

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

**Електричні та фотоелектричні властивості діодів Шотткі графіт/CdZnTe
отриманих методом електронно-променевого випаровування**

Дипломна робота

Рівень вищої освіти – бакалаврський

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

Василяш Р.Д.

Керівник: Ілащук М.І

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

від „____” _____ 2021 р.

зав. кафедри _____ доц. Майструк Е.В.

Чернівці 2021

Анотація

В роботі проведено дослідження електричних та фотоелектричних властивостей діодів Шотткі графіт / $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, виготовлених осадженням прозорих графітових плівок нанометрової товщини на щойно сколоту підкладку $n\text{-CdZnTe}$ методом електронно-променевого випаровування.

Встановлено, що отримані структури характеризуються випрямляючими властивостями. Визначений коефіцієнт випрямлення при $V=0,7\text{В}$ і $T=296\text{К}$ становить 10^4 .

Аналіз високочастотних вольт-фарадних характеристик ($f=500\text{-}1000\text{kHz}$) показав, що досліджувані діоди графіт / $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ відносяться до різких асиметричних структур з вбудованим електричним полем в $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Встановлено, що в процесі виготовлення структури у приповерхневому шарі $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ виникає область з меншою ніж у підкладці ($N_2 = 6,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) концентрацією донорної домішки ($N_I = 3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

На основі аналізу температурних залежностей ВАХ встановлені механізми формування прямого та зворотного струмів через випрямляючий контакт графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Запропонована модель енергетичної діаграми виготовлених структур з врахуванням впливу поверхневих електрично активних енергетичних станів.

За стандартних умов освітлення ($100 \text{ мВт} \cdot \text{см}^2$, АМ 1,5) фотоелектричні параметри досліджуваних діодів графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ становлять: густина струму короткого замикання $J_{\text{кз}} = 9,5 \text{ мА/см}^2$; напруга холостого ходу $V_{\text{хх}} = 0,5\text{В}$.

Таким чином, виготовлені поверхнево-бар'єрні структури графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ можуть використовуватись як фотоприймачі та фотоперетворювачі електромагнітного випромінювання оптичного діапазону.

Дипломна робота містить: сторінок 50 , рисунків 23 , таблиць 1 , посилань на літературу 45 .

Вступ

Графіт є одним з найцікавіших матеріалів на основі вуглецю, який володіє унікальними властивостями. Висока прозорість та електропровідність графіту роблять його перспективним для виготовлення нових наноструктурованих електронних та оптоелектронних пристроїв. Гетеропереходи типу графіт/ CdTe розглядаються як перспективні сонячні елементи наступного покоління .

Особливістю графіту є його шарувата структура, яка складається з двовимірних графенових шарів, слабо пов'язаних між собою силами взаємодії Ван дер Ваальса.

Графіт і графітові вуглецеві тонкі плівки, можуть бути нанесені наступними методами: хімічне осадження парів , випаровування електронного пучка, магнетронне напилення. Нанесені такими методами плівки стійкі до високих температур, вологості, більшості хімічних речовин, ультрафіолетових та радіоактивних променів та не піддаються природному старінню . Надтонка графітова плівка, виготовлена електронно-променевим випаровуванням, має унікальну електрохімічну поведінку. Графітові плівки нанометрової товщини є хорошими матеріалами для прозорих електродів або компонентів “вікна” гетероперехідних сонячних елементів та основі бар'єрів Шотткі та фотодіодів. Ефективність тонкопліткових сонячних елементів графіт / CdTe може досягати 21,0% . Більше того, графітові плівки екологічно чисті та мають надзвичайно високу хімічну стійкість у порівнянні з іншими недорогими електронними матеріалами, що забезпечує стабільність пристроїв на основі графіту в різних умовах. Тому нанометрові тонкі графітові плівки, виготовлені електронно-променевим випаровуванням стають актуальними для застосування в оптоелектронних та фотоелектричних приладах.

Сонячна панель на основі твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$, виготовлена методами тонкопліткового виробництва, має більші перспективи порівняно з елементами на основі кремнію у сонячній промисловості. Основною перевагою цих елементів є те, що затрати на їх виробництво є найнижчими в порівнянні з будь-якими іншими сонячними елементами і є єдиною тонкоплітковою технологією з нижчим рівнем затрат на виробництво в порівнянні з кремнієвими. Сучасні

тонкоплівкові технології дозволяють виготовляти сонячні панелі на основі CdTe, ефективність яких становить понад 22%.

Однією з переваг телуриду кадмію є те, що сонячні елементи на його основі краще працюють при високих температурах, а ніж на основі кремнію. Це означає, що така структура може виробляти більше електричної енергії за рік приблизно на 5-10% в порівнянні з кремнієвими сонячними елементами.

В роботі проведені дослідження електричних та фотоелектричних властивостей діодів графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, виготовлених нанесення тонких плівок графіту на свіжосколоту поверхню кристалічного $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ методом електронно-променевого випаровування.

Зміст

РОЗДІЛ 1. Теоретична частина

1.1 Основні фізико-хімічні властивості графіту

1.2. Електричні та оптичні властивості графіту

1.3. Структурні та оптичні характеристики твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

РОЗДІЛ 2. Експериментальна частина

2.1.Методики отримання тонких плівок методом електронно-променевого випаровування

2.2. Методика виготовлення бар'єрів Шотткі графіт/ n -CdZnTe

2.3. Методика виготовлення омичних контактів

2.4. Методики вирощування кристалів CdTe

2.5. Установка для дослідження вольт-амперних характеристик та програмне забезпечення

2.6. Експериментальні результати та їх обговорення

Висновки

Список літератури

ДОДАТОК. Техніка безпеки і охорона праці

РОЗДІЛ 1. Теоретична частина

1.1 Основні фізико-хімічні властивості графіту

Використання унікальних фізико-хімічних властивостей тонких графітизованих плівок вуглецю (висока прозорість електропровідність і теплопровідність) є перспективним напрямком створення нових наноматеріалів. Графітизований вуглець має шарувату структуру, яка складається з серії складених паралельних площинних шарів (рис.1). Усередині кожної площини шару, атом вуглецю зв'язаний з трьома іншими атомами, утворюючи серію безперервних шестикутників[1]

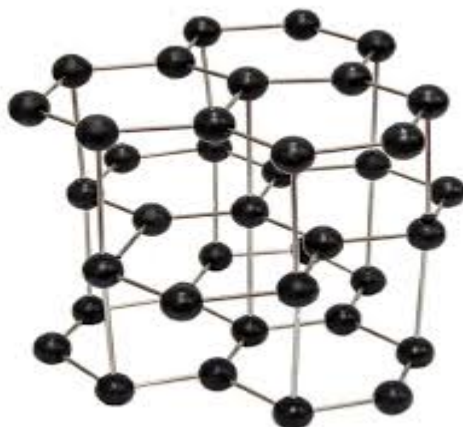


Рис.1. Кристалічна структура графіту

Графіт таким чином кристалізується в гексагональній формі, на відміну від самого елемента, який кристалізується в октаедричній або тетраедричній системі як алмаз.

Кожен атом вуглецю використовує три своїх валентних електрона для утворення зв'язків із сусідніми атомами. Тип зв'язку – ковалентний, має невелику довжину (0,141 нм) і високу міцність (524 кДж/моль).

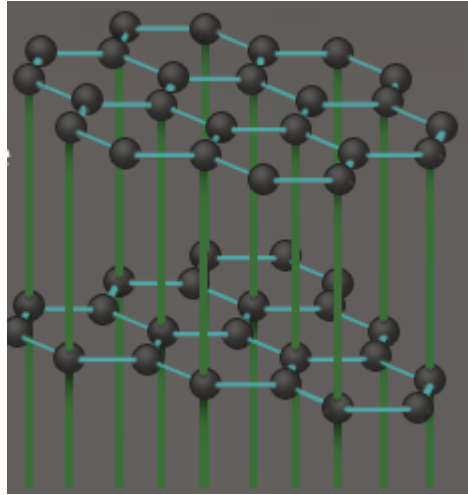


Рис.2. Утворення ван-дер-Ваальсівський зв'язку між шарами у структурі графітізованого вуглецю

Природний вуглець – це суміш двох стабільних ізотопів ^{12}C та ^{13}C . Графіт є чудовим конструкторським матеріалом, його використання ґрунтується на тому, що завдяки дуже високій температурі сублімації графіт залишається твердим при нагріві до температури біля 4000°C . Крім цього, графіт при невисокій густині є достатньо міцним і пластичним, легко обробляється механічно, має низький тиск насичених парів у вакуумі навіть при підвищених температурах. Графіт має високу теплопровідність і теплоємність, не завжди при цьому володіючи високою електропровідністю. Міцність і пластичність графіту значно зростають за температур близьких до 2000°C . Графіт, крім цього, за рахунок високої пористості стійкий до високих градієнтів температур. Корозійна і хімічна стійкість вуглецю властивостями роблять його незамінним в багатьох наукових і практичних дослідженнях. [2].

На відкритому повітрі графіт не окисляється до температури 400°C , в двоокисі вуглецю до 500°C . Міцність графіту значно змінюється в залежності від методу його виготовлення, тому графіти з однаковою щільністю, але різних марок відрізняються структурою і можуть мати різну міцність. Загальним правилом є те, що більш тонко структурований графітовий композит володіє, як правило більшою міцністю. [2]. Існує багато добре вивчених форм вуглецю з графітоподібним зв'язком, включаючи графен, найтонший із досліджуваних матеріалів.

1.2. Електричні та оптичні властивості графіту

При утворенні хімічного зв'язку із сусідніми атомами, кожен атом вуглецю використовує три своїх валентних електрони. Інші, "четверті" валентні електрони утворюють систему делокалізованих молекулярних орбіталей. Це означає, що вони можуть вільно переміщатися по всьому шару, і тому графіт є хорошим провідником електричного струму. Характерним для зонної енергетичної моделі графіту є перекриття провідності зони та валентної зони на величину 0.03 - 0.04 eV, тобто графіт можна віднести до напівметалів.

У напрямку перпендикулярному до площини шарів, відстань між якими порівняно велика, і немає аналогічного механізму переходу для електронів, електричний опір є високим, а матеріал вважається ізолятором. Значення питомого опору складають $3000 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ і $2,5 - 5,0 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в паралельному та перпендикулярному до площин напрямку, відповідно. [4]. Таким чином, графіт володіє сильно анізотропними електричними властивостями.

Визначені з досліджень електричних властивостей полікристалічних об'ємних зразків та тонких плівок графітізованого вуглецю ($T=293\text{K}$) такі кінетичні параметри, як: питома електропровідність ρ , концентрація носіїв заряду n та холлівська рухливість електронів μ_H приведені в таблиці 1. Як видно, досліджувані зразки характеризуються високими значеннями величин $\rho = 1,4-110,8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ та $n = 7,0-9,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Встановлено також, що концентрація електронів у температурному інтервалі $T=293-450\text{K}$ не залежить від температури (рис.1). Таким чином, досліджувані матеріали можна віднести до вироджених напівпровідників. [5].

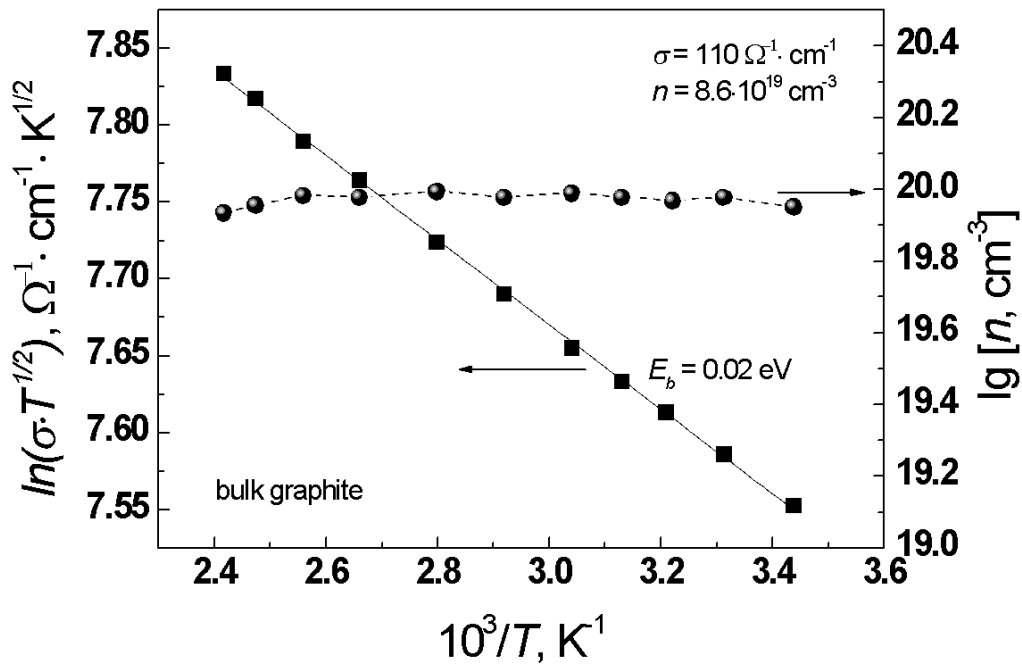


Рис.3. Температурні залежності питомої електропровідності σ і концентрації носіїв заряду n об'ємних зразків графіту

Сумарний струм можна визначити як механізмом переходу носіїв заряду так і провідністю зерен .

$$\sigma = \frac{Lq^2n}{\sqrt{2\pi m^*kT}} \exp\left(-\frac{qV_b}{kT}\right), \quad \sigma = \frac{Lq^2p_0}{\sqrt{2\pi m^*kT}} \exp\left(-\frac{qV_b}{kT}\right) \quad (1)$$

$$\mu = \frac{Lq}{\sqrt{2\pi m^*kT}} \exp\left(-\frac{qV_b}{kT}\right), \quad (2)$$

де L – середній розмір кристалітів; m^* - ефективна маса носіїв заряду; n – концентрація носіїв заряду всередині кристаліта; $qV_b = E_b$ – висота бар'єра на границі зерен.

