рис. 1.6 – Спектральна залежність квадрата коефіцієнта поглинання плівок оксиду цинку, завданих при різному вмісті кисню в суміші газів $\text{Ar}/\text{O}_2, \%$: a - 0, b - 30, c - 51, d - 74, e - 100.

Встановлено залежності питомого опору плівок оксиду цинку від вмісту кисню в суміші газів Ar/O_2 (Рис. 4). При збільшенні вмісту кисню в суміші газів Ar/O питомий опір спочатку зменшується і досягає мінімуму 35-40 Ом · м при вмісті кисню 10-30%, а потім різко збільшується до 106 Ом · м при вмісті кисню 40-50%. При подальшому збільшенні вмісту кисню опір збільшується незначно, до $6 \cdot 10^6$ Ом · м. Зміна провідності плівок оксида цинку пов'язано зі зміною концентрації кисневих вакансій в плівці. При розпилюванні мішені оксиду цинку в атмосфері Ar з низьким вмістом кисню відбувається часткове відновлення оксиду цинку і в плівках спостерігається нестача кисню. Це сприяє збільшенню електричної провідності нанесених плівок.

Оптичні властивості тонких плівок CdO

Оксид кадмію належить до матеріалів, що досить мало досліджені. CdO є

широкозонним напівпровідником класу A_2B_6 . За своїми властивостями він відрізняється від властивостей таких оксидів, як In_2O_3 і SnO_2 , які мають широке практичне застосування.

Тип даного матеріалу може володіти n -типом провідності, з низьким питомим опором ($\approx 10^{-3}$ Ом·см) та досить високим значенням коефіцієнта пропускання у видимій області спектру. Оптична ширина забороненої зони (E_g) у оксида CdO знаходиться на межі від 2,3 до 2,7 еВ.

В роботі були проведені дослідження фотоелектричних та електричних властивостей у плівках CdO, які були отримані методом магнетронним розпиленням кадмієвої мішені в суміші кисню з азотом. У вакуумній камері був тиск який мав постійне значення $2,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Парціальний тиск кисню змінювався від значення $3 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. Осаджував на підкладки із кремнія і кварцу при значенні кімнатної температури.

Спектри відбивання і пропускання отриманих плівок CdO показані на

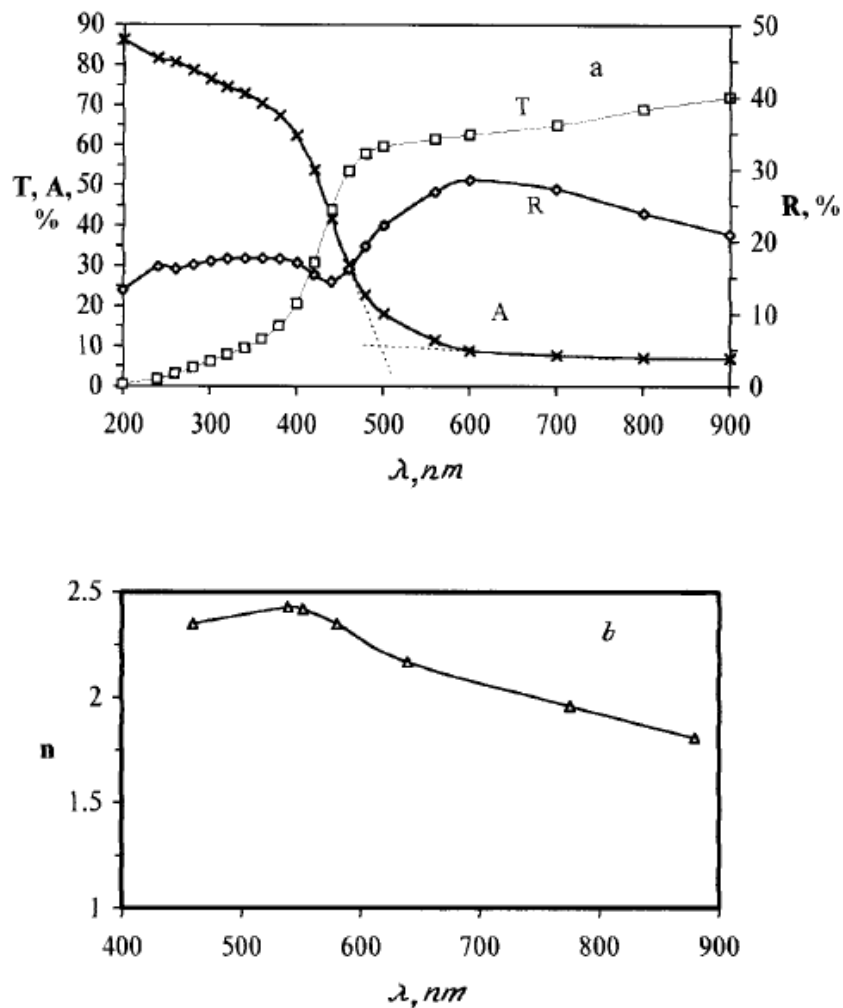


Рис.1.7 – Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання T , відбивання R і поглинання A (а) та показника заломлення $n = f(\lambda)$ (б).

На (Рис. 1.7) в діапазоні від 500–900 нм коефіцієнт пропускання світла (T) є більше 60% і слабо змінюється із ростом довжини хвилі λ . При $\lambda < 500$ нм T бачимо різке зменшення, що пов'язано з власним поглинанням світла в CdO.

Враховуючи положення максимуму на залежності $R = f(\lambda)$ та абсолютне значення коефіцієнта відбивання були розраховані товщина плівки d , а також показник заломлення n ($d = 600 \text{ \AA}$, $n = 2,25$).

Із розрахованої спектральної залежності $n = f(\lambda)$ (Рис.1.7,б) видно, що абсолютні значення показника заломлення невеликі при всіх довжинах хвиль $\lambda = 400\text{--}900$ нм. Тому плівки CdO можуть бути використані для виготовлення антивідбивних покриттів.

Оптичні властивості тонких плівок $Cd_xZn_{1-x}O$

Приведені у літературі результати наукових досліджень, свідчать про наявність різних технологічних методів формування тонкоплівкових твердих розчинів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$. Встановлено, що за своїми електричними, структурними, і оптичними параметрами отримані плівки істотно відрізняються одна від одної. У роботі [4] приведені результати дослідження оптичних властивостей плівок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, вирощених на сапфірових підкладках методом високочастотного розпилювання в атмосфері аргону.

Дифракційні x -променеві дослідження (XRD) показали, що плівки $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ при $0 \leq x \leq 0,4$ є однофазними і мають структуру вюрциту, тоді як плівки чистого CdO кристалізуються у кубічній структурі.

Дослідження спектральних залежностей оптичного пропускання дали можливість показати, що отримані плівки характеризувалися досить високою прозорістю у видимому діапазоні спектра ($T \sim 65\text{--}90\%$). В області краю власного поглинання залежність $\alpha=f(h\nu)$ добре описується співвідношенням для прямих міжзонних оптичних переходів

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 (E_g - h\nu)^{1/2}, \quad (1.1)$$

де E_g — ширина забороненої зони напівпровідника, α_0 — параметр, який не залежить від $h\nu$. Визначені зі спектральної залежності (1.1) величини E_g змінюються в межах ширин заборонених зон CdO і ZnO від 2,31 до 3,3 еВ відповідно.

Встановлена експериментально залежність величини E_g від складу твердих розчинів була близька до лінійної (Рис. 1.8).

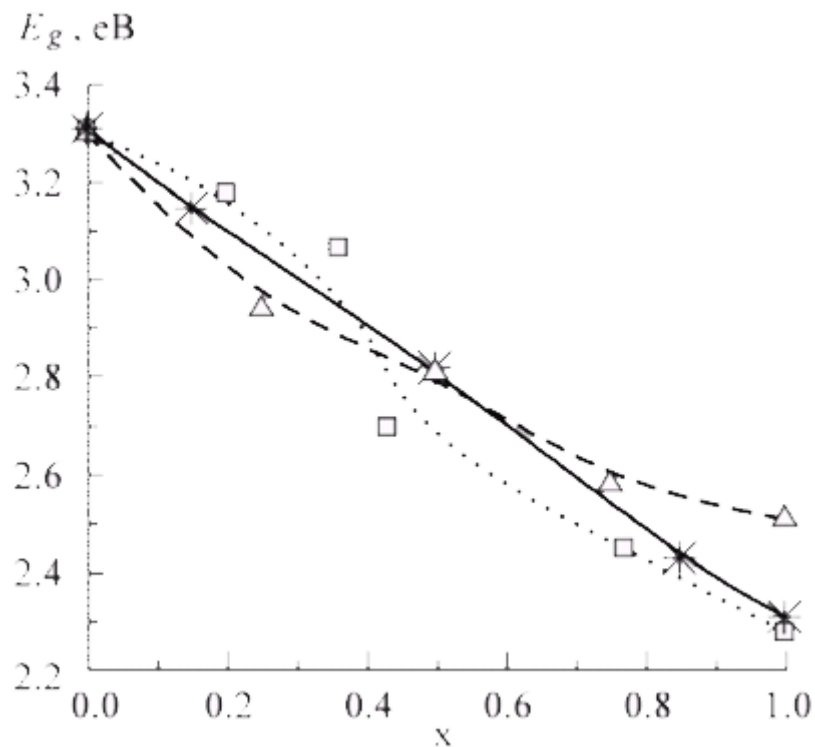


Рис. 1.8 - Залежність величини E_g плівок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ від вмісту компонентів CdO і ZnO

На цьому рисунку також наведені значення E_g для твердих розчинів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, які були отримані іншими авторами. Спостерігається добра кореляція значень E_g для $0 \leq x \leq 0,5$ для плівок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, які були отримані іншими методами. Лише при малих концентраціях цинку ($x \geq 0,8$) спостерігається розбіжність величин E_g , що можна пояснити різним типом кристалічної структури компонент.

