

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

Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

**Електричні властивості гетеропереходу
MnS/*n*-CdZnTe, виготовленого методом
спрей-піролізу**

Дипломна робота

Рівень вищої освіти - перший (бакалавр)

Виконав:

студент 4 курсу, групи 433

спеціальності 141–“Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(назва спеціальності)

Адамчук Віталій Валерійович

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Керівник доц. кафедри електроніки та
енергетики Орлецький Іван Григорович

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

від „____” _____ 2020 р.

зав. кафедри _____ проф. Мар'янчук П.Д.

Чернівці – 2020

Анотація

Досліджені умови виготовлення діодних гетероструктур $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$ методом спреї-піролізу тонких плівок $\alpha\text{-MnS}$ на кристалічні підкладки $n\text{-CdZnTe}$. На основі аналізу температурних залежностей I - V -характеристик встановлено механізми впливу на прямий струм електронних процесів у плівці MnS . З'ясовано механізми утворення зворотних струмів. Проаналізовані умови формування енергетичного бар'єру на гетеропереході $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$ та вплив на його параметри енергетичних станів на межі поділу напівпровідників. Побудована модель енергетичної діаграми гетероструктури, яка добре описує експериментальні електрофізичні явища.

Дипломна робота містить 51 сторінку, 25 рисунків, 18 бібліографічних найменувань.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ I. Розділ 1. Аналіз способів виготовлення і властивостей гетеропереходів на основі CdTe	6
1.1. Основи отримання тонких плівок для створення p-n переходу способом спреї-піролізу	6
1.2. Властивості гетеропереходів для вирівнювання струму	8
1.3. Підбір речовин для створення фотоперетворювачів за допомогою гетеропереходу	12
1.4. Конструкція фотоперетворювачів на основі CdTe	16
1.5. Процес створення фотоперетворювача за допомогою телуриду кадмію	19
Розділ II. Експериментальні результати та їх обговорення	25
2.1. Оптичні властивості тонких плівок сульфіді марганцю.....	25
2.2. Методика виготовлення гетеро структури на основі тонких плівок сульфіді марганцю.....	27
2.3. <i>I-V</i> -характеристики гетеропереходу MnS/ <i>n</i> -CdZnTe	30
2.4. Енергетична діаграма гетеропереходу MnS/ <i>n</i> -CdZnTe.....	33
2.5. Механізми прямих і зворотних струмів на гетеропереході MnS/ <i>n</i> -CdZnTe.....	34
Висновки.....	40
Список літератури.....	41
Додаток: Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	43

Вступ

Сульфід марганцю MnS відомий у трьох поліморфних формах: α -MnS зі структурою кам'яної солі (rock-salt), β -MnS зі структурою цинкової обманки і γ -MnS з типом ґратки вюрциту [1]. Алабандит α -MnS – найбільш стабільний поліморф. β -MnS і γ -MnS форми відносяться до тетраедральних метастабільних модифікацій. Під високим тиском або термічною дією біля 200 °C вони можуть бути легко перетворені до α -MnS [2,3]. α -MnS є напівпровідниковим матеріалом p -типу електропровідності з шириною забороненої зони $E_g = 2.7$ eV [4,5]. Дана величина E_g є зручною і корисною при конструюванні фотоелектричних приладів на основі гетеропереходів. При цьому плівка розташовується у конструкції приладів з фронтальної сторони, по відношенню до освітлення. Внаслідок зменшення поглинання у фронтальному шарі зменшуються втрати через рекомбінацію на фронтальній поверхні. Тонкі плівки α -MnS використовуються у гетероструктурах у поєднанні з ультратонкими шарами MoS₂ [6], фотодіодах MnS/Si [7], композитах з гетероконтактом MnS/In₂Se₃ для фотокаталітичних реакцій добування водню [8], гетеропереходах PbS/MnS [9], структурах MnS-Carbon [10], композитах для розщеплення сірководню під дією сонячного випромінювання MnS/(In_xCu_{1-x})₂S₃ [11], в нанотрубчатих сонячних елементах із втіленими композитами на основі ZnS-MnS [12].

При виготовленні тонких плівок сульфїду марганцю використовують вакуумні методи високочастотного магнетронного напилення [13], лазерного випаровування [14], епітаксія з використанням гарячих стінок (hot-wall epitaxy) [15]. Привабливими з економічної точки зору є невакуумні методи хімічного осадження з розчину (chemical bath deposition (CBD)) [16] і спреї-піролізу [17]. Нескладне обладнання даних методів дозволяє з достатньою точністю відтворювати режими осадження плівок з потрібними оптичними і електричними властивостями.

У літературі дослідження гетеропереходів на основі MnS і CdTe обмежуються теоретичним вивченням енергетичного профілю інтерфейсу поділу матеріалів у загальній концепції гетероконтактів між сполуками A^2B^6 [18]. Відомо, що тверді розчини $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при малих значеннях x , порівняно із CdTe, характеризуються вищою механічною міцністю і кращою структурною досконалістю. Застосування $Cd_{1-x}Zn_xTe$ для створення гетероструктур MnS/ n -CdZnTe сприяє їх кращій стійкості та стабільності.

У даній дипломній роботі досліджуються умови вирощування методом спреї-піролізу тонких плівок α -MnS на кристалічних підкладках CdZnTe електронного типу провідності та аналізуються електричні властивості і енергетичні параметри сформованого гетеропереходу MnS/ n -CdZnTe.

Розділ 1. Аналіз способів виготовлення і властивостей гетеропереходів на основі CdTe

1.1 Основи отримання тонких плівок для створення р-п переходу способом спреї-піролізу

Спосіб спреї-піролізу полягає у нанесенні на гарячу підкладку суміші, яка складається з аніонів кислотного залишку та катіонів металів (солі). При нанесенні розчину солі на нагріту підкладку вона розкладається під впливом температури, а речовини, які залишились на поверхні після проходження реакції, утворюють кристалічну ґратку. Побічні речовини, які є також продуктами цієї реакції, разом із розчинником випаровуються. Підкладка нагрівається тепловою енергією, що підводиться до неї і потрібна для забезпечення необхідної температури для проходження реакції термічного розпаду та взаємодії частин речовини. У результаті об'єднання одних кристалів з іншими утворюється шар з потрібної нам речовини.

Нанесення хімічної сполуки повітряно-крапельним шляхом забезпечується використанням пульверизатора за допомогою газу носія, який також вступає в реакцію термічного розпаду (рис 1.1). Нанесення суміші на розігріту підкладку відбувається при розрахованому стабільному тиску та швидкості нанесення речовини.

Механізм утворення плівки на розігрітій підкладці складається з таких етапів:

- а) розміщення крапель речовини на підкладці;
- б) розщеплення речовини під впливом температури;
- в) взаємодія між речовинами, які утворились в ході реакції розщеплення;
- г) випаровування побічних продуктів реакції;
- д) повторення даного механізму при нанесенні нових крапель на поверхню.

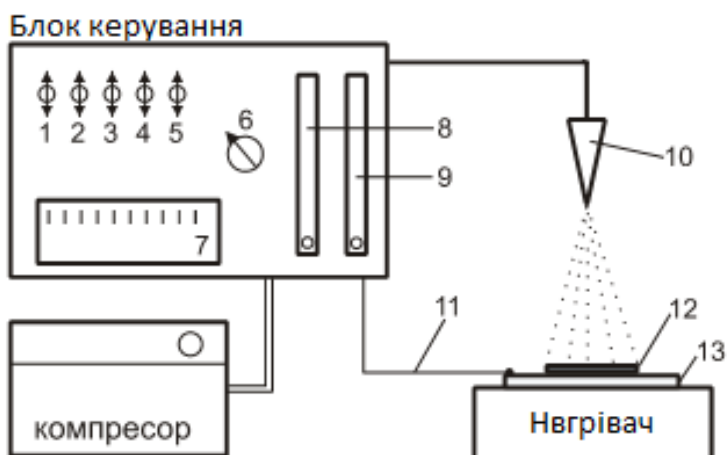


Рис.1.1 Блок-схема установки для спреј-піролізу:

1- вимикач припинення нагрівання підкладки; 2- джерело світла для перевірки товщини шару речовини; 3- вимикач подачі газу носія; 4,5- вибір динамічних режимів нанесення суміші; 6- вибір частоти нанесення; 7- контролер температури; 8- показник об'єму газу, який використовується для обдуву поверхні нанесення; 9- показник об'єму газу, який використовує пульверизатор; 10- пульверизатор з сумішшю; 11- термопара; 12- підкладка; 13- стійка до зовнішніх чинників поверхня для розміщення підкладок.

Речовини, які потрібні для термічного розпаду розпиленої на підкладку суміші, мають володіти такими властивостями:

а) у результаті розщеплення суміші під впливом температури повинні утворитись речовини, частинки яких вступають в реакцію, спровоковану температурою, і утворять необхідний нам шар речовини;

б) непотрібні нам продукти реакцій повинні легко випаруватись з поверхні при тій же температурі.

1.2. Властивості гетеропереходів для вирівнювання струму

Завдяки гетеропереходам з'являється значно більша варіація в виборі напівпровідників, які використовуються при фотоелектричних перетвореннях енергії. Гетероструктура складається з контакту пари напівпровідників з різною енергією проходження р-п переходу або різним хімічним складом.

Існує два види контактів: ізотипний (при однотипній провідності напівпровідників) та анізотипний (при різній провідності напівпровідників).

Для визначення коефіцієнту корисної дії і аналізу процесів, що відбуваються у досліджуваному фотоперетворювачі, розраховують конфігурацію зонної діаграми та енергетичні параметри.

Провідні енергетичні показники речовин, які впливають на особливості гетероструктур, це E_{g1} і E_{g2} - енергія, яку потрібно витратити для проходження забороненої зони, що утворилась при контакті двох напівпровідників; χ_1 і χ_2 – спорідненості до електрона; A_n і A_p – роботи виходу електронів; δ_n і δ_p – глибина залягання рівня Фермі відносно зони основних носіїв заряду у забороненій зоні.

Для різних напівпровідників притаманне своє значення енергії проходження забороненої зони E_g та спорідненості з електроном χ . Від типу провідності та енергетичних особливостей варіюється глибина залягання рівня Фермі δ і робота виходу електронів A , тобто розрахунок цих двох параметрів є обов'язковим, оскільки вони можуть відрізнятись навіть використовуючи один і той же матеріал.

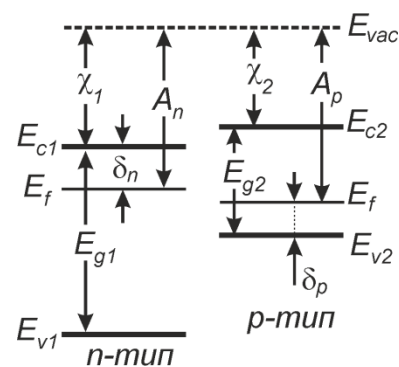


Рис.1.2. Енергетичні показники напівпровідників

Щоб знайти роботу виходу електронів A_n і A_p для структур з обома (n і p) типами провідності, використовують таку формулу:

$$A_n = \chi_1 + \delta_n ; \quad A_n = \chi_2 + (E_{g2} - \delta_p) , \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.1)$$

Для обчислення глибини залягання рівня Фермі необхідно визначити питомий електроопір (до прикладу чотиризондовим методом). Щоб розрахувати опір для напівпровідників з різними типами провідності, скористаймося формулою:

$$\rho_n = \frac{1}{q\mu_n n} ; \quad \rho_p = \frac{1}{q\mu_p p} , \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.2)$$

Де μ_n і μ_p – рухливості носіїв заряду (електронів та дірок), n і p – концентрації носіїв заряду для невироджених напівпровідникових матеріалів з невисокою кількістю електронів або дірок, які визначають за виразами:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{\delta_n}{kT}\right) ; \quad p = N_V \exp\left(-\frac{\delta_p}{kT}\right) , \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.3)$$

де N_C і N_V – ефективні величини значень густини енергетичних станів зонах провідності або валентній, відповідно, T – абсолютна температура.

Беручи до уваги вирази (1.2) та (1.3) тоді формули для обчислення глибини залягання рівня Фермі для напівпровідників з різним типом провідності набувають вигляду:

$$\delta_n = kT \cdot \ln(q\mu_n \rho N_C) ; \quad \delta_p = kT \cdot \ln(q\mu_p \rho N_V) ,$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.4)$$

На рисунку 1.3 ми бачимо енергетичні діаграми для гетеропереходів з різними типами провідності, які виникли внаслідок поширення електронів з напівпровідника з більшою шириною забороненої зони E_g і меншою роботою виходу $A_1 = \chi_1 + \delta_1$ у напівпровідник з меншою шириною забороненої зони і більшою роботою виходу електрона $A_1 = \chi_1 + E_{g2} - \delta_2$ ($A_1 < A_2$). Головне чим відрізняються ці– гетеропереходи прояв енергетичного максимуму у зоні

провідності на стику напівпровідників. На (рис.1.3,б) його виникнення є наслідком відношення спорідненостей електрона $\chi_1 < \chi_2$. На (рис.1.3,а) максимум не спостерігається тому, що відношення спорідненостей тут $\chi_1 > \chi_2$. Після потрапляння світла на гетероструктуру утворюються носії заряду, неосновні носії заряду напівпровідника з невеликою шириною забороненої зони E_{g2} поширюються до гетеропереходу і під впливом внутрішнього електричного поля переходять з напівпровідника із p типом провідності в напівпровідник з n типом провідності. Неосновні носії заряду, які виникли внаслідок освітлення сонячного елемента, не розділятимуться за умов наявності в зоні провідності бар'єру у вигляді енергетичного максимуму, що в свою чергу провокує зменшення кількості носіїв заряду відповідно зниження фотоструму в даній гетероструктурі. Виходячи з вищесказаного, використання гетеропереходів з енергетичною діаграмою як на рис.1.3.б) не є доцільним, тому при створенні сонячних елементів надають перевагу гетеропереходу без піку рис.1.3.а), що не створює перешкод для дифундування електронів.