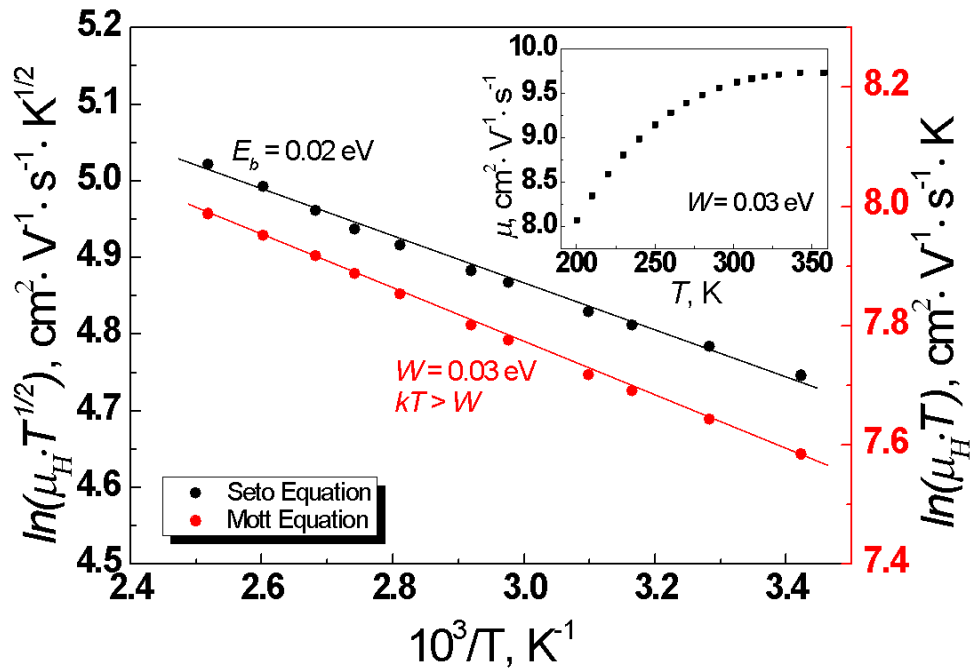


Рис. 4. Температурна залежність холлівської рухливості електронів μ_H в об'ємних зразках графіту за співвідношеннями Мотта (3) і Сето (4) та розрахована температурна залежність стрибокової рухливості (вставка)

Для визначення висоти бар'єрів E_b на границях зерен у об'ємних зразках і графітізованих тонких плівках вуглецю була використана температурна залежність електропровідності у діапазоні $290 \text{ K} < T < 420 \text{ K}$ побудована у координатах $\ln(\sigma \cdot T^{1/2}) = f(10^3/T)$ (рис.4 і 6). [6]. Ефективна маса електронів вуглецю $m^* = 0.054 \cdot m_0$ [31,32]. Питомий електроопір ρ плівок при кімнатній температурі незначно залежить від температури підкладки T_s при їх графітізації. При збільшенні T_s він зростає від 0.17 до 0.7 $\Omega \cdot \text{cm}$.

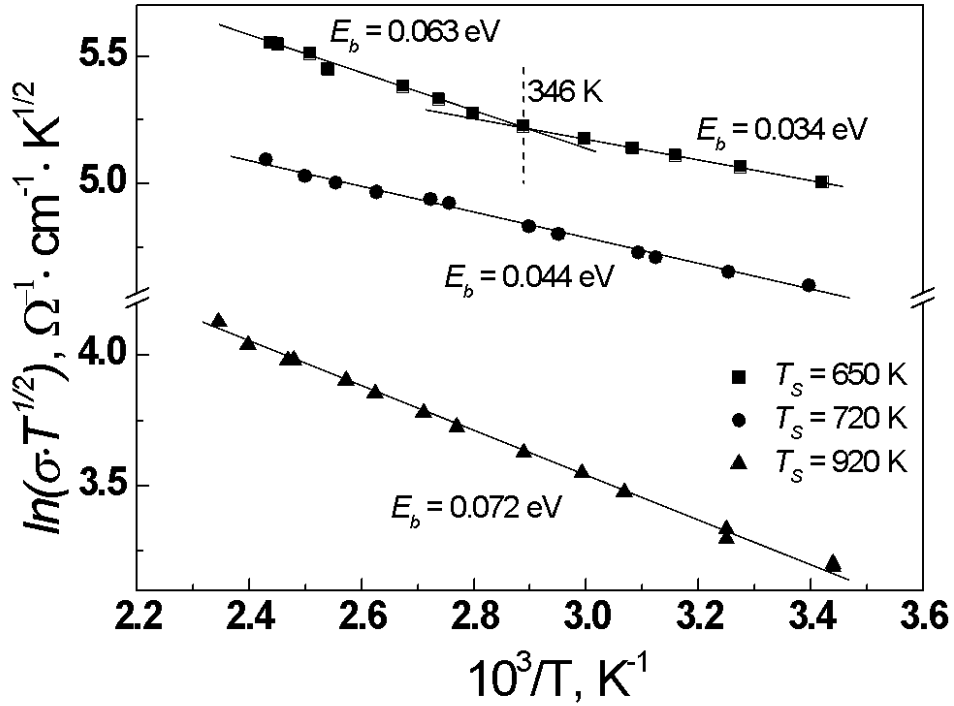


Рис.5. Температурні залежності електропровідності плівок графіту, отриманих при різних температурах підкладки T_s

Висота бар'єра на границях зерен для зразків об'ємного вуглецю дорівнює $E_b \approx 0.02$ eV. Результати розрахунків концентрації електронів $n = 8.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ і ефективної рухливості $\mu_{ef} = 8.0 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ з використанням виразів (3) і (4) для об'ємних полікристалічних зразків графіту з розмірами кристалітів $L \sim 40$ нм, які характерні графітизації при температурах ~ 2000 °C [33,34], добре узгоджуються з даними експериментальних досліджень ефекту Холла (табл.1).

Для плівок графітизованого вуглецю, отриманих при температурах підкладки $T_s = 650$ К, на залежностях $\ln(\sigma \cdot T^{1/2}) = f(10^3/T)$ спостерігаються дві лінійні ділянки, яким відповідають значення висоти бар'єру $E_b \approx 0.034$ eV у діапазоні температур $290 \text{ К} < T < 346 \text{ К}$ і $E_b \approx 0.063$ eV при $T > 346 \text{ К}$. При $T \sim 346 \text{ К}$ відбувається зміна зарядового стану границь зерен та збільшення E_b . З врахуванням розмірів кристалітів $L_a \sim 5$ нм, визначених при аналізі раманівських спектрів, обчислені за (3) і (4) концентрація носіїв заряду і ефективна рухливість при кімнатній температурі ($E_b \approx 0.034$ eV) дорівнюють $n = 9.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ і $\mu_{ef} = 0.58 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, відповідно. При підвищенні температури графітизації плівок вуглецю від 650 до 920 К концентрація електронів

змінюється незначно $n = (7 - 9.3) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, ефективна рухливість електронів зменшується від 0.58 до 0.13 $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ і висота енергетичних бар'єрів зростає від $E_b \approx 0.034 \text{ eV}$ до $E_b \approx 0.072 \text{ eV}$ (табл.1).

Таблиця 1. Електричні параметри об'ємних зразків та тонких плівок графітізованого вуглецю

№	Тип зразка	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	n , см^{-3}	μ_{eff} , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	E_b , eV	δ , nm	N_t , см^{-2}	D
1	об'ємний (розрахунок)	110.8	$8.7 \cdot 10^{19}$	8.0	0.02	0.23	$4 \cdot 10^{12}$	0.90
	об'ємний (експеримент)	110.8	$8.6 \cdot 10^{19}$	8.0	0.02	-	-	-
2	плівка, $T_s = 650 \text{ K}$	8,7	$9.3 \cdot 10^{19}$	0.58	0.034	0.28	$5 \cdot 10^{12}$	0.88
3	плівка, $T_s = 720 \text{ K}$	5,8	$9.3 \cdot 10^{19}$	0.39	0.044	0.32	$5 \cdot 10^{12}$	0.85
4	плівка, $T_s = 920 \text{ K}$	1,4	$7.0 \cdot 10^{19}$	0,13	0.072	0.48	$5 \cdot 10^{12}$	0.73

Розраховані з використанням експериментальних даних n , E_b та діелектричної проникності $\varepsilon_r \sim 2$ [35] для графіту товщина δ і густина енергетичних станів N_t границь зерен у досліджуваних об'ємних матеріалах і графітізованих плівках вуглецю за співвідношеннями [36,37]:

$$\delta = \left(\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 E_b}{q^2 p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \delta = \left(\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 E_b}{q^2 n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$E_b = \frac{q^2 N_t^2}{8\varepsilon \varepsilon_0 n}. \quad (4)$$

Густина енергетичних станів на межах кристалітів $N_t \sim (4 - 5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, товщина границь зерен знаходиться у межах $\delta \approx 0.23 \div 0.48 \text{ nm}$. Коефіцієнт тунелювання D носіїв заряду у випадку прямокутних бар'єрів при товщині границі зерна δ визначається співвідношенням [38]:

$$D = \int_0^1 \exp \left[-\frac{4\pi\delta\sqrt{2m^*E_b}}{h} \sqrt{1-\xi} \right] d\xi \quad D = \exp \left(-\frac{2}{h} \cdot \delta \cdot \sqrt{2m^*E_b} \right). \quad (5)$$

Згідно розрахунків, значна частина носіїв заряду в об'ємних матеріалах і графітізованих плівках вуглецю рухається крізь границі зерен шляхом

тунелювання ($D \sim 0.73 - 0.90$). При збільшенні температури T_s одержання плівок зростає термоемісійний струм.

Оптичні властивості плівок графіту досить детально були досліджені у багатьох роботах [7]. На рисунку 4 зображено, що прозорість матеріалу залежить від товщини. При освітленні плівки товщиною 10 нм та довжиною хвилі 1000 нм можна отримати коефіцієнт пропускання $T=70,7\%$, що нижче, ніж для плівок FTO – $T = 82,4\%$ та плівок ITO=90,0%. При зменшенні товщини плівки покращується її коефіцієнт прозорості.

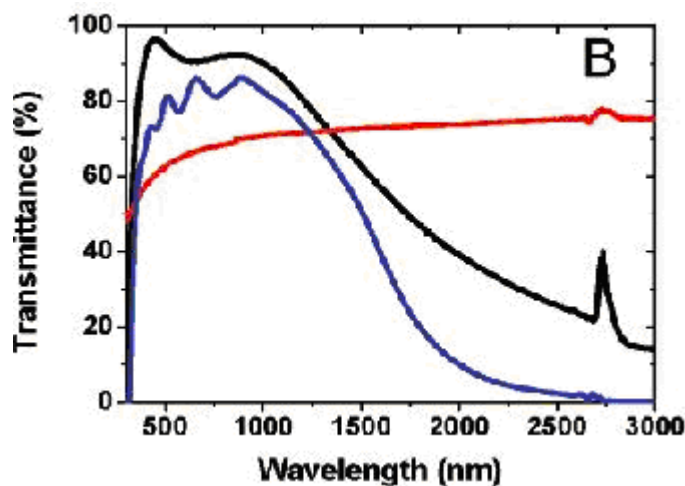


Рис.6. Спектральні залежності коефіцієнта пропускання товстої графітової плівки товщиною 10мкм (червона крива), плівок ITO та FTO (чорна та голуба криві, відповідно).

Оптичні властивості графітових плівок робить їх використання перспективним для виготовлення прозорих електродів і контактів у ролі у сонячних елементах

1.3. Структурні та оптичні характеристики твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

Телурид кадмію відноситься до сполук групи A_2B_6 . Це єдиний матеріал у цій групі, який може бути отриманий як n так і p -типу провідності. CdTe має структуру сфалериту, що належить до групи кубічних симетрій і складається з двох гранецентрованих кубічних ґраток (ГЦК), зсунутих одна відносно іншої на чверть просторової діагоналі кристалографічної комірки. Кожна з цих підґраток утворена атомами кадмію (Cd) або атомами телуру (Te) [6]. Як це показано на рис. 1. Таким чином кожен атом у кристалічній ґратці оточений чотирма сусідніми атомами, що належать до іншої ГЦК підґратки. Чотири валентні електрони перерозподіляються між сусідніми атомами, розташованими у формі тетраедра, утворюючи ковалентні зв'язки.

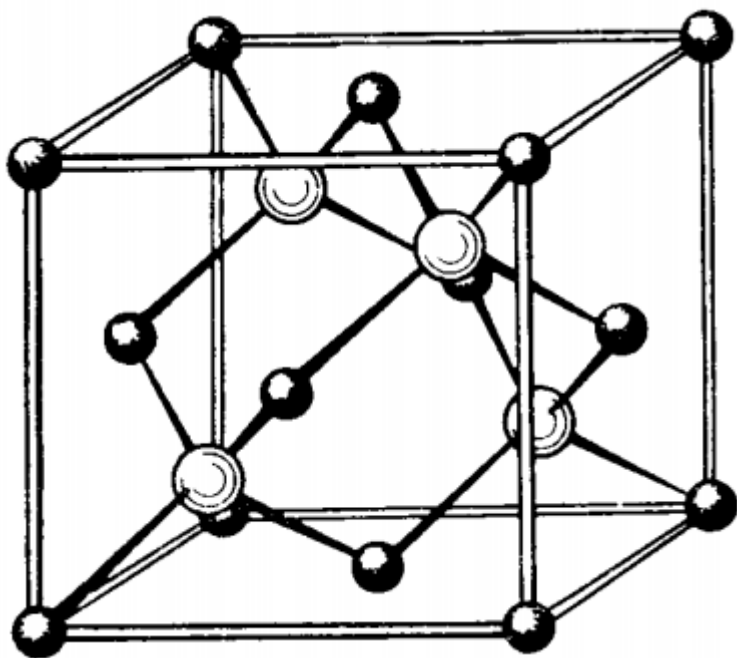


Рис.7. Кристалічна структура сфалеритної фази $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

У загальному випадку механізм утворення твердого розчину полягає у взаємному заміщенні атомів у підґратці металу (Cd, Zn,), тоді як концентрація атомів у підґратці халькогену (Te) залишається незмінною. Відповідно, основні фізичні параметри потрійних твердих розчинів можуть мати проміжні значення порівняно з базовими чистими бінарними сполуками. Наприклад, у твердому розчині $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ при $x=0,1$ відбувається зменшення параметру кристалічної ґратки матеріалу, що супроводжується збільшенням його ширини забороненої

зони (33), разом з тим твердий розчин з таким відносно невеликим вмістом цинку все ще має властивості наближені до чистого CdTe (рис.8). На рис.8 пунктиром показані значення параметра ґратки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ та відповідні енергії E_g при $x=0,1$ та $x=0,7$. Водночас подальше збільшення концентрації цинку у матеріалі до значень $x=0,7$ приводить до наближення значень параметру кристалічної ґратки розчину та ширини його ЗЗ до таких, що відповідають чистому ZnTe [4].

У свою чергу зміна ширини ЗЗ приводить до зміни основних оптичних та електрофізичних параметрів матеріалу.