1.2. Енергетична діаграма та вплив термообробки на електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів ZnO/CdTe

Досліджувані гетеропереходи $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$ були отримані осадження тонких плівок ZnO методом спреї-піролізу на підкладки кристалічного $p\text{-CdTe}$ [8].

Кристали $p\text{-CdTe}$ були вирощені вертикальним методом Бріджмена. Їх діркова провідність забезпечувалася введенням домішки фосфору в ампулу для вирощування. Кристали характеризувалися низьким питомим опором $\rho = 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ та високою концентрація дірок $p = 1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Плівки ZnO отримували з розчину ZnCl_2 , або ж розчиненого цинку в ацетаті. Поверхню підкладок $p\text{-CdTe}$ попередньо механічно, а також хімічно полірували.

Побудований за моделлю Андерсона (без врахування впливу поверхневого заряду) енергетичний профіль контакту структури приведений на (Рис. 1.9) Вбудоване електричне поле переходу повністю розташоване в $p\text{-CdTe}$, так як ZnO відноситься до вироджених напівпровідників.

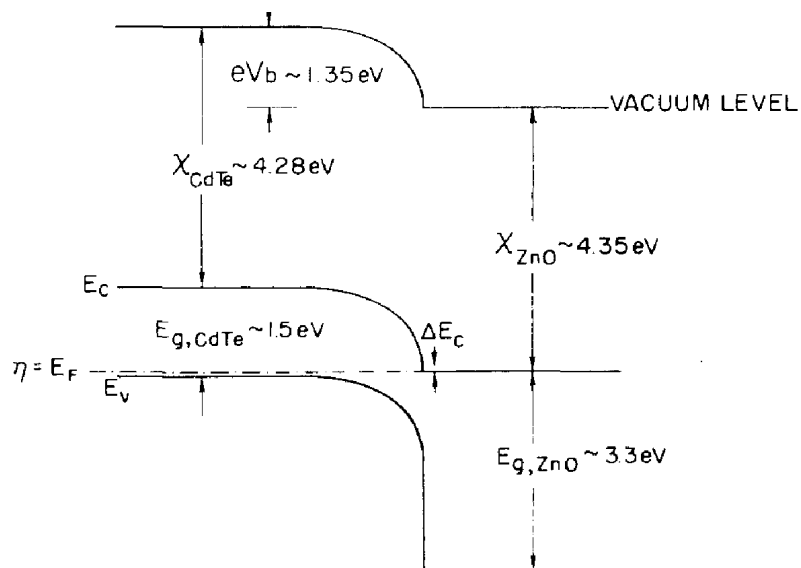


Рис.1.9 - Профіль енергетичних зон контакту структури $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$, побудований за моделлю Андерсона

Темнові, а також і світлові ВАХ досліджуваних у цитованій роботі структур $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$ не відзначалися хорошими параметрами. Прямі гілки ВАХ гетеропереходів не пояснювалися експоненційною залежністю $J = J_0 [\exp(eV/kT) - 1]$, що означало відсутність дифузійного, або ж рекомбінаційного струмів.

Основні фотоелектричні параметри: $I_{кз}$ – струм короткого замикання; $V_{хх}$ – напруга холостого ходу; ff – фактор заповнення ВАХ для досліджуваних структур були невисокими та становили: 10 мА/см², 0,2В, 0,35 відповідно (Рис. 1.10).

Для покращення фотоелектричних характеристик структур була проведена їх термічна обробка в атмосфері водню при різних температурах. Відпал до температури 235° С показав незначне покращення параметрів діодів, однак величина струму короткого замикання істотно збільшилася $I_{кз} = 17$ мА/см². Істотне покращення фотоелектричних параметрів структур спостерігали внаслідок термообробки при 325°С (Рис.1.11). Значно збільшилася величина напруги розімкнутого кола $V_{хх} = 0,5$ В. При цьому, ВАХ неосвітлених структур описувалися експоненціальним законом.

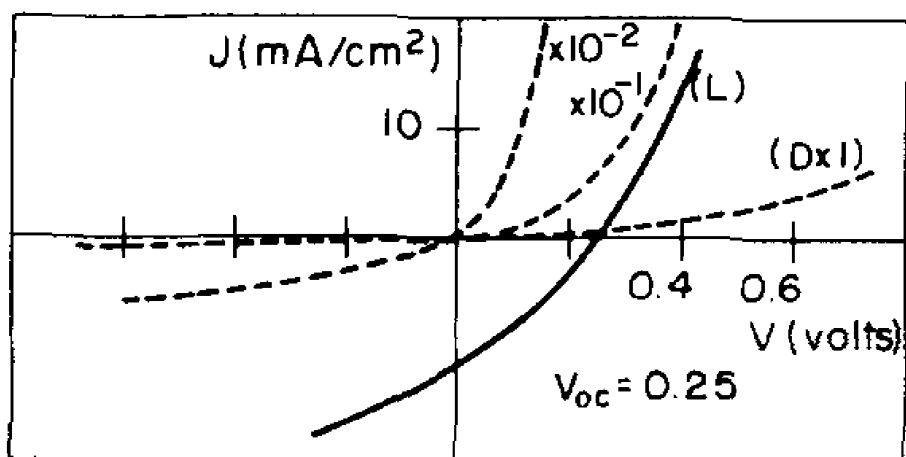


Рис. 1.10 – ВАХ неосвітлених та освітлених невідпалених структур n-ZnO/p-CdTe

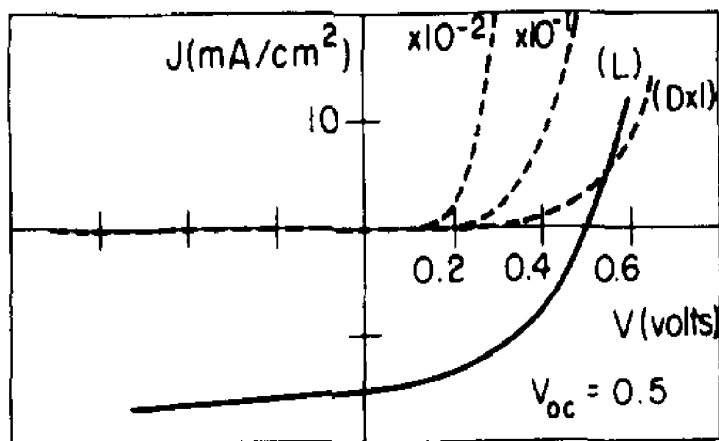


Рис.1.11 – ВАХ неосвітлених та освітлених структур $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$, відпалених в атмосфері водню при 325°C .

В роботі також проведені дослідження вивчали вплив температури, до якої нагрівали підкладинки, на які проводили осадження плівок ZnO. На (Рис.1.11) приведені ВАХ неосвітлених та освітлених структур $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$, нанесених на підкладинці, нагріті до різної температури. Найкращі результати були отримані при температурі підкладинки 470°C .

Ефективність фотоелектричного перетворення істотно зростала, внаслідок збільшення величини V_{xx} , що можна пояснити зменшенням величини струму насичення J_0 . Спостерігалось значне зростання струму короткого замикання $I_{кз}=20\text{ мА/см}^2$ (інтенсивність освітлення $W=87\text{ мВт/см}^2$)

Основним механізмом проходження носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр неосвітлених структур, як вважають автори, є тунелювання. Це підтверджується значенням коефіцієнта неідеальності, незалежність нахилу прямолінійних ділянок ВАХ, побудованих у координатах $\ln I=f(T)$, а також значення струму насичення. Враховуючи те, що розмір області просторового заряду у CdTe є недостатнім для тунелювання, автори вважають, що такий процес відбувається за участю глибоких електрично активних центрів на гетеромежі.

Розділ 2. Експериментальна частина

2.1. Методика виготовлення анізотипних гетеропереходів

$n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$

Для виготовлення підкладок при створенні гетероструктур $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ використовували кристалічний CdTe діркової провідності, вирощений вертикальним методом Бріджмена при невеликому тиску пари кадмію. Його кінетичні коефіцієнти при $T=295\text{K}$ були такими: питома електропровідність $\sigma = 8.9 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, концентрація носіїв заряду $p = 7.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Нанесення тонких плівок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, проводили на свіжосколоті підкладки кристалічного CdTe (типорозміром $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}$) на промисловій установці ВУП-5 М методом магнетронного розпилювання зі спеціально сконструйованим зовнішнім блоком живлення магнетрона. Частота ВЧ-генерації була рівною 13.56 МГц . Робочим і хімічно активним газом слугували високочисті Ar і O_2 у співвідношенні 4:1 відповідно. Для розпилення використовували мішень, виготовлену у вигляді диска діаметром 40 мм із сплаву кадмію і цинку ($\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}$). Напилення проводили на підкладки, нагріті до температури 100°C .

Магнетронні системи йонного розпилення є вдосконаленими діодними системами і відрізняються від них наявністю в прикатодній області електричного і кільцеподібного магнітного полів, спрямованих перпендикулярно один до одного.