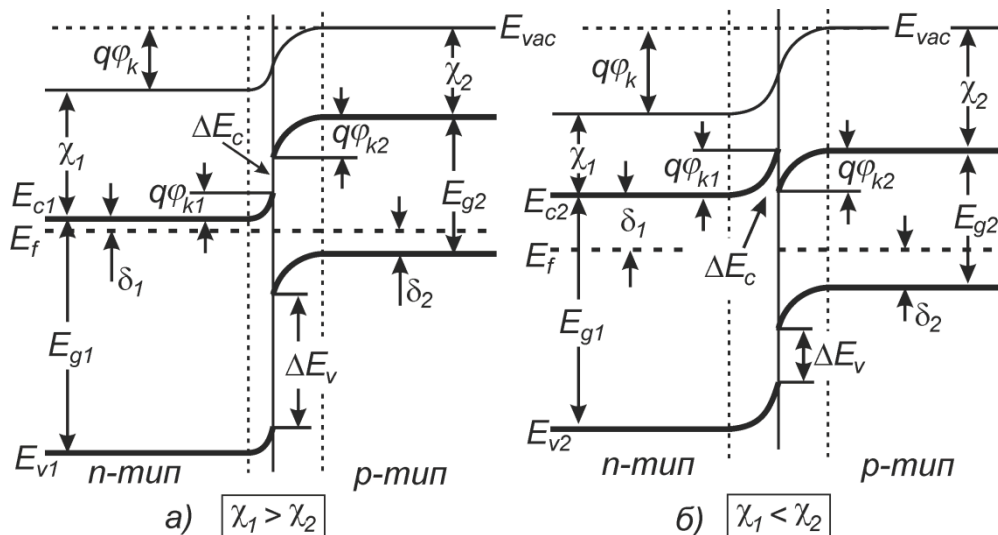


Рис.1.3. Енергетичні діаграми гетеропереходів: без перешкод для дифундування носіїв заряду (а) та із бар'єром у зоні провідності для електронів (б)

Знаючи висоту бар'єру у напівпровідників з широкою $q\varphi_{k1}$ та вузькою $q\varphi_{k2}$ шириною забороненої зони, можемо знайти висоту бар'єру зумовленого контактною різницею потенціалів на стику двох напівпровідників:

$$q\varphi_k = q\varphi_{k1} + q\varphi_{k2} \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.5)$$

Величина розриву зони провідності ΔE_C – це різниця спорідненостей до електрона напівпровідників:

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.6)$$

Величина розриву валентної зони ΔE_V – це різниця спорідненостей до електрона і різниця заборонених зон напівпровідників:

$$\Delta E_V = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.7)$$

Для розрахунку висоти потенціального бар'єру, зображеного на рис.1.3,а), використовуючи енергетичні показники, маємо формулу:

$$q\varphi_k = E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 - \Delta E_C \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.8)$$

Для розрахунку висоти потенціального бар'єру у вигляді максимуму, зображеного на рис.1.3,б), використовуючи енергетичні показники, маємо формулу:

$$q\varphi_k = E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 + \Delta E_C \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.9)$$

Щоб отримати якомога більшу напругу холостого ходу U_{xx} на гетеропереході, нам потрібно, як і в звичайному напівпровіднику, збільшити контактну різницю потенціалів φ_k . З метою збільшення φ_k і U_{xx} гетероструктури з формул (1.8) і (1.9) бачимо, що потрібно збільшити

енергію для проходження р-n переходу в вузькозонному напівпровіднику. Для досягнення цієї мети доречно насичувати обидва напівпровідники, з контакту яких складається гетероперехід, максимальною кількістю донорів і акцепторів (тобто збільшити їх концентрацію N_d і N_a). Також наслідком цього є те, що в забороненій зоні зменшуються глибини залягання рівнів Фермі δ_1 і δ_2 :

$$\delta_1 = kT \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_d}\right), \quad \delta_2 = kT \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_a}\right), \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.10)$$

У діапазоні температур, у якому починається зменшення концентрації носіїв заряду, домішки $n = N_d$ і $p = N_a$.

Те, що немає енергетичного максимуму, який виконує роль перепони для носіїв заряду в зоні провідності, негативно впливає на контактну різницю потенціалів. Внаслідок чого ΔE_C (величина розриву зони провідності) послаблює φ_k (1.8). Використання таких гетероструктур доцільне лише при умові $\Delta E_C \rightarrow 0$, тільки тоді можна отримати високу U_{XX} .

У гетероструктурі, в якій наявний максимум, навпаки спостерігається зростання контактної різниці потенціалів (1.9). Та цей же максимум перешкоджає розділенню домішкових носіїв заряду, що супроводжується спадом фотоструму, хоча і зростанням φ_k і U_{XX} .

Умова створення енергетичного максимуму для дірок в гетероструктурі, яка складається з напівпровідника з вузькою шириною забороненої зони n -типу та з великою p -типу, виглядає так:

$$(\chi_1 + E_{g1}) < (\chi_2 + E_{g2}), \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.11)$$

У такому гетеропереході при розриві валентної зони зменшується контактна різниця потенціалів, як і в випадку з розривом зони провідності в гетеропереході з широкозонним n -типу та вузькозонним p -типу

напівпровідниками. При умові, якщо енергетичний максимум не створюється, то при збільшенні розриву валентної зони спадає φ_k .

$$q\varphi_k = E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 - \Delta E_V \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.12)$$

При створенні максимуму:

$$q\varphi_k = E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 + \Delta E_V \quad \Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.13)$$

Виходячи з усього вищесказаного, для виготовлення фотоперетворювачів використання гетероструктур з наявним енергетичним максимумом на контакті двох напівпровідників не є доцільним. А при використанні таких гетеропереходів зменшують вплив бар'єру особливостями конструкції.

1.3. Підбір речовин для створення фотоперетворювачів за допомогою гетеропереходу

Для підбору якісних напівпровідникових зразків для виготовлення гетероструктури слід використовувати такі критерії:

1. На енергетичній діаграмі напівпровідника не має простежуватись будь-який максимум (ні у валентній зоні, ні у зоні провідності), який не дає, створеним світлом, носіям заряду розділятися. Для дотримання цього критерію необхідне здійснення такої умови:
 - для напівпровідника E_{g2} p - типу потрібно дотримання співвідношення $\chi_n > \chi_p$ (рис.1.4,а);
 - для напівпровідника E_{g2} n -типу потрібно дотримання співвідношення $\chi_n < \chi_p$ (рис.1.4,б).

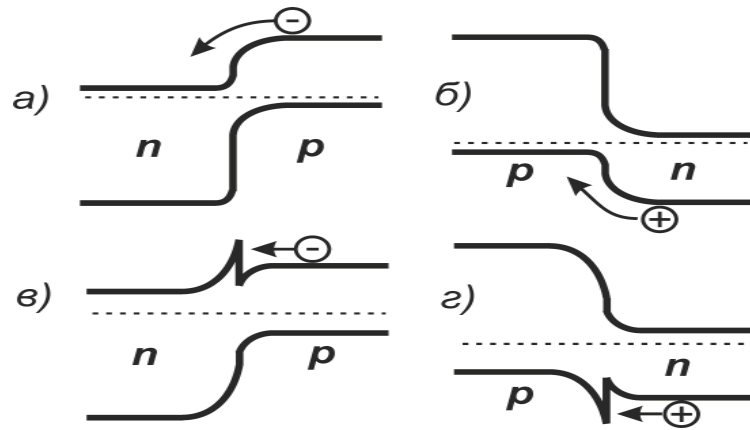


Рис.1.4.Вплив співвідношення спорідненості з електроном на енергетичну діаграму гетероструктури:

а) $\chi_n > \chi_p$; б) $\chi_n < \chi_p$; в) $\chi_n < \chi_p$; г) $\chi_n > \chi_p$.

2. При виготовленні фотоперетворювача за допомогою гетероструктури відіграє велику роль U_{xx} і φ_k (напруга холостого ходу та контактна різниця потенціалів) і для досягнення ними високих значень, потрібно дотримання такої умови:
 - для напівпровідника E_{gl} n -типу розрив зони провідності має прямувати до 0 ($\Delta E_C \rightarrow 0$) та $\chi_n \approx \chi_p$;
 - для напівпровідника E_{gl} p -типу розрив зони валентності має прямувати до 0 ($\Delta E_V \rightarrow 0$) та $\chi_n \approx \chi_p$.
3. Для достатнього ККД сонячного елемента енергія, необхідна для проходження забороненої зони напівпровідника з вузькою зоною, який поглинає випромінювання, має бути розташована в межах від 1,4 до 1,6 еВ.
4. Для збільшення кількості сонячної енергії, яка проникає до поглиначя, величина енергії, яку потрібно затратити для проходження ширини забороненої зони поверхневого шару, має бути якомога більшою. Але матеріал має мати невеликий опір.
5. Потрібно підібрати матеріали з невеликою різницею показників кристалічних ґраток.

6. Щоб уникнути руйнування від високих температур, при виготовленні гетероструктури необхідно вибирати матеріали зі схожими значеннями коефіцієнта теплового розширення.

Основним методом створення фотоперетворювачів з використанням гетероструктур є «вікно»-поглинач. Конструкція такого сонячного елемента передбачає собою поглинання світлової енергії лицевим шаром, який являє собою напівпровідник з широкою забороненою зоною (E_{gl}). У такій структурі широкозонним напівпровідником (лицевою стороною) відбувається поглинання фотона світла (енергія якого $h\nu \geq E_{gl}$), а для створення пари електрон-дірка необхідне проникнення фотона (енергія якого $E_{g2} < h\nu < E_{gl}$) до вузькозонного напівпровідника. Перевагою такої конструкції є поглинання ширшого спектру світла, за допомогою якого фотоперетворювач стає більш чутливим до квантів з енергією $h\nu \approx E_{gl}$. Та це явище відбувається не завдяки поглинанню фотонів на лицевій стороні сонячного елемента. Напівпровідник з невеликою шириною забороненої зони також створює пари електрон-дірка за умови поглинання ним фотона, енергія якого $h\nu \geq E_{gl}$. Більшість пар створених фотонами, енергія яких $h\nu \geq E_{gl}$, взаємознищуються на верхньому шарі вузькозонного напівпровідника. Для зменшення наявності валентних ненасичених зв'язків і утворення «вікна», створюють шар напівпровідника з шириною забороненої зони E_{gl} на напівпровіднику з шириною забороненої зони E_{g2} , що сприяє розділенню внутрішнім полем гетероструктури фотонів (з енергією $h\nu \geq E_{gl}$), які проникли у вузькозонний напівпровідник. Якщо пара електрон-дірка виникне в E_{gl} напівпровіднику, то вона одразу ж взаємознищиться, що є недоцільним. Для цього при створенні фронтального шару фотоперетворювача надають перевагу напівпровіднику, в якому вірогідність створення носіїв заряду буде невисокою, що забезпечується якомога більшою шириною забороненої зони.

Присутність валентних ненасичених зв'язків (рис.1.5,а) при контакті напівпровідників супроводжується виникненням в забороненій зоні локальних енергетичних станів (рис.1.5,б).

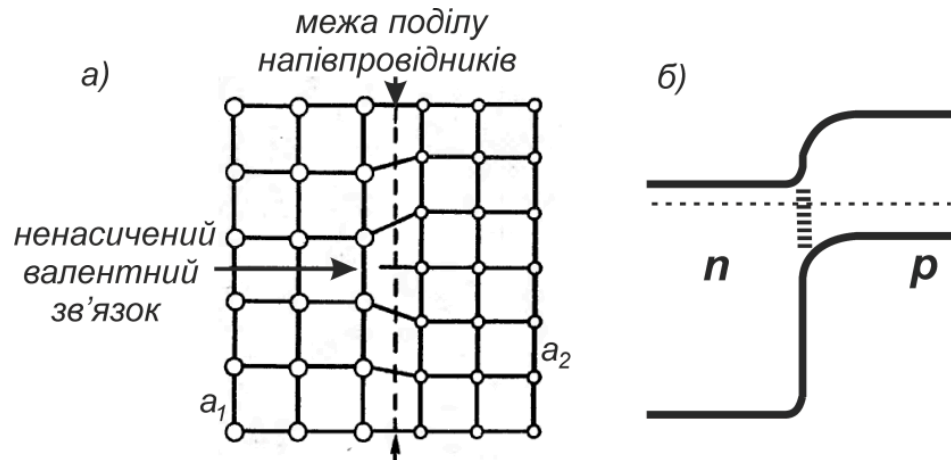


Рис.1.5. Створення валентного ненасиченого зв'язку внаслідок контакту двох кристалів з неоднаковими показниками постійної ґратки (а) і локалізовані енергетичні стани на гетеропереході (б)

Внаслідок їх присутності відбувається взаємознищення носіїв заряду, які були генеровані квантами світла. Різні значення постійних ґратки напівпровідників a_1 і a_2 провокують створення локалізованих енергетичних станів. Але при створенні гетероструктури на перших його етапах (при нанесенні одного матеріалу на інший) має місце утворення пружинних деформацій, що нейтралізує дію цієї невідповідності $\Delta a = a_1 - a_2$. Щоб знайти сумарну кількість валентних ненасичених зв'язків на одиницю площі, маємо формулу:

$$N_s = \frac{1}{a_1^2} - \frac{1}{a_2^2}$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x},$$

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1.14)$$

За умови $a_1 \approx a_2 = a$, $\Delta a/a = 0,05$ і $a = 0,5$ нм (показники постійної ґрати різняться на 5%) буде спостерігатись така кількість рекомбінаційних центрів $N_s = 4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$.

