

Міністерство освіти та науки України  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
Навчально – науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Кафедра електроніки та енергетики

**Електричні властивост гетеропереходу  
p-CdTe/n-InSe**

Дипломна робота  
Освітні рівень «Бакалавр»

**Виконав:**

Студент 4 курсу , групи 433ск

Спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

Таранчук Іван Володимирович

Керівник: Грушка О.Г.

Рецензент: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**До захисту допущено :**

**Протокол засідання кафедри №\_\_**

від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

заф. кафедри \_\_\_\_\_ Майструк Е.В.

**Чернівці - 2024**

## Анотація

Досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетеропереходу p-CdTe/n-InSe, створеного методом посадки на оптичний контакт. Показано, що цей гетероперехід є бар'єрною структурою з контактною різницею потенціалів  $U_K$  від 1.45 до 1.01 В у температурному інтервалі від 251 до 330К.

При додатних напругах  $U < U_K$  струм залежить від напруги за експоненціальним законом  $I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right)$ , де коефіцієнт не ідеальності  $n = (3.3 - 3.8)$ , а струм насичення  $I_0$  залежить від температури згідно виразу  $I_0 \sim \exp(-\Delta E/kT)$ , де енергія активації  $\Delta E = (0.32 \pm 0.01)$  еВ.

При від'ємних напругах ВАХ підкоряються степеневій залежності  $I \sim U^m$  з показником степені  $m = 1.2 - 1.4$ , що характерно для випадку наявності в гетеропереході струмів витоку.

**Ключові слова:** вольт-амперна характеристика, метод посадки на оптичний контакт, струм насичення, енергія активації

## Abstract

The current-voltage (I-V) characteristics of the p-CdTe/n-InSe heterojunction, created by the method of landing on an optical contact, were studied. It is shown that this heterojunction is a barrier structure with a contact potential difference  $U_K$  from 1.45 to 1.01 V in the temperature range from 251 to 330K.

At positive voltages  $U < U_K$ , the current depends on the voltage according to the exponential law  $I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right)$ , where the coefficient of non-ideality  $n = (3.3 - 3.8)$ , and the saturation current  $I_0$  depends on the temperature according to the expression  $I_0 \sim \exp(-\Delta E/kT)$ , where the activation energy  $\Delta E = (0.32 \pm 0.01)$  eV.

At negative voltages, the I-V characteristics obey the power dependence  $I \sim U^m$  with the power index  $m = 1.2 - 1.4$ , which is typical for the case of the presence of leakage currents in the heterojunction.

**Key words:** current-current characteristic, heterojunction, method of deposition over optical contact, saturation current, activation energy

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

\_\_\_\_\_ І. Таранчук

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Фізичні властивості CdTe і InSe.....	5
1.1. Властивості кристалів CdTe.....	5
1.2. Властивості кристалів InSe.....	7
2. Фізичні процеси в бар'єрних структурах.....	9
2.1. Контактні явища в р-п-переході.....	9
2.2. Специфічні властивості гетеропереходу.....	12
3. Характеристики і параметри гетеропереходу р-CdTe/n-InSe.....	15
3.1. Методика створення гетеропереходу .....	15
3.2. Вольт-амперні характеристики.....	16
3.2.1. Прямі зміщення.....	17
3.2.2. Зворотнє зміщення.....	20
Висновки.....	21
Список літератури.....	22
Додатки.....	23

## Вступ

Щоб задовольнити потреби електроніки ведеться пошук матеріалів для створення приладів на основі гетеропереходів, які працюють в різних спектральних діапазонах. При цьому дослідники стикаються з технологічними труднощами, пов'язаними з виготовленням переходу без дефектів на межі контактуючих матеріалів. Тому, щоб задовольнити потреби науки і техніки постійно розширюється коло матеріалів, які використовуються для створення гетеропереходів. Так, хороші перспективи відкривають у цьому напрямку сполуки  $A^{II}B^{VI}$ , які володіють низкою вигідних властивостей, таких як висока фотопровідність, велика ймовірність випромінювальної рекомбінації при наявності прямих оптичних переходів, високий квантовий вихід люмінесценції та інші. Сполуки  $A^{II}B^{VI}$ , зокрема CdTe, вивчені порівняно добре і вже знайшли використання в багатьох фотоелектронних приладах.

Отже, проблема створення гетероструктур з потрібними властивостями, а також розробка високоефективних і дешевих технологій виготовлення цих структур є досить актуальною задачею.

Дана робота присвячена вивченню гетеропереходів CdTe/InSe. Вибір цієї пари матеріалів обумовлений їх значною фоточутливістю і досить добре розробленою технологією одержання якісних кристалів. На відміну від CdTe кристалам InSe характерна анізотропія механічних і фізичних властивостей, які обумовлені різним характером хімічних зв'язків атомів у кристалі.

Створення гетеропереходів CdTe/InSe методом посадки на оптичний контакт суттєво спростило задачу завдяки тому, що InSe являє собою шаруватий напівпровідник, який легко розділяється на досить тонкі шари з ідеальною природною гладкою поверхнею, яка дозволяє створювати міцний контакт InSe з іншими матеріалами навіть тоді, коли парою служить матеріал іншої структури такий як телурид кадмію.

# 1. Фізичні властивості CdTe і InSe

## 1.1. Властивості кристалів CdTe

Телурид кадмію кристалізується в структурі з тетраедричним розташуванням атомів. Кожний атом одного елементу Cd(Te), оточений чотирма атомами іншого елементу Te(Cd), розташованих на вершинах правильного тетраедру. Із цих тетраедрів можливо утворення двох типів структур: сфалериту (кубічної), характерної як для об'ємних кристалів, так і для тонких плівок; та вюрциту (гексагональної), характерної лише для тонких плівок (рис. 1.1). Решітка структури сфалериту представляє собою дві гранецентровані кубічні решітки, які зсунуті на  $\frac{1}{4}$  довжини по напрямку просторової діагоналі куба. Одна підрешітка побудована із атомів катіонів кадмію, друга підрешітка – із атомів катіонів телуру.

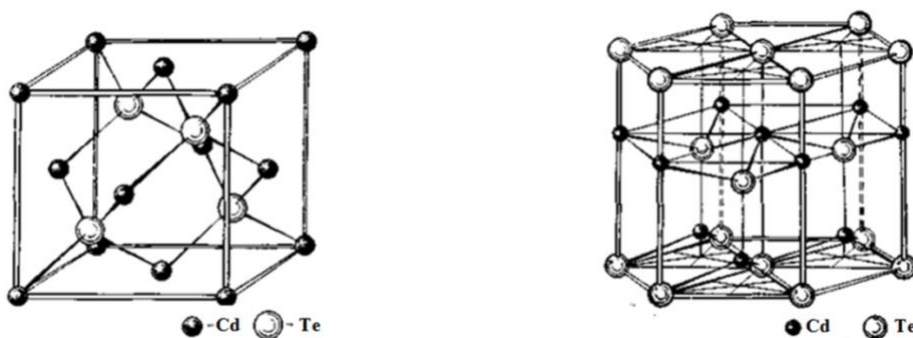


Рис. 1.1. Кристалічні структури CdTe сфалериту (зліва) і вюрциту (справа)

Телурид кадмію із структурою сфалериту є прямозонним напівпровідником, екстремуми енергетичних зон якого розташовані в центрі зони Бріллюена.