Принцип дії діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення наведено на (Рис. 2.1)

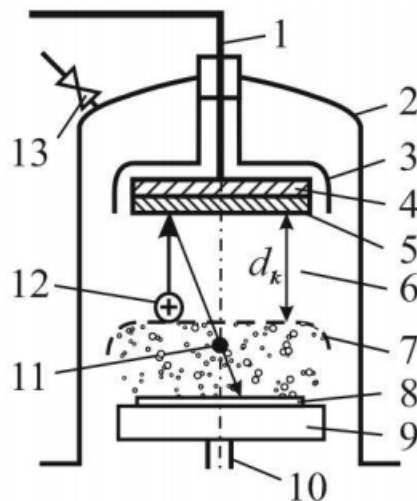


Рис 2.1 – Схема діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення:

1 - високовольтний ввід; 2 - вакуумна камера; 3 - екран; 4 - катод; 5 - пластина (мішень); 6 – вакуумна камера ; 7 – позитивно заряджена плазма; 8 - підкладка; 9 - анод; 10 - патрубок до вакуумної системи; 11 - осаджувані частинки; 12 - йони; 13 – натікач.

Два основні елементи системи - катод 4 і анод 9 - розміщені в робочій вакуумній камері 2. Катод 4 через високовольтний ввід 1 під'єднується до негативного полюсу високовольтного джерела. Напилюваний матеріал у вигляді пластини 5, яку зазвичай називають мішенню, прикріплюють до катода. Анод 9, що знаходиться під потенціалом землі, розміщують на відстані в кілька сантиметрів від катода. Підкладки 8, на які наносять плівки, закріплюють на аноді. При подачі на катод напруги близько 3-5 кВ у камері виникає тліючий розряд, для якого характерний певний розподіл потенціалу в просторі між катодом і анодом. Причому в основному падіння прикладеної напруги приходить на темновий катодний простір 6. Йони 12, які дифундують до межі позитивного стовпа 7, потрапляють на межу темного катодного простору і, прискорюючись в ньому під дією електричного поля, бомбардують мішень (катод). Вибиті з неї частинки 11 розпилюваної речовини летять у напрямку до анода 9 і осідають на підкладку 8 у вигляді тонкої плівки.

Швидкість нанесення тонких плівок у діодних системах складає близько 0,5 нм/с.

Катод і анод охолоджуються проточною водою, щоб запобігти перегріву. Крім того, із зворотного боку мішені на відстані 3-5 мм розміщено екран 3 для

того, щоб розряд локалізувався тільки на її лицьовому боці, а задня частина катода не піддавалася йонному розпиленню.

Розміром темного катодного простору? визначається мінімальна відстань між мішенню і підкладкою, яка зазвичай становить від 3 до 5 см. Якщо ця відстань менша, розряд гасне, оскільки відстань, пройдена електронами між катодом і анодом, занадто коротка для створення достатньої кількості йонів і електронів.

Для попередньої відкачки до вакууму порядку 10^{-4} Па? і подальшої підтримки робочого тиску порядку 10^{-10} Па? служить відкачувальна система, яку під'єднують до патрубку 10. Робочий газ уводять в камеру через натікач? 13, одночасно продовжуючи відкачування через патрубок 10. Це проводять для того, щоб через камеру проходив потік чистого, постійно оновлюваного газу. Зазвичай в якості робочого використовують інертний газ - аргон дуже високого ступеня чистоти.

У розглянутій системі діодного розпилення мішень розміщено вгорі камери. Однак мішені діодних систем можуть мати будь-яке просторове розміщення.

Порівняно з термовакuumним методом нанесення плівок метод діодного йонного розпилювання має ряд переваг:

- розпилюється велика площа мішені, яка виконує функції джерела атомів речовини, яка осаджується, що дозволяє осаджувати одномірні за товщиною плівки на підкладку великих розмірів і забезпечує ефективну реалізацію групового методу обробки;
- мішень є джерелом тривалої дії напилюваних частинок, що полегшує автоматизацію і підвищує однорідність процесу;
- значна енергія атомів, які конденсуються, забезпечує високу адгезію плівки до підкладок.

Основним недоліком цього методу є необхідність забезпечення відносно високого тиску аргону для підтримки розряду, що підвищує ймовірність забруднення плівки газовими включеннями. Крім того, при високому тиску

довжина вільного пробігу частинок становить кілька міліметрів, тому вони втрачають свою енергію і змінюють напрямок руху при зіткненнях з молекулами робочого газу. У результаті потік осаджуваних на поверхню підкладки частинок є хаотичним, що ускладнює можливість використання при розпиленні масок, які дають розмите зображення елементів через ефект "підпилення".

При проведенні процесу розпилення в діодних системах необхідно досить стабільно підтримувати тиск, оскільки його підвищення збільшує ймовірність зіткнення розпиленних атомів з молекулами робочого газу. В результаті цього частина атомів не осаджується на підкладку, а розсіюється в об'ємі камери або повертається на мішень, а швидкості розпилення і осадження падають, що може спричинити невідтворюваність товщини плівки.

У даний час діодні розпилювальні системи використовують переважно при виробництві гібридних ІМС. Пояснюється це тим, що частина електронів може без зіткнення пройти простір катод – підкладка, і, будучи сильно прискореними, бомбардувати анод (підкладку). Це викликає значне нагрівання підкладок, що може спричинити пошкодження напівпровідникових структур.

Оскільки концентрація електронів у плівці більша як на чотири порядки за значення концентрації носіїв заряду у підкладці, досліджувані анізотипні гетеропереходи $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ можна відкласити до асиметричних поверхнево бар'єрних структур з областю просторового заряду у CdTe.

2.2. Методика створення омичних контактів до плівки CdZnO та базового матеріалу p -CdTe

Відомо, що традиційні тильні контакти Cu/Au або Au у сонячних елементах на основі p -CdTe створюють діод з висотою потенціального бар'єра $< 0,3$ еВ, включений назустріч основному бар'єру [1]. Одним з методів усунення цієї проблеми є створення у приповерхневому шарі телуриду кадмію p^+ -області. Для цього у даній роботі було проведено опромінення поверхні підклади нок p -CdTe імпульсами рубінового лазера (довжина хвилі $\lambda = 0.694$ мкм, коефіцієнт поглинання $\alpha = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$). Утворення p^+ -області відбувається за рахунок збагачення поверхні вакансіями кадмію V_{Cd} , які утворюються при розплавленні та подальшій рекристалізації приповерхневого шару при дії потужного лазерного випромінювання. Провідні контакти до підготовленої вказаним методом поверхні p -CdTe здійснювали послідовним осадженням металів Au/ Cu з водних розчинів їх солей.

Фронтальний електричний контакт до плівки $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ створювали за методом термічного осадження алюмінію температура якого була 100°C . Провідні дрітки до плівок алюмінію прикріплювали використовуючи струмопровідну пасту на основі срібла.

2.3. Методики вимірювання електричних та фотоелектричних характеристик анізотипних гетеропереходів $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$

Залежність струму, що протікає через випрямляючий електричний $p\text{-}n$ -перехід від прикладеної напруги можна описати формулою

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

де U – прикладена до $p\text{-}n$ -переходу напруга, I_s – струм насичення.

Схема для вимірювання вольт-амперних характеристик при використанні постійного струму приведена на (рис.2.2). До параметрів приладів, що використовуються у вимірній схемі виставляються певні вимоги: внутрішній опір вольтметра повинен бути якомога більшим; амперметр, навпаки, повинен мати найменший внутрішній опір. При вимірюваннях обов'язково враховувати струм через вольтметр, а також спад напруги на амперметрі. За характером прямих та зворотних гілок ВАХ визначають, чи досліджувані структури мають випрямляючі властивості. Якщо встановлено, що струмові контакти є омичними, а вольт-амперна характеристика має нелінійний характер, то можна вважати, що на контакті існує різниця потенціалів.

Необхідно відмітити, що бар'єрні структури характеризується граничним значенням зворотної напруги, яку називають напругою пробою. Незначне підвищення зворотної напруги у цьому випадку викликає різке збільшення зворотного струму, і перехід може руйнуватися.

У вимірних електричних схемах використовували універсальний цифровий вольтметр В7-21, а також міліамперметр М82, джерелом зовнішньої напруги слугував ВІП-009 (Рис.2.2).

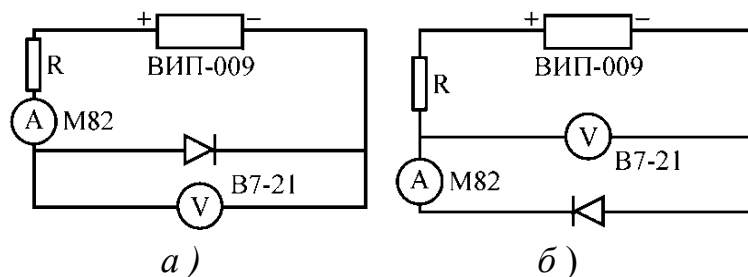


Рис.2.2 . Електричні схеми для вимірювання прямих (а) та зворотних (б) гілок ВАХ

Якщо до p – n -переходу прикладене зовнішнє зміщення U , то в залежності від того, яка її величина і полярність, ширина d збідненої області буде змінюватися.