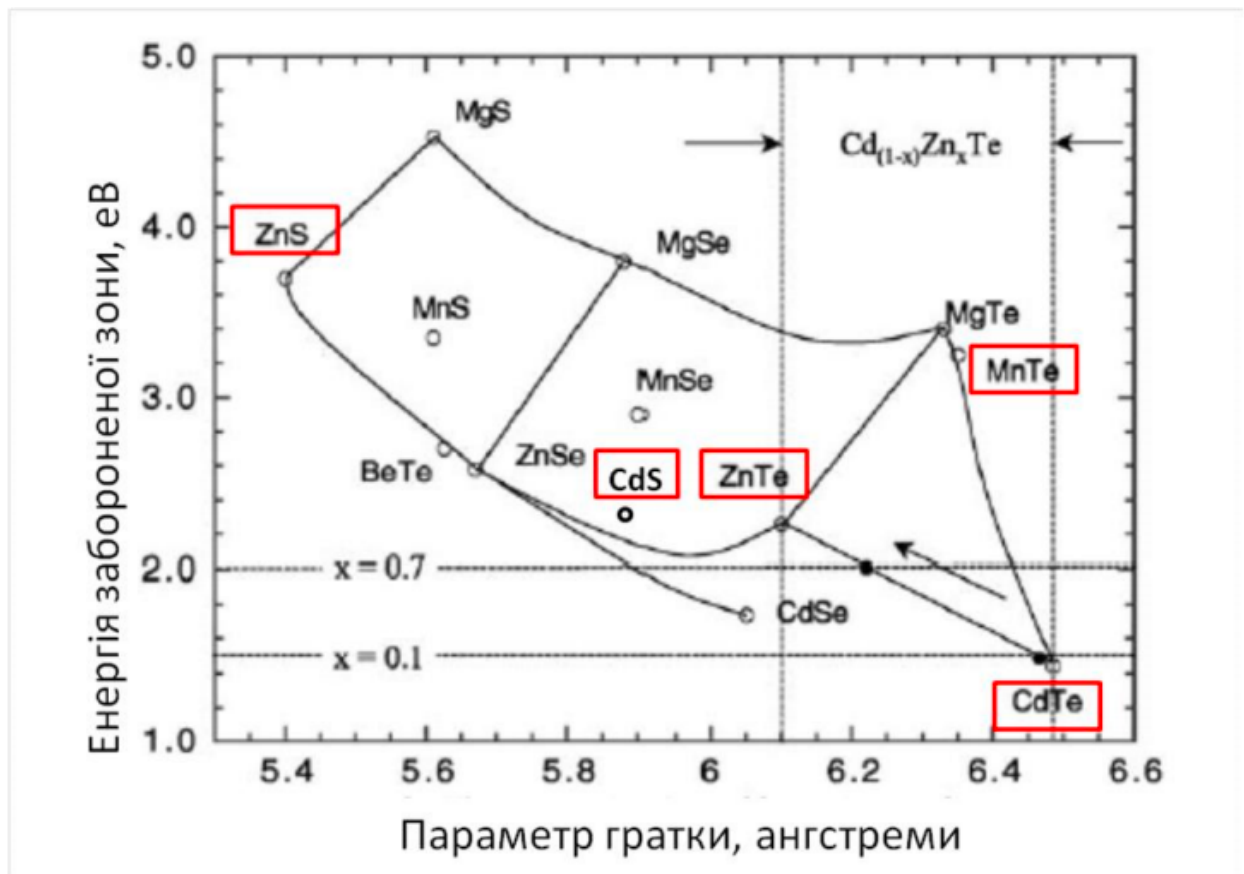


Рис. 8. Залежність ширини ЗЗ деяких напівпровідникових матеріалів від періоду ґратки.

Структурні властивості потрійних розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ подібні до властивостей базових подвійних сполук A^2B^6 . Тобто, як правило, кристали та плівки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ мають кубічну структуру. На дифрактограмах крім відбивання від кристалографічної площини (111), також можуть фіксуватися відбивання від площин (220), (200), (220), (311) та (222). Присутність невеликої кількості гексагональної фази може спостерігатись у плівках поганої кристалічної якості, отриманих в нерівноважних технологічних умовах.

Введення атомів домішки (цинку) у CdTe викликає загальну деформацію кристалічної ґратки та зменшення її постійної. У загальному випадку залежність сталої ґратки від концентрації цинку лінійна, тобто ця залежність описується законом Вегарда для твердих розчинів. У випадку розчину $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ експериментально та теоретично було встановлено, що залежність ширини забороненої зони від значення x досить добре описується лінійними функціями $E_g(\text{eV}) = 1,51 + 0,606x$.

Оптичні властивості потрійних твердих розчинів та структура їх домішкових центрів може бути детально досліджена за допомогою аналізу спектрів низькотемпературної фотолюмінесценції. Типовий спектр фотолюмінесценції $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ умовно можна поділити на декілька ділянок: (i) крайова або екситонна фотолюмінесценція, яка включає піки, пов'язані з наявністю вільних (X) та зв'язаних на акцепторних (A0X) або донорних (D0X) домішках екситонів; (ii) донорно–акцепторні переходи (DAP), що можуть супроводжуватись фононними повтореннями першого LO та другого (третього) 2LO порядку; (iii) випромінювання, за положенням екситонних ліній зазвичай з високою точністю визначають ширину ЗЗ матеріалу. [7]. Необхідно відзначити, що присутність на досліджених спектрах екситонної фотолюмінесценції являється ознакою високої кристалічної якості матеріалу.

Навпаки у випадку, коли матеріал характеризується високою концентрацією протяжних дефектів та (або) значним рівнем мікронапружень на спектрах фотолюмінесценції фіксуються широкі енергетичні смуги випромінювання. Деякі з областей дефектного випромінювання (D) можуть бути ідентифіковані як фотолюмінесценція, пов'язана з рекомбінацією носіїв заряду на протяжних дефектах – дислокаціях (так звані Y–лінії). Загально відомо, що зв'язані екситони (A0X) утворюються не тільки за рахунок власних точкових дефектів (ТД), таких як вакансія кадмію (V_{Cd}) акцепторного типу, а також за рахунок залишкових домішок металів (Cu, Au, Li, Na), які утворюють у CdTe та ZnTe мілкі акцепторні центри. Присутність залишкових домішок металів, пов'язана з складністю очищення вихідних матеріалів Cd, Te, Zn. Таким чином, з спектрів фотолюмінесценції можна визначати ширину ЗЗ потрійних твердих розчинів

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ та відповідно їх склад (такий підхід вважається одним з найбільш точних). Також фотолюмінесцентний аналіз дозволяє дослідити домішкові стани у напівпровідниках та оцінити кристалічну якість матеріалу. Така універсальність робить цей метод ключовим при дослідженні кристалів та плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Особливості утворення потрійних сполук $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ достатньо детально досліджені завдяки вивченню структури оптичних фононів методом Раманівської спектроскопії. На раманівських спектрах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, як правило, спостерігаються моди від повздовжніх (LO) та поперечних (TO) фононних коливань (рис.9)..

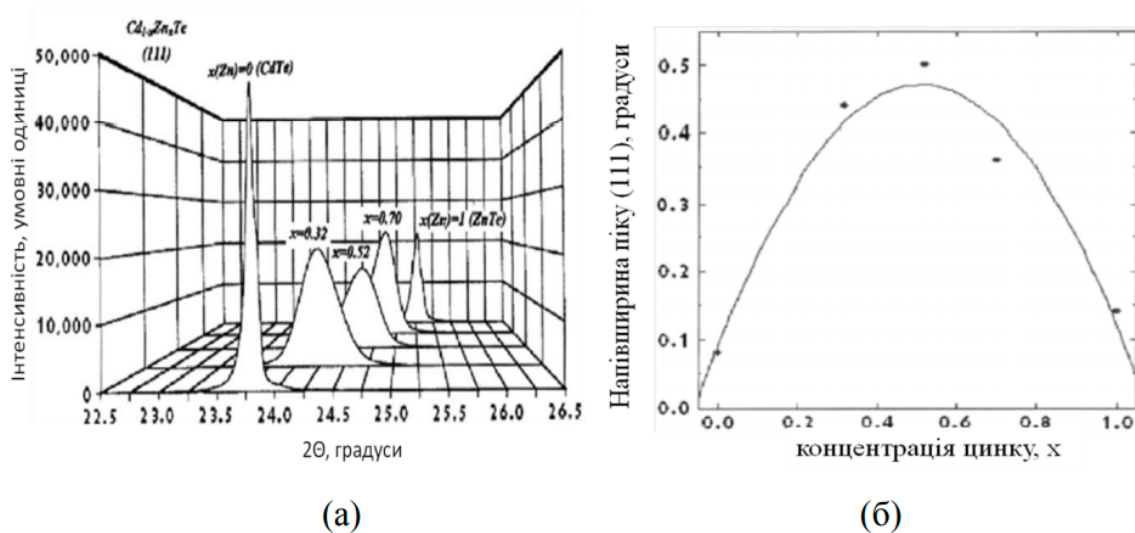


Рис.9. Вплив концентрації цинку на спектр фононних коливань $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$: (а) раманівські спектри плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з різним значенням x ; (б) залежність положення основних мод коливань CdTe (LO1, TO1) та ZnTe (LO2, TO2) від концентрації цинку, x .

Зміна властивостей фононних коливань у матеріалі при зміні значення x чітко прослідковується за величиною зсуву основних мод коливань відносно їх положення у чистих сполуках. Таким чином, за дисперсійними кривими, згідно положення мод коливань LO1, TO1, LO2 та TO2 можна оцінити, наприклад, концентрацію цинку у $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Необхідно відзначити, що для кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, є характерним утворення включень телуру, що супроводжується різким зниженням якості матеріалу. Такі включення також можуть бути ідентифіковані за допомогою раманівської спектроскопії.

Розділ 2. Експериментальна частина

2.1.Методики отримання тонких плівок методом електронно-променевого випаровування

Електронно-променеві пучки широко використовуються у технологічному обладнанні , за їх допомогою відбувається : нагрів, зварювання, плавка, розмірна обробка , розпилення; фундаментальні і прикладні дослідження, зокрема і в нанотехнологіях. Суть електронно-променевого впливу полягає в перетворенні кінетичної енергії електронного пучка в теплову .

Електронний промінь - потік електронів, що рухаються в одному і тому ж напрямку по близьких траєкторіях. Він має розміри, значно більші в напрямку руху в порівнянні з поперечною площиною.

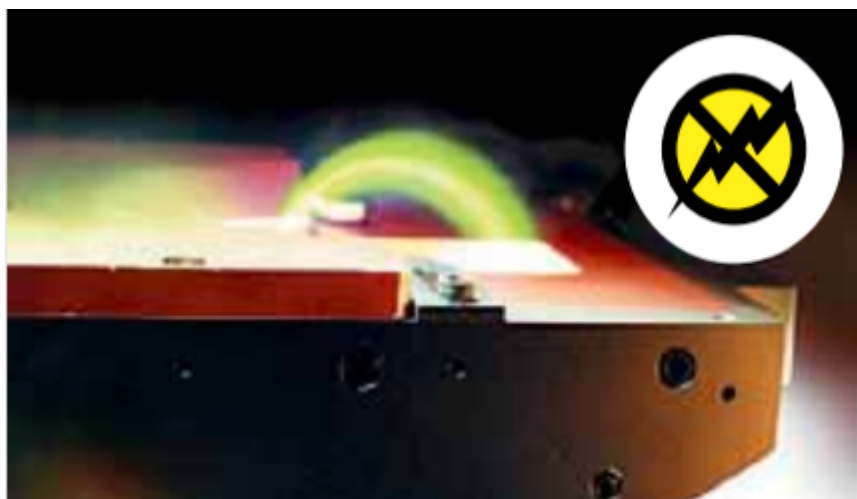


Рис.10 Електронний промінь

Електронний промінь (рис.10) за питомою енергетичною потужністю, легкістю управління, ефективністю і локальністю нагріву перевершує всі відомі, на сьогодні, джерела. До переваг можна віднести те, що промінь він не вносить домішок в оброблюваний матеріал, може працювати в різних несприятливих середовищах .

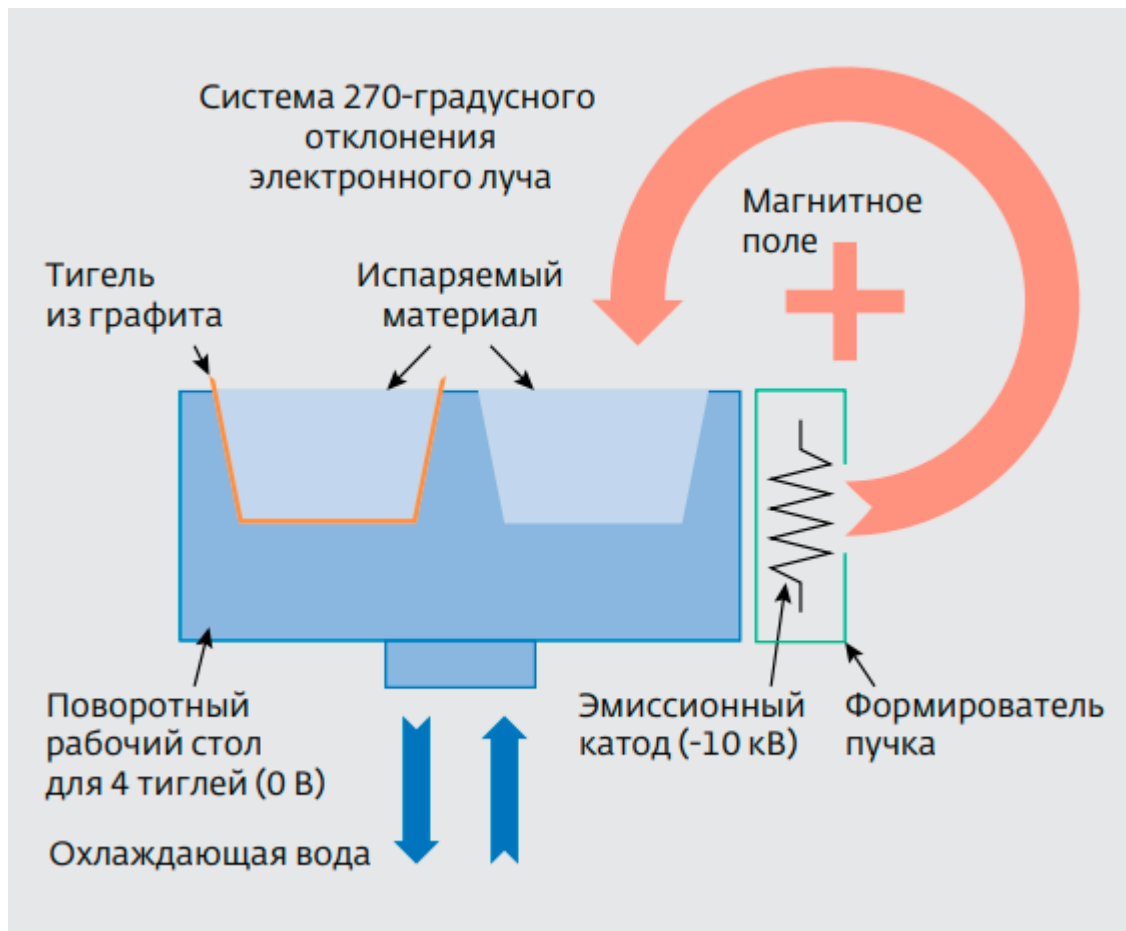


Рис.11 Схематичне зображення електронно-променевого випаровувача

Як правило, електронно-променевий випаровувач складається з трьох основних частин: електронної гармати, відхиляючої системи і водо-охолоджуваного тигля різної ємності. Це забезпечує безперервну роботу без додавання матеріалу, який випаровується. Крім того, в розплавленому стані він не контактує з мідними стінками тигля. У загальному випадку можливе використання сформованого за розміром тигля матеріалу (безтигельної випаровування) або застосування спільно зі спеціальними тиглями порошкового матеріалу.