Телурид кадмію має високу температуру плавлення  $1041^{\circ}\text{C}$  з початком випаровування при  $1050^{\circ}\text{C}$ ; більш стабільний, ніж його вихідні сполуки кадмій і телур та більшість інших сполук Cd завдяки своїй високій температурі плавлення і нерозчинності.

Телурид кадмію – широкозонний напівпровідник, в забороненій зоні якого міститься велика кількість глибоких домішкових рівнів, які володіють високою

чутливістю до впливу зовнішніх факторів і визначають його основні фізичні властивості.

Кристали CdTe, які одержані при невисоких тисках парів кадмію ( $P_{Cd} < 1.0$  атм.), володіють провідністю р типу з концентрацією дірок  $p = 10^{13} - 10^{16}$  см<sup>-3</sup> при 300К. При тиску парів кадмію більше 1.4 атм. одержується матеріал n-типу провідності з концентрацією електронів  $n = 10^{14} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup> при 300К. Холівська рухливість дірок  $\mu_p$  кристалів CdTe, одержаних методом Бріджмена, при кімнатних температурах дорівнює 60–80 см<sup>2</sup>/(В·с). А рухливість дірок – до 1000 см<sup>2</sup>/(В·с). Забруднення матеріалу домішками призводить до появи глибоких акцепторних рівнів  $E_v = (0.12 - 0.17)$  еВ;  $E_v = 0.24$  еВ;  $E_v = (0.3 - 0.4)$  еВ.

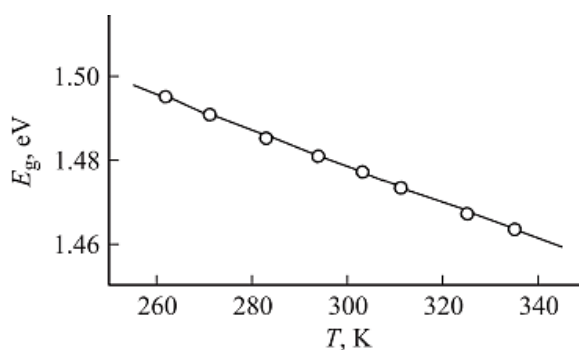


Рис. 1.2. Температурна залежність ширини забороненої зони CdTe

На рис. 1.2 показана температурна залежність ширини забороненої зони, яку можна представити формулою  $E_g = 1.608 - 4,52 \cdot 10^{-4} \cdot T$  еВ [1], з якої видно, що для телуриду кадмію ширина забороненої зони при  $T = 0$ К і температурний коефіцієнт рівні 1.608 еВ і  $4,52 \cdot 10^{-4}$  еВ/К відповідно.

В роботі [2] досліджено спектральні характеристики фотодіодів на основі монокристалічних підкладок телуриду кадмію. Монокристалічні пластини n-CdTe оброблялися у водній суспензії лужних металів, в результаті чого отримувалася модифікована поверхня з утворенням поверхневого бар'єру. Отримані поверхнево-бар'єрні структури можуть бути використані в якості ефективних детекторів різного випромінювання, в тому числі і сонячного.

Стехіометричний InSe є напівпровідником n-типу, при легуванні будь-якими атомами, провідність може змінитися на р-тип.

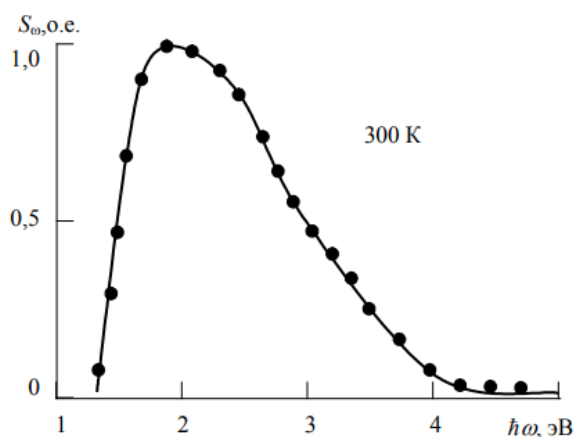


Рис. 1.3. Спектр fotocутливості поверхнево-бар'єрного діоду на основі CdTe

Як показано на рис. 1.3, спектр fotocутливості  $S_{\omega}$  лежить в діапазоні енергій від 1.5 до 5.0 eV при кімнатній температурі. Нижня границя обумовлена різким зменшенням поглинання при енергії фотонів менше ширини забороненої зони CdTe, що характерно для прямозонних напівпровідників. Зменшення чутливості в області більших енергій обумовлено поверхневою рекомбінацією, роль якої зростає при збільшенні енергії фотонів.

## 1.2. Властивості кристалів InSe

Селенід індію InSe належить до класу напівпровідників  $A^{III}B^{VI}$  з шаруватою кристалічною структурою, які мають сильну анізотропію хімічних зв'язків між шарами та всередині них, оскільки шари зв'язані між собою слабкими силами Ван-дер-Ваальса, тоді як усередині шарів домінують міцні ковалентні зв'язки. В залежності від послідовності розташування шарів існують гексагональні  $\beta$ -,  $\epsilon$ - і тригональні  $\gamma$ -політипи (модифікації).

Відсутність обірваних зв'язків на площинах сколу робить ці кристали придатними для утворення гетеропереходів. Монокристал InSe має ширину забороненої зони 1.3 eV, що робить його перспективним для застосування в сонячних елементах [3-5].



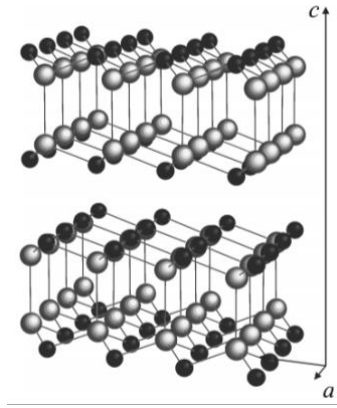


Рис. 1.4. Кристалічна структура  $\beta$ -InSe.

Світлі кружечки – атоми індію, темні – атоми селену

Селенід індію n-типу володіє наступними електричними параметрами при 77 і 300К: холлівська рухливість  $1.9 \cdot 10^5$  і  $1.8 \cdot 10^5$  Кл<sup>-1</sup>см<sup>-3</sup>; концентрація електронів  $3.3 \cdot 10^{13}$  і  $3.4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>; рухливість 180 і 870 см<sup>2</sup>/(В·с); електропровідність  $6.0 \cdot 10^{-4}$  і  $3.0 \cdot 10^{-3}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> відповідно [6].

Автори роботи [7] роблять висновок, що отримані різні значення електрофізичних параметрів на різних зразках і ходу їх температурних залежностей в монокристалах селеніду індію (n-InSe) обумовлені наявністю крупномасштабних дефектів в досліджуваних зразках.

## 2. Фізичні процеси в бар'єрних структурах

### 2.1. Контактні явища в р-п-переході

Електронно-дірковим переходом (р-п-переходом) називається шар напівпровідника, який розташований по обидва боки від межі розділу р- і п-областей, збіднений основними носіями заряду і являє собою область об'ємного заряду. Оскільки на межі поділу областей існує градієнт концентрації вільних носіїв заряду, буде відбуватися процес дифузії електронів в р-область і дірок – в п-область. Це призводить до збіднення основними носіями заряду прилеглих шарів до переходу і до виникнення об'ємних зарядів протилежного знаку.