Велика кількість таких дефектів спричинить значний спад напруги холостого ходу (U_{xx}) фотоперетворювача, який буде спричинятись спадом

різниці потенціалів внаслідок рекомбінації пар електрон-дірка в цих центрах на заміну їх розділенню.

1.4. Конструкція фотоперетворювачів на основі CdTe

Хімічна сполука кадмію (Cd) і телуру (Te) – це один з основних матеріалів, який використовують для виготовлення сонячних елементів. Його основні характеристики такі:

- це прямозонний напівпровідник типу A^2B^6 ;
- енергія, яка потрібна для походження ширини забороненої зони $E_g = 1,5$ eV, (що дає можливість ефективного фотоперетворення енергії);
- коефіцієнт поглинання світла $\alpha \approx 10^6 \text{ м}^{-1}$;
- ККД фотоперетворювачів на основі телуриду кадмію наближається до 22,1 %.

На рис.1.6. ми бачимо схему створення найпотужніших фотоперетворювачів з допомогою телуриду кадмію. Є доцільним дотримуватись такого порядку нанесення шарів TCO – CdS – CdTe, що дасть значно якісніший сонячний елемент. Якщо ж використати послідовність CdTe – CdS – TCO, то виготовлений на перших етапах тиловий контакт з кадмій телуридом є нестабільним в подальшому процесі. Можливе збільшення опору або контакт може стати неомічним, що негативно вплине на якість фотоперетворювача.

Покращивши конструкцію $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$, отримуємо фотоелемент з конструкцією TCO/ $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ (тонка плівка сульфїду кадмію виконує роль буферного шару). Для створення «вікна»-поглинача (лицевого шару) необхідний матеріал з високою прозорістю, а CdS маючи значення енергії необхідної для перетинання забороненої зони $E_g = 2,42$ eV не є достатньо

прозорим, що створює можливість генерації зарядів у його шарі при попаданні на нього фотонів, енергія яких $h\nu \geq 2,42$ еВ.

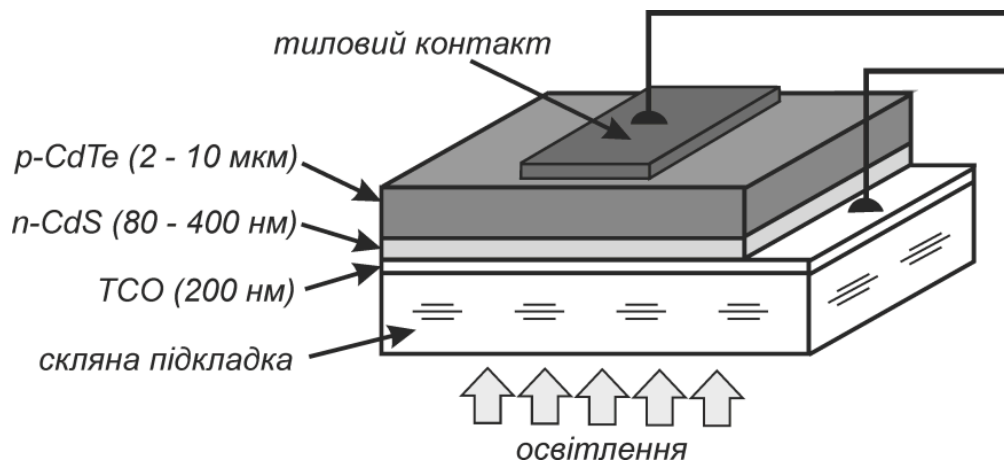


Рис.1.6. Принципова схема фотоперетворювача з високим ККД на основі телуриду кадмію.

Оскільки постійні ґраток матеріалів CdTe та CdS ідентичні, то і на їхньому стику не будуть утворюватись рекомбінаційні центри. Але пари електрон-дірка, які були створені при потраплянні квантів у шар сульфід кадмію, будуть взаємознищуватись на лицевій поверхні сонячного елемента. Щоб досягти невеликого опору лицевого шару (сульфід кадмію), необхідне його значне легування, і як наслідок збільшується кількість рекомбінованих пар електрон-дірка в тілі шару. Якщо ж замість CdS взяти інший напівпровідник з більшою шириною забороненої зони, припустимо TCO, то це створить велику кількість рекомбінаційних центрів через різні показники постійної ґраток. Щоб збільшити кількість квантів з енергією $h\nu \geq 2,42$ еВ, які в гетероструктурі CdS/CdTe проходять через шар сульфід кадмію до телуриду кадмію, необхідно зменшити шар CdS. Завдяки цьому в зоні внутрішнього електричного поля будуть створюватись пари електрон-дірка, які одразу ж будуть розділятися ним же і будуть створювати різницю потенціалів. Також зменшення товщини шару сульфід кадмію зменшить кількість рекомбінованих зарядів. Але є і негативний аспект зменшення товщини (мало легованої) плівки CdS, він полягає у збільшенні опору. Щоб

нівелювати цей ефект є доречним нанесення на CdS шару TCO (провідний оксид з високою прозорістю).

Отже, фотоперетворювач з конструкцією, вказаною на рис.1.6., складається з гетеропереходу між сульфідом кадмію та телуридом кадмію (CdS/CdTe), а фронтальний шар з TCO слугує провідником носіїв заряду до зовнішнього кола. У фотоперетворювачі TCO/*n*-CdS/*p*-CdTe можливий дотик провідного оксиду до телуриду кадмію (за умови надтонкого шару сульфід кадмію <50 нм), що значно зменшує ККД гетеро структури (рис.1.7,а). Щоб не відбувалось міні КЗ, в таких місцях дотику між цими шрами наносять надтонкий шар *i*-ZnO (оксид з великим опором) (рис.1.7,б). Для створення контакту з кадмій телуридом необхідно утворення шару *p*⁺-типу з невисоким опором. Якщо ж створити контакт з металом без цього шару, можливе утворення неомічного контакту, що відбувається внаслідок появи бар'єрів Шотки. Для того, щоб збагатити верхній шар телуриду кадмію (*p*-типу провідності), його піддають дії розчинюючого травника. Останнім етапом формування фотоперетворювача є створення шару Cu₂Te (*p*⁺-типу провідності), який характеризується невеликим опором і на нього наноситься тонкий шар вуглецю або металу.

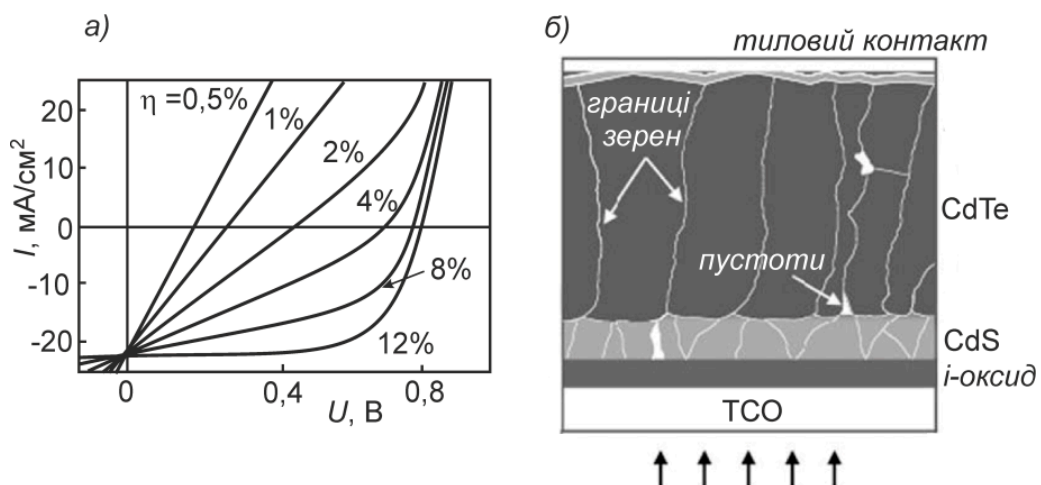


Рис.1.7. Графік, який демонструє зниження ефективності сонячних елементів при пробіі шару CdS (а) та конструкція фотоперетворювача з використанням шару TCO (б)

Проте контакт з Cu є недостатньо надійним, оскільки цей метал створює слабкий зв'язок Cu-Te та дуже сильно дифундує у телурид кадмію, тому ведуться дослід, в яких в якості контакту використовують Sb_2Te_3 і ZnTe:N .

1.5 Процес створення фотоперетворювача за допомогою телуриду кадмію (CdTe)

Для створення повноцінних панелей з фотоперетворювачами, кристали вирощують на натрій-кальцієвому склі з напиленням відносно дешевого $\text{SnO}_2\text{:F}$. Існують й інші види напилення, такі як ITO, але їх використовують не так часто, оскільки є ряд недоліків таких, як дифундування індію в інші шари на етапах напилення шарів сульфід кадмію та телуриду кадмію на поверхню такого типу та висока вартість цього матеріалу. Найдоцільнішим провідним оксидом для створення фотоперетворювача на основі CdTe є Cd_2SnO_4 , оскільки він має ряд переваг порівняно з вище названими. Його переваги полягають у більшій провідності та можливості пропускати більшу кількість сонячної енергії. Одним з найважливіших критеріїв при виборі провідного оксиду для створення фронтального шару сонячного елемента є невразливість до великих значень температури, які виникають при нанесенні шару телуриду кадмію *p*-типу провідності ($\sim 500 - 600^\circ\text{C}$). Напилення ZnO:Al створюється при невисоких значеннях температури, що не влаштовує нас через вищезазначений критерій. Але при дотриманні температурного режиму на всіх етапах виготовлення ($\sim 390^\circ\text{C}$), то виготовлений сонячний елемент буде мати ККД до $\sim 14\%$.

Існує два види нанесення шару сульфід кадмію на підкладку скло/провідний оксид:

- хімічне осадження розчину (CBD);
- сублімація у замкнутому об'ємі (CSS).

І шість найефективніших видів нанесення шару телуриду кадмію:

- сублімація у вакуумі (PVD - physical vapor deposition);
- сублімація у замкнутому просторі (CSS);
- магнетронне високочастотне напилення;
- транспортне осадження випаровувань (VTD - vapor transport deposition);
- розклад метал-органічних сполук з газової фази (MOCVD - Metal organic chemical vapor deposition);
- трафаретний друк зі спіканням нанесених шарів.

Для утворення телуриду кадмію способом сублімації у вакуумі (PVD), який зображений на рис.1.8,а), необхідна раніше утворена уже готова речовина CdTe. Цей процес відбувається в діапазоні температур 700 – 900 °C і починається з випаровування з твердої фази молекул телур двічі і атомів кадмію. Сама суть цього методу полягає у тому, що відбувається осадження цих частинок на менш нагрітій поверхні (підкладці) з температурою (100 – 400 °C), внаслідок чого утворюється шар потрібного нам матеріалу. Установка, яка є обов'язковим компонентом цього процесу, це вакуумна камера, що створює необхідний нам тиск $\sim 10^{-6}$ Торр ($\sim 10^{-4}$ Па) для сублімації. Розмір зерен у шарі телуриду кадмію, ширина якого ~ 2 мкм, значною мірою залежить від температури поверхні підкладки, так при температурі 350 °C він дорівнює ~ 1 мкм, а при 100 °C ~ 100 нм. Але цей метод є відносно повільним, оскільки при температурі поверхні підкладки в 400 °C кадмій і телур знову випаровуються з уже осадженого шару.

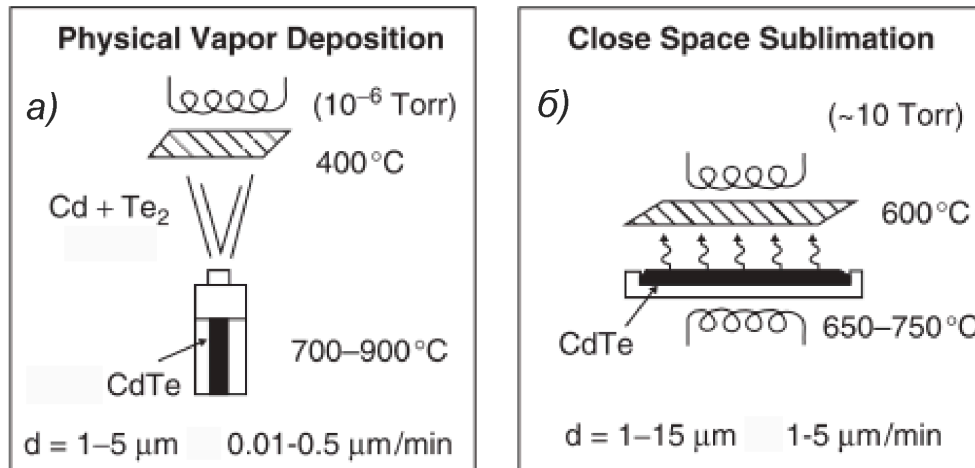


Рис.1.8. Вирощування плівки телуриду кадмію а) PVD-методом і б) CSS-методом.