Для несиметричного різкого p – n -переходу:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{eN}} \quad (2.2)$$

де N - концентрація електрично активної домішки в слаболегованій області; U – зовнішня напруга; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона; ε – діелектрична проникність напівпровідника; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

Видно, що при збільшенні зворотної напруги в області p – n -переходу, його ширина, а отже і величина зарядів p - і n -областей зростають. Така залежність величини і розміру об'ємного заряду від зовнішньої напруги, еквівалентна поведінці ємності. Це означає, що p – n -перехід за поведінкою схожий до конденсатора. Таку ємність p – n -переходу називають бар'єрною або зарядовою. Бар'єрна ємність електричного переходу проявляється при постійній зворотній напрузі та накладанні змінного в часі сигналу. Величину цієї ємності можна розрахувати за формулою для ємності плоского конденсатора

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.3)$$

де S і d – площа та товщина електричного переходу відповідно.

Заряди, які зумовлюють бар'єрну ємність, зосереджуються у двох тонких прошарках, розміщених на віддалі W .

З врахуванням виразу (2.3) бар'єрна ємність для різкого p – n -переходу може бути визначена за формулою:

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 e N}{2(\varphi_k - U)}} \quad (2.4)$$

Залежність величини бар'єрної ємності від прикладеної до p – n -переходу зовнішньої напруги (вольт-фарадна характеристика) приведена на рис.2.3

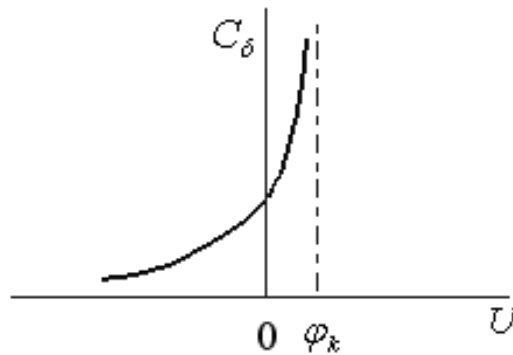


Рис.2.3 – Залежність бар'єрної ємності від зовнішньої напруги на $p-n$ -переході

У тому випадку, коли $p-n$ -перехід симетричний (тобто концентрація домішки в p - і n -областях одного порядку) величина C_δ визначається за формулою:

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_A N_D}{2(N_A + N_D)(\varphi_\kappa - U)}}, \quad (2.5)$$

де N_D і N_A -концентрація донорів та акцепторів відповідно.

При під'єднанні до $p-n$ -переходу зворотної напруги область просторового заряду збільшується, а бар'єрна ємність відповідно зменшується. Якщо ж до $p-n$ -переходу прикладена пряма напруга, то C_δ збільшується.

З врахуванням наведених вище формул, на основі експериментально виміряних $C-V$ характеристик, можна встановити характер розподілу домішок в області просторового заряду, визначити контактну різницю потенціалів φ_κ , концентрацію електрично активної домішки в збідненому шарі, а також ширину $p-n$ -переходу d . Побудова $C-V$ характеристик ВФХ (Рис.2.4) у координатах

$C_\delta^{-n} = f(U)$ дає можливість отримати лінійну залежність бар'єрної ємності від напруги (Рис. 2.4) та оцінити вказані параметри переходу.

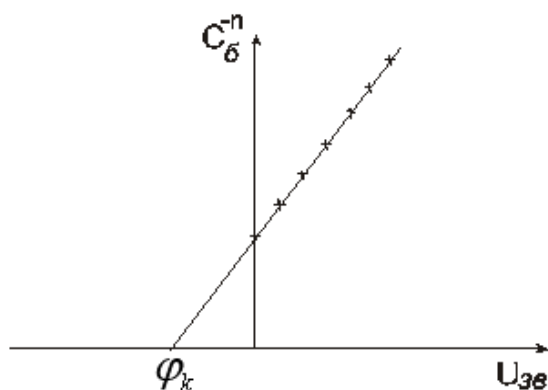


Рис. 2.4 – Вольт-фарадна характеристика p - n – переходу, побудовані у координатах $C_{\delta}^{-n} = f(U)$

Як слідує з виразу (2.5), для різких бар'єрних структур $n=2$. Екстраполяція прямої лінії до вісі напруг в точці перетину дає значення контактної різниці потенціалів. За нахилом прямої визначають концентрацію електрично активної домішки в зарядовій частині електричного переходу

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{e \varepsilon \varepsilon_0 N S^2} \quad (2.6)$$

де α – кут нахилу прямої до вісі напруг.

За значенням ємності при $U=0$, можна отримати ширину p - n -переходу у стані термодинамічної рівноваги.

Вольт-амперні (ВАХ) і вольт-фарадні характеристики (ВФХ) виготовлених гетеропереходів n - $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p$ - CdTe вимірювали використовуючи комплекс SOLARTRON SI 1286, SI 1255. Вимірювання світлової вольт-амперної характеристики проводили при опроміненні бар'єрної структури інтегральним світлом, близьким до AM1.5 ($P=100 \text{ мВт/см}^2$).

2.4. Експериментальні результати та їх обговорення

Досліджувані гетероструктури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ характеризуються яскраво вираженими випрямляючими властивостями: висота потенціального бар'єра $q\phi_k$ при $T=295\text{ K}$ становить $0,63\text{ eV}$. Коефіцієнт випрямлення дорівнює $5 \cdot 10^3$ при напрузі $V = 2,0\text{ В}$. Так як, концентрація носіїв заряду у $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ ($n = 10^{19}\text{ см}^{-3}$) значно перевищує концентрацію носіїв заряду в підкладці ($p = 7.2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$), то такі структури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ можливо віднести до різко асиметричних гетеропереходів, у яких бар'єрна область формується у CdTe .

ВАХ досліджуваних гетеропереходів $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, які виміряні при прямих напругах та різних температурах наведені на (Рис. 2.5)

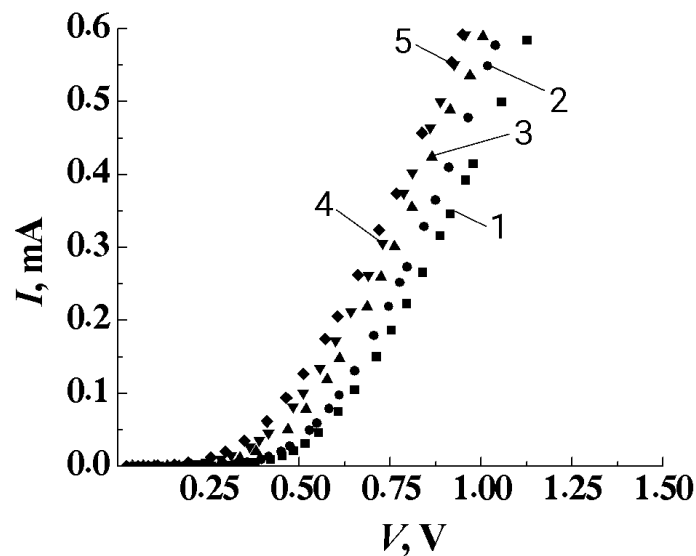


Рис. 2.5 – Прямі гілки ВАХ структури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ при різних температурах:

1 – 295 К; 2 – 305 К, 3 – 321 К, 4 – 334 К, 5 – 348 К.

Визначений із лінійних ділянок ВАХ послідовний опір структури R_s при $T=295\text{ K}$ становив $R_s=8.3 \cdot 10^2\text{ Ом}$, що, з урахуванням геометричних розмірів підкладки, досить добре співпадає з опором базового матеріалу.

На рис.2 приведені вольт-фарадні характеристики (ВФХ) гетероструктури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, виміряні в області низьких частот ($f=10\text{--}30\text{ кГц}$) змінного сигналу з малою амплітудою в 10 мВ .

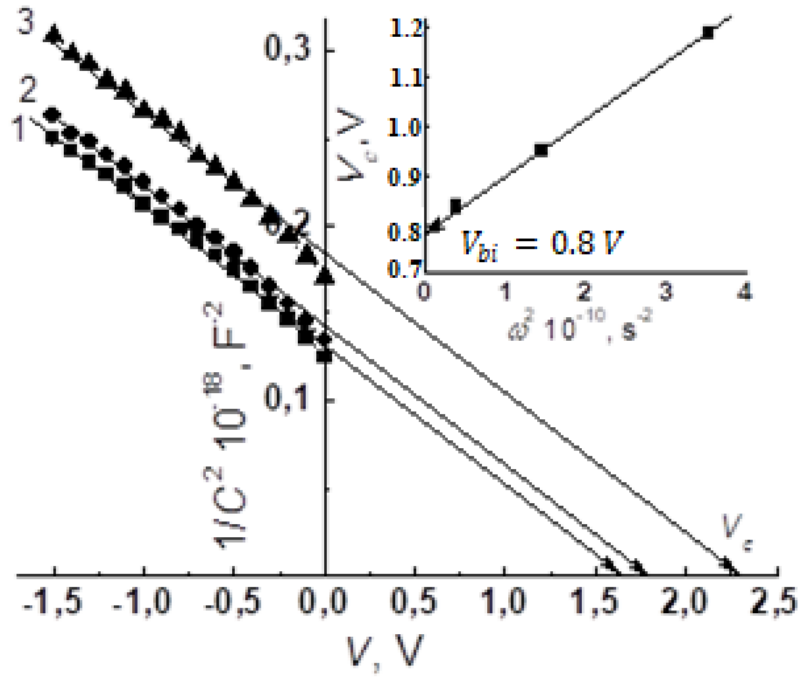


Рис. 2.6 – ВФХ гетеропереходу $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ при різних частотах змінного сигналу:
1 – 10 кГц, 2 – 20 кГц, 3 – 30 кГц.