При відсутності зовнішньої напруги р-п-перехід знаходиться в рівновазі. Дифузійні струми основних носіїв заряду балансуються дрейфовими струмами неосновних носіїв заряду, так що загальний струм через р-п-перехід дорівнює нулю. На рис. 2.1 приведена зонна схема для рівноважного стану р-п-переходу. Рівень Фермі  $E_f$  є загальним для всіх областей напівпровідника. При переході із п- в р-область потенціал зменшується на величину контактної різниці потенціалів, тобто  $U_k = \varphi_p + \varphi_n$  (рис. 2.1).

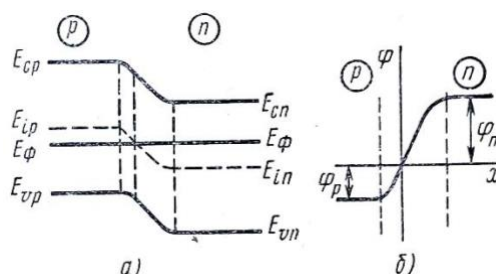


Рис. 3.1. Зонна схема рівноважного стану р-п-переходу (а)

і зміна потенціалу в р-п-переході (б)

Рівноважні концентрації неосновних носіїв заряду ( $n_p, p_n$ ) можна виразити через рівноважні концентрації основних носіїв заряду ( $n_n, p_p$ ) в протилежних областях, а також через контактну різницю потенціалів  $U_k$ .

$$n_p = n_n \exp(-eU_k/kT);$$

$$p_n = p_p \exp(-eU_k/kT);$$

(2.1)

При прикладанні зовнішньої напруги порушується рівновага і рівні Фермі замінюються на квазірівні. На рис. 2.2 приведені зонні діаграми р-n-переходу в рівновазі (а), при прямому (б) і зворотному (в) включенні.

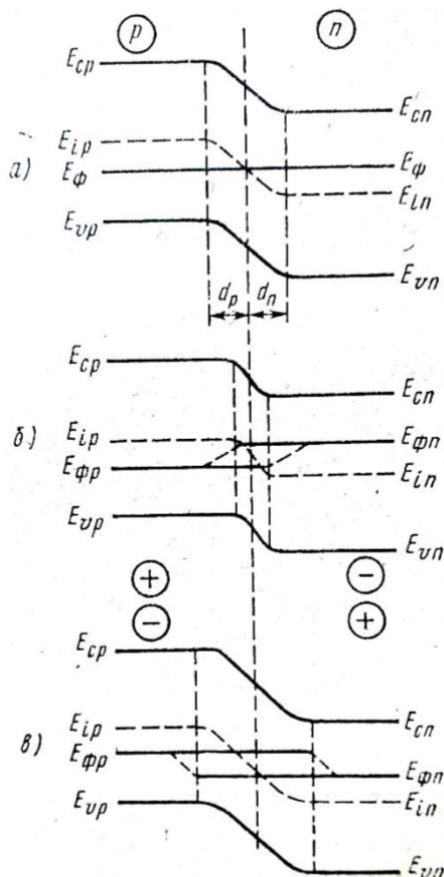


Рис. 2.2. Зонна діаграма для рівноважного стану (а), при прямому (б) і зворотному (в) включенні р-n-переходу

При прикладанні зовнішнього поля в прямому напрямку вигин зон на р-n-переході зменшується і дорівнює  $e(U_k - U) = e(\varphi_n + \varphi_p)$ , де  $\varphi_n$  і  $\varphi_p$  – зміна потенціалу в n- і р-областях. Квазірівні Фермі для основних носіїв заряду в n-області ( $E_{\varphi_n}$ ) і основних носіїв заряду в р-області ( $E_{\varphi_p}$ ) зсуваються відносно один одного на  $eU$ , тобто

$$E_{\varphi_n} - E_{\varphi_p} = eU. \quad (2.2)$$

Пунктирами умовно нанесені квазірівні Фермі для неосновних носіїв заряду в кожній із областей. Подалі від р-n-переходу вони співпадають з квазірівнями для основних носіїв заряду, тобто рівнями Фермі для кожної із областей. При прикладанні зовнішнього поля у зворотному напрямку (рис. 2.2

б) вигин зон на р-п-переході збільшується і стає рівним  $e(U_k + U_{зв})$ , де  $U_{зв}$  – частина зовнішньої напруги, яка спадає на р-п-переході. Цей вигин зон дорівнює  $e(U_k + U) = e(\varphi_n + \varphi_p)$ . Квазірівні Фермі зсуваються так, що залишається справедливим вираз (2.2), тільки обидві частини цієї рівності від’ємні.

При зворотних і не дуже великих прямих напругах на р-п-переході струми через нього відповідно також невеликі. Тому спад потенціалу на об’ємному опорі напівпровідника малий, і можна вважати, що зовнішня напруга на р-п-переході  $U$  практично дорівнює прикладеній до діоду різниці потенціалів. Також можна вважати незмінними основні електрофізичні параметри напівпровідника, а саме, коефіцієнт дифузії носіїв, час їх життя, концентрацію основних носіїв заряду і інші.

При наявності тільки дифузії неосновних носіїв заряду рівняння вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду в області малих струмів має вигляд:

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (2.3)$$

де  $I_0$  – струм насичення.

Вираз (2.3) показує, що при достатньо великих зворотних напругах ( $U < 0$ ) струм прямує до значення  $I_{зв} = -I_0$ , тобто до струму насичення.

При достатньо великих прямих напругах одиницею у формулі (2.3) можна знехтувати і одержується, що струм росте експоненціально.

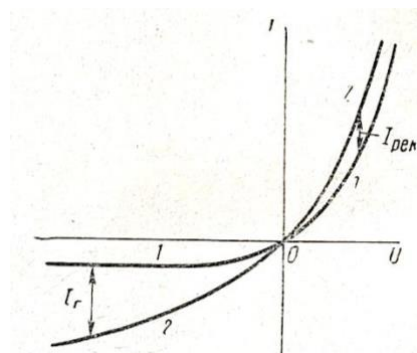


Рис. 2.3. Вольт-амперні характеристики напівпровідникового діоду:

1 – без врахування генерації і рекомбінації в області об’ємного заряду;

2 – з врахуванням генерації і рекомбінації

Крім дифузійних процесів в області об'ємного заряду відбуваються процеси генерації і рекомбінації носіїв. При прямих напругах носії заряду входять в область об'ємного заряду р-п-переходу і там відбувається їх рекомбінація, яка більш суттєва для діодів, виготовлених із напівпровідників з великою шириною забороненої зони, де прямий струм майже повністю визначається рекомбінацією носіїв в області об'ємного заряду. Рекомбінаційна складова струму залежить від напруги як  $\exp(eU/2kT)$ .

Як показано на рис. 2.3, врахування дифузійних і генераційно-рекомбінаційних струмів свідчить про те, що наявність генерації і рекомбінації збільшує струми напівпровідникового діоду. Внаслідок цього зворотний струм виявляється ненасиченим.