Недолік попереднього методу врахований в способі сублімації у закритому об'ємі (CSS-метод). Для вирощування плівки таким методом необхідно, щоб між речовиною (CdTe) і поверхнею для вирощування була незначна відстань (рис.1.8,б). Для зменшення кількості речовини, яка вдруге випарувалась з підкладки, необхідно збільшити парціальний тиск ($\sim 1 \text{ Torr}$) у просторі, в якому відбувається вирощування, для цього в нього запускають неактивні гази такі, як He , Ar чи N_2 . У цьому ж випадку розмір кристалів речовини приблизно рівний шару плівки телуриду кадмію при температурі підкладки в $\approx 500^\circ\text{C}$, що в свою чергу значно підвищує швидкість напilenня плівки на відміну від методу сублімації у вакуумі.

Якщо ж нам необхідно виростити плівку на підкладці, яка знаходиться на віддалі від джерела випаровування, то використовують метод VTD транспортного осадження (рис.1.9,а). Його суть в тому, що кадмій і телур переносяться потоком газу. Використовується окремий об'єм з температурою $\sim 800^\circ\text{C}$, в якому знаходиться речовина телурид кадмію, при нагріванні якої виділяються Te і Cd , які переносяться інертним газом до прикладу N_2 чи Ar в інший об'єм і через отвір на віддалі в 1 cm наносяться на поверхню для росту плівки. Потрапляючи у другу камеру, температура в якій $\sim 600^\circ\text{C}$, пари підвищують концентрацію Cd і Te , що провокує їх осадження (конденсацію)

на підкладку. Спосіб, схожий з сублімацією у закритому об'ємі, але при транспортному осадженні атоми дифундують. Перевагою цього способу є висока швидкість вирощування плівок та можливість вирощувати плівки на поверхнях, що рухаються.

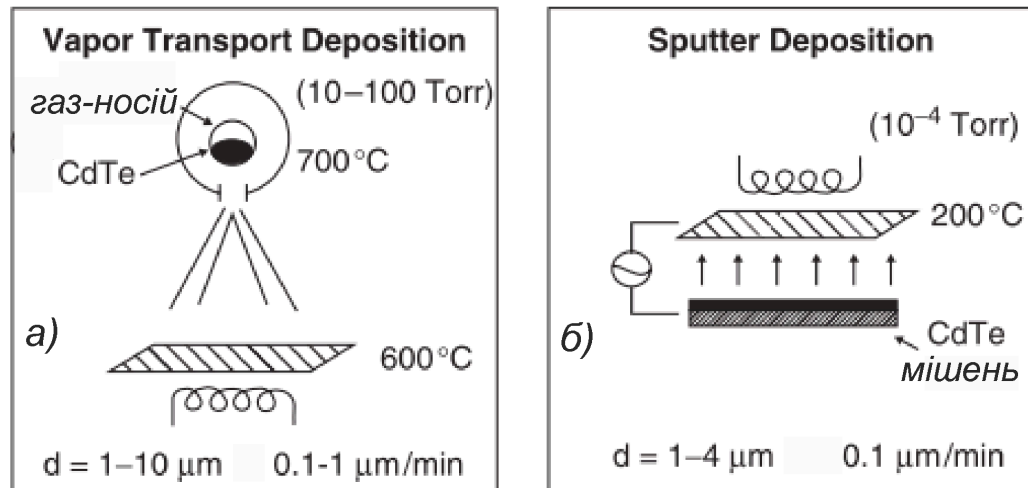


Рис.1.9. Одержання плівок телуриду кадмію а) VTD-методом б) методом магнетронного високочастотного напилення.

Створення плівок методом високочастотного магнетронного напилення (рис.1.9,б) полягає у бомбардуванні зразку CdTe зарядженими позитивно частинками аргону Ar^+ , внаслідок чого вибиті атоми Cd і Te переносяться на підготовлену поверхню і утворюють там шар телуриду кадмію. При проходженні цього процесу підкладка має бути розігріта не більше 300°C та знаходитись під тиском ~ 10 мТорр. У результаті проходження цього процесу утворюється шар телуриду кадмію (~ 2 мкм), величина зерна в якому $\sim 300\text{нм}$.

Суть методу розкладу метал-органічних речовин з газового стану МОСVD (рис.1.10,а) у розкладі під впливом температури двох сполук CdMe_2 та диізопропілтелуру на поверхні з температурою в діапазоні $200 - 400^\circ\text{C}$. Наслідком є утворення шару CdTe (~ 2 мкм) з розміром зерна >1 мкм.

Найбільш елементарним способом утворення плівки телуриду кадмію вважається спосіб трафаретного друку зі спіканням шарів (рис.1.10,б). Щоб використати такий метод, потрібно приготувати суміш, яка складається з розчинника поліпропіленгліколю, солі кадмій хлорид двічі і подрібненого телуриду кадмію. Ця суміш наноситься на потрібну нам поверхню і спікається при температурі 500 – 800 °С. Під дією температури телурид кадмію розчиняється у CdCl_2 , який переходить у рідкий стан. При охолодженні цього розплаву, створюється плівка внаслідок кристалізації телуриду кадмію через його високу концентрацію у розплаві. Охолодження проводиться азотом. Основні характеристики таких плівок це товщина <30 мкм і поперечний переріз зерен <5 мкм. Внаслідок дешевизни, швидкості та простоти процесу страждає якість.

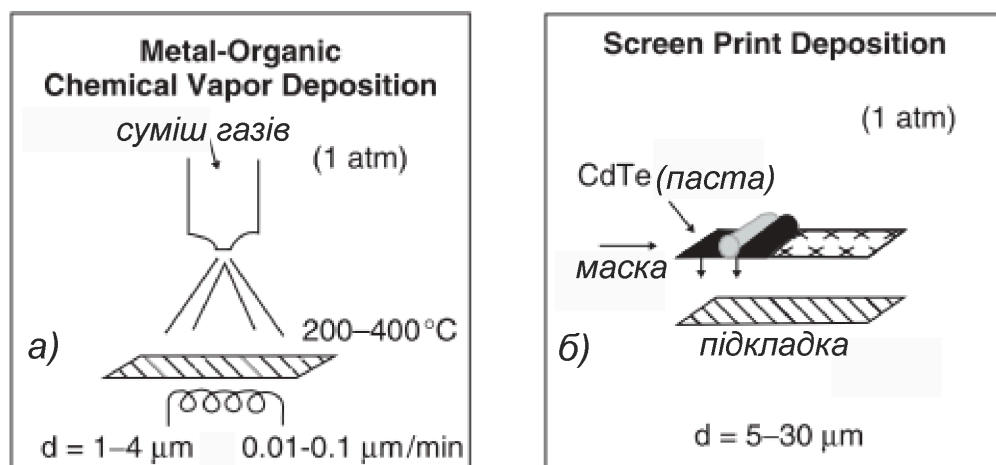


Рис.1.10. Вирощування плівки телуриду кадмію а) розкладу метал-органічних сполук б) трафаретним друком.

Для знімання фотоереєс з сонячного елемента конструкції TCO/*n*-CdS/*p*-CdTe необхідно утворити тиловий контакт, для цього необхідно обробити плівку телуриду кадмію хлоридом кадмію (~20 – 200 нм) і піддати дії температури 380 – 450 °С протягом 15 – 30 хв. Це необхідно для так званої «активації» гетеропереходу (рис.1.11), внаслідок якої відбувається:

- збільшення зерен при рекристалізації;

- покращення властивостей шару телуриду кадмію;
- пасивуються межі зерен;
- дифундують атоми (формується гетероперехід);

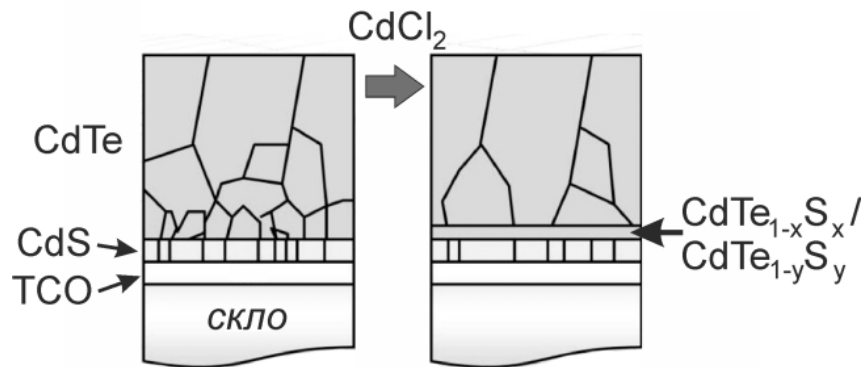


Рис.1.11. «активація» гетероструктури

(наслідок нанесення шару CdCl_2)

Тобто ця «активація» фотоперетворювача конструкції TCO/*n*-CdS/*p*-CdTe значною мірою впливає на ККД елемента, підвищуючи його від 1% (до термообробки) до >10% (після термообробки).

Розділ 2. Експериментальні результати та їх обговорення

2.1. Оптичні властивості тонких плівок сульфід марганцю

Виготовлені на підкладках натрій-кальцієвого скла (SLG) методом спреї-піролізу тонкі плівки сульфід марганцю при довжинах хвиль електромагнітного випромінювання $\lambda > 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ володіли оптичним коефіцієнтом пропускання світла $T > 50 \%$ (рис.2.1).

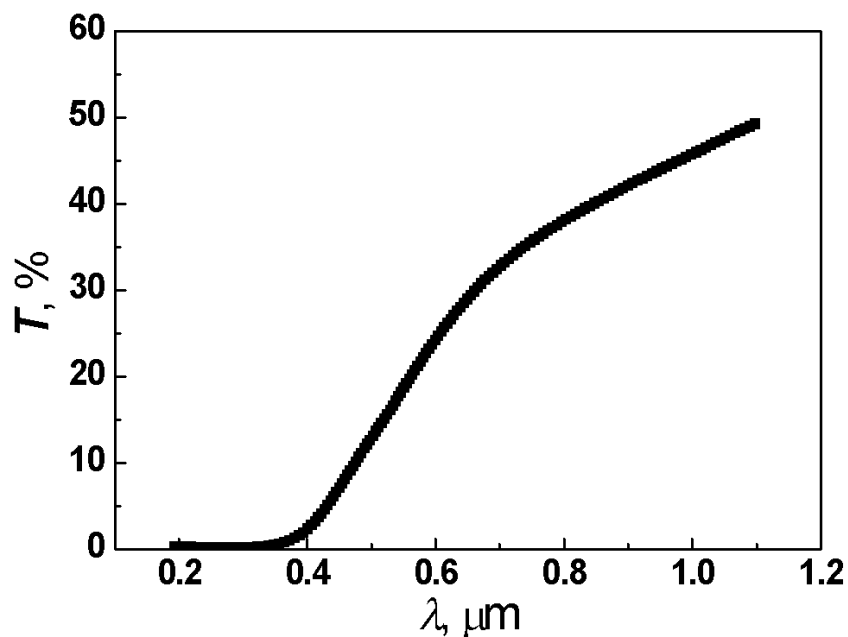


Рис.2.1. Спектральна залежність коефіцієнта пропускання T тонких плівок $\alpha\text{-MnS}$, отриманих методом спреї-піролізу

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

Коефіцієнт оптичного поглинання α при товщині плівки MnS $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ і коефіцієнті відбивання у досліджуваному діапазоні довжин хвиль $R \approx 15 \%$ ($n \approx 2.2$), який за даними літературних джерел характерний для плівок сульфід марганцю виготовленого методом спреї-піролізу, розраховувався за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^2}{4T^2} + R^2} \right]. \quad (2.1)$$

Спектральна залежність коефіцієнта поглинання α аналізувалася з використанням співвідношення:

$$\alpha = \frac{B^2 (h\nu - E_g)^n}{h\nu}, \quad (2.2)$$

де B – константа, n – константа, яка визначається типом оптичного переходу і для прямих дозволених переходів дорівнює $n = 1/2$.

Оптична ширина забороненої зони, яка визначалася екстраполяцією прямолінійних ділянок залежності $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ до нульового значення $\alpha h\nu = 0$, становить $E_g = 2.7$ eV (рис.2.2).

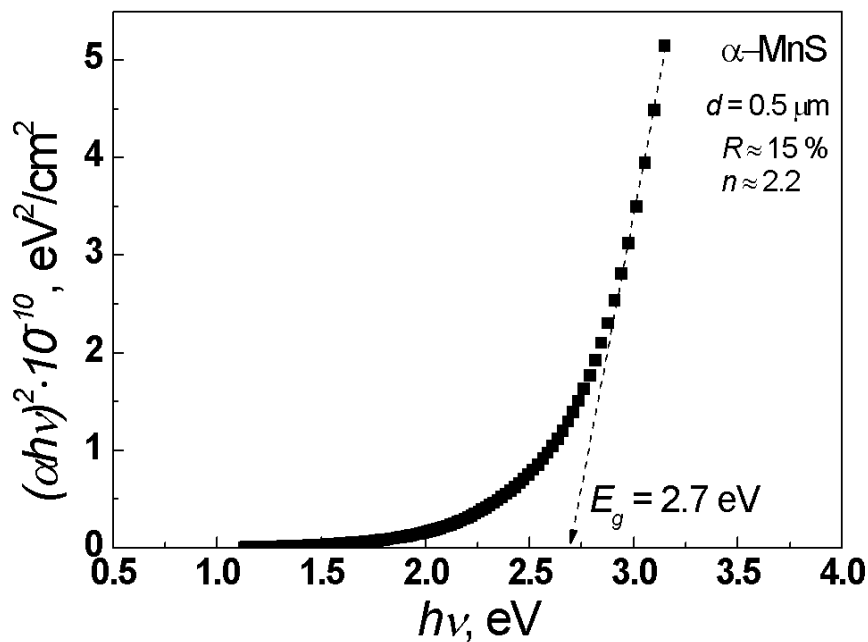


Рис.2.2. Спектральна залежність коефіцієнта поглинання α тонких плівок α -MnS, отриманих методом спреї-піролізу

Визначена оптична ширина забороненої зони отриманих спреї-піролізом плівок сульфїду марганцю добре узгоджується з відомими в літературі значеннями E_g для rock-salt структури алабандиту α -MnS, і відрізняється від значень, які характерні для гексагональної фази γ -MnS ($E_g > 3.5$ eV).