Електронно-променевий випаровувач розміщується в камері, де підтримується рівень вакууму 10^{-4} Па, необхідний для мінімізації впливу залишкового газу на ефективність проходження електронного променя, і виключення забруднень іншими матеріалами структури плівки. Електронно-променеве напилення використовують у всіх випадках, коли не потрібна висока продуктивність, але необхідна система для напилення широкого спектру матеріалів різної товщини на різноманітні підкладки. Метод найбільш універсальний для виробництва

виробів великої номенклатури. Його істотний мінус - низька продуктивність. Однак установку електронно-променевого напилення можна оснастити системою переміщення підкладок, збільшивши цей параметр, але знизивши рівень номенклатури виробів, що виготовляються. Рекомендовані товщини покриттів для електронно-променевого напилення від 10 нм до 1 мкм, коли виключно важлива точність напилення в десятки ангстремів

2.2. Методика виготовлення бар'єрів Шотткі графіт/ n -Cd_{1-x}Zn_xTe

Тонкі графітові вуглецеві плівки отримували методом випаровування електронним пучком чистого масивного полікристалічного графіту в універсальній вакуумній установці Leybold-Heraeus L560. Інтенсивність пучка електронів, швидкість осадження і товщину плівок контролювали за допомогою INFICON XTC контролера. Напилення плівок проводили на підкладинки (площа підкладинок $S=0,2 \text{ см}^2$), отримані сколюванням об'ємних монокристалів n -CdZnTe, вирощених вертикальним методом Бріджмена під високим тиском пару кадмію в ампулі. Підкладки CdTe розколювали назовні, а потім розміщали у вакуумній камері. Під час процесу осадження, залишковий тиск у вакуумній камері був близько 5×10^{-5} мбар. Процес осадження тривав 90 с із середньою швидкістю осадженням 0,27 нм / с (результуюча товщина плівок становила близько 25 нм) при температурі основи 723 К. Одночасно напиляли графітові вуглецеві тонкі плівки на скляну підкладку для аналізу їх електричних та оптичних властивостей

Спектр пропускання тонких графітизованих вуглецевих плівок на скляних підкладках вимірювали за допомогою звичайного спектрофотометра СФ-2000. Експериментальні дані були виміряні в діапазоні довжин хвиль від 200 до 1100 нм з кроком 1 нм.

2.3. Методика виготовлення омичних контактів

Омичний контакт - це контакт метал-напівпровідник, в якому не виявляється потенційний бар'єр на межі поділу; він є невід'ємною частиною будь-якого напівпровідникового приладу. Дослідження контактів почалися ~ 60 років тому, коли було помічено, що на межі Ni-CdS існує потенційний бар'єр, а на межі Al-CdS його немає. Шотткі припустив, що бар'єр не утворюється, коли робота виходу електрона з металу A_m менша ніж енергія спорідненості до електрона напівпровідника χ_s . Проводилися технологічні роботи з метою зниження опору контактів до такої міри, щоб вони не впливали на властивості напівпровідникових приладів. Величини опору омичних контактів, наведені до одиниці площі, досягли $R_c = 10^{-6}-10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Це здійснювалося або за рахунок зміни хімічного складу приконтактної області напівпровідника, або за рахунок додаткового легування.

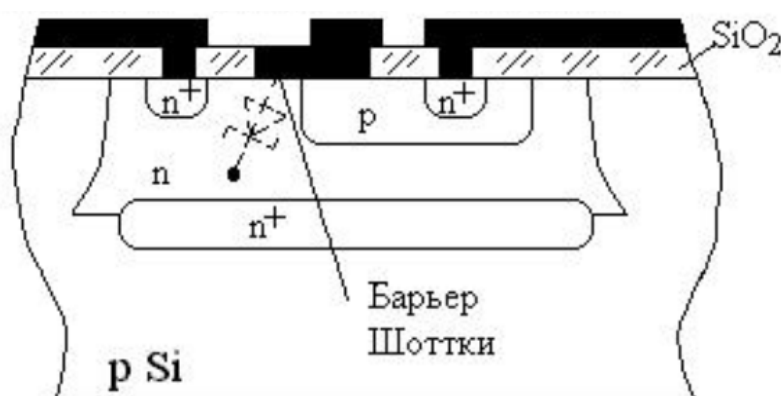


Рис. 12 . Схематичне зображення розміщення сильно легованих областей для виготовлення омичних контактів у бар'єрах Шотткі

Як відомо, контакт метал-напівпровідник може бути або випрямляючим (бар'єрним), якщо потенційний бар'єр між металом і напівпровідником тунельно-непрозорий; або омичним, якщо потенційний бар'єр відсутній або він тунельно-прозорий для електронів.

Омичні контакти до підкладинки n-CdZnTe отримували вплавленням індію, а до плівок графіту – використовуючи струмопровідну пасту на основі срібла.

2.4. Методики вирощення кристалів CdTe

CdTe - матеріал, з якого важко виростити високоякісні монокристали з наступних причин:

- 1) низька теплопровідність, що викликає труднощі регулювання форми фронту кристалізації через розсіювання тепла під час затвердіння розплаву;
- 2) оскільки критичне напруження зміщення низьке, то дислокації легко створюються тепловими напруженнями. З цієї причини зазвичай спостерігаються густини дислокацій в CdTe вище, ніж 10^6 см^{-2} ;
- 3) двійники легко утворюються, тому що енергія дефектів упаковки дуже низька.

Але не тільки це ускладнює технологію отримання кристалів, погіршуючи їх мікроструктуру. Наявність фазових переходів викликає труднощі при отриманні кристалів, виражені в нестабільності і не відтворюваності електрофізичних властивостей, які сильно залежать від умов, в яких вирощувався монокристал. Різні методи вирощування кристалів були досліджені для CdTe і твердих розчинів на його основі. На думку авторів роботи отримання монокристалічного телуриду кадмію для виготовлення детекторів розміром 5^{10} мм вже викликає серйозні ростові проблеми. Існує кілька технологій, що відрізняються як тривалістю технологічного процесу, так і особливостями характеристик одержуваних кристалів. По суті, існує три методи в різних модифікаціях:

- 1) вирощування з парової фази;
- 2) вирощування з телурового розчину - розплаву;
- 3) вирощування з розплаву.

Для отримання кристалів детекторної якості, застосовують метод вирощування з парової фази, в різних варіантах. Методи вирощування з парової фази можуть бути приблизно розділені на незатравочні - метод Пайпера-Поліша і приманок - метод Маркова-Давидова. Перевагою цього методу є виключення впливу стінок

контейнера на ріст монокристала. Ця технологія може застосовуватися для будь-якої сполуки, яка легко сублимується нижче температури точки плавлення.

Цим методом були отримані кристали CdTe діаметром 50 мм, вагою 250 - 300 г і з густиною дислокацій $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, а також кристали CdZnTe діаметром 50 мм з опором $8 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Недоліком даного методу є використання монокристалічних затравок, які дороги і дефіцитні. Спроба застосувати більш доступні і дешеві затравки з GaAs призводить до забруднення CdTe галієм до рівня $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, це призводить до виникненню пасток електронів (А-центри) і скорочення часу життя носіїв заряду, в результаті даний тип кристалів непридатний для виготовлення рентгенівських детекторів. [5]. В роботі застосований метод вирощування монокристалів CdTe на германієвих монокристалічних затравках діаметром 100 мм. Монокристали характеризуються опором понад $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Однак відомо, що германій створює в забороненій зоні CdTe глибокий рівень, тому хороша квантова ефективність матеріалу була досягнута лише при енергіях до 40 кеВ і при товщині шару, що не перевищує кілька сотень мкм. Даний метод призводить до отримання кристалів з механічними напруженнями, з наявністю в них телурових преципітатів. Низькі швидкості росту призводять до проблем рівноваги дислокацій і формування міжзеренних границь, що є головним недоліком такого способу вирощування. Незважаючи на переваги методу вирощування з газової фази, в більшості випадків він не зможе замінити вирощування кристалів CdTe з рідкої фази. Наступним методом вирощування детекторних кристалів є вирощування з телурового розчину - розплаву. У даній групі основним є метод рухомого нагрівача (Traveling Heater Method - THM), є вертикальним варіантом методу зонного плавлення в температурному градієнті. Використання низьких температур при вирощуванні позитивно позначається на структурній досконалості і чистоті кристалів. Однак довгий час (аж до 2000 р) не вдавалося отримати кристал діаметром більше ніж (10 - 32 мм). В Японії при використанні кристалізації CdTe з телурового розчину - розплаву (метод THM) були отримані монокристали діаметром 100мм, довжиною 300 мм і масою 15 кг. Отримані монокристали мали розподіл, з кроком 4 мм по діаметру шайби,

величин $\mu\tau$ (добуток рухливості на час життя носіїв заряду - транспортна характеристика) для електронів $2,3 \cdot 10^{-3} \text{см}^2/\text{В} \pm 5\%$ і для дірок $2,0 \cdot 10^{-4} \text{см}^2/\text{В} \pm 12\%$, що свідчить про високий ступінь макро гомогенності і високий рівень чистоти матеріалу [8]. Матеріал вирощували з метою застосування його в приладах, що створюють рентгенівське зображення. Однак слід зазначити, що даний тип матеріалу характеризується великим числом телурових включень. Серйозні проблеми, обумовлені наявністю протяжних дефектів в кристалах CdZnTe, вирощених методом з розчину - расплаву, відзначають також автори роботи [8]. У Франції з'явився новий метод вирощування з телурового розчину-розплаву, що здійснюється за допомогою випаровування Te [8]. У цьому методі CdTe і CdZnTe легують як хлором, так і алюмінієм і використовуються відкриті тиглі діаметром від 65 до 300 мм. Отриманий великий полікристал діаметром 300 мм і товщиною 1-10 мм, характеризується хорошими транспортними характеристиками: $\mu\tau_e = 3 \cdot 10^{-3} \text{см}^2/\text{В}$ і $\mu_e = 1020 \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а також високим опором (109- 1010 Ом $\cdot$ см). Використовуючи метод ІЧ-мікроскопії, було виявлено, лише незначну кількість телурових преципітатів в кристалах розміром 20 - 25 мкм [8], цим, мабуть, і пояснюється хороше $\mu\tau$ отриманих кристалів. Самі автори відзначають, що вище вказаний метод вимагає багатьох відпрацювань і оптимізацій. Для промислового випуску метод поки не підходить, з огляду на те, що товщина зливка в середньому 4,9 мм, а діаметр кристала хоч і 300 мм, однак це полікристал. Наявність Те преципітатів або включень (викликаних виділенням надлишку Ті в твердій фазі під час охолодження) і низькі швидкості росту відносяться до недоліків методу вирощування з телурового розчину - расплаву. Найбільш поширеним методом вирощування монокристалів CdTe і CdZnTe є вирощування з расплаву. У даній категорії найбільша кількість варіантів. Для отримання великих монокристалів застосовують метод Бріджмена і метод Обреїмова-Шубникова, який в зарубіжній літературі називається методом охолодження в градієнті температури (VGF - Vertical Gradient Freezing Method). Застосування методу Бріджмена при вирощуванні кристалів CdTe підвищує вихід монокристалічних злитків. Однак, використання методу в такому варіанті супроводжується

експериментальними труднощами, пов'язаними зі здійсненням точної орієнтації затравки в ампулі. [8]. Крім того, існує небезпека повного розплавлення затравки. Це обумовлює потребу підвищення осьового градієнта температури, що несприятливо впливає на структурні характеристики вирощеного кристала. При вирощуванні великих монокристалів однією з проблем є регулювання їх складу. Зростання монокристалу при температурі плавлення нижче її максимального значення призводить до концентраційного переохолодження розплаву, що знижує ймовірність його зародження. Наявність преципітатів і мікрровключень телуру в кристалі також представляє серйозну проблему, пов'язану з регулюванням складу розплаву. Найбільш поширений спосіб фіксування складу розплаву полягає в регулюванні температури кадмієвого резервуара, що знаходиться в «холодному» кінці ампули і задає необхідний парціальний тиск парів кадмію. Для досягнення бажаних результатів зазвичай підтримують постійною температуру кадмієвого резервуара під час росту кристалу. Температуру вибирають в інтервалі від 800 до 850°C. Докладний аналіз впливу температури кадмієвого резервуара на склад і властивості кристалів CdTe наведено в роботі. Однак, застосування даного методу можливо лише при використанні складних багатозонних печей. В цьому випадку, зі збільшенням діаметра вирощуваних кристалів істотно зростають енергетичні витрати, що призводить до підвищення вартості кристалів. Стандартний і модифікований варіанти методу Бріджмена, як правило, не забезпечують стабільно високого виходу монокристалічного матеріалу. Відома лише одна робота, із застосуванням модифікованого вертикального методу Бріджмена (MVB), де авторам вдалося отримати вихід кристалів спектрометричної якості $> 50\%$, з питомим опором в діапазоні $(2 - 9) \cdot 10^{10}$ Ом $\cdot$ см і високим значенням добутку рухливості на час життя електронів до 1×10^{-2} см² / В. Це було досягнуто завдяки додаванню в процесі росту домішок, які значно збільшують час життя електронів за рахунок перетворення електрично заряджених дефектів в нейтральні. Слід зазначити, що найкращі результати за значенням добутку рухливості на час життя для електронів, відомі з більшості робіт останніх років, перебувають на рівні близько 10^{-3} см² / В. Ще одним різновидом методу