## 2.2. Специфічні властивості гетеропереходу

Гетеропереходом називається електричний перехід при контакті різних напівпровідників, які відрізняються по ширині забороненої зони. При утворенні таких контактів відбувається перерозподіл носіїв заряду, що призводить до появи контактної різниці потенціалів і до вирівнювання рівнів Фермі. Із-за різниці ширини забороненої зони поблизу контактів можуть утворюватись розриви.

Гетеропереходи можуть бути типу n-n, p-p, p-n. Всі вони можуть випрямляти струм. Гетеропереходи типу n-n і p-p називаються ізотипними (однакового типу). В цих структурах струм переноситься основними носіями заряду. На рис. 2.4, а приведена зонна діаграма для n-p гетеропереходу. Зліва знаходиться напівпровідник з широкою забороненою зоною, яка має збіднений основними носіями заряду шар, де зони викривленні вгору, справа – напівпровідник з більш вузькою забороненою зоною, яка має збагачений основними носіями заряду (електронами) шар біля контакту, де зони викривлені вниз.

Властивості гетеропереходів в основному визначаються станами на межі поділу, при цьому густина пасток, їх енергетичний спектр залежать від різниці

сталих кристалічних решіток контактуючих матеріалів, дефектів їх структури і технології виготовлення гетеропереходів.

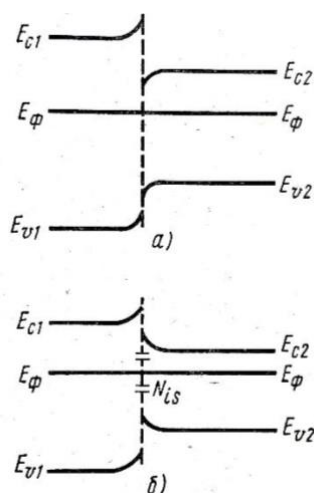


Рис. 2.4. Зонна діаграма n-n-гетеропереходу (а) і два зустрічно включених запірних шарів (б)

При наявності великої кількості дефектів на межі поділу вольт-амперна характеристика ізотипних гетеропереходів може являти собою накладання двох зворотних гілок ВАХ. Цим зумовлено виникнення двох зустрічно включених запірних шарів (рис. 2.4, б). Внаслідок захоплення електронів на локальні стани  $N_{iS}$  на межі поділу з'являється від'ємний заряд, який викривляє зони в обох напівпровідниках вверх, що відповідає виникненню двох запірних шарів.

На рис. 2.5 а, б приведені ВАХ ізотипних гетеропереходів, які відповідають рис. 2.4 а, б.



Рис. 2.5. Вольт-амперна характеристика ізотипних гетеропереходів у відповідності з рис. 2.4 а, б

Гетеропереходи типу р-n можуть мати різні зонні діаграми і ВАХ. На рис. 2.6 зображені зонні діаграми для неізотипних гетеропереходів, де викривлення зон відповідає збідненню основними носіями заряду для обох напівпровідників.

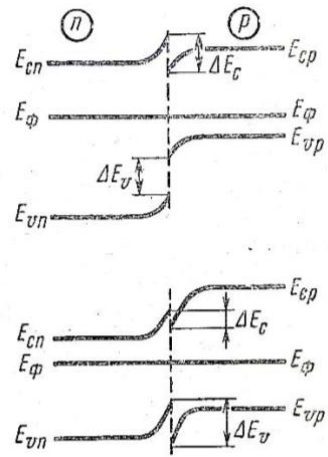


Рис. 2.6. Зонні діаграми р-п гетеропереходів

Як видно з рис. 2.6, можливі розриви в зоні провідності ( $\Delta E_c$ ) і валентній зоні ( $\Delta E_v$ ).

Найбільш цікава властивість гетеропереходу, до якого прикладена деяка напруга  $U > 0$ , полягає в тому, що крім розривів, тут для електронів і для дірок виникають потенціальні бар'єри різної висоти. Тому досліджувати його властивості значно важче ніж характеристики переходу, виконаного із одного і того ж матеріалу.

### 3. Характеристики і параметри гетеропереходу p-CdTe/n-InSe

#### 3.1. Методика створення гетеропереходу

Гетероперехід p-CdTe/n-InSe був створений методом, який називається “посадка на оптичний контакт”. Цей метод полягає в наступному: поверхні двох матеріалів з високим класом частоти притискають таким чином, щоб створився контакт за рахунок адгезії – щеплення двох поверхонь. Механічна міцність контакту двох поверхонь, зближених на відстань порядку дії міжатомних сил, наближається до об’ємної міцності матеріалів. Оптичний контакт вважається досконалим, якщо нерівності поверхонь не перевищують  $\frac{1}{4}$  довжини хвилі світла, тобто десяті долі мікрметра. За допомогою описаного метода, використовуючи напівпровідники типу A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>, одержують якісні діоди [8, 9].

Сполука InSe як компонент гетеропереходу має шарувату структуру, яка складається з пакетів, в яких атоми зв’язані ковалентними, або іонно-ковалентними зв’язками, а між пакетами діють слабкі сили Ван-дер-Ваальса. Завдяки цьому тонкі кристалічні шари товщиною 10-20 мкм легко відщеплюються від монокристалів InSe. Крім того, низька концентрація поверхневих станів, яка не перевищує  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> та інертність природної поверхні сколу до адсорбції атомів з атмосфери дозволяє з успіхом використовувати ці матеріали для виготовлення оптичних контактів. Пластичність шаруватого напівпровідника InSe дозволяє виготовляти методом посадки на оптичний контакт гетеропереходи в парі з матеріалом, який має менш досконалу поверхню і нешарувату структуру.

Як підкладки для гетеропереходів застосовувались пластинки CdTe, вирізані із об’ємного монокристалу, вирощеного за методом Бріджмена. Для усунення зруйнованого поверхневого шару пластинки механічно шліфувались і полірувались, а також оброблялись в поліруючому травнику. На підготовлену поверхню CdTe накладалася свіжевідщеплена плівочка InSe, яка завдяки адгезії міцно приліплювалась до підкладки, утворюючи гетероперехід. Струмові контакти підпаювались індієм.



### 3.2. Вольт-амперні характеристики

Досліджено залежності струму від напруги – вольт-амперні характеристики (ВАХ) при прямому зміщенні (при додатних напругах  $+U$ ) і зворотному зміщенні (від’ємних напругах  $-U$ ) гетеропереходу p-CdTe/n-InSe в інтервалі температур 251–330К. Одержані результати приведені на рис. 3.1.