2.2. Методика виготовлення гетероструктури на основі тонких плівок сульфїду марганцю

Для виготовлення гетероструктур використовували плоскопаралельні пластинки базового матеріалу $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ товщиною $d \approx 1$ mm, які виготовлялися методом сколювання зі злитків твердих розчинів, отриманих вертикальним методом Бріджмена. Кристали характеризувалися електронним типом провідності. При $T = 300$ K вони мали наступні кінетичні параметри: електропровідність $\sigma = 53 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, концентрація електронів $n = 4.35 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ і їх холівська рухливість $\mu_H = 760 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Структури MnS/ n -CdZnTe виготовлялися нанесенням плівок α -MnS товщиною ~ 0.5 μm на поверхню нагрітих до температури $T_s = 350$ °C підкладок n -CdZnTe методом спреї-піролізу при атмосферному тиску 0.1 М водних розчинів солей дихлориду марганцю $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ і тіосечовини $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ у співвідношенні $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/(\text{NH}_2)_2\text{CS} = 1/3$ (рис.2.3). Для хлористого марганцю враховувався вміст молекул води, тобто бралось до уваги, що дана сіль є кристалогідратом. Збільшена концентрація іонів сірки у розчині обумовлена її летучістю та покиданням поверхні росту. Слід зазначити, що при змішуванні розчинів солей не відбувається комплексоутворення з характерним для нього мутним відтінком. Незважаючи на початкову прозорість свіжоприготованих розчинів, вони піддавалися перед пульверизацією фільтруванню. Приготовані до пульверизації розчини зберігали прозорість тривалий час. При піролізі утворюється бінарна сполука

сульфіду марганцю MnS p -типу електропровідності з оптичною шириною забороненої зони $E_g = 2.7$ eV і питомим опором $\rho \approx 2 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{см}$. При такому високому значенні ρ та низькій рухливості дірок у $\alpha\text{-MnS}$ $\mu = 6.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ концентрація носіїв заряду дорівнює $p \approx 4.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В умовах спреї-піролізу зверталася увага на те, що тривале перебування підкладок телуриду кадмію при високих температурах може бути причиною зміни їх електричних властивостей.

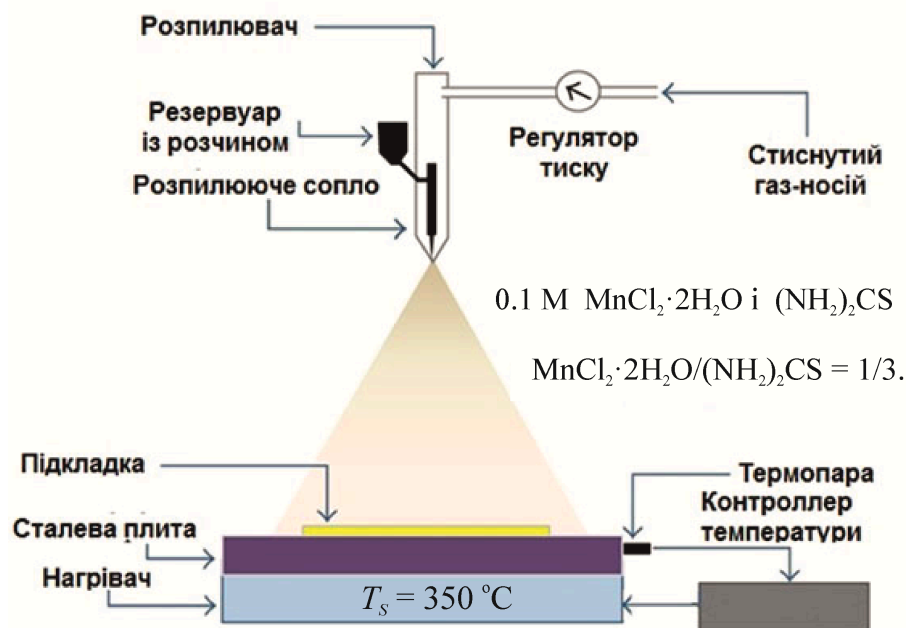


Рис.2.3.Схематичний вигляд установки для нанесення тонких плівок MnS методом спреї-піролізу

Товщина плівок $\alpha\text{-MnS}$ вимірювалася методом багатопроменевої інтерференції на мікроінтерферометрі Лінника МІІ-4. При цьому на поверхні з плівкою формувалася перед вимірюванням сходи́нка (рис.2.4 і 2.5).

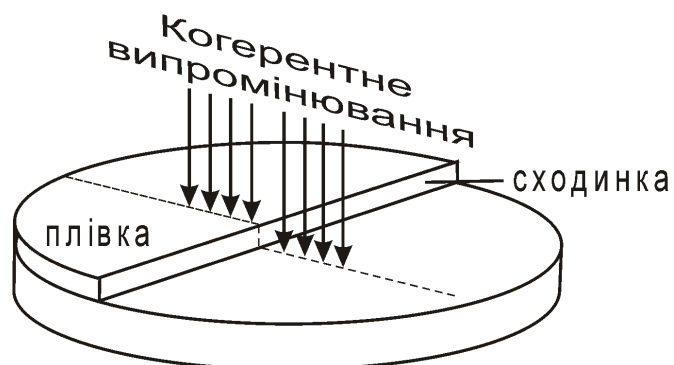


Рис.2.4. Сформована на підкладці ситалу тонка плівка MnS із сходинкою

Зміщення інтерференційної картини (ліній інтерференції) на величину одного інтервалу відповідає товщині плівки близько 0,27 мкм. Для досліджуваних плівок сульфїду марганцю інтерференційні лінії зміщувалися на (наближено) два інтервали. Щоб уникнути пошкодження виготовлених гетероструктур вимірювання товщини проводилося на супутніх підкладках, які розташовувалися поряд із підкладками телуриду кадмію.

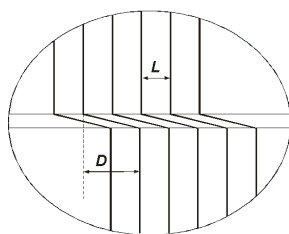


Рис.2.5. Вимірювання товщини плівки MnS за зсувом інтерференційних смужок на сходинці

Питомий опір плівок досліджувався за допомогою чотиризондового методу. Спектри пропускання плівок у видимій області випромінювання досліджувалися на спектральній установці СФ-2000. Виготовлення омичних контактів до низькоомних кристалів *n*-типу CdZnTe проводили вплавленням In. До плівки α -MnS контакти формувалися за допомогою струмопровідної пасти на основі срібла. *I-V*-характеристики гетероструктур MnS/*n*-CdZnTe вимірювалися на комплексній установці з використанням комбінованих приладів Щ300 і В7-16А. Стабільність електричних характеристик гетероструктури MnS/*n*-CdZnTe протягом тривалого часу (чотири місяці) контролювалася за допомогою приладу спостереження параметрів напівпровідникових структур (у тому числі і *I-V*-характеристик) Л2-56.

Вимірювання вольт-фарадних характеристик (ВФХ або $C-V$) здійснювалося із використанням приладу LCR Meter BR2876.

2.3. I - V -характеристики гетеропереходу MnS/ n -CdZnTe

Дослідження I - V -характеристик гетеропереходів MnS/ n -CdZnTe в діапазоні температур $T = 289 - 334$ К (рис.2.6) при прямих (позитивний потенціал на плівці MnS) та зворотних (позитивний потенціал на n -CdZnTe) напругах вказували на випрямлення струму. Коефіцієнт випрямлення при напругах $|V| = 1$ В становив $\sim 10^3$.

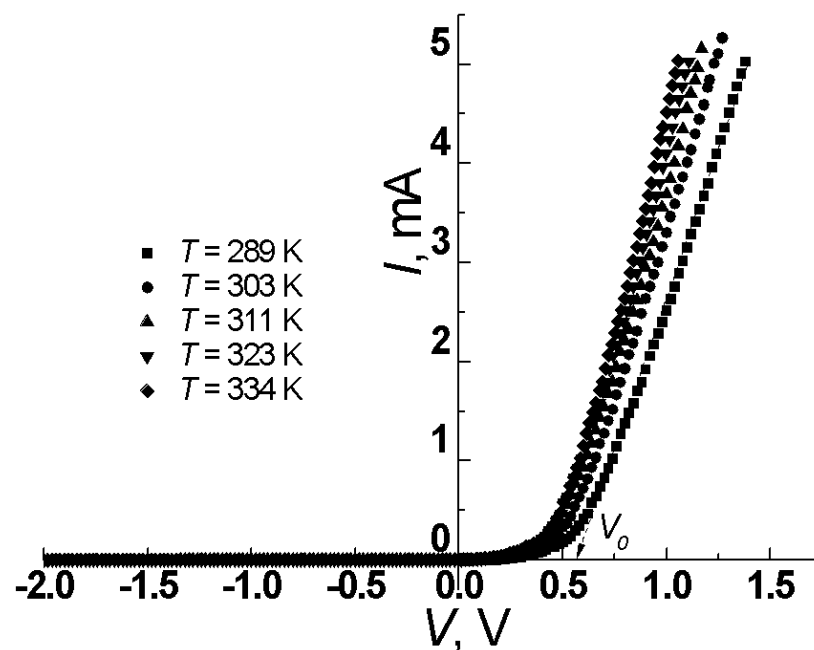


Рис.2.6. I - V -характеристики гетероструктури MnS/ n -CdZnTe при різних температурах

Напруга V_0 , при якій спостерігається стрімке збільшення прямого струму, оцінювалася методом екстраполяції лінійних ділянок прямих гілок I - V -характеристик до осі напруг. Лінійне зменшення V_0 від 0.6 В до 0.46 В при підвищенні температури від $T = 289$ К до $T = 334$ К (рис.2.8) пов'язане зі зменшенням висоти потенціального бар'єра $q\phi_B$ на гетеропереході MnS/ n -CdZnTe.

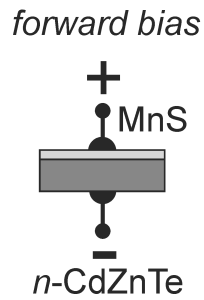


Рис.2.7. Полярність прямого зміщення гетероструктури MnS/n-CdZnTe

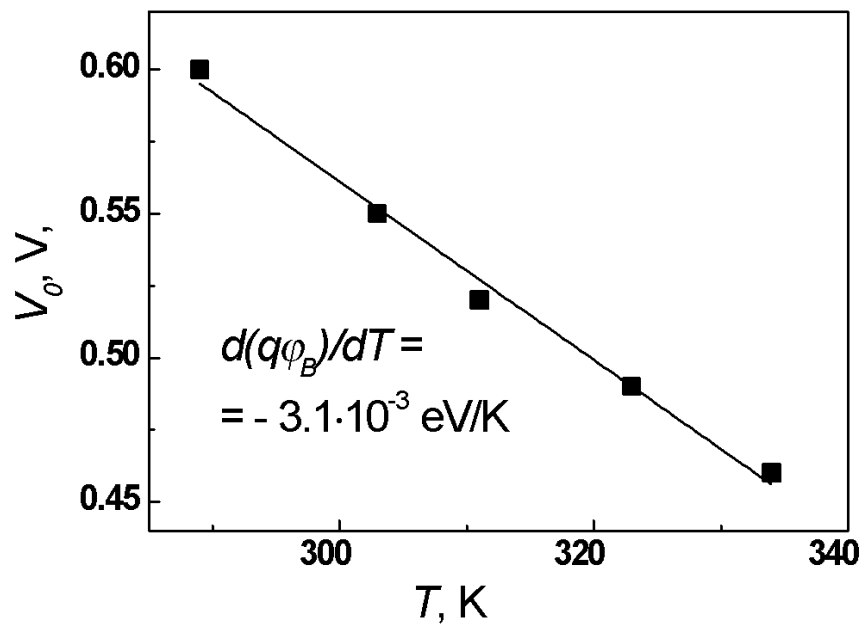


Рис.2.8. Температурна залежність висоти бар'єра $q\phi_B \approx qV_0$ гетероструктури MnS/n-CdZnTe

Визначений температурний коефіцієнт зміни $q\phi_B$ у дослідженому температурному інтервалі дорівнює $d(q\phi_k)/dT = -3.1 \cdot 10^{-3} \text{ eV/K}$. Отримана величина $d(q\phi_k)/dT$ гетероструктури MnS/n-CdZnTe добре узгоджується з характерними значеннями зменшення висоти енергетичного бар'єру на гетеропереходах з використанням кристалів CdZnTe. Вона на порядок більша, порівняно із температурним коефіцієнтом зміни ширини забороненої базового напівпровідника n-CdZnTe $\beta = -4.01 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ та є наслідком зростання при підвищенні температури концентрації власних носіїв заряду n_i

та ефективної густини станів N_C і N_V у дозволених енергетичних зонах. У структурі MnS/*n*-CdZnTe найбільш високоомним матеріалом є плівка MnS і зміна кута нахилу прямих гілок I - V -характеристик, який визначає послідовний опір R_S гетероструктури, пов'язана із температурною залежністю електричних властивостей плівки. Визначена з графіка $R_S = f(10^3/T)$ (рис.2.9) мала енергія активації провідності $E_a = 0.04$ eV характеризує електропровідність полікристалічних плівок і пов'язана із активацією руху носіїв заряду крізь бар'єри границь зерен. З використанням методу спреї-піролізу розміри кристалітів у плівках MnS знаходяться у межах десятків нанометрів і при товщині плівки 500 nm границі зерен здатні впливати на температурну залежність електропровідності навіть за перпендикулярного напрямку ліній струму до поверхні плівки (що реалізується у структурі MnS/*n*-CdZnTe).