Бріджмена є метод спрямованої кристалізації під високим тиском інертного газу – High Pressure Bridgman (HPB). В роботі [8] ріст кристала здійснювали при високому тиску інертного газу, вважаючи, що в цих умовах відбувається зменшення інтенсивності процесів сублімації і випаровування, а для отримання монокристала стехіометричного складу необхідно досить точно зважити в атомному співвідношенні компонентисполуки. Однак, як і слід було очікувати, в процесі вирощування кристалів відбувається втрата маси розплаву і збіднення кристала кадмієм і, як наслідок, утворення в ньому преципітатів. Використання високого тиску, також обумовлює структурну недосконалість, що виникає в процесі росту. Метод Бріджмена, здійснюваний при високому тиску інертного газу, характеризується ще меншим виходом монокристалів, а, крім того, і низькою якістю мікроструктури. Однак у даного методу є одна дуже цікава особливість - не використовуючи компенсації дефектів хлором, цим методом отримують напівізолюючі кристали. [8]. На завершення слід зазначити, що в практиці вирощування монокристалів часто зустрічаються матеріали, для яких використання класичного методу Чохральського практично неможливе. Так наприклад, метод Чохральського, що дозволяє вирощувати великі бездислокаційні монокристали кремнію і германію, виявився принципово непридатний до кристалів телуриду кадмію і твердих розчинів на його основі. Причинами є властивості матеріалу: низькі величини теплопровідності, енергії дефектів упаковки і критичне напруження утворення дислокацій, а також висока летючість і інконгруентне випаровування. При вирощуванні кристалів CdTe методом Чохральського, при високих осьових градієнтах температури (150 - 450 ° С / см) [7], не вдається домогтися опуклого фронту кристалізації. У підсумку виходить полікристал з безліччю меж зерен і двійників

2.5 Установка для дослідження вольт-амперних характеристик та програмне забезпечення

На рисунку (13 а) зображено схему із загальним вольтметром як включає опір вольтметра у вимірювальний струм, а вклад падіння напруги з амперметра для вимірювальної напруги також виключає для загального амперметра.

. Враховуючі дані аспекти для вибору та реалізації схеми дослідження ВАХ потрібно дотримуватись наступних положень:

а) Для структур з опором $10^4 \Omega$ і вище при прямому включенні (бар'єр повністю відкритий) потрібно використовувати лише схему із загальним вольтметром, тому для таких випадків вольтметр що має опір всього на два порядки вище може відбирати на себе суттєву долю, а для амперметра, який має опір на 3-4 порядки нижче падіння напруги буде меншим ніж 0,1% яким можна знехтувати.

б) Для структур з опором $10^2 \Omega$ і нижче при прямому включенні потрібно використовувати лише схему із загальним амперметром, тому для таких випадків вольтметр що має опір на 4 порядки вище відбирає дуже малий струм (около 0,01%) яким можна знехтувати, а амперметр, який володіє опором на 1-2 порядки менше має недопустимих 10% падіння напруги на собі до 10%.

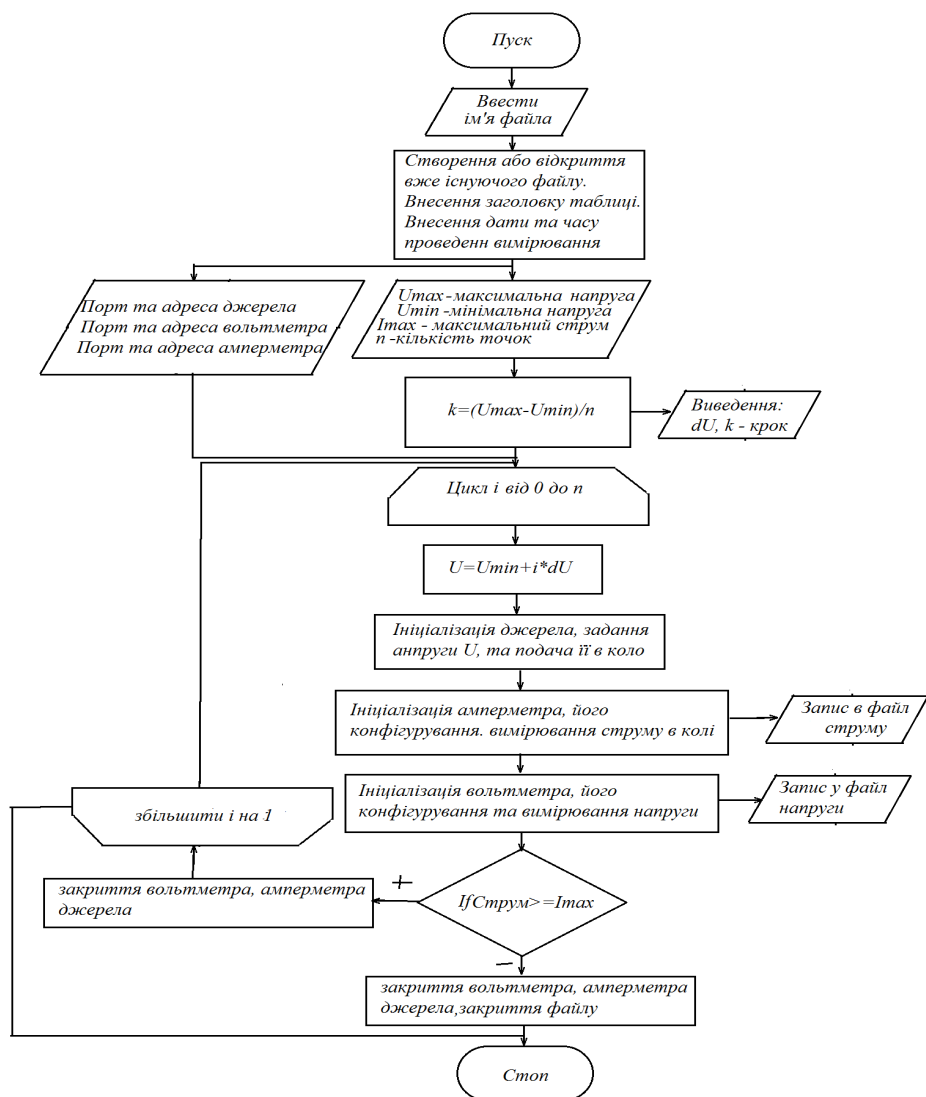


Рис. 14 – Блок-схема програми.

в) у випадку коли опір структури коливається від 10^2 до 10^4 Ом виникає складніша ситуація. Для таких випадків розглядають опір структури в прямому і в зворотному напрямках щоб знайти компромісне вирішення. [8].

На час проведення роботи в даній установці використовувались обидві схеми

Для автоматизації процесу та одночасного зберігання даних всі прилади було під'єднано за допомогою шини USB до ПК використовуючи програму написану в середовищі LabView наведена на рис. здійснювалось керування приладами.

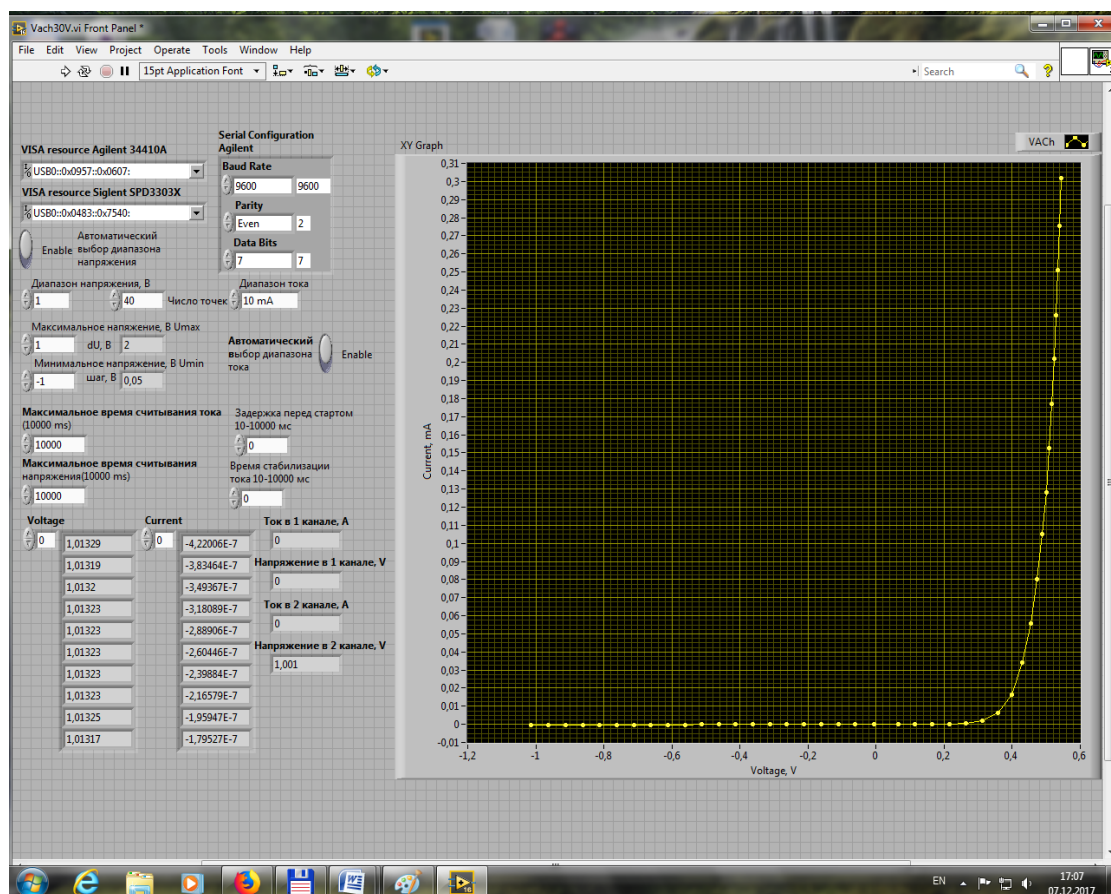


Рис. 15 – Вікно програми для дослідження ВАХ Інструментарій програми дозволяє:

1. Задавати напругу прямого і зворотного зміщення.
2. Задавати зміну кроку напруги для вимірюванні ВАХ.

3. Задавати максимально допустимий струм, для захисту від пошкоджень.

4. Можливість вибору діапазону вимірювання напруги та струму для амперметра та вольтметра або для режиму зміни діапазонів

5. Можливість задавати час витримки відразу після комутації але перед початком вимірювання.

6. Зберігає всі отримані результати на ПК у вигляді файлу який придатний для обробки як у MS Excel так і Origin.

7. Після вимірювань отримані результати виводяться на екран у вигляді графіків Виводить результати вимірювань на екран (рис.), у вигляді точок, так можливо вивести і у вигляді графіка

2.6. Експериментальні результати та їх обговорення

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) виготовлених бар'єрів Шотткі графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (рис.2.1), виміряні при прямих та зворотних зміщеннях в інтервалі температур $T=296\text{--}344\text{K}$, показують наявність хороших випрямляючих властивостей. Визначений коефіцієнт випрямлення при $V=0,7\text{В}$ і $T=296\text{K}$ становить $\sim 10^4$.

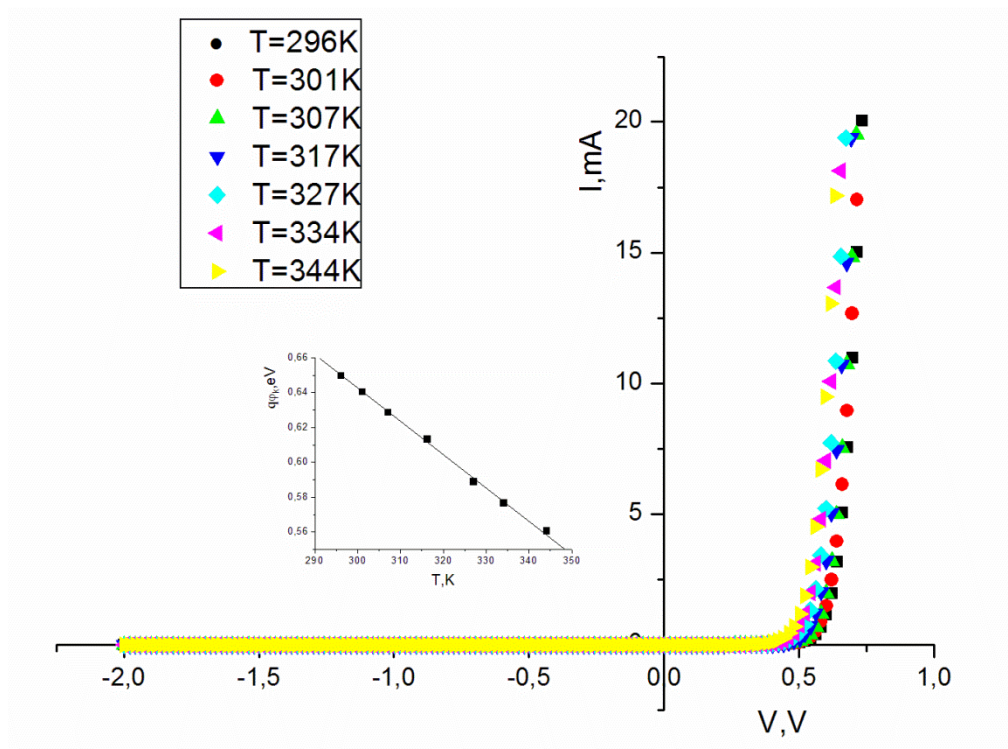


Рис.2.1. Вольт-амперні характеристики бар'єрів Шотткі графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в температурному інтервалі $T=296\text{--}344\text{K}$. На вставці – залежність $\phi_k=f(T)$.