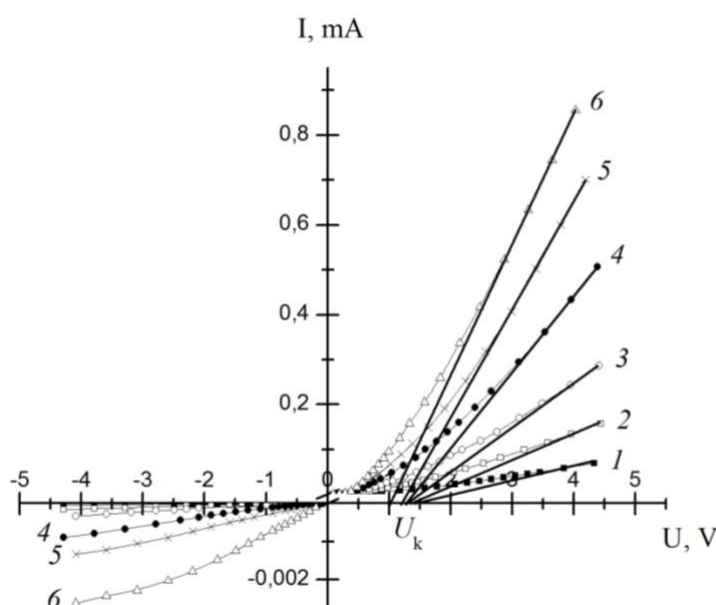


Рис. 3.1. Вольт-амперні характеристики гетеропереходу p-CdTe/n-InSe при температурах  $T$ , К: 251 (1), 264 (2), 277 (3), 293 (4), 308 (5), 330 (6)

Як видно з рис. 3.1, ВАХ мають випрямляючий характер і подібні до ВАХ бар’єрних структур з р-п-переходом. При цьому коефіцієнт випрямлення  $K$ , який визначався як відношення прямого  $I_{пр}$  і зворотного  $I_{зв}$  струмів ( $K = I_{пр}/I_{зв}$ ) при  $U = \pm 1V$ , змінюється від 726 до 119 при збільшенні температури від 251 до 330К.

При напругах, більших контактної різниці потенціалів  $U > U_k$ , ВАХ мають лінійні залежності, обумовлені спадом напруги на послідовному опорі структури. Їх нахил залежить від температури. Із-за зменшення опору із збільшенням температури нахил залежності  $I = f(U)$  зростає. За цими даними визначено опір  $R$  базової області гетеропереходу в залежності від температури (таблиця).

Екстраполюючи прямолінійні ділянки залежностей  $I = f(U)$  при прямих зміщеннях до перетину з віссю напруг при  $I = 0$ , визначили контактну різницю потенціалів  $U_k$ , яка змінюється від 1.45 до 1.01 В із збільшенням температури від 251 до 330К.

### 3.2.1. Прямі зміщення

Щоб проаналізувати ВАХ при прямих зміщеннях, побудували залежності  $lgI = f(U)$ , як показано на рис. 3.2. Як видно з рисунку, при напругах, менших контактної різниці потенціалів  $U_k$ , залежності  $lgI = f(U)$  представляють собою прямолінійні ділянки, що дозволяє в даній області напруг ВАХ описати експоненціальною функцією типу

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right), \quad (3.1)$$

де  $I_0$  – струм насичення,  $n$  – коефіцієнт неідеальності.

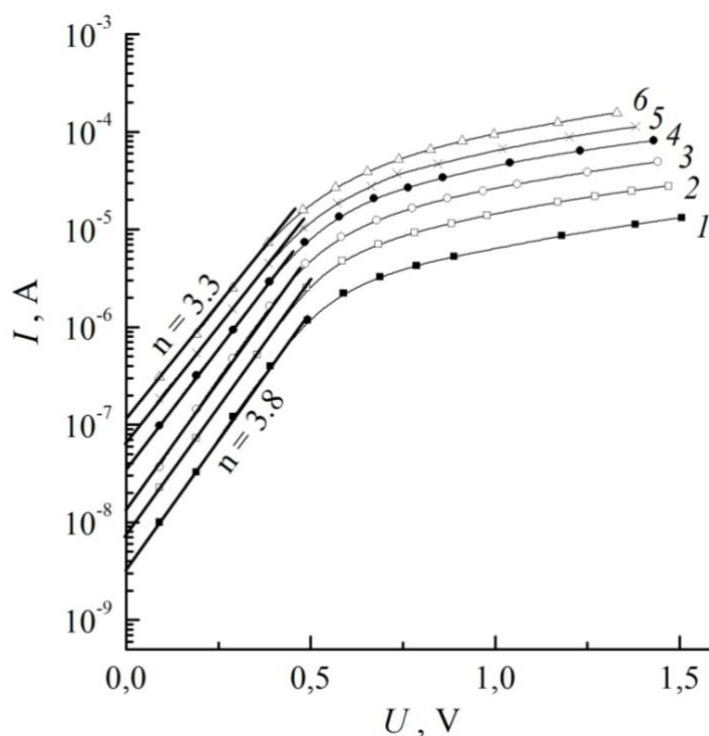


Рис. 3.2. ВАХ гетеропереходу p-CdTe/n-InSe в напівлогарифмічному масштабі при температурах  $T$ , К: 251 (1), 264 (2), 277 (3), 293 (4), 308 (5), 330 (6)

За нахилом лінійних ділянок на рис. 3.2 залежностей визначено коефіцієнт неідеальності  $n$  при різних температурах за допомогою співвідношення

$$n = \frac{e}{kT} \frac{\Delta U}{2.3 \cdot \Delta \lg I} \quad (3.2)$$

Значення  $n$ , які приведені в таблиці повільно зростають від 3.3 до 3.8 із зменшенням температури від 330 до 251К.

Відомо, що при  $n = 2$  домінуючим механізмом перенесення носіїв заряду є рекомбінаційна складова струму. В нашому випадку слабо залежний від температури показник  $n$  помітно вищий, що можливо при наявності додаткового механізму струмопроходження, який може бути при нетермоелектронному механізмі протікання струму у структурі.

Таблиця

Діодні параметри гетеропереходу p-CdTe/n-InSe

T, К	K	$U_K$ , В	R, кОм	$I_0$ , А	n	m
251	726	1,45	80,7	$3,3 \cdot 10^{-9}$	3,8	1,4
264	713	1,41	35,7	$7,4 \cdot 10^{-9}$	3,6	1,4
277	610	1,31	19,1	$1,4 \cdot 10^{-8}$	3,5	1,4
293	357	1,26	10,7	$3,5 \cdot 10^{-8}$	3,4	1,4
308	224	1,16	7,2	$6,5 \cdot 10^{-8}$	3,4	1,2
330	119	1,01	5,3	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3,3	1,2

Струм насичення  $I_0$  визначали при екстраполяції прямолінійних ділянок залежностей  $\lg I_0 = f(U)$  до перетину з віссю струмів при  $U = 0$ . Одержані дані  $I_0$  приведені в таблиці.

Як видно з таблиці, величина  $I_0$  залежить від температури. Щоб виявити характер цієї залежності, побудували графік  $\lg I_0 = f(10^3/T)$ . Отримали прямолінійну залежність (рис.3.3), що є підставою вважати, що струм насичення залежить від температури за експоненціальним законом

$$I_0 \sim \exp(-\Delta E/kT), \quad (3.3)$$

де  $\Delta E$  – енергія активації.

Скориставшись нахилом залежності (3.3) розрахували енергію активацію за формулою

$$\Delta E = 0.2tg\alpha = 0.2 \frac{\Delta \lg I_0}{\Delta(10^3/T)}. \quad (3.4)$$

Одержана енергія активація  $\Delta E = (0.32 \pm 0.01)$  еВ.