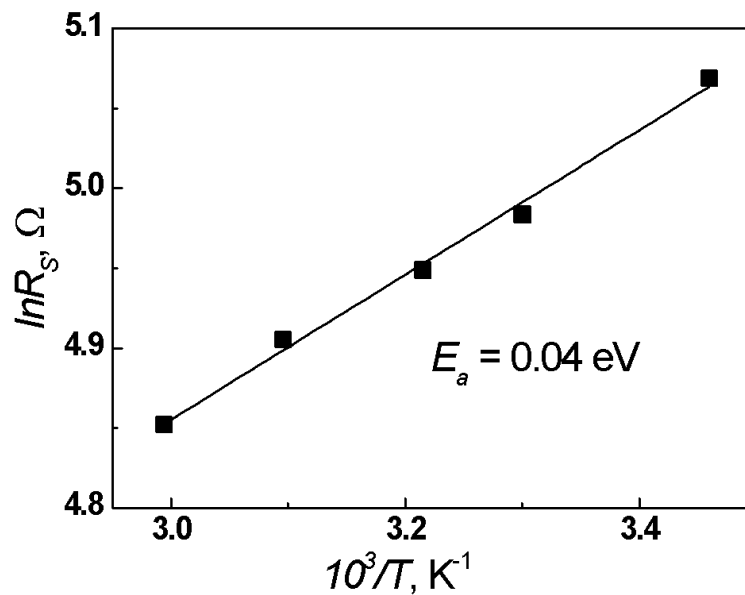


Рис.2.9. Температурна залежність послідовного опору R_S гетероструктури MnS/*n*-CdZnTe

Діодний характер I - V -характеристик гетероструктури MnS/*n*-CdZnTe за оцінкою значень V_0 (рис.2) визначається енергетичним бар'єром $q\phi_B \approx 0.5 - 0.6$ eV ($T \approx 300$ K). При відсутній зміні енергетичних параметрів матеріалів на

межі гетероконтакту: спорідненості до електрона $\chi(\text{MnS}) = 3.31 \text{ eV}$ і $\chi(\text{CdZnTe}) = 4.28 \text{ eV}$ та ширини заборонених зон $E_g(\text{MnS}) = 2.7 \text{ eV}$ (експеримент) і $E_g(\text{CdZnTe}) = 1.53 \text{ eV}$, при контакті $p\text{-MnS}$ і $n\text{-CdZnTe}$ повинен утворюватися достатньо високий енергетичний бар'єр для електронів у вигляді розриву зони провідності $\Delta E_C = \chi(\text{CdZnTe}) - \chi(\text{MnS}) = 0.97 \text{ eV}$. Величина ΔE_C не змінюється при прикладанні напруги, а існування такого значного бар'єру для електронів зони провідності заперечує отримані експериментальні дані. На реальному гетероконтакті $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$ спорідненість до електрона на поверхні $n\text{-CdZnTe}$ може зменшуватися внаслідок захоплення поверхнею електронів з об'єму напівпровідника. У той же час контактуюча поверхня плівки $p\text{-MnS}$ може захоплювати з плівки основні носії заряду (дірки), що супроводжується збільшенням спорідненості до електрона $\chi(\text{MnS})$. Тому реальне значення ΔE_C у досліджуваній структурі $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$ необхідно встановлювати експериментально.

2.4. Енергетична діаграма гетеропереходу $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$

Аналіз гетеропереходу $p\text{-MnS}/n\text{-CdZnTe}$ з точки зору контакту об'ємних матеріалів, який базується на розрахунку контактної різниці потенціалів ϕ_k внаслідок відмінних робіт виходу $A(p\text{-MnS}) = \chi(\text{MnS}) + (E_g(\text{MnS}) - (E_F - E_V)) = 5.51 \text{ eV}$ і $A(n\text{-CdZnTe}) = \chi(\text{CdZnTe}) + (E_C - E_F) = 4.38 \text{ eV}$ вказує на значну асиметрію гетеропереходу через значно більший опір плівки $p\text{-MnS}$ порівняно з $n\text{-CdZnTe}$. Електричне поле переходу у цьому випадку розташоване у плівці. При розрахунку $(E_F - E_V)$ використовувалися дані про ефективну густину станів $N_V(\text{MnS}) = 5.9 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $(E_C - E_F)$ для (CdZnTe) визначалося згідно типової методики. Оскільки у виготовленій гетероструктурі $\text{MnS}/n\text{-CdZnTe}$ використовується плівка $p\text{-MnS}$ (обмежений у об'ємі матеріал), то при формуванні гетеропереходу внаслідок різниці робіт виходу при переході електронів з $n\text{-CdZnTe}$ в $p\text{-MnS}$ відбувається інверсія

типу провідності плівки сульфиду марганцю. Тобто, внаслідок переходу електронів з телуриду кадмію у сульфід марганцю при контакті матеріалів плівка збагачується на електрони. Оскільки першопочатково вона володіє дірковою електропровідністю, то відбувається компенсація типу електропровідності та перехід до електронної провідності. Згідно досліджень C - V -характеристик плівка залишається високоомною і зі сторони n -CdZnTe формується енергетичний бар'єр висотою $q\phi_d = 0.5$ eV. Модель енергетичної діаграми гетероструктури MnS/ n -CdZnTe, яка добре узгоджується з експериментальними даними I - V - та C - V -характеристик показана на рис.2.10.

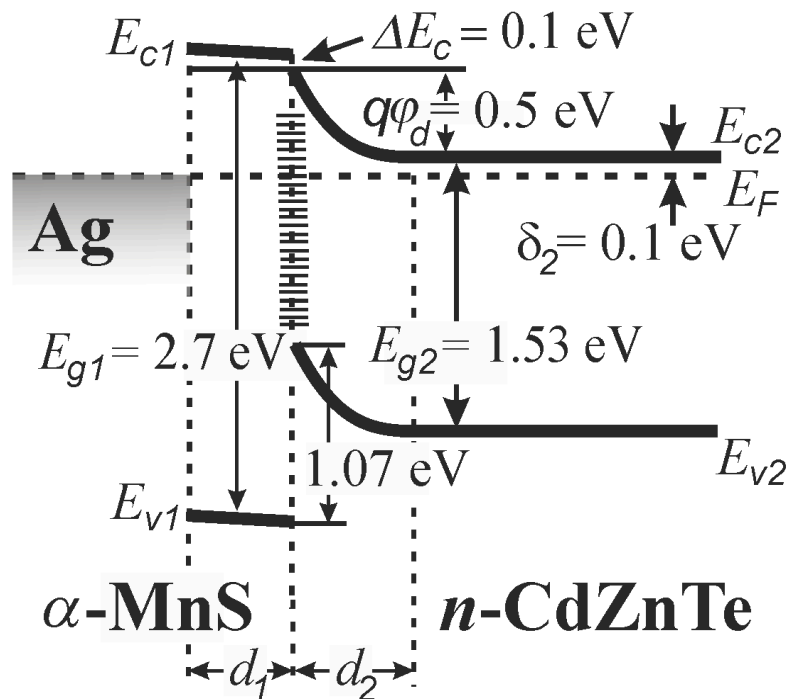


Рис.2.10. Енергетична діаграма гетероструктури α -MnS/ n -CdZnTe ($T = 300$ K)

Основними носіями заряду, які формують струм гетероструктури є електрони зони провідності матеріалів.

2.5. Механізми прямих і зворотних струмів на гетеропереході MnS/ n -CdZnTe

Для з'ясування механізмів протікання струму крізь гетероструктуру MnS/*n*-CdZnTe аналізувалися прямі гілки I - V -характеристик, які побудовані у координатах $\ln I = f(\ln V)$ (рис.2.11). Залежності $\ln I = f(\ln V)$ при різних температурах характеризуються двома лінійними ділянками з нахилом $m = 2$: при прямих напругах до 0.22 V і при $V > 0.78$ V. В області малих струмів при $V < 0.22$ V така динаміка I - V -характеристики пов'язується із обмеженням струму внаслідок захоплення носіїв заряду на мілкі пастки у забороненій зоні. При цьому густина струму визначається виразом:

$$j = \frac{8}{9} \theta \varepsilon \varepsilon_0 \mu \frac{V^2}{L^3}, \quad (2.3)$$

де θ - коефіцієнт Ламперта, ε – діелектрична проникність напівпровідника, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m – діелектрична постійна, μ – рухливість носіїв заряду у напівпровіднику, L – товщина області просторового заряду.

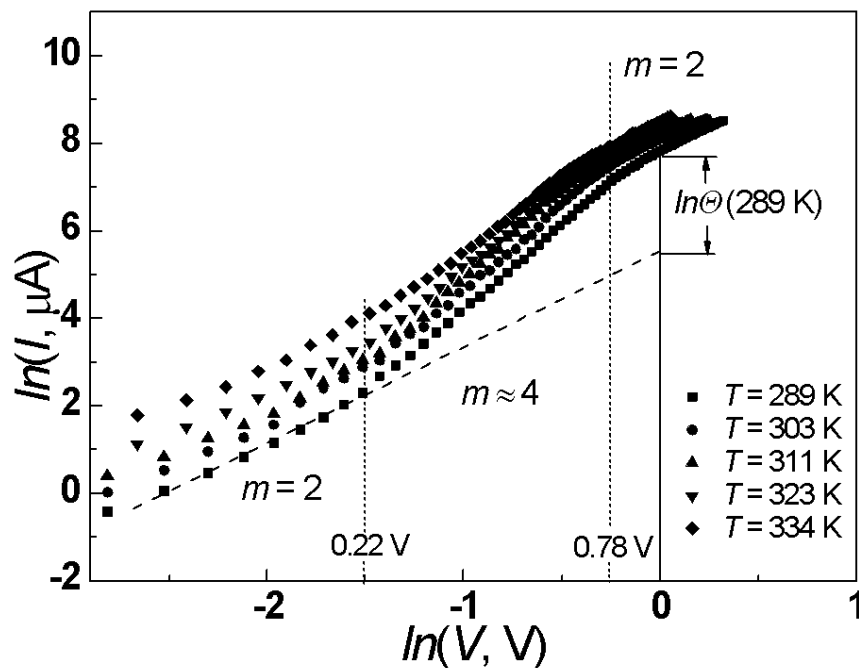


Рис.2.11. I - V -характеристики гетероструктури MnS/*n*-CdZnTe у координатах $\ln I = f(\ln V)$

При малих прямих зміщеннях гетеропереходу MnS/*n*-CdZnTe інжекція електронів крізь енергетичний бар'єр у плівку MnS супроводжується

захопленням частини інжекттованих носіїв на мілкі пастки у забороненій зоні MnS. Через це прямий струм зменшується. Температурна залежність коефіцієнта Ламперта θ дозволяє визначити глибину розташування у забороненій зоні енергетичних пасток E_t і їх концентрацію N_t згідно співвідношення:

$$\theta = \frac{N_C}{gN_t} \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right), \quad (2.4)$$

де N_C – ефективне значення густини станів у зоні провідності MnS, g – фактор спінового виродження електронних пасток, який у більшості випадків дорівнює одиниці.

В області прямих напруг $0.22 < V < 0.78$ V нахил залежності $\ln I = f(\ln V)$ $m \approx 4$ пов'язаний із заповненням пасток у забороненій зоні MnS і обмеженням струму енергетичним бар'єром гетеропереходу. При $V > 0.78$ V у гетероструктурі MnS/n-CdZnTe спостерігається виникнення області просторового заряду (SCL – space charge limit) у високоомній плівці MnS, так як при зменшенні опору електричного переходу вся зовнішня напруга прикладена до плівки. При цьому нахил залежності $\ln I = f(\ln V)$ $m = 2$ і густина струму визначається виразом:

$$j = \frac{8}{9} \varepsilon \varepsilon_0 \mu \frac{V^2}{L^3}. \quad (2.5)$$

За аналізом виразів (2.3) і (2.5) із температурних залежностей I - V -характеристик гетероструктури MnS/n-CdZnTe у координатах $\ln I = f(\ln V)$ (рис.2.11) можна визначити $\ln \theta(T)$ шляхом екстраполяції лінійних ділянок з нахилом $m = 2$ до значення при $\ln V = 0$. Температурна залежність $\ln \theta = f(10^3/T)$ показана на вставці рис.2.12.