Висота потенціального бар'єра $q\phi_k$, визначена методом екстраполяції прямолінійних ділянок ВАХ до вісінапруг, становить $q\phi_k=0,65\text{eV}$ при $T=296\text{K}$. Визначений із залежності $\phi_k=f(T)$ температурний коефіцієнт зміни $q\phi_k$ у досліджуваному інтервалі температур дорівнює $d(q\phi_k)/dT = -1,9 \cdot 10^{-3}\text{eV/K}$, що істотно перевищує швидкість температурної зміни значення ширини забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ $d(E_g)/dT = -4,01 \cdot 10^{-4}\text{eV/K}$. Тому, лінійне зменшення величини $q\phi_k$ при підвищенні температури (рис.2.1, вставка), можна пояснити зростанням концентрації власних носіїв заряду n_i , а також ефективної густини станів N_C і N_V у зоні провідності та валентній зоні $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Спостережуване різке зростання прямого струму при відповідному для кожної температури значенні напруги характерне для ВАХ структур з низьким опором базового матеріалу R_s . Визначена з прямолінійних ділянок ВАХ величина R_s становила $R_s=4,2$ Ом, що з врахуванням геометричних розмірів підкладки добре співпадає з її опором. Крім цього, значення R_s практично не залежить від температури (рис.2.1), що може бути пояснене виснаженням мілкового енергетичного донорного рівня $E_C - 0,01\text{eV}$, який в кристалах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, легованих індієм, відповідає домішковим центрам In_{Cd} .

Характер залежностей $C=f(V)$, виміряних як в області низьких ($f=10$ - 100кГц), так і високих ($f=500$ - 1000кГц) частот (рис.2.2 та 2.3) при зворотних – $0,0\text{В} > V > -2,0$ В та прямих напругах $V > 0,65$

Вдобрє пояснюється на основі теорії бар'єрної ємності асиметричних випрямляючих структур [12] з розподілом вбудованого потенціалу в області напівпровідника зі значно меншою концентрацією легуючої домішки, в даному випадку $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

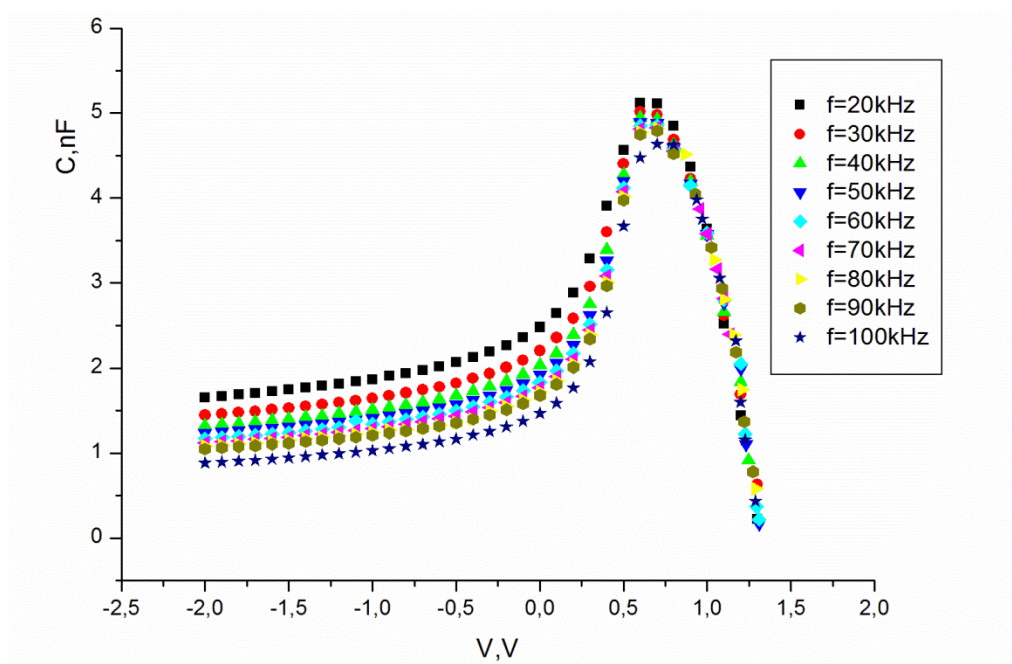


Рис.2.2. Вольт-фарадні характеристики бар'єрів Шотткі графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в області низьких частот $f=10$ - 100кГц .

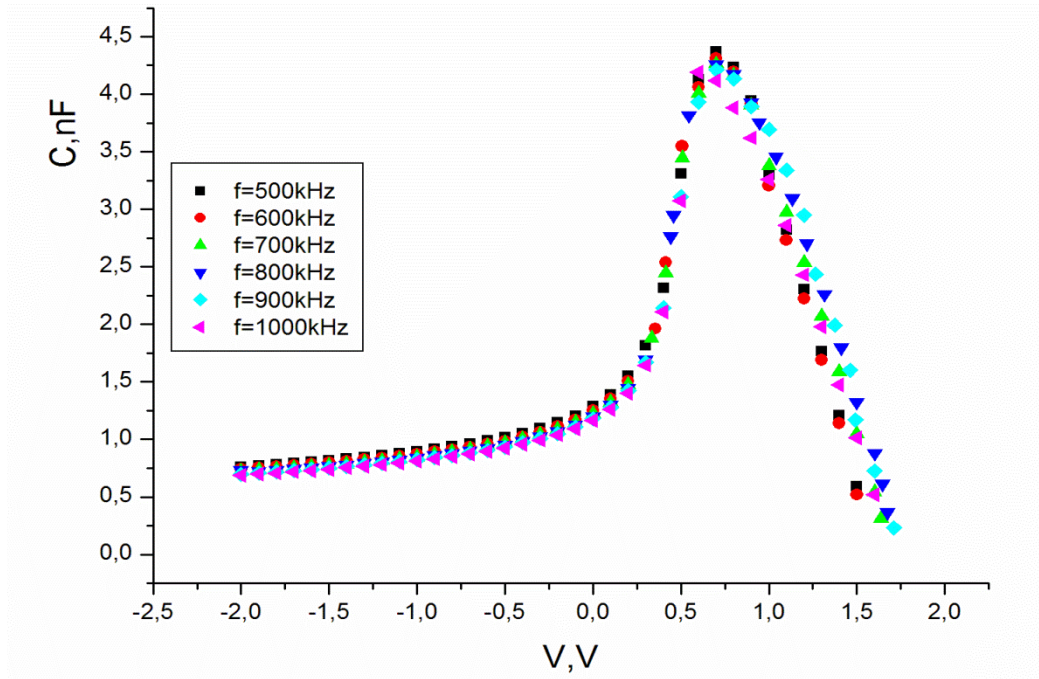


Рис.2.2.Вольт-фарадні характеристики бар'єрів Шотткі графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в області високих частот $f = 500\text{--}1000\text{ кГц}$.

Спостережувана залежність ємності від частоти змінного сигналу при низьких її значеннях зумовлена впливом заряду глибоких енергетичних рівнів, які можуть бути розміщені як на межі розділу, так і в зарядженій області структури. Особливістю вольт-фарадних характеристик (ВФХ) діодів графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, виміряних як в області низьких ($f = 10\text{--}100\text{ кГц}$) (рис.2.2), так і високих ($f = 500\text{--}1000\text{ кГц}$) (рис.2.3) частот є наявність ділянки різкого зменшення ємності в області прямих напруг $V > 0,65\text{ В}$. Оскільки вказана величина напруги $0,65\text{ В}$ добре корелює з висотою потенціального бар'єра, то спостережувана зміна $C = f(V)$ може бути пояснена зникненням бар'єрної області структури при $qV > q\phi_k$.

Аналіз ВФХ діодів графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ був проведений за відомими методиками [] з використанням $C = f(V)$ характеристик, виміряних при високих частотах, оскільки для них практично відсутня залежність ємності від частоти (рис.2.2).

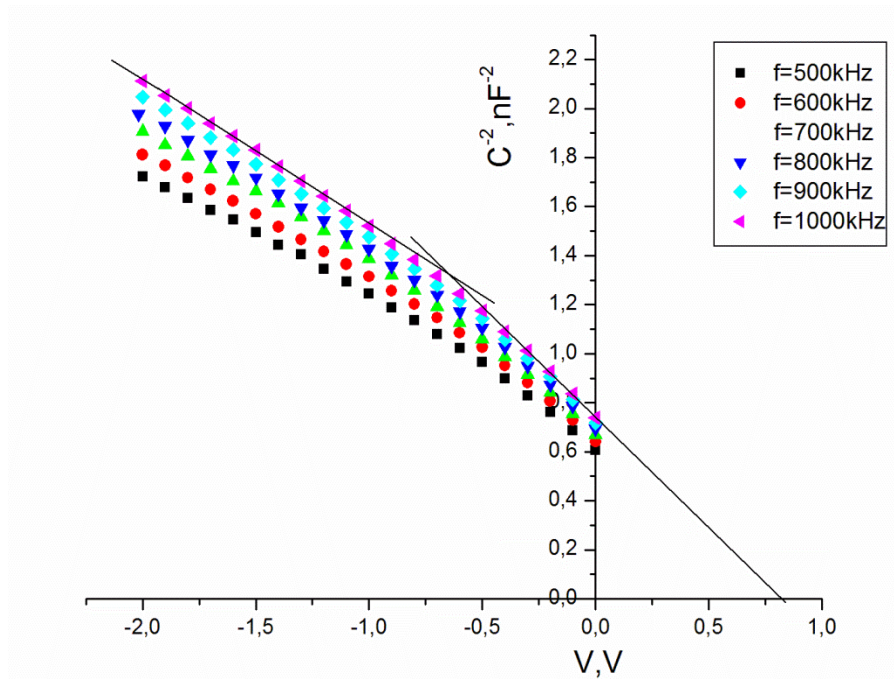


Рис.2.3.Вольт-фарадні характеристики бар'єрів Шотткі графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в координатах $C^2=f(V)$.

Дві прямолінійні ділянки на залежностях $C^2=f(V)$ з різними кутами нахилу до вісі напруг (ϑ_1, ϑ_2) свідчать про виникнення у приповерхневому шарі матеріалу підкладки області з іншою концентрацією електрично активної домішки. В данному випадку розподіл домішок має сходинкоподібний характер. Концентрації домішок як у приконтактній області (N_1), так і в глибині базової області (N_2) визначаються за виразами [12]:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \frac{2}{q \varepsilon \varepsilon_0 N_1 \cdot S^2}; \operatorname{tg} \alpha_2 \frac{2}{q \varepsilon \varepsilon_0 N_2 \cdot S^2}, \quad (2.1)$$

де q – заряд електрона; S – площа діода; ε – відносна діелектрична проникність матеріалу; ε_0 – електрична проникність вакууму. Визначені концентрації електрично активних донорів N_1 та N_2 становили $3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ та $6,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, відповідно. Утворення більш високоомної приконтактної області виникає внаслідок випаровування атомів кадмію, як з поверхні, так і з приповерхневого шару $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ при нагріванні підкладки до досить високих температур ($T=723 \text{ K}$) в процесі виготовлення структури [13]. Оскільки при цьому в $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ створюються власні точкові дефекти вакансії кадмію, які у данному

напівпровіднику є акцепторами, то це зприводить до зміни співвідношення між концентраціями донорних і акцепторних електрично активних центрів та, як наслідок, зменшення різниці $N_D - N_A$. Визначена концентрація N_2 досить добре відповідає значенню концентрації носіїв заряду у базовому матеріалі.

Товщину приконтактної до графіту області просторового заряду $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з концентрацією донорів N_I розраховували на основі виразу [12]:

$$d_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\phi_k}{qN_1}}, \quad (2.2)$$

Значення величин, які входять до складу виразу (2.2) пояснені вище. Розрахована товщина області зі зниженою концентрацією донорів у $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ d_1 становила $4.4 \cdot 10^{-5}$ см.

Визначене екстраполяцією прямолінійних ділянок залежностей $C^2=f(V)$ до перетину з віссю абсцис значення напруги V_C рівне 0,8eВ, дещо перевищує висоту потенціального бар'єра $q\phi_k=0,65\text{eВ}$, отриману з аналізу прямих гілок ВАХ. Неспівпадання значень вказаних величин можна пояснити впливом на ємність досліджуваних діодів заряду поверхневих електрично заряджених глибоких рівнів, що підтверджується залежністю кута нахилу $C^2=f(V)$ від частоти змінного сигналу. Згідно моделі Донеллі-Мілнса[4], яка враховує наявність електричного заряду локалізованого на поверхневих станах металургійної межі розділу

$$V_c = q\phi_k - \frac{Q_{ss}^2}{2q(\varepsilon_p N_a + \varepsilon_n N_d)}, \quad (2.3)$$

де $Q_{ss} = qN_{ss}$ – електричний заряд, розміщений на одиниці площі поверхні гетеропереходу; ε_p , ε_n і N_a , N_d – відносні діелектричні проникності та концентрації електрично активних акцепторних і донорних центрів відповідно.

Оскільки, контактне електричне поля розподіляється в приповерхневому шарі

базового матеріалу, можна вважати, що заряд поверхневих центрів впливає тільки на значення та розподіл електричного потенціалу в цій області. В такому випадку, враховуючи вираз (2.2), концентрацію заряджених поверхневих станів можна розрахувати за формулою

$$N_{ss} = \frac{Q_{ss}}{q} = \frac{1}{q} \sqrt{2\epsilon\epsilon_0} q N_D (V_c - q\phi_k),$$

(2.4)

де N_D – концентрація електрично активних донорних центрів у $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Розрахована за формулою (2.4) величина N_{ss} становила $\sim 8,0 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$.

Для кращого розуміння фізичних процесів в області контакту графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ був проведений аналіз енергетичної діаграми структури за моделлю Андерсона (без врахування впливу поверхневих станів) та з врахуванням отриманих експериментальних результатів. Необхідні енергетичні параметри компонентів структури – спорідненість до електрона χ та ширина заборонної зони – були взяті з наукової літератури. Використовувалися такі величини спорідненостей до електрона $\chi(\text{CdZnTe}) = 4.28 \text{eV}$ [15] та графіту $\chi(\text{G}) = 4.6 \text{eV}$ [6], а також ширини забороненої зони $E_g(\text{CdZnTe}) = 1.53 \text{eV}$ [17]. Для розрахунку положення рівня Фермі E_F відносно дна зони провідності у $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ використовували температурну залежність концентрації носіїв заряду у невиродженому напівпровіднику n -типу провідності. Розрахунок розміщення рівня Фермі для CdZnTe проводили використовуючи значення концентрації електронів $N_I = 4 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$, отримане за експериментальними результатами дослідження C - V -характеристик діодів графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Рівень Фермі знаходиться нижче дна зони провідності CdZnTe на величину $\delta_2 = 0.14 \text{eV}$. Оскільки графіт за своїми властивостями близький до металлу, то положення рівня Фермі відносно рівня вакууму у данному випадку визначається величиною спорідненості до електрона [16]. Розрахована на

основі енергетичної діаграми, побудованої на основі моделі Андерсона, як різниця термодинамічних робіт виходу, висота потенціального бар'єра діода графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ становила 0,18 еВ, що істотним чином відрізняється від експериментально встановленої $q\phi_k=0,65\text{eV}$. Згідно моделей ізотипних бар'єрних структур [18], заряджена область у приконтakтному шарі напівпровідника n – типу провідності може формуватися внаслідок захоплення електронів поверхневими станами, що добре узгоджується з результатами C - V -характеристик.