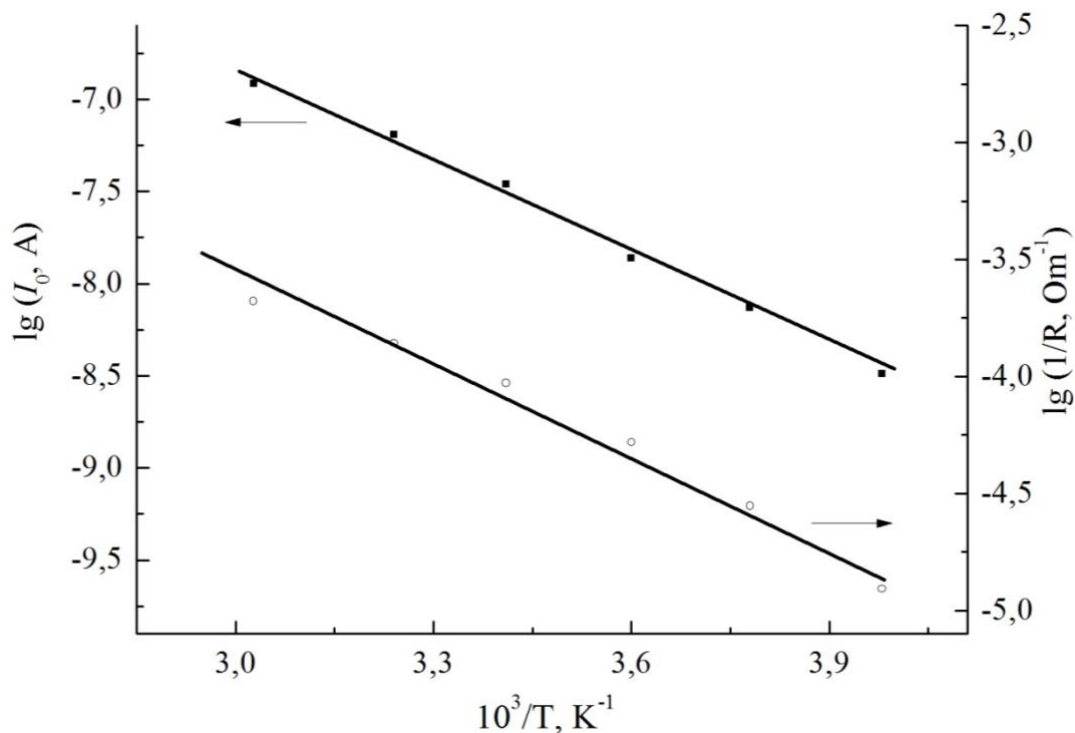


Рис.3.3. Температурні залежності  $\lg I_0$  і  $\lg(1/R)$  в гетеропереході p-CdTe/n-InSe

Щоб перевірити можливий зв'язок одержаної енергії активації з властивостями базового матеріалу гетеропереходу, побудували залежність  $\lg(1/R) = f(10^3/T)$  (рис. 3.3). Так як електропровідність  $\sigma$  пропорційна  $1/R$ , то енергія активації, яку визначили за нахилом  $\lg(1/R) = f(10^3/T)$  відповідає енергії активації електропровідності. Енергії активації для  $I_0$  і  $\sigma$  співпадають і дорівнюють  $(0.32 \pm 0.01)$  еВ. Отже, активаційний характер струму насичення зумовлений домішковими акцепторними рівнями з глибиною залягання  $(0.32 \pm 0.01)$  еВ в забороненій зоні CdTe.

### 3.2.2. Зворотнє зміщення

Зазвичай ВАХ бар'єрних структур при зворотному зміщенні підкоряються степеневій залежності типу  $I \sim U^m$ , де показник степені  $m$  залежить від фізичних процесів, які відбуваються в структурі. Щоб визначити значення  $m$  для гетеропереходу p-CdTe/n-InSe, побудували залежності  $\lg I = f(\lg U)$ , які приведені на рис. 3.4.

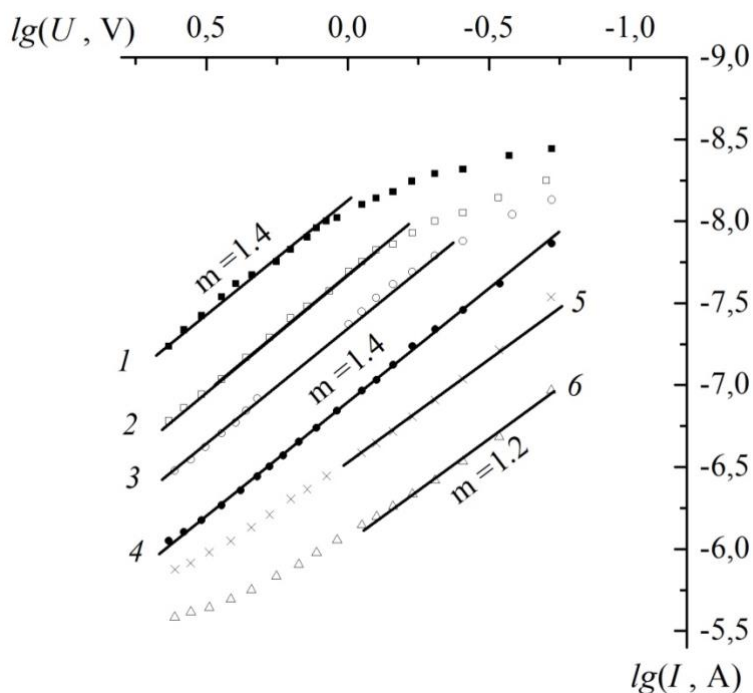


Рис. 3.4. Вольт-амперні характеристики гетеропереходу p-CdTe/n-InSe в логарифмічних координатах при  $-U$  при температурах  $T$ , К:  
251 (1), 264 (2), 277 (3), 293 (4), 308 (5), 330 (6)

На одержаних залежностях (рис. 3.4) можна виділити прямолінійні ділянки приблизно однакового нахилу з показником  $m = \Delta \lg I / \Delta \lg U$ , рівним 1.2 – 1.4, що є близьким до значення  $m = 1.0$ , характерного при наявності струмів витоку із-за наявності шунтуючого опору бар'єрної структури.

## Висновки

1. Гетероперехід p-CdTe/n-InSe являє собою бар'єрну структуру з контактною різницею потенціалів від 1.01 до 1.45 В в температурному інтервалі (330 – 251)К відповідно.
2. При прямих зміщеннях  $U < U_k$  вольт-амперні характеристики описуються експоненціальною залежністю  $I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right)$  з коефіцієнтом неідеальності  $n = 3.3 - 3.8$  і з струмом насичення  $I_0$ , залежним від температури з енергією активації  $\Delta E = (0.32 \pm 0.01)$  еВ.
3. При зворотних зміщеннях ВАХ описуються степеневою залежністю типу  $I \sim U^m$ , де показник степені  $m = 1.2 - 1.4$ , що зумовлено впливом струмів витоку на ВАХ.