Лінійність вольт-фарадних характеристик у координатах $C^{-2} - V$ свідчить про однорідний розподіл концентрації некомпенсованої акцепторної домішки в межах області просторового заряду [10]. Таким чином, отриманий гетероперехід може бути віднесений до різких бар'єрних структур.

Оскільки в досліджуваних гетеропереходах присутній, обумовлений базовою областю $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ послідовний опір $R_S = 8.3 \cdot 10^2 \text{ Ом}$, то згідно моделі [10] загальна ємність C таких бар'єрних структур описується виразом:

$$C^{-2} = C_0^{-2} + 2\omega^2 R_S^2, \quad (2.7)$$

де C_0 – ємність збідненої на носії заряду області, ω – циклічна частота збуджуючого сигналу.

Щоб визначити висоту потенціального бар'єра використовували методику приведену в роботі [10]. На вставці (рис.2.6) наведена залежність напруги відсічки V_c від квадрату циклічної частоти ω^2 , на основі котрої можна визначити величину вбудованого потенціалу V_{bi} при $\omega=0$. Визначене значення становило $V_{bi} = 0,8 \text{ еВ}$. Неодинаковість значень висоти потенціального бар'єра,

визначених з ВХФ та ВАХ, найбільш всього імовірно, зумовлене електрично зарядженою гетерограницею [11].

Залежність $C^{-2} = f(V)$ для досліджуваного гетеропереходу $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ характеризується при зворотних напругах прямими лініями, кут нахилу α яких до вісі напруг має однакове значення (Рис.2.6). Визначена з використанням співвідношення:

$$\text{tg}\alpha = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 N_A S^2}, \quad (2.8)$$

де $\epsilon = 10.6$ – діелектрична проникність CdTe, концентрація електрично активної акцепторної домішки у зарядженій області гетеропереходу становила $N_A = 3.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Для розрахунку товщини електричного переходу в стані термодинамічної рівноваги використовували вираз (2.8)

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_\kappa}{eN_A}} \quad (2.9)$$

Розрахована товщина електричного p - n -переходу становила 3,5 мкм.

Аналіз механізмів струмопереносу при прямих зміщеннях проводили з врахуванням послідовного опору R_s , через його велике значення. В цьому випадку ВАХ описуються виразом [10] :

$$I(V) = I_s \exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{kT}\right), \quad (2.10)$$

де I_s – величина струму насичення, V – напруга від зовнішнього джерела живлення, IR_s – спад напруги на послідовному опорі структури. Аналіз залежностей $\ln I = f(V)$, побудованих для прямих гілок ВАХ досліджуваних гетеропереходів, показав наявність двох прямолінійних ділянок, що вказує на експоненційну залежність величини струму від зовнішньої напруги та прояв двох домінуючих механізмів струму у досліджуваному інтервалі напруг (Рис.2.7).

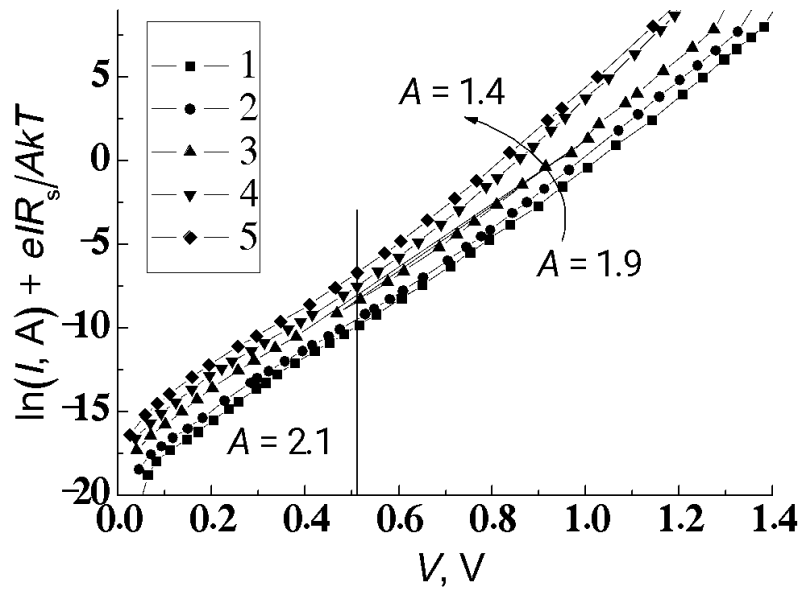


Рис. 2.7 Прямі гілки ВАХ гетеропереходу $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, побудовані у напівлогарифмічному масштабі, при різних температурах: 1 – 295 К; 2 – 305 К, 3 – 321 К, 4 – 334 К, 5 – 348 К.

Обидві прямолінійні ділянки залежностей $\ln I = f(V)$ ($V < 0.5$ В та $0.5 < V < 1.5$ В) добре описуються формулою [2.11]

$$I(V) = I_s [\exp(qV/AkT) - 1], \quad (2.11)$$

де I_s – величина струму насичення, q – заряд електрона, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, A – коефіцієнт неідеальності.

Визначений в області менших напруг ($V < 0.5$ В) коефіцієнт неідеальності A дорівнює 2.1. Це свідчить, що у вказаному діапазоні напруг визначальним механізмом проходження носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр є рекомбінація носіїв заряду, яка може відбуватися через центри рекомбінації, розміщені як в ОПЗ структури, так і на межі розділу компонент гетеропереходу. Глибина залягання рекомбінаційних центрів в забороненій зоні напівпровідника $E_r = 0,53$ еВ була визначена з температурної залежності струму насичення $\ln I_s = f(10^3/T)$ (Рис.2.8). Оскільки область просторового заряду розміщена в CdTe, то такі рекомбінаційні центри можуть утворюватися

складними дефектами за участю двократно зарядженої вакансії кадмію та неконтрольованої домішки донорного типу $(V_{cd}^{-2}D^{+1})^{-1}$ [12].

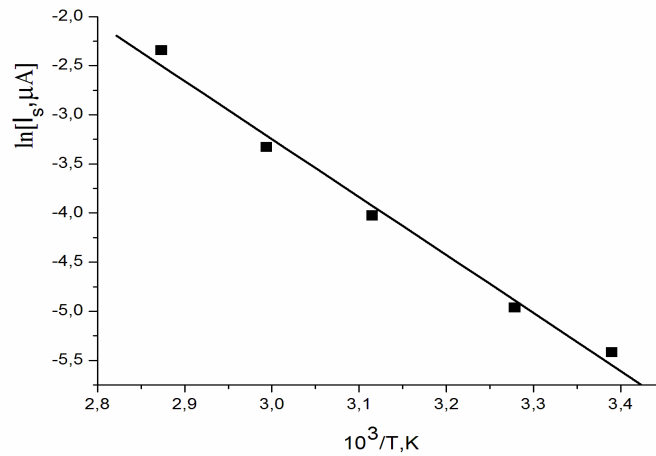


Рис. 2.8 – Температурна залежність струму насичення I_s гетеропереходу $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, побудована у координатах $\ln I_s = f(10^3/T)$

При більших напругах ($0.5 < V < 1.5$ В) величина A менше 2 і змінюється від 1.9 до 1.35 в області напруг $T = 295 - 348$ К. Така зміна коефіцієнта A свідчить про домінування емісійно-рекомбінаційного механізму струмопереносу, що зумовлено зростанням вкладу надбар'єрної складової електричного струму при зростанні температури внаслідок зниження висоти потенціального бар'єра.

Швидке зростання величини зворотного струму з напругою і його суттєва залежність від температури свідчать про домінування генераційних процесів. У випадку формування зворотного струму носіями заряду, утвореними внаслідок термічної генерації, його залежність від прикладеного зміщення $I_{rev}(V)$ визначається зміною товщини ОПЗ w [10]. Так як, величина w для різних $p\text{-}n\text{-}$ переходів змінюється пропорційно $\sqrt{\phi_k - eV}$, то залежність $I_{rev}(V)$ в координатах $I_{rev}(V) = f(\sqrt{\phi_k - eV})$ буде прямолінійною, що і спостерігається на експерименті (Рис.2.9).

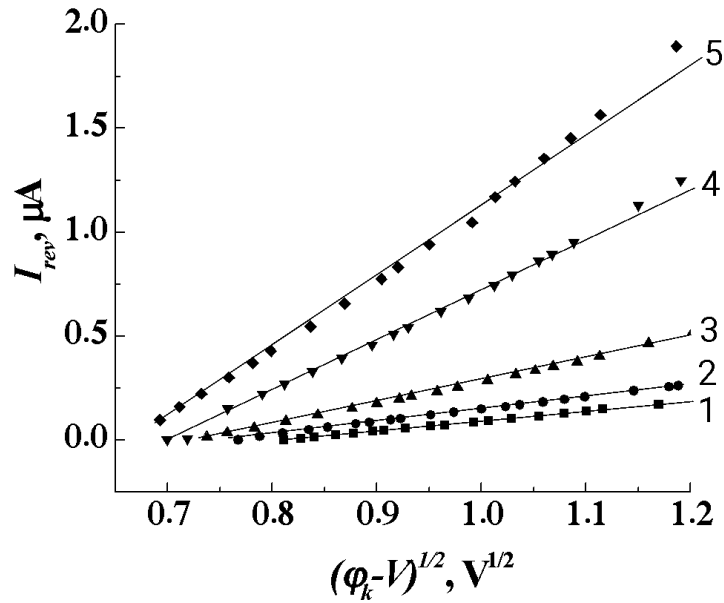


Рис. 2.9 Зворотні гілки ВАХ гетеро структури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ у координатах $I_{rev}(V) = f(\sqrt{\varphi_k - eV})$, при різних температурах 1 – 295 К; 2 – 305 К, 3 – 321 К, 4 – 334 К, 5 – 348 К.