Енергетична діаграма структури графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з врахуванням отриманих експериментальних результатів приведена на рис.2.4.

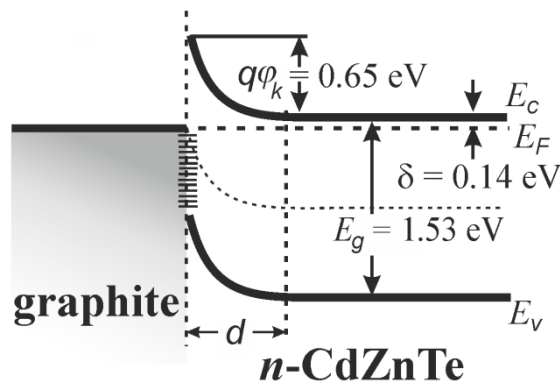


Рис.2.4. Енергетичний профіль діодів графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з врахуванням експериментальних даних.

Для визначення механізмів струму крізь потенціальний бар'єр при прямих зміщеннях прямі гілки ВАХ перебудували у напівлогарифмічному масштабі (рис.2.5).

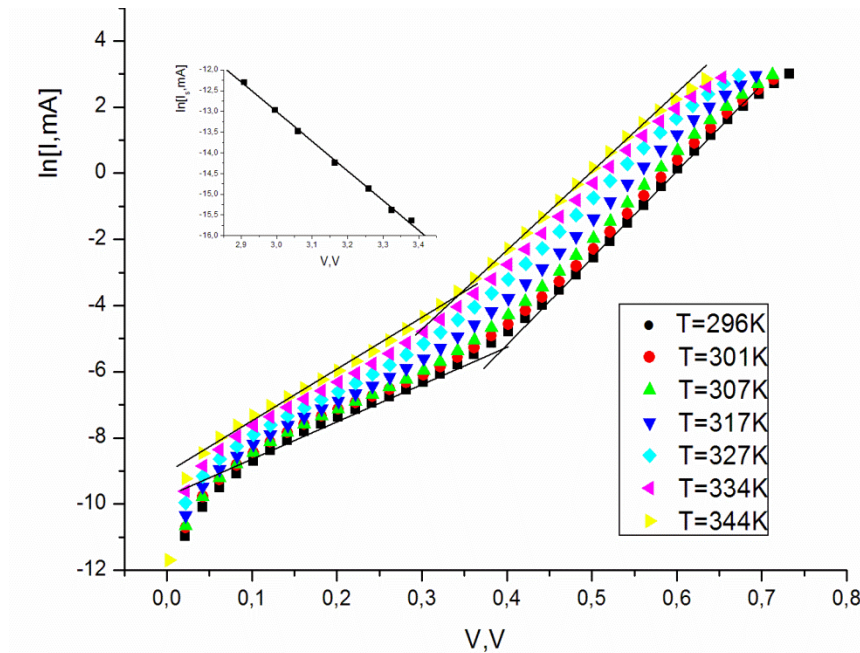


Рис.2.5. Вольт-амперні характеристики бар'єрів Шотткі графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в напівлогарифмічному масштабі при різних температурах $T=296\text{-}344\text{K}$. На вставці – температурна залежність струму насичення $I_s=f(10^3/T)$.

Залежності $\ln I = f(V)$ при різних температурах характеризуються двома прямолінійними ділянками, що свідчить про прояв різних механізмів проходження електронів крізь потенціальний бар'єр. В області малих струмів при $3kT < V < 0.35\text{V}$ коефіцієнт неідеальності A в температурному інтервалі $T=296\text{-}344\text{K}$ змінюється від 3,2 до 2,3. Можна допустити, що в деякому наближенні ВАХ діодів графіт/ $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ описується виразом для рекомбінаційного струму [12]

$$j = \frac{qn_i d}{\tau} (e^{\frac{qV}{2kT}} - 1) = \frac{n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2q}{N_D}} (\phi_k - V) (e^{\frac{qV}{2kT}} - 1) \quad (2.5)$$

де n_i – значення власної концентрації носіїв заряду в $n\text{-CdZnTe}$, d – товщина збідненої області в $n\text{-CdZnTe}$, τ – час життя носіїв заряду у цій області, N_D – концентрація донорних домішок. При цьому рекомбінація носіїв заряду відбувається у збідненій області $n\text{-CdZnTe}$ через глибокі рівні, які неповністю заповнені електронами, оскільки рівень Фермі в цій області при малих прямих напругах розміщений поблизу середини забороненої зони напівпровідника. Визначене експериментально дещо більше значення A може бути пояснене участю пасток, які можуть захоплювати електрони з зони провідності $n\text{-CdZnTe}$.

Зменшення величини A зі зростанням температури зумовлене термічним збудженням електронів з пасток.

При прямих зміщеннях $0.35 < V < 0.7$ В коефіцієнт A зменшується від 1,5 до 1,35 в області температур $T=296-344$ К, що свідчить про значний внесок надбар'єрного струму, природа якого визначається товщиною електричного переходу та її співвідношенням з довжиною вільного пробігу носіїв заряду l . Розрахунок величини l показав, що її значення при $T=300$ К для електронів у CdTe становить ~ 10 нм, що значно менше ніж розмір збудненої області діода (440 нм). Таким чином, досліджувані діоди графіт/ n -Cd_{1-x}Zn_xTe можна віднести до товстих бар'єрних структур, для яких ВАХ описується виразом [19]

$$j_n = q\mu_n N_c E_s e^{-\frac{q\phi_k}{kT}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (2.6)$$

де μ_n – дрейфова рухливість електронів; E_s – напруженість електричного поля на межі розділу метал-напівпровідник при напрузі прямого зміщення V . В цьому випадку, відомого як дифузійна теорія, густина струму з напівпровідника в метал буде обмежуватися процесами їх дрейфу та дифузії.

Оскільки температурна залежність струму насичення визначається експоненційним множником $e^{-\frac{q\phi_k}{kT}}$, то це дає можливість провести оцінку висоти потенціального бар'єра структури з графіка $\ln I_s = f(10^3/T)$. Значення величини I_s при різних температурах визначали екстраполяцією прямолінійних ділянок залежностей $\ln I = f(V)$ в області прямих зміщень $0.35 < V < 0.7$ В до вісі напруг (рис.2.5, вставка). Розрахована величина $q\phi_k = 0,62$ еВ, що практично співпадає зі значенням, отриманим при аналізі прямих гілок ВАХ ($q\phi_k = 0,65$ еВ).

При невеликих зворотних напругах $3kT/q < V < 0.5$ В ВАХ діодів графіт/ n -Cd_{1-x}Zn_xTe добре описуються формулою для генераційного струму (множник перед дужками у виразі 2.5) [12], що підтверджується лінійним характером залежностей $\ln I = f(\phi_k - V)^{1/2}$ (рис.2.7).

Генерація носіїв заряду має місце у зарядженій області n -CdZnTe та зумовлює формування зворотного струму внаслідок переміщення негативного

заряду електронів в об'ємну частину n -CdZnTe та позитивного заряду в тонку плівку графіту за участю поверхневих станів на межі структури.

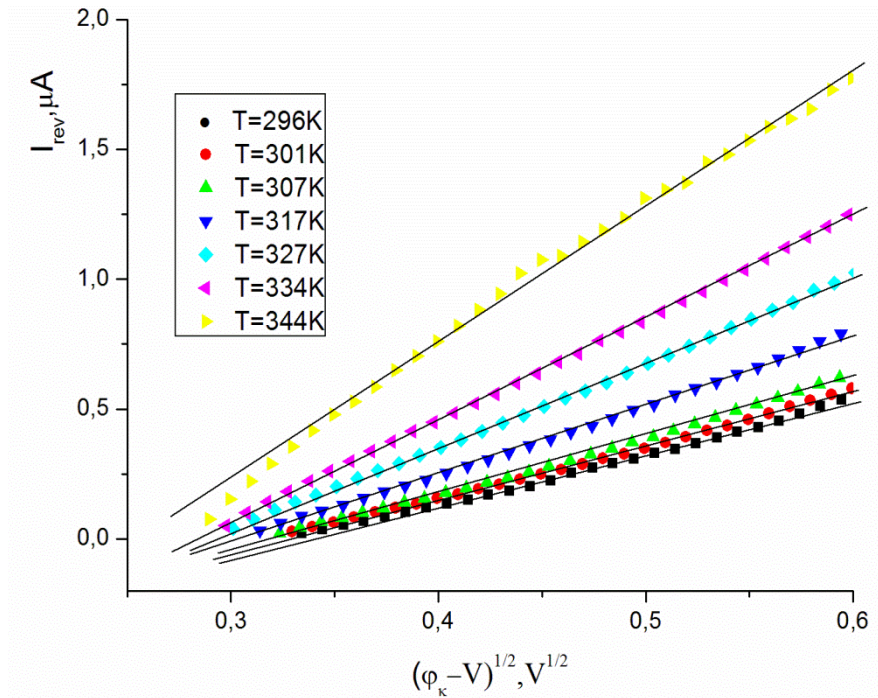


Рис.2.6. Зворотні гілки вольт-амперних характеристик бар'єрів Шотткі графіт/ n -Cd_{1-x}Zn_xTe в координатах $\ln I = f(\phi_k - V)^{1/2}$ при різних температурах

При зворотних напругах $V_r > 0.5$ В ВАХ діодів графіт/ n -Cd_{1-x}Zn_xTe описуються формулою для тунельного струму [8]:

$$I_{rev} = a_0 \exp\left(-b_0(\phi_b - V)^{-1/2}\right), \quad (2.7)$$

де a_0 – параметр, значення якого залежить від імовірності заповнення електронами рівнів, з яких має місце тунелювання електронів, b_0 – визначає зміну величини струму з напругою.

Згідно з виразом (2.7), залежність зворотного струму від прикладеної напруги у випадку тунельного механізму струмопереносу в координатах $\ln I_{rev} = f(\phi_b - V)^{-1/2}$ повинна бути лінійною, що спостерігається експериментально (рис.2.6).

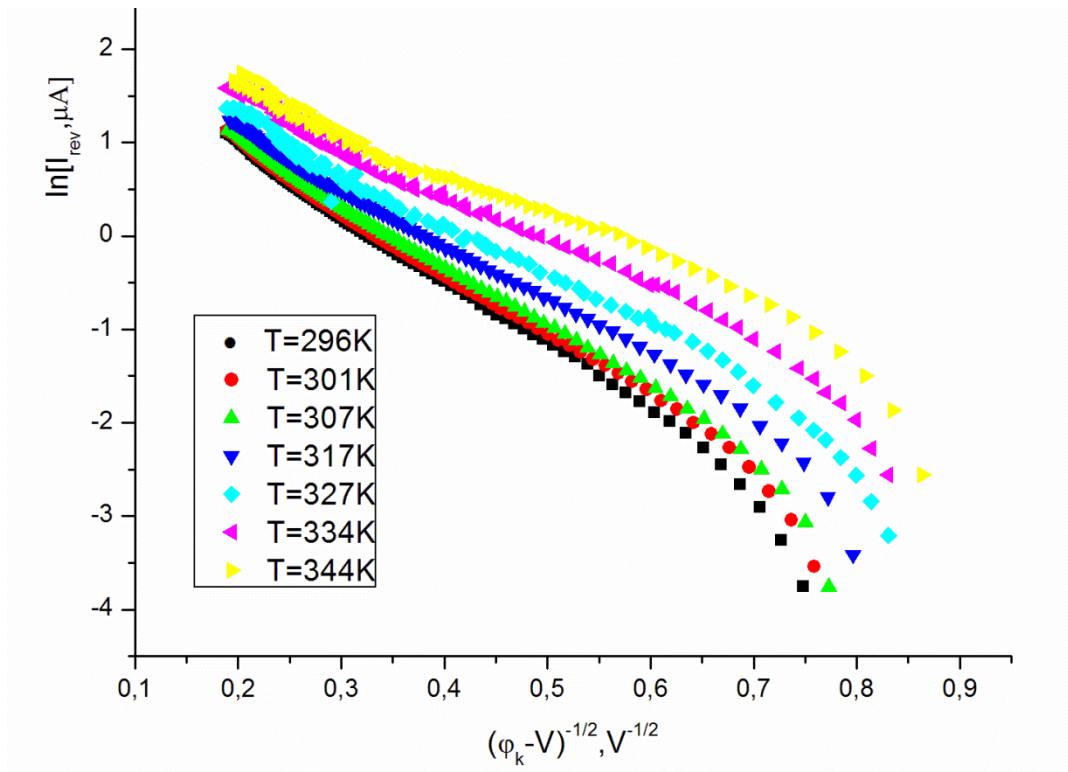


Рис.2.7. Зворотні гілки вольт-амперних характеристик бар'єрів Шотткі графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в координатах $\ln I_{\text{rev}} = f(\phi_k - V)^{-1/2}$ при різних температурах

Для визначення параметра a^0 прямолінійні ділянки функції $\ln I = f(\phi_k - V)^{-1/2}$, побудовані при різних температурах, екстраполювали до вісі струмів.

Встановлено, що значення a^0 не залежить від температури. Таким чином, в процесі тунелювання приймають участь енергетичні рівні, заповнення яких електронами, не залежить від температури, що добре узгоджується з енергетичною діаграмою структури. При зворотних зміщеннях $V_r > 0,5$

Вднозоніпровідостів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ знаходиться нижче ніж рівень Фермі у графіті.

Тому зворотний струм формується тунелюванням електронів з заповнених енергетичних рівнів графіту, на незайняті енергетичні рівні зони провідності

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Таке тунелювання можливе внаслідок звуження розмірів бар'єра біля

межі розділу компонент діода, що пояснюється параболічним розподілом електричного потенціалу в ОПЗ діода.

Необхідно відмітити, що отримані діоди графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ характеризуються досить високою фоточутливістю (рис.2.8). Їх фотоелектричні параметри при освітленні потужністю 100 мВт/см^2 : густина струм короткого замикання $J_{\text{кз}} = 9,5 \text{ мА/см}^2$; напруга холостого ходу $V_{\text{хх}} = 0,5 \text{ В}$. Залежність фотоструму від зовнішнього зміщення можна пояснити наявністю рекомбінаційних процесів в зарядженій області структури, що підтверджується визначеними при аналізі прямих гілок ВАХ механізмами струмопереносу.