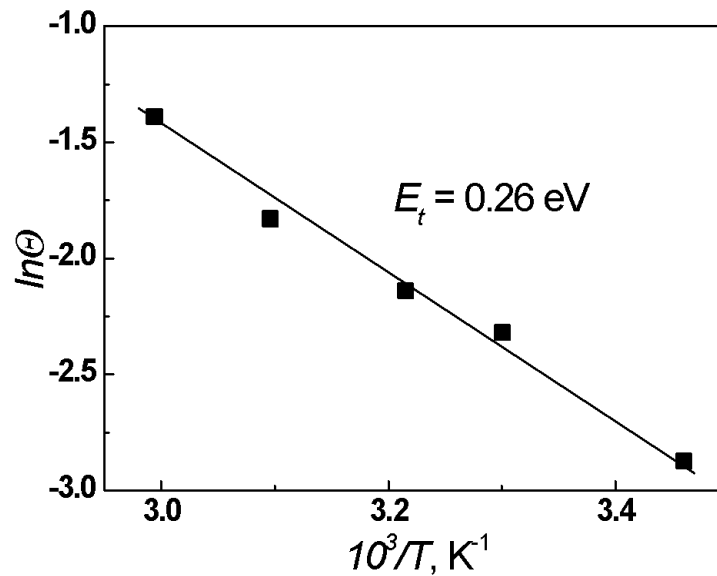


Рис.2.12. Температурна залежність коефіцієнта Ламперта

Глибина розташування у забороненій зоні MnS енергетичних пасток $E_C - E_t = 0.26$ eV. Екстраполяція залежності $\ln \Theta = f(10^3/T)$ до значення $10^3/T = 0$, згідно формули (2.4) при $g = 1$ дозволила визначити співвідношення між концентрацією пасток у забороненій зоні N_t і густиною станів N_C у зоні провідності MnS: $N_C/N_t = 3.6 \cdot 10^3$.

I - V -характеристики гетеропереходу MnS/ n -CdZnTe при зворотних зміщеннях -1.1 V $< V < -0.19$ V у температурному діапазоні $T = 289 - 334$ K описуються виразом для тунельного струму:

$$I = a_0 \exp\left(-b_0(\varphi_B - V)^{-1/2}\right), \quad (2.6)$$

де a_0 – параметр, який залежить від ймовірності заповнення електронами енергетичних рівнів з яких здійснюється тунелювання, b_0 – параметр, який визначає динаміку зміни струму від напруги.

Згідно виразу (2.6) зворотна I - V -характеристика в координатах $\ln I = f(\varphi_B - V)^{-1/2}$ має лінійний вигляд (рис.2.13) в діапазоні напруг -1.1 V $< V < -0.19$ V.

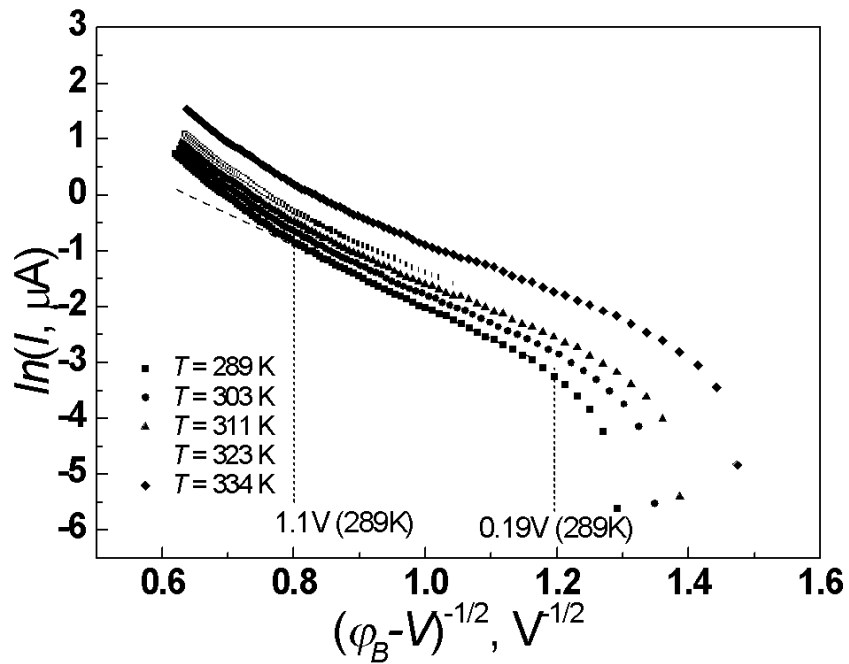


Рис.2.13. Зворотні гілки I - V -характеристики гетероструктури MnS/ n -CdZnTe у координатах $\ln I = f(\phi_B - V)^{-1/2}$

При цьому зворотний струм у гетероструктурі MnS/ n -CdZnTe утворюється тунелюванням електронів з енергетичних станів забороненої зони на межі гетеропереходу у зону провідності n -CdZnTe крізь енергетичний бар'єр, який утворений дном зони провідності n -CdZnTe. При напругах $V < -1.1$ V характер залежності $\ln I = f(\phi_B - V)^{-1/2}$ перетворюється у надлінійну (рис.2.13), що зумовлене збільшенням зворотного струму внаслідок процесів лавинного збільшення носіїв заряду шляхом ударної іонізації на гетеропереході.

При напругах -0.19 V $< V < -3kT/q$ I - V -характеристика гетероструктури α -MnS/ n -CdZnTe описується виразом для генераційного струму:

$$j = \frac{qn_i d_2}{\tau} = \frac{n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2q}{N_d} (\phi_B - V)} \quad (2.7)$$

де N_i – власна концентрація носіїв заряду в n -CdZnTe, d_2 – товщина збідненої на основні носії заряду області в n -CdZnTe, τ – час життя носіїв заряду у збідненій області, N_d – концентрація донорних домішок.

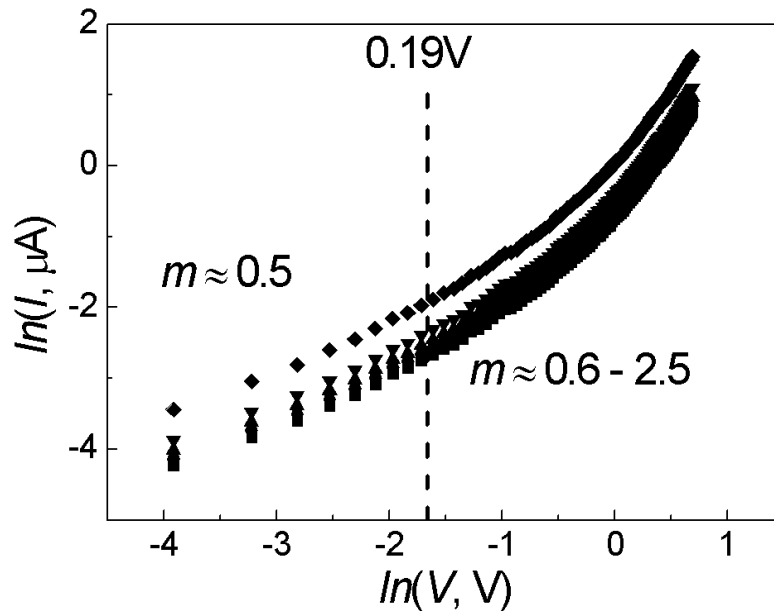


Рис.2.14. Зворотні гілки I - V -характеристики гетероструктури MnS/ n -CdZnTe у координатах $\ln I = f(\ln V)$

Згідно (2.7) I - V -характеристика у координатах $\ln I = f(\ln V)$ (рис.2.14) при зворотних зміщеннях $-0.19 \text{ V} < V < -3kT/q$ має нахил $m = 0.5$.

При цьому генерація носіїв заряду відбувається у збідненій області гетеропереходу зі сторони n -CdZnTe. Зворотний струм формується перенесенням негативного заряду електронів у зоні провідності в об'ємну частину базової області n -CdZnTe та позитивного заряду у плівку MnS за участю станів на межі гетеропереходу.

Висновки

1. Методом спреї-піролізу плівок α -MnS на поверхні n -CdZnTe отримані випрямляючі струм гетероструктури MnS/ n -CdZnTe.
2. Діодні характеристики гетероструктур визначаються енергетичним бар'єром висотою $q\phi_B \approx 0.6$ eV на межі гетеропереходу, який утворюється дифузійним потенціалом $\phi_d = 0.5$ V приконтактної області n -CdZnTe і різницею спорідненостей до електрона поверхонь контактуючих матеріалів $\Delta E_C \approx 0.1$ eV.
3. При прямих зміщеннях $3kT/q < V < 0.19$ V струм у гетероструктурі обмежується внаслідок захоплення частини електронів, які інжектуються у зону провідності MnS, пастками з глибиною розташування у забороненій зоні $E_C - E_t = 0.26$ eV. У При $V > 0.78$ V у гетероструктурі MnS/ n -CdZnTe спостерігається обмеження струму просторовим зарядом, який утворюється у високоомній плівці MnS.
4. При напругах -0.19 V $< V < -3kT/q$ зворотний струм у гетероструктурі MnS/ n -CdZnTe формується внаслідок генерації у збідненій на основні заряду області n -CdZnTe. При зворотних зміщеннях -1.1 V $< V < 0.19$ V реалізується тунельний механізм зворотного струму.

Список літератури

1. D. Ma, S. Huang, L. Zhang, One-pot synthesis and magnetic, electrical properties of single-crystalline α -MnS nanobelts, *Chemical Physics Letters*. 462 (2008) 96–99.
2. B.J. Skromme, Y. Zhang, D.J. Smith, S. Sivananthan, Growth and characterization of pseudomorphic single crystal zinc blende MnS, *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 2690–2692.
3. S. Biswas, S. Kar, S. Chaudhuri, Growth of different morphological features of micro and nanocrystalline manganese sulfide via solvothermal process, *Journal of Crystal Growth*. 299 (2007) 94–102.
4. N. Li, Y. Zhang, R. Cheng, J. Wang, J. Li, Z. Wang, M.G. Sendeku, W. Huang, Y. Yao, Y. Wen, J. He, Synthesis and Optoelectronic Applications of a Stable *p*-Type 2D Material: α -MnS, *ACS Nano*. 13 (2019) 12662–12670.
5. E.I. Ugwu, Theoretical Analysis of the Influence of the Refractive Index on Electromagnetic Wave Propagating through Manganese Sulphide [MnS], *NNOA*. 3 (2018).
6. X. Chen, J. Zhang, J. Zeng, Y. Shi, S. Lin, G. Huang, H. Wang, Z. Kong, J. Xi, Z. Ji, MnS coupled with ultrathin MoS₂ nanolayers as heterojunction photocatalyst for high photocatalytic and photoelectrochemical activities, *Journal of Alloys and Compounds*. 771 (2019) 364–372.
7. A.A. Shehab, S.A. Fadaam, Al/MnS/Si/Al Nanostructure Solar Cell, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)* ISSN: 2458-9403, 3 (2016) 5.
8. M. Dan, Q. Zhang, S. Yu, A. Prakash, Y. Lin, Y. Zhou, Noble-metal-free MnS/In₂S₃ composite as highly efficient visible light driven photocatalyst for H₂ production from H₂S, *Applied Catalysis B: Environmental*. 217 (2017) 530–539.
9. A. Banerjee, Electrical and Optoelectronic Properties of Chemically

- Prepared PbS/MnS Heterojunction, *Journal of Elec Materi.* 48 (2019) 438–444.
10. S.M. Lee, J.-K. Lee, Y.C. Kang, Electrochemical Properties of Hollow-Structured MnS-Carbon Nanocomposite Powders Prepared by a One-Pot Spray Pyrolysis Process, *Chem. Asian J.* 9 (2014) 590–595.
 11. M. Dan, S. Wei, D.E. Doronkin, Y. Li, Z. Zhao, S. Yu, J.-D. Grunwaldt, Y. Lin, Y. Zhou, Novel MnS/(In_xCu_{1-x})₂S₃ composite for robust solar hydrogen sulphide splitting via the synergy of solid solution and heterojunction, *Applied Catalysis B: Environmental*. 243 (2019) 790–800.
 12. W. Shen, J. Zhang, S. Wang, H. Du, Y. Tang, Improve the performance of the quantum dot sensitized ZnO nanotube solar cells with inserting ZnS-MnS composites layers, *Journal of Alloys and Compounds*. 787 (2019) 751–758.
 13. P. Tiwari, J. Jaiswal, R. Chandra, Optical and electrical properties of highly ordered α -, γ - and $\alpha + \gamma$ -MnS films deposited by reactive sputtering technique, *Journal of Applied Physics*. 126 (2019) 213108.
 14. N. Zhang, H. Kawamata, A. Nakajima, K. Kaya, Photoelectron spectroscopy of manganese–sulfur cluster anions, *The Journal of Chemical Physics*. 104 (1996) 36–41.
 15. Y.-M. Yu, D.-J. Kim, Y.D. Choi, C.-S. Kim, Growth and characterization of rocksalt MnS/GaAs epilayers by hot-wall epitaxy, *Applied Surface Science*. 253 (2007) 3521–3524.
 16. S.H. Chaki, S.M. Chauhan, J.P. Tailor, M.P. Deshpande, Synthesis of manganese sulfide (MnS) thin films by chemical bath deposition and their characterization, *Journal of Materials Research and Technology*. 6 (2017) 123–128.
 17. A. Yilmaz, Characterization of MnS films deposited by the spray pyrolysis method, *Phys. Scr.* 83 (2011) 045603.
 18. S.-H. Wei, A. Zunger, Chemical trends in band offsets of Zn- and Mn-based II-VI superlattices: *d*-level pinning and offset compression, *Phys. Rev. B*. 53 (1996) R10457–R10460.