Необхідно відмітити, що як в області прямих, так і зворотних напруг не проявляється характерний для більшості гетероструктур [11], в тому числі і для структур $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, досліджуваних в даній роботі [13], тунельно-рекомбінаційний механізм струмопереносу, який може бути пояснено зменшенням густини заряджених поверхневих станів на гетерограниці через підвищення структурної досконалості тонких плівок $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ [11].

Отримані гетероструктури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ характеризувалися досить високою фоточутливістю (Рис. 2.10).

Характерним для світлових ВАХ досліджуваних гетеропереходів є наявність ділянки, на якій спостерігається насичення фотоструму ($1,5\text{V} \leq V \leq -0,5\text{V}$) що, враховуючи відношення значень фотоструму та зворотного струму неосвітленої структури ($\approx 4 \cdot 10^3$) дає можливість їх ефективно використовувати у фотодіодному режимі. Визначені зі світлової $I(V)$ характеристики гетеропереходу $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}/p\text{-CdTe}$: густина струму короткого замикання

$J_{sc} = 2,0 \text{ mA/cm}^2$, напруга холостого ходу $V_{oc} = 0.47 \text{ V}$.

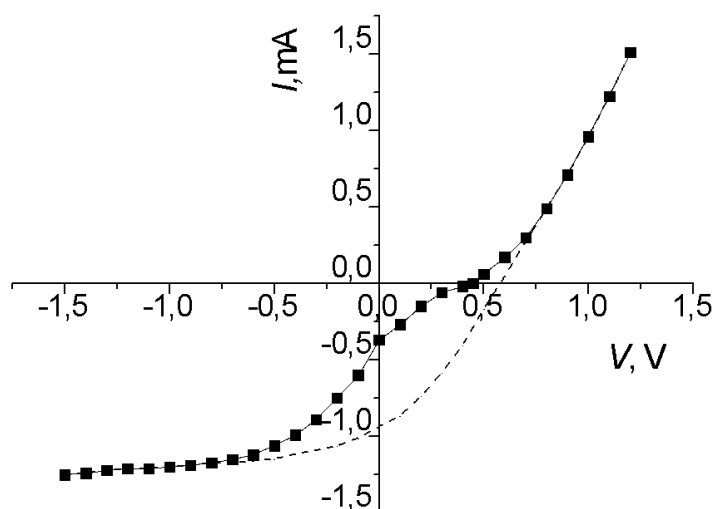


Рис. 2.10 – Світлова ВАХ гетероструктури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ ($P=100 \text{ мВт/см}^2$).

Однак зменшення фотоструму від закономірної для фотоперетворювачів залежності $I = f(V)$ (пунктирна лінія Рис.2.10) в діапазоні напруг $-0,5\text{V} \leq V \leq 0.5 \text{ V}$ суттєво обмежує значення коефіцієнта заповнення освітленої ВАХ ($FF = 0.23$). Така поведінка $I = f(V)$ може бути зумовлена рекомбінаційними процесами через поверхневі стани на гетеромежі.

Спектральна залежність відносної квантової ефективності фотоперетворення η гетероструктури $n\text{-Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{O}/p\text{-CdTe}$ (Рис.2.11) вказує на домінуючу генерацію фотоструму в області $p\text{-CdTe}$, оскільки генерація у фронтальному шарі $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, через значну ширину забороненої зони $E_g = 2,7 \text{ eV}$ і велику концентрацію носіїв заряду, зведена до мінімуму.

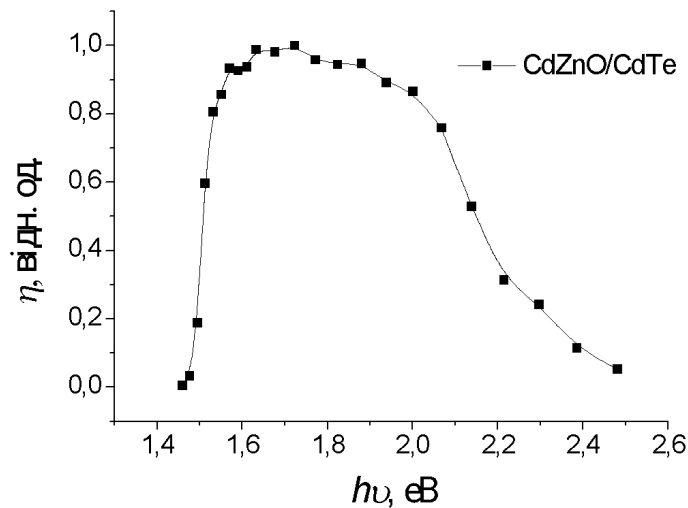


Рис. 2.11 – Спектральна залежність відносної квантової ефективності фотоперетворення для структур $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$

У довгохвильовій області спектра ефективність гетероструктури $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ обмежена енергією фотонів $h\nu$, які відповідають ширині забороненої зони CdTe $E_g = 1,5$ eV. Різкий край квантової ефективності у довгохвильовій області свідчить про відсутність інтенсивної рекомбінації в області просторового заряду структури, оскільки електричний перехід знаходиться у CdTe. Значення повної ширини спектра $\eta(h\nu)$ на напіввисоті $\delta_{1/2}$ сягає 0,75 eV, що є важливим при розробці високоефективних широкодіапазонних фотоперетворювачів. У той же час, спостережуваний короткохвильовий спад квантової ефективності для енергій фотонів $h\nu > 2,1$ eV пов'язаний, очевидно, частково поглинанням у фронтальному шарі гетерограниці, а в основному – рекомбінацією на гетеропереході за участю енергетичних станів на межі розділу напівпровідників. Дані результати добре корелюють з вищенаведеними результатами аналізу механізмів переміщення носіїв заряду через електричний перехід при прямому зміщенні, де було встановлено, що рекомбінаційні процеси є визначальними у формуванні струму в області додатних напруг $V < 0.5$ V. Доволі широкосмуговий характер спектрів $\eta(h\nu)$ у створених гетеропереходах $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$, що свідчить про добру якість їх гетеромежі та вказує на перспективність їх практичного використання у широкому спектральному діапазоні ($\lambda = 590 - 820$ нм).

Висновки

1. Фоточутливі анізотипні гетеропереходи $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ виготовлені методом високочастотного магнетронного розпилення твердого розчину $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ на сколоту поверхню кристалічного CdTe.
2. Показано, що досліджувані гетеропереходи відносяться до різких асиметричних поверхнево-бар'єрних структур.
3. Основні механізми переміщення носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр в гетеропереходах $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ при прямих та зворотних напругах пояснені в рамках генераційно-рекомбінаційної моделі.
4. Виготовлені гетеропереходи $n\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/p\text{-CdTe}$ можуть мати практичне використання, як фотоприймачі у видимій області спектра.

Література

1. A.L. Fahrenbruch, R. H. Bube, *Fundamentals of solar cels. Photovoltaic solar energy conversion*, Academic Press, New York, 1983, 236p.
- 2 V.V. Khomyak, M.M. Slyotov, I.I. Shtepliuk, G.V. Lashkarev, O.M. Slyotov, P.D. Marianchuk, V.V. Kosolovskiy, Annealing effect on the near-band edge emission of ZnO // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2013, Vol.74, No. 2, P.291–297.
3. V. Khomyak, M. Slyotov, I. Shtepliuk, O. Slyotov, and V. Kosolovskiy, Effect of Se Isoelectronic Impurity on the Luminescence Features of the ZnO // *Acta Phys. Polon.*, 2012, Vol. 122, No.6, P. 1039-1041.
4. V.V. Khomyak, M.M. Slyotov, O.M. Slyotov, Optical Properties of $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ Thin Films, Growth by Highfrequency Magnetron Sputtering // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2011, Vol.2, No. 8, P.65-68.
5. D.W. Ma, Z.Z. Ye, J.Y. Huang, L.P. Zhu, B.H. Zhao, J.H. He, Effect of post-annealing treatments on the properties of $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ films on glass substrates // *Materials Sci. Engineering B*, 111, , (2004).P. 9-13
6. Баранов А.М., Малов Ю.А., Тереёшин С.А., Вальднер В.О. Исследование свойств пленок CdO // *Письма в ЖТФ*. – 1997. – Т. 23, №20. – С. 70–74.
7. B Saha, R Thapa, N S Das, K K Chattopadhyay Intentionally incorporated defect and its consequences in xide thin film through Radio Frequency MagnetronSputtering Technique *Indian J. Phys.* 84 (6), 681-685 (2010)
8. J. A. Aranovich, D. Golmayo, A. L. Fahrenbruch, R. H. Bube. Photovoltaic properties of ZnO/CdTe heterojunctions prepared by spray pyrolysis // *J. Appl. Phys.*, 1980. Vol.51, No.8, P. 4260-4268.
9. A. Niemegeers, M. Burgelman. Effects of the Au/CdTe back contact on and characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells, *J. Appl. Phys.*, 81(1997) 288.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 655с.
11. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. – М.: Мир. – 1975. – 432 с.

12. Матвеев О. О., Терентьев А. И. Основные принципы послеростового отжига слитка CdTe:Cl для получения полуизолирующих кристаллов // ФТП. –2000.– Т.34,вып.11. – С.1316-1321.
13. V. V. Brus, M. I. Ilashchuk, V. V. Khomyak, Z. D. Kovalyuk, P. D. Maryanchuk, K. S. Ulyanytsky, Electrical properties of anisotype heterojunctions n-CdZnO/p-CdTe// Semiconductors, 2012, Vol 46, No. 9, P. 1152-1157.