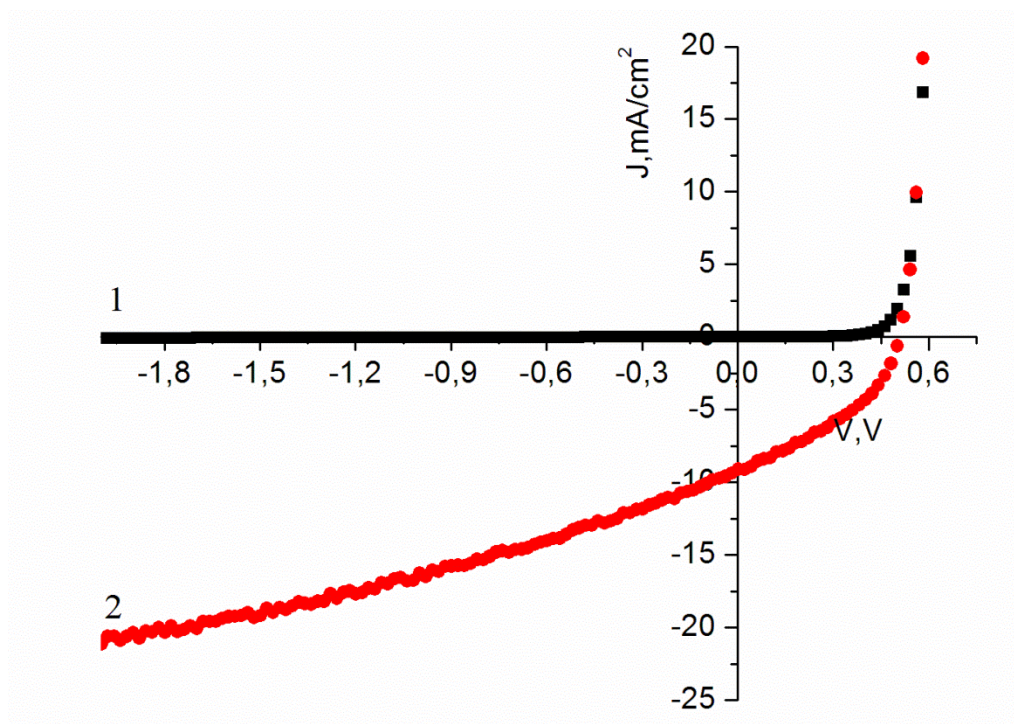


Рис.2.8. Вольт-амперні характеристики діодів графіт/ n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$: 1— без освітлення; 2— освітлених випромінюванням потужності $P = 100 \text{ мВт/см}^2$.

Зважаючи на характер світлових ВАХ, отримані структури можуть бути запропоновані для практичного використання як фотоперетворювачі та фотоприймачі електромагнітного випромінювання.

Висновки

1. Фоточутливі бар'єри Шотткі графіт / $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, виготовлені нанесенням тонких плівок графіту на свіжосколоту поверхню кристалічного $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ методом електронно-променевого випаровування.
2. На основі енергетичної діаграми контакту графіт / $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ показано домінуючий вплив поверхневих енергетичних станів на його енергетичні параметри.
3. На основі дифузійної теорії випрямлення розрахована висота потенціального бар'єра досліджуваних діодів графіт / $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($q\phi_k=0,62\text{eV}$), що практично співпадає зі значенням, отриманим при аналізі прямих гілок ВАХ ($q\phi_k=0,65\text{eV}$).
4. Зважаючи на характер світлових ВАХ, отримані структури можуть бути запропоновані для практичного використання як фотоперетворювачі та фотоприймачі електромагнітного випромінювання.

Література

1. Malard L.M., Raman spectroscopy in graphene / Malard L.M, Pimenta M.A, Dresselhaus G, Dresselhaus M.S. // Raman Phys. Reports -2009; 473:P. 51-87.
2. Blackstock J.J., Ultraflat carbon film electrodes prepared by electron beam evaporation / J.J Blackstock, A.A Rostami, A.M Nowark, R.L McCreery, M.R Freeman, M.T McDermott // Anal. Chem..-2004.-Vol. 76.P. 2544-2552.
3. Pierson H.O, Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes / H.O Pierson. Noyes Publications.- 1993.
4. Kurra N. Field effect transistors and RC filters from pencil-trace on paper / N Kurra, D Dutta, G.U Kulkarni. // Phys. Chem. Chem. Phys. - 2013; Vol.15. – P. 8367-8372.
5. Sze S.M. Physics of semiconductor devices / S.M Sze, K.K Ng.// New Jersey: Wiley; -2007.
6. Sharma B.L. Semiconductor Heterojunctions / Sharma B.L, Purohit R.K // New York: Pergamon.-1974.
7. A.G Milnes. Metal-semiconductor junctions / Milnes A.G, Feucht D.L//New York: Academic Press. -1972.
8. Brus V.V. On impedance spectroscopy analysis of nonideal heterojunctions / V.V Brus // Semicond. Sci. Technol.– 2012. Vol.27 - 035024.
9. Brus V.V. Electrical and photoelectrical properties of P3HT/n-Si hybrid organic-inorganic heterojunction solar cells / V.V Brus, M Zellmeier, X Zhang, S.M Greil, M Gluba, A.J Tofflinger, J Rappich, N.H Nickel // Organic Electronic – 2013. –Vol.14. - P. 3109-3116.
10. Goodman A.M. Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method – one carrier system./A.M Goodman //J. Appl. Phys. – 1962.Vol.34. – P. 329-338.
11. I.G. Orletskyi, M.I. Ilashchuk, M.N. Solovan, P.D. Maryanchuk, O.A. Parfenyuk,

- E.V. Maistruk, S.V. Nichyi, Electrical Properties and Energy Parameters of n-FeS₂/p-Cd_{1-x}Zn_xTe Heterojunctions, Semiconductors. 52 (2018) 1171–1177.
- 123и С. М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 655с.
- .13. O.A. Parfenyuk, M.I. Ilashchuk, S.M. Chupyra, V.R. Burachek, D.V. Korbutyak, S.G. Krylyuk, N.D. Vakhnyak, Influence of low-temperature annealing on the state of CdTe surface, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2005. V. 8, N 3. P. 50-53
14. Милнс А. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт – М.: Мир., 1975. – 432 с.
15. Handbook of photovoltaic science and engineering / Edited by A. Luque and S. Hegedus. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Ltd., 2011. – 1132p.
16. Bartolomeo A.D. Graphene Schottky diodes: an experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction // Article in Physics Reports. – 2016. – 75p.
17. Olego D. J. Optoelectronic properties of Cd_{1-x}Zn_xTe films grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates / D. J. Olego, J. P. Faurie, S. Sivananthan, P. M. Raccah // Appl. Phys. Lett. – 1985 – V.47. – P. 1172-1174
18. Б. Шарма, Р. Пурохит. Полупроводниковые гетеропереходы – М., Сов. радио, 1979. – 227с.
19. Сердюк В.В. Физика солнечных элементов. – Одесса: Логос, 1994. – 336 с.
20. Ferrari A.C., Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects/Ferrari AC. Sol. State Commun. - 2007 - . P. 143: 47-57.

Характеристика процесу праць

При роботі з електровимірювальними приладами і високими напругами, для забезпечення безпеки працюючих у відповідності з вимогами правил встановлення електроустановок повинні бути встановлені заземлюючі пристрої, до яких надійно повинні бути підключені металеві частини електроустановок і корпуси електрообладнання, які в наслідок пошкодження ізоляції можуть бути піднапругою.

1. Заземлення необхідне:

- при напрузі 500В і більше змінного і постійного струму у всіх випадках,
- при напрузі 36В і вище змінного струму і 100В постійного в приміщеннях з підвищеною небезпекою,
- при всіх напругах змінного і постійного струму в вибухонебезпечних приміщеннях.

2. Вимикачі, магнітні пускачі, пускорегулюючі пристрої і тому подібне повинні мати напис, який вказує до якого пристрою відноситься.

3. На приводах комутаційних апаратів повинні бути ясно вказані положення “Включено” і “Виключено”, які можуть підтверджуватись сигнальними лампочками.

4. Електричний провід повинен мати якісну ізоляцію.

5. Після закінчення робіт необхідно відключити електроенергію, прибрати робоче місце, виключити перемикач, перевірити водопровідні крани[26].

Заходи безпеки праці під час роботи

Основними правилами техніки безпеки при роботі з хімреактивами і токсичними речовинами є:

1. При роботі з кислотою і лугом потрібно одягти спецодяг: захисні окуляри і гумові рукавиці. Поряд повинна знаходитись посудина з нейтралізуючою речовиною.

2. Заборонено користуватися реактивами, які не мають етикеток з чітким надписом.

3. Не допускати розливу речовин, які легко загораються. Речовину, що розлилася негайно зібрати.

4. При процесах, які супроводжуються виділенням токсичного типу (при роботі з кислотами та лугами,) необхідно працювати в окремій кімнаті з витяжною шафою.

При роботі із зрідженими газами завжди треба врахувати, що посудини Дьюара із зрідженими газами повинні бути закриті ковпачками, які легко пропускають газ, який випаровується із посудини. Це необхідно, щоб уникнути створення надлишкового тиску в посудині, в наслідок чого може відбутися її руйнування. Необхідно пам'ятати, що попадання зріджених газів на відкриті частини тіла викликають сильні опіки.

Протипожежний та проти вибуховий захист

Запобігання пожежі - це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення пожежі.

Організаційні і технічні заходи щодо запобігання пожежі реалізуються ще на стадії проектування окремих об'єктів. При цьому заздалегідь вивчаються особливості технологічних процесів і об'єктів, можливі причини і джерела виникнення пожежі. Запобігання пожежі великою мірою сприяє правильне планування, розміщення основних об'єктів з урахуванням рельєфу місцевості, дотримання протипожежних розривів між будівлями відповідно до вимог генерального плану.

Попередження пожежі досягається:

- запобіганням утворенню горючого середовища;
- запобіганням виникненню в горючому середовищі або появи в ньому джерел запалювання.

Запобігання утворення горючого середовища повинно досягатися:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важкогорючих речовин і матеріалів;

- обмеженням маси і об'єму горючих речовин, матеріалів та найбільш безпечним способом їх розміщення:

- ізолюванням горючого середовища;
- підтримуванням концентрації горючих газів, пари, суспензій і окислювача в суміші за межею їх спалаху;
- достатньої концентрації флегматизатора в повітрі захищуваного об'єкту;
- підтримуванням його температури і тиску, за якими розповсюдження полум'я неможливе;
- максимальною механізацією і автоматизацією технологічних процесів, пов'язаних з вживанням горючих речовин;
- встановленням пожежонебезпечного обладнання, по можливості, в ізольованих приміщеннях чи на відкритих площадках;
- застосуванням для горючих речовин герметичного обладнання і тари;
- застосуванням пристроїв захисту виробничого обладнання з горючими речовинами від ушкоджень і аварій, встановленням відключаючих, відсікаючих та інших пристроїв;
- застосуванням ізольованих відсіків, камер, кабін.

Попередження утворення в горючому середовищі джерел запалювання повинно досягатися:

- застосуванням машин, механізмів, обладнання, пристроїв, під час експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;
- застосуванням електрообладнання, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
- застосуванням в конструкції швидкодіючих засобів захисного відключення можливих джерел запалювання;
- застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки;
- пристроєм блискавкозахисту будівель, споруд і обладнання. Будівлі та споруди складів паливно-мастильних матеріалів захищають від прямих ударів блискавки, електростатичної та електромагнітної індукції та заносу потенціалів;

- підтримкою температури горючого середовища нижче максимально допустимої, тобто до температури запалення горючої суміші. Наприклад, для підтримання температури горючої суміші нижче за температуру запалення резервуар, що знаходиться поруч з палаючим резервуаром, охолоджують водою;
- підтримкою тиску в горючому середовищі нижчого за максимально припустимий за горючістю;
- зменшенням визначального розміру горючої суміші середовища нижче максимально припустимого за горючістю. Температура самозаймання горючої суміші залежить від форми останньої. Зменшуючи визначальний розмір горючої суміші у фланцевих з'єднаннях трубопроводів, світильниках, електродвигунах, запобігаємо небезпеці виникнення пожежі і навіть вибуху;
- регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації машин, механізмів та іншого обладнання, матеріалів і виробів, що можуть бути джерелом запалювання горючого середовища. При експлуатації машин і механізмів в процесах прийому, зберігання і відпускання паливно-мастильних матеріалів не допускаються співудари окремих вузлів машин, внаслідок яких можуть висікатися іскри.

Запобігання впливу на працівників небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що виникають внаслідок вибуху, та збереження матеріальних цінностей забезпечується:

- | встановленням мінімальних кількостей вибухо-небезпечних речовин, що застосовуються в технологічних процесах на підприємствах в лабораторіях, розливних, роздавальних пунктах, в зливних ємкостях та нафто-уловлювачах;
- використанням вогнеогороджувачів в дихальних клапанах резервуарів для зберігання бензинів та палив, а також гідрозатворів;
- використанням обладнання, розрахованого на тиск вибуху;
- розміщенням ділянок зварювальних робіт під час ремонту обладнання складів ПММ в окремих приміщеннях;
- улаштуванням запобіжних мембран і клапанів, що запобігають руйнуванню обладнання під час вибуху, шляхом аварійного скидання тиску;

- застосуванням швидкодіючих відсікаючих і зворотних клапанів, активних систем придушення вибуху і засобів попереджувальної сигналізації.

Профілактичні заходи. Організаційні та організаційно-технічні заходи щодо забезпечення вибухобезпеки повинні бути направлені на такі цілі:

- організацію навчання, інструктажу і допуску інженерно-технічного персоналу до робіт у вибухонебезпечних приміщеннях;

- розробку інструкцій, технології прийому, зберігання і відпускання рюливно-мастильних матеріалів;

- контроль за дотриманням встановлених режимів технологічних процесів, правил і норм техніки безпеки, виробничої санітарії та пожежної безпеки;

- організацію гасіння пожеж і аварійно-рятувальних робіт.

Для гасіння пожеж використовувати такі вогнегасні речовини: хімічна і повітряно-механічна піна, водні розчини солей, інертні та негорючі гази, водяна пара. При ліквідації невеликих вогнищ використовують сухий пісок, азбестові килимки та інший протипожежний інвентар.

Гасіння електроустановок, які знаходяться під напругою, проводиться з допомогою сухих вогнегасних порошків .