ДОДАТОК:

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Системний підхід до охорони праці, профілактика травматизму на виробництві

Під безпекою розуміють такий стан умов праці, при якому виключена можливість дії на людину шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Методологічною основою охорони праці є системний підхід, який забезпечує комплексне вивчення проблеми з урахуванням усіх взаємозв'язків і взаємовпливів. При використанні системного підходу в першу чергу формується мета й виробничі критерії оптимізації. Перед цим необхідно оцінити стан охорони праці в галузі, тому що корисна діяльність людини завжди пов'язана з потенційною небезпекою.

Тому завданням охорони праці є виключення шкідливого й небезпечного впливу факторів виробничого середовища на людину або зведення цього впливу до мінімуму.

У процесі аналізу стану охорони праці визначаються кількісні значення факторів, які характеризують умови праці, що порівнюються з їх нормативними значеннями. Аналіз починається з виявлення потенційно небезпечних і шкідливих факторів для даної галузі, поділу всього виробничого процесу або системи на "підсистеми" з метою визначення їх взаємного впливу.

Основним об'єктом охорони праці є робоче місце - простір, в якому може знаходитись людина при виконанні виробничо-технологічних функцій. Будь-який технологічний процес реалізується через систему робочих місць.

Робоче місце - основна підсистема виробничого процесу. У результаті аналізу умов функціонування різних підсистем складається перелік потенційно небезпечних і шкідливих факторів галузі і розраховується їх вплив з урахуванням рівня значущості фактора (часу дії, кількості людей,

характеру наслідків); визначаються завдання, які забезпечують виконання цілей, що сформульовані на першому етапі.

При виборі оптимального за критерієм безпеки варіанта виробничого процесу необхідно враховувати, що головним у роботі з охорони праці є соціальний ефект, який виявляється в збереженні й зміцненні здоров'я, підвищенні ступеня задоволення працею, зміцненні трудової дисципліни, підвищенні престижу ряду професій, зростанні виробничої активності, формуванні відношення до праці.

Під умовами праці розуміють сукупність факторів виробничого середовища, які впливають на здоров'я і працездатність людини в процесі праці.

Дослідження умов праці показали, що факторами виробничого середовища в процесі праці є:

- санітарно-гігієнічні умови, що визначають зовнішнє середовище в робочій зоні: мікроклімат, механічні коливання, випромінювання, температура, освітлення тощо, як результат дії обладнання, сировини, матеріальних і технологічних процесів, які застосовуються;
- психофізіологічні елементи: робоча поза, фізичне навантаження, нервово-психологічне напруження та інші, які обумовленні самим процесом праці;
- естетичні елементи: оформлення виробничих приміщень, обладнання, робочі місця, інструменти тощо;
- соціально-психологічні елементи — складові характеристики психологічного клімату.

Зазначені фактори з точки зору дії на людину поділяються на:

- активні - ті, що містять у собі енергетичний ресурс (кінематична енергія, термічні, електричні, електромагнітні, хімічні, біологічні фактори);

- активно-пасивні - ті, що активізуються за рахунок енергії людини або стану обладнання (гострі нерухомі елементи, нерівні або з малим тертям поверхні тощо);

- пасивні - ті, що діють посередньо, побічно (корозія, недостатня міцність, підвищені навантаження).

При організації умов праці необхідно також враховувати дію на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть призвести до травмування або погіршення стану здоров'я.

Шкідливі й небезпечні фактори поділяються на чотири групи:

- фізичні (рухомі машини й механізми, падаючі предмети, коливання температури, підвищення шуму, вібрація, випромінювання, електричний струм, гострі краї обладнання, робота на висоті тощо);

- хімічні (хімічні речовини);

- біологічні (бактерії, віруси, гриби); психофізіологічні (фізичні навантаження і нервово-психічні перевантаження).

Аналіз показує, що основними причинами виробничого травматизму в галузі є такі:

- організаційні - відсутність або низька якість проведення інструктажу, порушення вимог охорони праці, відсутність контролю, невчасний ремонт або заміна несправного обладнання, незабезпечення санітарно-гігієнічних вимог тощо;

- технічні - невідповідність вимогам охорони праці або несправність виробничого обладнання, інструмента та засобів захисту;

- психофізіологічні - помилкові дії внаслідок втоми працюючих, монотонність праці, хвороби, необережність. Звідси випливає, що першочерговими напрямками профілактики виробничого травматизму в галузі є:

- аналіз причин травматизму;

- визначення найбільш травмонебезпечних ділянок та робочих місць і встановлення за ними постійного контролю;
- забезпечення високої дисципліни праці, шляхом призначення відповідних працівників відповідальними за стан охорони праці на всіх рівнях управління галуззю;
- впровадження автоматизованої системи управління охороною праці в галузі;
- підвищення рівнів навчання, атестації, інструктажів згідно з розробленим положенням про навчання працівників охорони праці в галузі;
- виконання комплексних заходів усіх структурних підрозділів щодо досягнення встановлених норм безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, підвищення рівня охорони праці, запобігання випадкам виробничого травматизму, професійних захворювань і аварій.

Для зменшення втомленості і створення комфортних умов праці необхідно організовувати:

- раціональний режим праці і відпочинку (тривалість робочого дня, вихідні дні, обідні перерви, технічна перерва, відпустка);
- кабінети професійної діагностики, де здійснюється перевірка працівників на відповідність їх фізіологічних, психологічних і антропометричних показників характеру робіт;
- періодичні медогляди;
- естетику виробництва; робочі місця, обладнання, інструменти;
- нормальний психологічний клімат. Недотримання вищезазначених вимог або порушення їх призводять до травматизму.

Захист від ураження електричним струмом

Аналіз травматизму свідчить, що більше половини електротравм спостерігаються при дотику до струмоведучих частин обладнання. Застосування тільки захисних технічних засобів не може створити умови

повної безпеки при монтажі, експлуатації та ремонті обладнання. Це можливо лише тоді, коли до цих засобів додаються організаційні засоби (інструкція, навчання, перевірка знань).

Усі захисні засоби можна умовно поділити на дві групи.

Перша група забезпечує захист від ураження електричним струмом працівників у випадку дотику до струмоведучих частин: контроль за станом ізоляції, блокування й захисні огороження, оптимальне розташування обладнання, сигналізація, маркування, попереджувальні плакати, захист від переходу високої напруги до низької, застосування малих напруг 12; 36; 42 В, застосування індивідуальних захисних засобів.

Друга група забезпечує захист від ураження електричним струмом при дотику до корпусів електроустановок у випадку пробою ізоляції: захисне заземлення, занулення, захисне вимкнення, подвійна ізоляція, застосування розділювальних трансформаторів.

Електроізоляція струмоведучих частин. Фізична суть ізоляції як захисного заходу полягає в обмеженні струму в тілі людини до безпечної величини. Як правило, електротехнічне обладнання має робочу ізоляцію, яка повинна витримувати граничнодопустимі механічні, електричні й теплові навантаження. Для запобігання пошкодження ізоляції необхідно не тільки в процесі експлуатації, але й при введенні і ремонті електрообладнання проводити її перевірку. На підприємствах зв'язку проводиться замірювання ізоляції електродвигунів, трансформаторів, масляних вимикачів, роз'єднувачів, комплексних розподільних пристроїв, конденсаторних установок, вторинних мереж, електропроводки до 1000 В, акумуляторних батарей, заземлюючих пристроїв, кабельних ліній.

Основними приладами вимірювання в установках до 1000 В є: в мережах змінного струму - мегометри, в мережах постійного струму - вольтметри. Для постійного контролю ізоляції використовують прилади захисного вимкнення, реле вимикання, прилади контролю ізоляції.

Огородження, розміщення на недоступній висоті, блокування, сигналізація безпеки і маркування відносяться до методів зменшення небезпечних факторів. Захисні огороження мають бути стійкими, як суцільними, так і сітчастими, у вигляді ящиків, шаф і закриватися на замок. Постійні (суцільні) огороження застосовують на електротехнічному обладнанні, а сітчасті - в генераторних.

Для захисту від дотику струмоведучі частини розміщуються на недоступній висоті, всередині приміщення 3,5 м, назовні - 6 м.

Блокування є надійним і ефективним засобом захисту від дотику й застосовується при роботі з підвищеною небезпекою: електроустановки радіопідприємств, радіолінійних станцій, телецентрів, підприємств проведеного зв'язку, радіо- і телевізійних передавачах. Системи блокування мають бути побудовані за принципом самоконтролю, тобто в нормальному стані схема повинна перебувати під струмом. Про порушення в схемі свідчать датчики, які працюють на розрив мережі, тобто установка автоматично вимикається.

Радіотехнічні пристрої з напругою вищою за 350 В, які не мають дистанційного управління, можуть мати одне електричне блокування з блок-контактами, що безпосередньо розривають мережу первинної обмотки анодного трансформатора. На радіопередавальних станціях живлення блокування здійснюється від загальних шин передавача через окремий ізолюючий трансформатор, до якого заборонено під'єднувати інших споживачів, переважно напругою 110 В. За принципом дії блокування поділяються на електричне, механічне, комбіноване.

Електроблокування. Здійснюється розривання електричної мережі спеціальними датчиками, які встановлені на огороженнях, кожухах. Блокконтакти під'єднуються до кола живлення або керування пускової апаратури - магнітного пускача. У трифазній мережі блокування ставиться в кожній фазі напруги, а при однофазному живленні - у кожному проводі

живлення. Струми, які проходять через блокувальні контакти, не повинні перевищувати 100 А. Електроблокування легко реалізується. Воно чутливе, надійне, малогабаритне, здійснює самоконтроль, але легше розблоковується, бо залежить від стану електричної схеми. Тому обладнання підвищеної потужності в установках з напругою вищою за 1000 В повинно мати два види блокування: електричне і механічне.

Механічне блокування застосовується в рубильниках, пусках, автоматизованих вимикачах і при цьому подача напруги можлива тільки при закритому замку або заціпці, які механічно зв'язані з вимикачем. Механічне блокування застосовують в однокорпусних потужних електро- і радіоустановках зі струмами навантаження вищими за 100 А.

Для зняття залишкових зарядів при блокуванні встановлюються додаткові заземлювачі, які заземлюють від'єднані струмоведучі частини одночасно з дією блокувальних контактів: електромагнітні замки й розрядні опори.

Зняття залишкових зарядів повинно застосовуватись в установках з напругою вищою за 250 В, в яких існують:

- фільтри джерел живлення;
- лінії, що формуються штучно;
- накопичувальні ємності.

Сигналізація не є засобом безпосереднього захисту, але вона звертає увагу, дозволяє своєчасно застосувати засоби безпеки або попередити неправильні дії персоналу (світлова, звукова, приладна).

Існують такі види сигналізації:

- сигналізація положення, коли подана або, навпаки, відсутня напруга;
- оперативна (вказує на послідовність виконання робіт);
- попереджувальна (повідомляє про перебої в роботі);
- аварійна;
- вказівна.

Як пристрої сигналізації застосовуються контрольно- вимірювальні прилади, реле, звукові зумери, дзвінки, сирени, різнокольорові лампочки (для установок з напругою вищою за 250 В - червоні), датчики та регулятори температури, тиску.

Маркування (попереджувальні написи, розмічування, фарбування) окремих частин обладнання має велике значення для забезпечення безпеки праці. Як правило, розподільні пристрої й щитки, кабелі і вводи повинні маркуватись.

Особливе значення має маркування в електротехнічних установках радіопідприємств і телецентрів, де існує велика кількість електромереж із різними напругами на струмах різного роду (змінний, постійний). Для розпізнавання фаз шини змінного струму при вертикальному розташуванні фарбуються: верхня фаза "А" - у жовтий колір, середня фаза "В" - у зелений, нижня фаза "С" - у червоний; при горизонтальному розташуванні шин у жовтий колір фарбується найвіддаленіша від персоналу фаза "А", у зелений - середня "В" і в червоний - найближча до персоналу фаза "С". Нульові типи фарбуються в білий колір при ізольованій нейтралі, в чорний - при заземленій нейтралі.

При постійному струмові плюсова шина - червона, мінусова - синя, заземлювальна траса - чорного кольору.

При напрузі 8-12 В і при опорі тіла людини 1 кОм струм, який проходить через людину, не перевищує 1-1,5 мА, що безпечно для людини. Тому для виробничої мети в приміщеннях із підвищеною небезпекою для переносного електроінструменту застосовується напруга 42 В; в особливо небезпечних приміщеннях 36 В; у переносних електросвітільниках - 12 В.

Джерелом малої напруги найчастіше є знижувальні трансформатори. Застосування автотрансформаторів заборонено тому, що мережа низької напруги в цьому випадку виявляється електрично зв'язаною з мережею високої напруги, що в знижувальних трансформаторах буває тільки при

пошкодженні ізоляції між обмотками. У мережах трифазного струму напругою вищою за 1000 В з ізолюваною нейтраллю захист від можливого переходу напруги з високовольтною на низьковольтну обмотку здійснюється за допомогою пробивного запобіжника, який встановлений у нейтралі або фазі з боку нижчої напруги в режимі з ізолюваною нейтраллю мережі. З напругою більшою від 1000 В і заземленою нейтраллю мережі з напругою до 1000 В необхідне заземлення вторинної обмотки.