## Список літератури

1. Косяченко Л.А., Склярчук В.М., Склярчук О.В., Маслянчук О.Л. Ширина запрещенной зоны  $2\bar{2}$  кристаллов CdTe и  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  // ФТП. – 2011. – Т. 45, вып. 10. – С.1323-1330.
2. Александрюк Т.Ю., Бойко Ю.Н., Махній В.П., Скрипник Н.В. Фотоэлектрические свойства диодов на основе монокристаллического теллурида кадмия с модифицированной поверхностью // Оптичні та оптико-електронні сенсори і перетворювачі в системах керування та екологічного моніторингу. – 2008. – С. 182–185.
3. Kobbi B., Kesri N. Physico-chemical and electrical properties of InSe films // Vacuum. – 2004. – V. 75. – P. 177–182.
4. Ertap H., Bacioglu A., Karabulut M. Photoluminescence properties of boron doped InSe single crystals // Journal of Luminescence. – 2015. – V. 167. – P. 227–232.
5. Segura A., Chevy A., Guedson J.P., Besson J.M. Photovoltaic efficiency of InSe solar cells // Solar Energy Materials. – 1979. – V.2. – P. 159–165.
6. Abdinov A.Sh., Babayeva R.F. Features of the Electron Mobility in the n-InSe Layered Semiconductor // Semiconductors, 2018, Vol.52, #13, pp. 1563–1569.
7. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М., Рагимова Н.А., Амирова С.И. К вопросу об электрофизических свойствах монокристаллов n-InSe // ФТП. – 2016, том 50, вып. 1 – С. 35-38.
8. Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, изготовленных посадкой на оптический контакт // ФТП. -1980. –Т.14, вып. 6. –С. 1115-1119.
9. D.V. Ananina, V.L. Vakumenko, A.K. Vodnikov, G.G. Grushka, About characteristics of n-SnS<sub>2</sub>/n-Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> heterojunction, prepared by a method of deposition over optical contact // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **14** (12), pp. 2419–2422 (1980)
10. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш.шк., 448 с.

11. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. М.: Высш.шк., 398 с.

## **Додатки**

### **Охорона праці загальні положення**

1.1. Інструкція розроблена на основі Закону України «Про охорону праці», «Правил безпечної роботи з інструментом та пристроями», вимог інших нормативних актів з охорони праці, посадової інструкції.

1.2. Інструкція діє на протязі 5 років з дня затвердження.

1.3. До виконання обов'язків провідного інженера енергетика (енергетика) допускається особа яка пройшла відповідне навчання та перевірку знань з питань охорони праці та пожежної безпеки, первинні інструктажі на робочому місці з охорони праці та пожежної безпеки.

1.4. При прийомі на роботу і не рідше одного разу на 3 роки енергетика повинен пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці і тих нормативних актів з охорони праці з якими пов'язані його посадові обов'язки.

1.5. У процесі виробничої діяльності можливий вплив шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- незадовільні метеорологічні умови;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена вірогідність травмування рухомими деталями інструмента і матеріалами;

1.6. Характерні причини нещасних випадків:

- падіння з висоти;
- травмування при підніманні і переміщенні вантажів;- опіки;
- враження електричним струмом.

1.7. Знаходячись на будівельному майданчику енергетика повинен використовувати індивідуальні засоби захисту, носити захисну каску.

1.8. Енергетик зобов'язаний:

1.8.1. Виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку, знати і виконувати вимоги цієї інструкції.

1.8.2. Виконувати тільки ту роботу, яка доручена керівником університету і по якій проінструктований.

1.8.3. Користуватися спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.



- 1.8.4. Не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці.
- 1.8.5. Пам'ятати про особисту відповідальність за виконання правил охорони праці та безпеку товаришів по роботі.
- 1.8.6. Вміти надавати медичну допомогу потерпілим при нещасних випадках.
- 1.8.4. Вміти користуватись первинними засобами пожежогасіння.
- 1.9. Знаходячись на території університету, складу, будівельної дільниці, автомобільних доріг забороняється:
  - 1.9.1. Перебігати шлях попереду рухомого транспорту.
  - 1.9.2. Проходити в місцях не призначених для проходу.
  - 1.9.3. Знаходитись під піднятим вантажем.
  - 1.9.4. Палити у не відведених для цього місцях.
- 1.10. Усі захисні засоби повинні мати клеймо з позначкою дати наступного іспиту та напруги, при якій потрібно користуватися цим засобом.
- 1.11. Гумові захисні засоби перед їх застосуванням повинні бути оглянуті та очищені від бруду, а при зволожені поверхні їх треба ретельно витерти і висушити. Забороняється застосовувати засоби, які мають проколи і тріщини.
- 1.12. Енергетику забороняється користуватись захисними засобами, які не пройшли встановлених випробувань, а також такими, у яких минув строк чергового випробування.
- 1.13. Періодичні (контрольні) випробування захисних засобів повинні проводитися в такі терміни:
  - раз на два роки – ізолюючі кліщі для установок з постійним черговим персоналом;
  - раз на шість місяців – діелектричні рукавиці;
  - раз на рік – діелектричні галоші;
  - раз на три роки – ізолюючі підставки (огляд);
- 1.14. Енергетику забороняється:
  - працювати несправним інструментом і інвентарем;
  - застосовувати для очищення легкозаймисті і горючі рідини;
  - курити на робочому місці;
  - вживати під час роботи спиртні напої;
  - приступати до роботи в стані алкогольного чи наркотичного сп'ягнення.
- 1.15. Енергетик повинен:
  - виконувати вимоги знаків безпеки;

- не підніматися на риштування і спускатися з них по опорних драбинах і стійкам риштувань;
  - бути уважним, не відволікатися і не відволікати інших
  - не стояти біля закритих дверей – вони можуть раптово відкритися;
  - зберігати гострі предмети у відведених для них місцях, звертатися з ними безпечно;
- 1.16. Пам'ятати про особисту відповідальність за виконання вимог нормативних актів з охорони праці.
- 1.17. У разі направлення працівника на виконання робіт, не пов'язаних з їх основною діяльністю, він повинен пройти цільовий інструктаж.
- 1.18. Контроль всіх видів робіт слід як правило виконувати в присутності особи відповідальної за безпечне виконання робіт.
- 1.19. Енергетик при контролі обладнання, електроустановок повинен знати:
- їх призначення, будову і принцип дії всіх механізмів, інструкції з технічного обслуговування і ремонту;
  - основні причини неполадок і аварій;
  - технологічний процес, правила використання обладнання, документації;
  - методи прийому і виконання робіт;
  - призначення, будову, конструкцію, правила застосування робочих, вимірювальних інструментів, поводження з ними і правила збереження;
  - загальні вимоги «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
  - правила й інструкції з охорони праці, виробничої санітарії, протипожежні заходи і правила внутрішнього розпорядку.
- 1.20. Енергетик винний в порушенні цієї інструкції, несе дисциплінарну, адміністративну, матеріальну, кримінальну відповідальність згідно з чинним законодавством.