Додаток

1. Небезпека ураження електричним струмом

З кожним роком зростає виробництво та споживання електроенергії, а відтак і кількість людей, які в процесі своєї життєдіяльності використовують (експлуатують) електричні пристрої та установки. Тому питання електробезпеки набувають особливої ваги.

Основними причинами електротравматизму на виробництві є: випадкове доторкання до неізольованих струмопровідних частин електроустаткування; використання несправних ручних електроінструментів; застосування нестандартних або несправних переносних світильників напругою 220 чи 127 В; робота без надійних захисних засобів та запобіжних пристосувань; доторкання до незаземлених корпусів електроустановок, що опинилися під напругою внаслідок пошкодження чи пробоя ізоляції; недотримання правил будови, улаштування, безпечної експлуатації електроустановок та правил експлуатації електрозахисних засобів тощо.

Сила струму, що проходить через тіло людини, є основним чинником, який обумовлює наслідки ураження. Різні за величиною струми справляють відповідний вплив на організм людини. Розрізняють три основних порогових значення сили струму:

- пороговий відчутний струм - найменше значення електричного струму, при проходженні якого через тіло людини виникають відчутні подразнення;
- пороговий невідпускаючий струм - найменше значення електричного струму, яке зумовлює судомні скорочення м'язів руки, в котрій затиснутий провідник, що унеможливорює самостійне звільнення людини від дії струму;
- пороговий фібриляційний (смертельно небезпечний) струм - найменше значення електричного струму, що спричинює при проходженні через тіло людини фібриляцію серця.

У табл. 4 наведено порогові значення сили струму при його проходженні через тіло людини по шляху "рука - рука" або "рука - ноги"

Таблиця 4.

Порогові значення сили струму при його проходженні через тіло людини по шляху
"рука - рука" або "рука - ноги"

Вид струму	Пороговий відчутний струм, мА	Пороговий невідпускаючий струм, мА	Пороговий фібриляційний струм, мА
Змінний струм частотою 50 Гц	0,5—1,5	6—10	80—100
Постійний струм	5,0—7,0	50—80	300

Струм (змінний та постійний) понад 5 А викликає миттєву зупинку серця, минаючи стан фібриляції.

Таким чином, чим більший струм проходить через тіло людини, тим більшою є небезпека ураження. Однак необхідно зазначити, що це твердження не є безумовним, оскільки небезпека ураження залежить також і від інших чинників, наприклад, від індивідуальних особливостей людини.

Електроустаткування, з яким доводиться мати справу практично всім працівникам на виробництві, становить значну потенційну небезпеку ще й тому, що органи чуття людини не здатні на відстані виявляти наявність електричної напруги. У зв'язку з цим захисна реакція організму виявляється лише після того, як людина потрапила під дію електричної напруги. Проходячи через організм людини, електричний струм справляє на нього термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

Термічна дія струму спричинює опіки окремих ділянок тіла, нагрівання кровоносних судин, серця, мозку та інших органів, через які проходить струм, що призводить до виникнення в них функціональних розладів.

Електролітична дія струму характеризується розкладом (електролізом) крові та інших органічних рідин, що викликає суттєві порушення їх фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму загрожує ушкодженнями (розриви, розшарування тощо) різноманітних тканин організму внаслідок електродинамічного ефекту.

Біологічна дія струму на живу тканину спричиняє небезпечне збудження клітин та тканин організму, що супроводжується мимовільним судомним скороченням м'язів. Таке збудження може призвести до суттєвих порушень і навіть повного припинення діяльності органів дихання та кровообігу.

Збудження тканин організму внаслідок дії електричного струму може бути прямим, коли струм проходить безпосередньо через ці тканини, та рефлекторним (через центральну нервову систему), коли тканини не знаходяться на шляху проходження струму.

2. Робота з електровимірювальними приладами та високою напругою

Електровимірювальні прилади призначені для перетворення різних електричних величин (сили струму, напруги, активних і реактивних потужностей та енергій, коефіцієнта потужності, опору, індуктивності, ємності та інших) у візуальну форму, зручну для сприйняття.

Електровимірювальний прилад складається з вимірювального механізму, який поміщений у корпус, та допоміжних частин (затиски для підключення, перемикачі меж вимірювань, блок живлення, коректор та інші). Вимірювальний механізм складається з рухомої і нерухомої частин, та має шкалу з певною кількістю поділок.

Принцип дії вимірювального механізму може бути заснований на явищі електромагнетизму, електромагнітної сили або теплової дії струму. В результаті цих явищ виникає обертаючий момент, який повертає рухому частину вимірювального механізму разом з покажчиком (стрілкою). Стрілка відхиляється на кут, прямо пропорційний значенню вимірюваної фізичної величини. В протидію обертаючому моменту (електромагнітним або механічним шляхом) створюється рівний та протидіючий момент, тому що інакше стрілка буде відхилятися до кінця шкали при будь-якому значенні вимірюваної величини (відмінної від нуля).

Щоб запобігти травматизму різного роду при роботі з електровимірювальними приладами і високою напругою, необхідно дотримуватись наступних правил техніки безпеки:

1. На дротах, комутаційних апаратах повинні бути ясно вказані положення “включено”, “виключено”, які можуть підтверджуватись сигнальними лампочками.

2. На вимикачах і рубильниках повинні бути написи, які вказують, до якого приладу вони відносяться.

3. Для забезпечення безпеки людей повинні заземлюватись механічні частини електроустановок і корпуса електрообладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок порушення ізоляції.

4. Заземлення електроустановок необхідне в наступних випадках:

- при напрузі вище 36 В змінного і 110 В постійного струму в приміщеннях з підвищеною небезпекою;
- при напрузі 500 В і вище змінного і постійного струму в усіх випадках;
- при всіх напругах змінного і постійного струму в усіх вибухонебезпечних приміщеннях.

5. Після закінчення роботи необхідно відключити електроенергію, прибрати робоче місце, закрити воду, вентиляцію.

3. небезпека електромагнітних випромінювань оптичного діапазону

Оптичний діапазон охоплює ділянки електромагнітного випромінювання, до складу якої входять інфрачервоні (ІЧ), видимі (ВВ) та ультрафіолетові (УФ) випромінювання (рис.3.1). За довжиною хвилі ці випромінювання розподіляються наступним чином: ІЧ - 14 - 540 мкм...760 нм, ВВ - 760...400 нм, УФ - 400... 10 нм. З боку інфрачервоних випромінювань оптичний діапазон межує з радіочастотним, а з боку ультрафіолетових - з іонізуючими випромінюваннями.

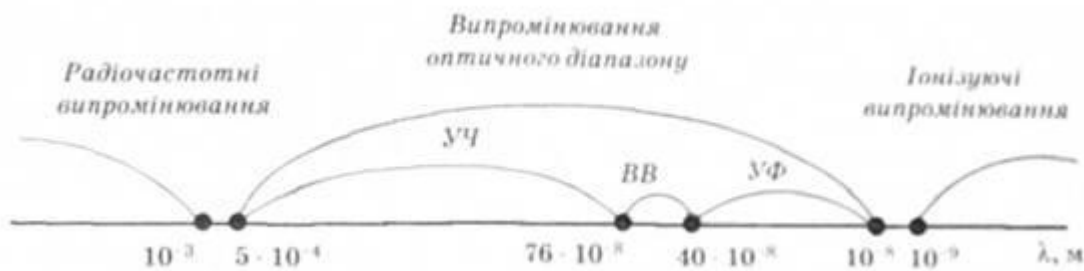


Рис.3.1 – Розподіл випромінювань оптичного діапазону за довжиною хвилі

Інфрачервоні випромінювання

Інфрачервоні випромінювання чинять на організм людини переважно теплову дію. Тому джерелом ІЧ випромінювань є будь-яке нагріте тіло, причому його температура визначає інтенсивність теплового випромінювання E (Вт/м²)

$$E = \epsilon C_0 (T/100)^4, \quad (3.1)$$

де ϵ - ступінь чорноти тіла (матеріалу); C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла ($C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$); T - температура тіла (матеріалу), К

Вплив ІЧ-випромінювань на людину може бути загальним та локальним і призводить він зазвичай до підвищення температури. При довгохвильових випромінюваннях підвищується температура поверхні тіла, а при короткохвильових - органів та тканин організму, до яких здатні проникнути ІЧ промені. Більшу небезпеку являють собою короткохвильові випромінювання, які можуть здійснювати безпосередній вплив на оболонки та тканини мозку і тим самим призвести до виникнення так званого теплового удару. Людина при цьому відчуває запаморочення, біль голови, порушується координація рухів,

настає втрата свідомості. Можливим наслідком впливу короткохвильових ІЧ-випромінювань на очі є поява катаракти. Досить часто таке професійне захворювання трапляється в складувів.

При тривалому перебуванні людини в зоні теплового променевого потоку, як і при систематичному впливі високих температур, відбувається різка зміна теплового балансу в організмі. При цьому порушується робота терморегулювального апарату, посилюється діяльність серцево-судинної та дихальної систем, відбувається значне потовиділення, яке призводить до втрати потрібних організмові солей. Інтенсивність теплового опромінення обумовлює також появу певних нервових розладів: дратівливості, часті болі голови, безсоння. Серед працівників "гарячих" цехів (прокатників, ливарників та ін.) відзначається значний відсоток осіб, які страждають на неврастенію.

Таким чином, ІЧ-випромінювання впливають на організм людини, порушують його нормальну діяльність та функціонування органів і систем, що може призвести до появи професійних та професійно зумовлених захворювань.

Ультрафіолетові випромінювання

Ультрафіолетові (УФ) випромінювання належать до оптичного діапазону електромагнітних хвиль і знаходяться між тепловими та іонізуючими (рентгенівськими) випромінюваннями, тому мають властивості як одних, так й інших. За способом генерації вони наближаються до теплового діапазону випромінювань (температурні випромінювачі починають генерувати УФ промені при температурі понад 1200 °С), а за біологічною дією - до іонізуючого випромінювання. Незважаючи на схожість біологічної дії на організм людини, негативні наслідки від ультрафіолетового опромінення значно менші, ніж від іонізуючого. Це обумовлено більшою довжиною його хвилі, а відтак і меншою енергією кванта УФ променів.

Спектр УФ-випромінювань поділяється на три області: УФА - довгохвильова з довжиною хвилі від 400 до 320 нм; УФВ - середньохвильова - від 320 до 280 нм; УФС - короткохвильова - від 280 до 10 нм. Ультрафіолетові випромінювання області УФА відзначаються слабкою біологічною дією.

Середньо - та короткохвильові УФ промені, в основному, впливають на шкіру та очі людини. Значні дози опромінення можуть спричинити професійні захворювання шкіри (дерматити) та очей (електрофтальмію). УФ-випромінювання впливають також на центральну нервову систему, що виявляється болем голови, підвищенням температури тіла, відчуттям млявості, передчасної втоми, нервового збудження тощо. Крім того, несприятлива дія УФ променів може посилюватись завдяки ефектам, що властиві для цього виду випромінювань, а саме іонізації повітря та утворенню озону.

Захист від інтенсивного опромінення ультрафіолетовими променями досягається: раціональним розташуванням робочих місць, "захистом відстанню", екрануванням джерел випромінювання, екрануванням робочих місць, засобами індивідуального захисту. Найбільш раціональним методом захисту вважається екранування (укриття) джерел УФ випромінювань. Як матеріали для екранів застосовують зазвичай непрозорі металеві листи або світлофільтри. До засобів індивідуального захисту належить спецодяг (костюми, куртки, білі халати), засоби для захисту рук (тканинні рукавички), лиця (захист щитки) та очей (окуляри зі світлофільтрами).

Лазерне випромінювання

Лазерна техніка з кожним роком знаходить все ширше використання. Це зумовлено унікальними властивостями лазерного випромінювання: монохромністю (генерування хвилі лише однієї довжини хвилі), високою спрямованістю (малим кутовим розширенням променя навіть на значних відстанях), великою інтенсивністю (до 10^{14} Вт/см²). Лазерне випромінювання широко застосовується в інформаційних системах, радіотехніці, енергетиці, зв'язку, металургії, металообробці, біології, медицині та ін.

Таблиця 5. Клас лазера залежно від небезпеки вихідного випромінювання

Клас лазера залежно від небезпеки вихідного випромінювання

Клас лазера	Небезпека вихідного випромінювання лазера
I	Немає небезпеки для очей та шкіри
II	Існує небезпека при опроміненні очей прямим або дзеркально відбитим випромінюванням
III	Існує небезпека при опроміненні очей прямим, дзеркально відбитим, а також дифузно відбитим випромінюванням на відстані 10 см від дифузно відбиваючої поверхні та (або) при опроміненні шкіри прямим і дзеркально відбитим випромінюванням
IV	Існує небезпека при опроміненні шкіри дифузно відбитим випромінюванням на відстані 10 см від дифузно відбиваючої поверхні

Дія лазерного випромінювання на організм людини відзначається складним характером, а біологічні ефекти, які при цьому виникають, можна поділити на дві групи: первинні ефекти - органічні зміни, що виникають безпосередньо в опромінених тканинах; вторинні ефекти - фізіологічні зміни, що виникають в організмі як реакція на опромінення. Вторинні ефекти виявляються у частих болях голови, швидкій втомлюваності, порушенні сну, підвищеній збудливості тощо. Оскільки лазерне випромінювання характеризується великою густиною енергії, то в опромінених тканинах можуть виникнути опіки різного ступеня. Найбільш небезпечне лазерне випромінювання для очей, оскільки кристалик фокусує та концентрує його на сітківці. Залежно від інтенсивності лазерне випромінювання може викликати тимчасову чи незворотну втрату зору внаслідок сильного опіку сітківки. При

великій інтенсивності випромінювання можливе ураження не лише очей, але й шкіри, оболонок мозку, внутрішніх органів.

Таблиця 6.

Гранично допустимі рівні лазерного випромінювання залежно від довжини хвилі

Довжина хвилі, мкм	$H_{\text{доп}}$, Дж/см ²
Від 0,200 до 0,210	$1 \cdot 10^{-8}$
Від 0,210 до 0,215	$1 \cdot 10^{-7}$
Від 0,215 до 0,290	$1 \cdot 10^{-6}$

Довжина хвилі, мкм	$H_{\text{доп}}$, Дж/см ²
Від 0,290 до 0,300	$1 \cdot 10^{-5}$
Від 0,300 до 0,370	$1 \cdot 10^{-4}$
Від 0,370 до 0,400	$1 \cdot 10^{-3}$

У залежності від класу лазерної установки використовуються ті чи інші захисні засоби та заходи, які за організаційною ознакою поділяються на колективні та індивідуальні.

До колективних заходів та засобів лазерної безпеки належать:

- вибір лазера для технологічної операції за мінімально необхідним рівнем випромінювання;
- розташування лазерів IV класу в ізольованих приміщеннях;
- встановлення попереджувального знака "Обережно! Випромінювання лазера" (див. форзац);
- запровадження дистанційного керування;
- огорожування зон можливого поширення лазерного випромінювання (прямого, розсіяного, відбитого);
- оброблення внутрішніх поверхонь приміщення, в якому встановлені лазерні установки матеріалами з високим коефіцієнтом поглинання;
- екранування променя лазера на всьому шляху його поширення, а також зони взаємодії променя і мішені;
- встановлення на лазерній установці блокувальних засобів та сигналізації початку та закінчення роботи лазера;
- проведення контролю рівнів лазерного опромінення.

До засобів індивідуального захисту від лазерного випромінювання належать захисні окуляри із світлофільтрами, маски, щитки, халати, рукавички,

їх вибір здійснюється з урахуванням інтенсивності та довжини хвилі лазерного випромінювання.

4. Заходи щодо пожежної безпеки

Система запобігання пожежі - це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на унеможливлення умов, необхідних для виникнення пожежі.

Система запобігання пожежі включає такі два основні напрями:

- запобігання утворенню горючого середовища;
- запобігання виникненню в горючому середовищі (чи внесенню в нього) джерела запалювання.

Горюче середовище - це середовище, здатне самостійно горіти після видалення джерела запалювання. Таке середовище утворює горюча речовина разом з окисником. Якщо в технологічних процесах застосовують горючі речовини та існує можливість їх контакту з повітрям, то небезпека пожежі та вибуху може виникнути як усередині апаратів, так і поза ними, в приміщенні та на відкритих площадках.

Однак для виникнення пожежі чи вибуху необхідно мати ще й джерело запалювання - засіб енергетичного впливу, що ініціює виникнення пожежі. Джерелом запалювання є: відкрите полум'я, розжарені предмети, електричні розряди, іскри від ударів і тертя, теплові прояви хімічних реакцій і механічних дій, сонячна радіація, електромагнітні та інші випромінювання.

Запобігання утворенню горючого середовища

Досягається: застосуванням герметичного виробничого устаткування; максимально можливою заміною в технологічних процесах горючих речовин та матеріалів негорючими; обмеженням кількості пожежо- та вибухонебезпечних речовин при використанні та зберіганні, а також правильним їх розміщенням; ізоляцією горючого та вибухонебезпечного середовища; організацією контролю за складом повітря в приміщенні та контролю за станом середовища в апаратах; застосуванням робочої та аварійної вентиляції; відведенням горючого середовища в спеціальні пристрої та безпечні місця; застосуванням в

установках з горючими речовинами пристроїв захисту від пошкоджень та аварій; використанням інгібувальних (хімічно активні компоненти, що сприяють припиненню пожежі) та флегматизаційних (інертні компоненти, що роблять середовище негорючим) добавок та ін.

Запобігання виникненню в горючому середовищі джерела запалювання

Досягається: використанням устаткування та пристроїв, при роботі яких не виникає джерел запалювання; використанням електроустаткування, що відповідає за виконанням класу пожежо- та вибухонебезпеки приміщень та зон, груп і категорії вибухонебезпечної суміші; виконанням вимог щодо сумісного зберігання речовин та матеріалів; використанням устаткування, що задовольняє вимоги електростатичної іскробезпеки; улаштуванням блискавкозахисту; організацією автоматичного контролю параметрів, що визначають джерела запалювання; використанням швидкодіючих засобів захисного вимкнення; заземленням устаткування, видовжених металоконструкцій; використанням під час роботи з ЛЗР інструментів, що не допускають іскроутворення; ліквідацією умов для самоспалахування речовин і матеріалів; усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин; підтриманням температури нагрівання поверхні устаткування пристроїв, речовин та матеріалів, які можуть контактувати з горючим середовищем нижче гранично допустимої (80 % температури самозаймання).