## **2. Вимоги безпеки до початку роботи.**

- 2.1. Оглянути робоче місце. Переконаватися, що меблі на робочому місці в справному стані, відсутні сторонні предмети. Розмістити документи таким чином, щоб було зручно працювати і не захащувати робоче місце. Перевірити стан канцелярського обладнання і інструменту.
- 2.2. Перевірити наявність засобів пожежогасіння, наявність та комплектність мед аптечки.
- 2.3. Якщо на робочому столі встановлений ПК, необхідно перевірити:

- справність кабелів електроживлення, блоків, пристроїв;- відсутність зламів і ушкоджень ізоляції живильних проводів; - відсутність відкритих струмоведучих частин.
- 2.4. При перевірці технічного стану електрообладнання одягти черговий комплект спецодягу та інших засобів індивідуального захисту, необхідних при виконанні даної роботи.
- 2.5. Оглянути робоче місце і підходи до нього на відповідність вимогам безпеки.
- 2.6. Проглянути записи в журналі про несправності, порушення охорони праці.
- 2.7. При огляді обладнання в приміщенні підвищеної небезпеки необхідно користуватися переносною лампою напругою 42 В або 12 В.
- 2.8. При користуванні переносною електричною лампою перевірити наявність на лампі захисної сітки, справність шнура й ізоляційної гумової трубки.
- 2.9. Енергетик не повинен приступати до контролю якщо на агрегаті відсутнє огороження механізмів і голих струмоведучих частин електроустановки.
- 2.10. Перевірити наявність заземлення електроустановок при напрузі 500 В і вище (змінного і постійного струму – у всіх випадках) корпусів електрообладнання, встановлених у приміщеннях з підвищеною небезпекою, в особливо небезпечних і в зовнішніх установках з номінальною напругою вище 42 В змінного струму і 110 В постійного струму, а також встановленого у вибухонебезпечних приміщеннях.
- 2.11. Якщо поруч виконується електрозварювальні роботи одіти спеціальні захисні окуляри.
- 2.12. Перевірити стан вимірювального інструменту, які будуть використовуватися.
- 2.13. Перед виїздом на дільниці для контролю вивчити особливості маршруту, небезпечні ділянки, визначити міста відпочинку та зупинок на маршруті.

### **3. Вимоги безпеки під час виконання роботи.**

#### **3.1. Енергетик зобов'язаний:**

- 3.1.1. При роботі на робочих столах стежити, щоб на них не було гострих предметів (лез, кнопок, залишків скла і т.і.).
- 3.1.2. При переході від столу до столу стежити, щоб не зачепити ногами телефонні дроти, що звисають і подовжувачі.
- 3.2. Енергетику забороняється:
  - 3.2.1. Знімати плакати, заборонні та попереджувальні знаки та написи, та огороження без дозволу керівника робіт.
  - 3.2.2. Захаращувати робочі місця, проходи, проїзди.
  - 3.2.3. Брати без дозволу і використовувати з робочих місць інструмент, та матеріали.
  - 3.2.4. Користуватися несправними інструментами і пристосуванням.
  - 3.2.5. Палити і користуватись відкритим вогнем в невстановлених для цього місцях.
  - 3.2.6. Забороняється класти інструмент на поручні огорожень або на необгороджений край площадки риштувань, помосту, а також поблизу відкритих люків, колодязів тощо.
- 3.3. Інструмент на робочому місці необхідно розміщувати так, щоб запобігти його скочуванню або падінню.
- 3.4. Під час перенесення або перевезення інструмента з гострими частинами, ці частини повинні бути зачищені.
- 3.5. При спуску і підйомі по драбині триматися за поручні обома руками, переставляючи по черзі кожну руку. Забороняється одночасно відривати від поручнів обидві руки.
- 3.6. Забороняється для підставок використовувати випадкові предмети (ящики, бочки тощо). Необхідно користуватись підставками типової конструкції.
  - 3.5. Забороняється заходити в зони робіт машин та механізмів, заходити на робочі місця та за огорожі небезпечних зон, де проводяться вогневі або вантажо – розвантажувальні роботи.
  - 3.6. Не користуватись нагрівальними приладами з відкритою нагрівальною спіраллю, не заводського виготовлення, а також електроприладами, які не мають інструкції по їх безпечній експлуатації.
  - 3.7. Забороняється знаходитися напроти працюючого з електроінструментом, з кувалдою, потрібно стояти збоку від нього.
  - 3.8. Забороняється заходити в зони робіт машин та механізмів, заходити на робочі місця та за огорожі небезпечних зон, де проводяться вогневі або вантажно – розвантажувальні роботи.
  - 3.9. Не дозволяється переносити вантажі в несправній тарі.

3.10. Не користуватись нагрівальними приладами з відкритою нагрівальною спіраллю, не заводського виготовлення, а також електроприладами, які не мають інструкції по їх безпечній експлуатації.

3.11. Включення побутових приладів проводити тільки за допомогою штепсельних з'єднань.

3.12. Не лишати без нагляду включене у мережу електрообладнання.

3.13. При експлуатації електроустаткування забороняється користуватися пошкодженими розетками, вимикачами.

3.14. При експлуатації опалювальних пристроїв забороняється:

3.14.1. Захаращувати прилади опалення будь – якими предметами чи матеріалами, сушити будь – що на опалювальних приладах.

3.14.2. Не ремонтувати самому електроприлади.

3.14.3. . Торкатися до струмоведучих частин електроустаткування, клемам, дротам і відчиняти дверцята електрошаф.

3.15. Забороняється торкатися обірваного дроту, не підходити ближче 8 – 10 м. до електричного дроту, який лежить на землі.

3.16. Не допускається зберігання на робочому місці легкозаймистих речовин.

3.17. Не палити в зоні знаходження легкозаймистих та вибухонебезпечних матеріалів.

3.18. Не розводити самому і не дозволяти розводити вогнищ працівникам на території університету.

3.19. Забороняється відпочивати (спати) в кабіні автомобіля при працюючому двигуні.

3.20. Особливо бути уважним при переході проїжджої частини, на трамвайних, тролейбусних та автобусних зупинках.

#### **4. Вимоги безпеки після роботи.**

4.1. Зняти спецодяг та засоби індивідуального захисту, які використовувались під час роботи, або перевірки виконання робіт підвищеної небезпеки, покласти їх у призначене місце.

4.2. Вимкнути всі електроспоживачі. Відключити прилади, інструмент, почистити їх і прибрати у відведене місце для зберігання.

4.3. Упорядкувати своє робоче місце, відходи паперу викинути в сміттєвий кошик. Відключити штепсельні вилки від розеток електроживлення.

4.4. Вимкнути всі прилади освітлення.

- 4.5. Перевірити стан пожежної безпеки на робочому місці, в приміщенні.
- 4.6. Вимити руки, обличчя теплою водою з милом, при можливості прийняти душ.
- 4.7. Доповісти головному інженеру про всі недоліки які мали місце під час виконання своїх посадових обов'язків.

### **5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.**

- 5.1 . У випадку появи стороннього шуму, звуку, запаху (горіння ізоляції), виявлення напруги (відчуття струму) на металевих частинах обладнання, замикання в ПЕОМ, необхідно відключити його від електромережі, шляхом вимикання загального рубильника або пакетного вимикача на електрощиті приміщення і негайно сповістити керівника .
- 5.2. При заміченні несправностей електрообладнання або аварій електричних мереж від короткого замикання, що може призвести до виникнення пожежі необхідно:
  - негайно припинити роботу;
  - ужити заходів по попередженню подальшого розвитку аварії (відключити електроенергію шляхом вимикання загального рубильника або пакетного вимикача на електрощиті приміщення);
  - про випадок аварії повідомити своєму безпосередньому керівнику.
- 5.3. При виявленні загорання необхідно негайно забезпечити евакуацію людей, приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння, викликати за тел. 101 пожежну команду.
- 5.4. При гасінні пожежі необхідно пам'ятати, що електроустановки потрібно гасити тільки вуглекислотним вогнегасником, сухим піском, щоб уникнути враження електричним струмом.
- 5.5. Якщо є потерпілі, надати їм першу медичну допомогу; при необхідності викликати швидку медичну допомогу.
- 5.6. Виконувати всі вказівки головного інженера по усуненню небезпечної ситуації.